



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ»

**Μαθηματική και Υπολογιστική Μοντελοποίηση Συνθέτων
Υλικών και Ανάπτυξη Τεχνικών Μη Καταστροφικού Ελέγχου**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Πλέουρας Δημήτριος

ΙΩΑΝΝΙΝΑ, ΕΤΟΣ 2020

Εσώφυλλο:

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στην εξειδίκευση:

(Μαθηματική και Υπολογιστική Μοντελοποίηση Συνθέτων Υλικών)

που απονέμει το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Εγκρίθηκε την 14/03/2018 από την εξεταστική επιτροπή:

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΒΑΘΜΙΑΔΑ

1. Λεωνίδας Γεργίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής του ΤΜΕΥ του Παν/μίου Ιωαννίνων, Επιβλέπων
2. Αλκιβιάδης Παϊπέτης, Καθηγητής του ΤΜΕΥ του Παν/μίου Ιωαννίνων,
3. Νεκταρία Μαριάνθη Μπάρκουλα, Καθηγήτρια του ΤΜΕΥ του Παν/μίου Ιωαννίνων

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

"Δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε κάτω από τους διεθνείς ηθικούς και ακαδημαϊκούς κανόνες δεοντολογίας και προστασίας της πνευματικής ιδιοκτησίας. Σύμφωνα με τους κανόνες αυτούς, δεν έχω προβεί σε ιδιοποίηση ξένου επιστημονικού έργου και έχω πλήρως αναφέρει τις πηγές που χρησιμοποίησα στην εργασία αυτή."

(Υπογραφή υποψηφίου)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	11
1.2 ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	13
1.3 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΒΛΑΒΗΣ	15
1.3.1 Μέθοδος ελαστικών κυμάτων Lamb	15
1.3.2 Μέθοδος ακουστικής εκπομπής	16
1.3.3 Μέθοδος δονήσεων	18
1.3.4 Μέθοδος παραμορφώσεων	19
1.3.5 Μέθοδος παρακολούθησης κενού - CVM	20
1.3.6 Μέθοδος ηλεκτρομηχανικής εμπέδησης	21
1.3.7 Μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης	22
ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΒΛΑΒΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΜΠΕΔΗΣΗΣ/ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ	24
2.1 ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΜΠΕΔΗΣΗΣ	24
2.1.1 Διαδικασία συλλογής δεδομένων	25
2.1.2 Διαδικασία ανακατασκευής εικόνας	28
2.2 ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ	30
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΒΛΑΒΗΣ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ CFRP ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ	33
3.1 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	33
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ CFRP.....	34
3.3 ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	36
3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	38
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΡΟΥΣΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΒΛΑΒΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ	46
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ CFRP.....	46
4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΡΟΥΣΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	49
4.2.1 Μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς των στρώσεων	49
4.2.2 Μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς των διεπιφανειών	50
4.2.3 Συνοριακές και Αρχικές Συνθήκες	54
4.2.4 Διακριτοποίηση	55
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΡΟΥΣΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	57
4.4 ΕΞΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ	59
4.4.1 Καταγραφή πλέγματος στη μορφή NASTRAN	59
4.4.2 Δεδομένα πλέγματος του εξεταζόμενου δοκιμίου	62
4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ.....	63

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1	65
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	70

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Ελαστικό κύμα διαδιδόμενο α) σε πλάκα αλουμινίου (αριστερά) και β) σε σύνθετο υλικό 5 μονοδιεύθυντων στρώσεων με ενίσχυση υαλονημάτων [12].

Εικόνα 2. Σύστημα ανίχνευσης της κατευθύνσεως των κυμάτων με χρήση κατευθυντικών αισθητήρων με πιεζοηλεκτρικές ίνες [12].

Εικόνα 3. Τυπικό σύστημα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας με την μέθοδο των δονήσεων [15].

Εικόνα 4. Μορφές των κυμάτων σε περιπτώσεις δοκιμών carbon fiber reinforced plastics (CFRPs), μετρημένες με μετρητές δόνησης λείζερ [12].

Εικόνα 5. Περιπτώσεις αισθητήρα CVM σε άθικτο και ραγισμένο δοκίμιο [1], [16].

Εικόνα 6. Γεωμετρίες των δοκιμών με τη διαμόρφωση των δεκαέξι επιφανειακών ηλεκτροδίων.

Εικόνα 7. Γεωμετρίες των δοκιμών με τη διαμόρφωση των οκτώ επιφανειακών ηλεκτροδίων.

Εικόνα 8. Γεωμετρίες των δοκιμών με τη διαμόρφωση των δεκαέξι περιμετρικών ηλεκτροδίων.

Εικόνα 9. Διακριτοποιημένο δοκίμιο.

Εικόνα 10. Ενδεικτικό αποτέλεσμα της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού (mV) στο δοκίμιο σε μία από τις επαναλήψεις της μεθόδου των γειτόνων.

Εικόνα 11. Συγκριτική απεικόνιση της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού (mV) στα ανισότροπα δοκίμια με τη διαμόρφωση των δεκαέξι επιφανειακών ηλεκτροδίων ανά περίπτωση βλάβης.

Εικόνα 12. Συγκριτική απεικόνιση της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού στα ισότροπα δοκίμια με την διαμόρφωση των δεκαέξι επιφανειακών ηλεκτροδίων ανά περίπτωση βλάβης.

Εικόνα 13. Συγκριτική απεικόνιση της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού σε ισότροπο δοκίμιο με την διαμόρφωση των οκτώ επιφανειακών ηλεκτροδίων.

Εικόνα 14. Συγκριτική απεικόνιση της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού στα ανισότροπα δοκίμια με την διαμόρφωση των δεκαέξι περιφερειακών ηλεκτροδίων ανά περίπτωση βλάβης.

Εικόνα 15. Συγκριτική απεικόνιση της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού με ενσωματωμένο σφάλμα στα ανισότροπα δοκίμια με τη διαμόρφωση των δεκαέξι περιφερειακών ηλεκτροδίων ανά περίπτωση βλάβης.

Εικόνα 16. Τομή της γεωμετρίας του δοκιμίου που χρησιμοποιείται για την κρούση χαμηλής ταχύτητας.

Εικόνα 17. Γεωμετρία του δοκιμίου που χρησιμοποιείται για την κρούση χαμηλής ταχύτητας.

Εικόνα 18. Ενδεικτική εικόνα του λειτουργικού του μηχανήματος INSTRON για τον υπολογισμό των παραμέτρων κρούσης

Εικόνα 19. Διακριτοποιημένο δοκίμιο

Εικόνα 20. Γεωμετρία δοκιμίου μετά την κρούση

Εικόνα 21. Γεωμετρίες διεπιφανειών μετά την κρούση

Εικόνα 22. Μεμονωμένες γεωμετρίες διεπιφανειών μετά την κρούση

Εικόνα 23. Παράδειγμα καταγραφής πλέγματος κατά NASTRAN [39]

Εικόνα 24. Μορφή καταγραφής κόμβου κατά NASTRAN [40]

Εικόνα 25. Μορφή καταγραφής εξάεδρου στοιχείου κατά NASTRAN [40]

Εικόνα 26. Ενδεικτικό αποτέλεσμα της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού στο δοκίμιο σε μία από τις επαναλήψεις της μεθόδου των γειτόνων.

Εικόνα 27 Απεικόνιση της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού σε ανισότροπο δοκίμιο με την διαμόρφωση των δεκαέξι επιφανειακών ηλεκτροδίων που υπέστη κρούση.

Εικόνα 27. Απεικόνιση της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού σε δοκίμιο CFRP με την διαμόρφωση των δεκαέξι επιφανειακών ηλεκτροδίων που υπέστη κρούση σε εργαστήριο [19].

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Κατηγορίες συνθέτων υλικών.

Σχήμα 2. Αστοχίες κατά τον εφελκυσμό α) παραλλήλως και β) εγκάρσιως των ινών, και αστοχίες κατά τη συμπίεση γ) παραλλήλως και δ) εγκάρσιως των ινών [7].

Σχήμα 3. Αστοχίες κατά τη διάτμηση α) παραλλήλως και β) εγκάρσιως των ινών [7].

Σχήμα 4. Τυπικό σύστημα παρακολούθησης των παραμορφώσεων με FBG αισθητήρες [14].

Σχήμα 5. Σύστημα ηλεκτρομηχανικής σύζευξης του PZT αισθητήρα και του δοκιμίου [14]

Σχήμα 6. Διάγραμμα συστήματος τομογραφίας ηλεκτρικής εμπέδησης [16].

Σχήμα 7. Πρότυπο μετρήσεων με τη μέθοδο των γειτόνων στην α) πρώτη (αριστερά) και β) δεύτερη (δεξιά) επανάληψη των μετρήσεων [16].

Σχήμα 8. Πρότυπο μετρήσεων με τη μέθοδο των αντιθέτων στην α) πρώτη (αριστερά) και β) δεύτερη (δεξιά) επανάληψη των μετρήσεων [16].

Σχήμα 9. Πρότυπο μετρήσεων με τη μέθοδο του σταυρού στην α) πρώτη (αριστερά) και β) δεύτερη (δεξιά) επανάληψη των μετρήσεων [16].

Σχήμα 10. Πρότυπο ανακατασκευής εικόνας με τη μέθοδο της οπίσθιας προβολής [16].

Σχήμα 11. Πρότυπο μετρήσεων με τη μέθοδο χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού

Σχήμα 12. Πρότυπο ανακατασκευής εικόνας με τη μέθοδο χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού [18].

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1. Τιμή του ηλεκτρικού δυναμικού ενός σημείου συναρτήσει του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων.

Διάγραμμα 2. Σχηματική απεικόνιση της τάσης συναρτήσει της παραμόρφωσης βάσει του αλγορίθμου αποσκλήρυνσης

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Σύνοψη συστημάτων παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας για σύνθετα υλικά [15].

Πίνακας 2. Πειραματικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης συνθέτων από ανθρακονήματα μονοδιεύθυντου προσανατολισμού και εποξικής ρητίνης.

Πίνακας 3. Αναφορά των περιπτώσεων βλάβης και διαμόρφωσης των ηλεκτροδίων που εξετάστηκαν.

Πίνακας 4. Δεδομένα ιδιοτήτων των στρώσεων του συνθέτου

Πίνακας 5. Δεδομένα ιδιοτήτων των διεπιφανειών/μήτρας του συνθέτου

Πίνακας 6. Ενδεικτικός πίνακας καταγραφής των δεδομένων διαφοράς δυναμικού βάσει της μεθόδου των γειτόνων.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία με τίτλο «Μαθηματική και Υπολογιστική Μοντελοποίηση Συνθέτων Υλικών και Ανάπτυξη Τεχνικών Μη Καταστροφικού Ελέγχου» εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των προϋποθέσεων, για τη λήψη του μεταπτυχιακού τίτλου του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο Προηγμένα υλικά του τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Λ. Γεργίδη, για τη βοήθεια, την υπομονή και την καθοδήγησή του, καθώς και τον καθηγητή κ. Α. Παϊπέτη, οι οποίοι συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, συμβάλλοντας στην εξέλιξη μου ως μηχανικός.

Κυρίως όμως, ευχαριστώ τους γονείς μου για την αμέριστη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, που ήταν καταλυτική για την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη διατριβή αυτή εφαρμόζεται μία σύγχρονη υπολογιστική μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου σε δοκίμια συνθέτου υλικού σε διάφορες περιπτώσεις βλάβης. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως ‘μέθοδος χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού’ ή ως ‘τομογραφία ηλεκτρικού δυναμικού’, και βασίζεται στην ανάλυση της απόκρισης του δοκιμίου σε ηλεκτρικά ερεθίσματα. Η μέθοδος στηρίζεται στη λογική πως η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού σε ένα υλικό αλλάζει σε περίπτωση οποιασδήποτε βλάβης, η οποία αποτελεί ουσιαστικά μία ασυνέχεια στην αγωγιμότητα του υλικού. Για την εφαρμογή της απαιτείται η τοποθέτηση ακροδεκτών περιμετρικά του δοκιμίου, ώστε να επιτραπεί η διαδικασία του ηλεκτρικού ερεθισμού και της συλλογής των δεδομένων ηλεκτρικής απόκρισης του δοκιμίου, τα οποία εν τέλει χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού του δοκιμίου.

Στην πρώτη ενότητα, γίνεται μία εισαγωγική περιγραφή των μεθόδων παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας συνθέτων υλικών, οι οποίες ανήκουν στην κατηγορία των μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου. Η μέθοδος της τομογραφίας ηλεκτρικής εμπέδησης και του ηλεκτρικού δυναμικού περιγράφεται αναλυτικά στη δεύτερη ενότητα, καθώς αποτελεί την εφαρμοζόμενη μέθοδο της διατριβής αυτής.

Η τρίτη ενότητα αφορά τη χαρτογράφηση του ηλεκτρικού δυναμικού σε δοκίμια πολύστρωτων συνθέτων από ανθρακονήματα και εποξική ρητίνη με διασταυρούμενες στρώσεις, εκ των οποίων κάθε ένα σχεδιάστηκε με οπές σε διαφορετικά σημεία για την αξιολόγηση της ικανότητας ανίχνευσης βλάβης της μεθόδου. Τα δοκίμια αναλύθηκαν με τρεις διαφορετικές διατάξεις των ακροδεκτών, ώστε να προσδιοριστεί η βέλτιστη. Η διαδικασία ανάλυσης του ηλεκτρικού δυναμικού στους ακροδέκτες γίνεται υπολογιστικά, και ως εκ τούτου διατυπώνεται μαθηματικά το ηλεκτροστατικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, καθώς επίσης περιγράφεται η υπολογιστική του εφαρμογή. Για την αποτελεσματικότερη εφαρμογή της μεθόδου χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού, που χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα του ηλεκτροστατικού μοντέλου, αναπτύχθηκε κώδικας που ανακατασκευάζει αυτόματα την κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού και παρατίθεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1. Τα αποτελέσματα φανερώνουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου στις περιπτώσεις βλάβης με οπές, και αποδεικνύεται η υπεροχή της διάταξης των δεκαέξι επιφανειακών ακροδεκτών έναντι των υπολοίπων δύο.

Η τέταρτη ενότητα αποτελεί μία επέκταση της τρίτης ενότητας, όπου η μέθοδος χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού εφαρμόζεται πλέον στο δοκίμιο χωρίς οπές της τρίτης ενότητας, το οποίο όμως υπέστη κρούση χαμηλής ταχύτητας και φέρει οπή και αποκολλήσεις μεταξύ των στρώσεών του. Η κρούση χαμηλής ταχύτητας γίνεται υπολογιστικά, ενώ το μαθηματικό μοντέλο που εφαρμόζεται διατυπώνεται αναλυτικά, και περιγράφεται η υπολογιστική του εφαρμογή. Το διακριτοποιημένο δοκίμιο μετά την κρούση εξάγεται σε μορφή NASTRAN, μέσω κώδικα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διατριβής. Στη συνέχεια, επαναλαμβάνεται η διαδικασία της προηγούμενης ενότητας, που περιλαμβάνει την ηλεκτροστατική προσομοίωση και την ανακατασκευή του ηλεκτρικού δυναμικού στο δοκίμιο, όπου παρατηρείται η δυνατότητα ανίχνευσης της βλάβης από τη μέθοδο χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού.

ABSTRACT

In this work, a novel method of structural health monitoring is numerically tested in damaged carbon fiber reinforced composites. This method is known as ‘electrical potential mapping’ or ‘electrical potential tomography’, and it is based on the electrical response of the examined specimen in case of an electrical stimulus. The principle behind this method lies on the fact that the electrical potential distribution of a specimen, that is connected to a power source, alters in case of the presence of damage, which is essentially a discontinuity of the specimen’s electrical conductivity tensor. The application of this method requires the placement of electrodes around the area of examination to allow for the electrical charging of the specimen and the collection of the electrical data that are necessary for the electrical potential mapping.

The first chapter presents an introduction to the structural health monitoring systems of composite materials that belong to the non-destructive evaluation methods, while the second chapter presents an extensive report of the electrical potential/impedance tomography, which is examined in this work.

In the third chapter, the electrical potential mapping is applied to multilayered carbon fiber reinforced polymer specimens, which are designed with flaws (holes) in different areas to test the method’s ability of damage detection and localization. These specimens were tested using three different electrode configurations, in order to determine the optimal among them. The electrical potential data of the electrodes are numerically evaluated using the finite element method on the electrostatic model that defines this problem. Accordingly, the mathematical definition of this model is presented along with a report of its numerical implementation. Moreover, the procedure of electrical potential mapping has been automated since the development of the presented code in appendix 1 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1). The results of this work validate the efficacy of the electrical potential mapping method, and demonstrate the superiority of the sixteen surface-electrode configuration.

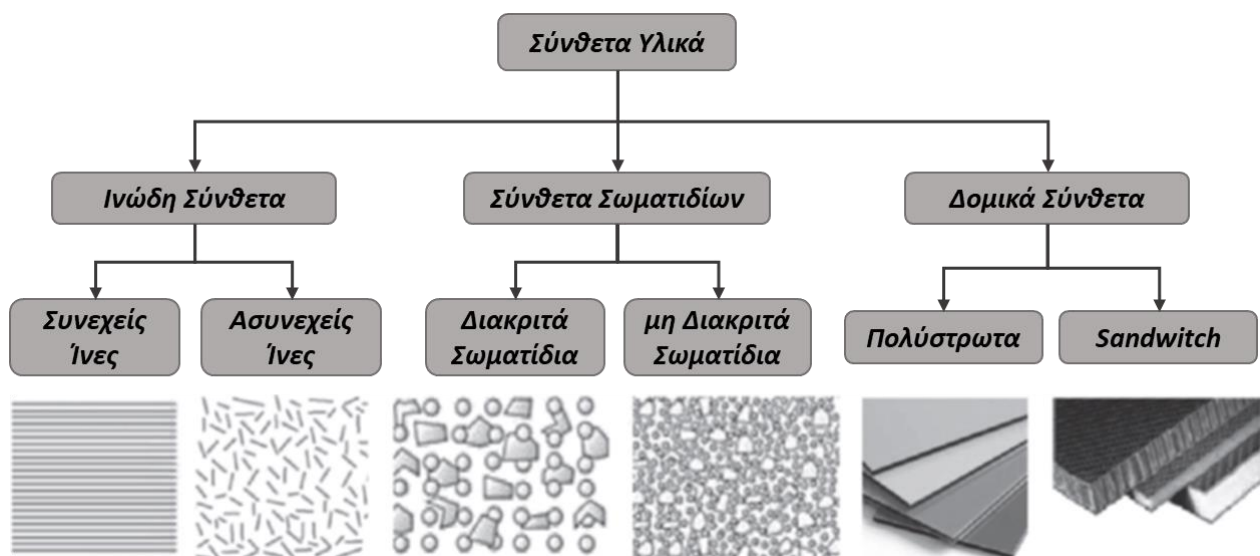
The fourth chapter is an extension of the third one and includes the application of the electrical potential mapping method upon the impacted flawless specimen of the third chapter, which presents delaminations among its laminas and an impact hole. The low velocity impact test is also numerically performed, and the model’s mathematical description is presented along with a report of its numerical implementation. The resulted meshed specimen is extracted in Nastran format, using the code that was developed in the context of this dissertation in appendix **Error! Reference source not found.** Following, the procedure of the third chapter is repeated to extract the necessary electrical data for the reconstruction of the electrical potential distribution, demonstrating the ability of damage detection of the electrical potential mapping method.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Οι ανάγκες της σύγχρονης κοινωνίας στον τομέα των κατασκευών ωθούν την ανάπτυξη νέων υλικών με διαφορετικές μηχανικές και χημικές ιδιότητες από τα συμβατικά. Ιστορικά, η εξέλιξη στον τομέα των κατασκευών συνάδει με την ανακάλυψη νέων υλικών. Πλέον όμως, η ανάγκη για νέα υλικά ενισχύεται λόγω της ύπαρξης του περιβαλλοντικού προβλήματος, που υποχρεώνει την αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική και τη ναυπηγική να κατασκευάζουν μεταφορικά μέσα με καλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα και με μικρότερες εκπομπές CO₂. Ως εκ τούτου, την τελευταία δεκαετία παρατηρείται η συνεχώς αυξανόμενη χρήση συνθέτων υλικών από τη βιομηχανία, καθώς παρουσιάζουν καλύτερες ιδιότητες από τα συμβατικά υλικά. Αναφορικά, τα σύνθετα υλικά και ιδίως τα ινώδη, αντικαθιστούν τα μέταλλα ως δομικά υλικά, λόγω των καλύτερων χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν συγκριτικά με τα μέταλλα, όπως για παράδειγμα το μικρό βάρος, την αντίσταση σε διάβρωση, τη σχεδιαστική ευελιξία, την υψηλή αντοχή και την αντοχή σε κόπωση [1].

Τα σύνθετα αποτελούνται από δύο ή περισσότερα υλικά, τα οποία παρουσιάζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες μακροσκοπικά από τα επιμέρους υλικά που τα απαρτίζουν. Ως επί των πλείστον, ένα σύνθετο υλικό απαρτίζεται από ένα υλικό ενίσχυσης (ίνες, σωματίδια, υλικά πλήρωσης) που βρίσκεται μέσα σε μία μήτρα ενός άλλου υλικού (πολυμερές, μέταλλο, κεραμικό). Ο συνδετικός ιστός ενός συνθέτου υλικού είναι η μήτρα, καθώς συγκρατεί το υλικό ενίσχυσης (ίνες, σωματίδια, υλικά πλήρωσης) στις θέσεις που έχουν σχεδιαστεί. Κατά κανόνα, το σύνθετο υλικό σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να παρουσιάζει αυξημένη αντοχή που του προσδίδει το υλικό ενίσχυσης, αλλά και αυξημένη πλαστικότητα/δυσθραυστότητα λόγω της μήτρας, που είναι συνήθως ένα πιο εύκαμπτο υλικό από με το υλικό ενίσχυσης [2].



Σχήμα 1. Κατηγορίες συνθέτων υλικών.

Ως σύνθετα νοούνται τα ινώδη σύνθετα, τα σύνθετα υλικά σωματιδίων και τα δομικά σύνθετα υλικά (Σχήμα 1). Συγκεκριμένα, όπως ορίζει και η ονομασία τους, τα ινώδη σύνθετα περιέχουν υλικά ενίσχυσης στη μορφή ινών, ενώ τα σύνθετα σωματιδίων περιέχουν υλικά ενίσχυσης στη μορφή των σωματιδίων. Ως δομικά σύνθετα υλικά ονομάζονται τα πολύστρωτα σύνθετα και τα σύνθετα sandwich. Όσον αφορά τα δομικά σύνθετα υλικά, τα πρώτα αποτελούνται από στρώσεις ενός ή περισσότερων υλικών που συγκολλούνται μεταξύ τους και απαρτίζονται είτε από συμβατικά υλικά, είτε από άλλα σύνθετα υλικά, που συνήθως έγκεινται στην κατηγορία των ινωδών. Τα δεύτερα περιλαμβάνουν ένα ή περισσότερα υλικά σε κυψελώδη μορφή και δύο ή περισσότερα σε μορφή ελάσματος και μπορεί να αποτελούνται είτε από συμβατικά, είτε από σύνθετα υλικά [3].

Στην περίπτωση των συνθέτων υλικών σωματιδίων, ο ρόλος των σωματιδίων αφορά τον περιορισμό της κινήσεως της μήτρας, ενώ στην περίπτωση μιας ενδεχόμενης κρυσταλλικής μήτρας, τα μικροσκοπικά σωματίδια εμποδίζουν την κίνηση των γραμμοαταξιών των κρυστάλλων της. Ως αποτέλεσμα, ο παρεμποδισμός αυτός επιτυγχάνει την αύξηση της αντοχής και της δυσθραυστότητας του συνθέτου υλικού. Επιπλέον, μία άλλη ωφέλεια από τη χρήση σωματιδίων είναι η αντίσταση στη φθορά λόγω τριβής, που συμβαίνει στην περίπτωση σκληρών σωματιδίων μέσα σε μία μαλακή μήτρα [4]. Σε αντίθεση, η μήτρα των ινωδών συνθέτων υλικών, πέραν της συγκράτησης του συνθέτου υλικού επιτελεί ακόμα έναν κύριο ρόλο άμεσα συσχετιζόμενο με τις ιδιότητες του συνθέτου υλικού. Συγκεκριμένα, το φορτίο που ασκείται σε ένα σύνθετο με ίνες, μεταφέρεται από τη μήτρα στις ίνες, μέσω των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια μήτρας-ινών. Η δυνατότητα της μήτρας να αντέχει και να μεταφέρει το φορτίο στις ίνες οφείλεται στην μεγάλη έκταση της διεπιφάνειας μήτρας-ινών, που οδηγεί στην ανάπτυξη μικρότερων τάσεων στη διεπιφάνεια. Συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί η συσχέτιση του μέτρου των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στις διεπιφάνειες μήτρας-ινών και του μεγέθους της συνολικής διεπιφάνειας. Για αυτόν τον λόγο, η ανάλυση της αντοχής ενός συνθέτου υλικού εξετάζει πέραν των άλλων, δύο παραμέτρους που σχετίζονται με το μέγεθος της διεπιφάνειας μήτρας-ινών, οι οποίες είναι η αναλογία των διαστάσεων μίας ίνας (μήκους προς πλάτος) και το κατ' όγκον ποσοστό των ινών στο σύνθετο υλικό [1].

Όσον αφορά στα υλικά της μήτρας ενός συνθέτου, αυτά κατηγοριοποιούνται σε πολυμερή, μέταλλα και κεραμικά. Τα πολυμερή υλικά χρησιμοποιούνται ως επί των πλείστων στα ινώδη σύνθετα, και παρουσιάζουν ιξωδοελαστική συμπεριφορά, μειωμένη δυσκαμψία και είναι είτε θερμοπλαστικά, είτε θερμοσκληρυνόμενα. Τα θερμοσκληρυνόμενα είναι ψαθυρά υλικά, αλλά είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα σε βιομηχανικές κατασκευές, καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση. Όσον αφορά τα μέταλλα ως μήτρες συνθέτων υλικών, αυτά που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως κράματα αλουμινίου, τιτανίου και σιδήρου [4]. Τα πρώτα σύνθετα με μεταλλική μήτρα έφεραν ίνες σιδήρου και ίνες βορίου [5]. Τέλος, οι κεραμικές μήτρες που έχουν αυξημένη αντοχή αλλά και ψαθυρότητα, παρουσιάζουν κατασκευαστική δυσκολία, λόγω της συχνής εμφάνισης ατελειών που οδηγούν σε μειωμένη αντοχή. Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα κεραμικά που υιοθετούνται ως κεραμικές μήτρες είναι το καρβίδιο του πυριτίου, η αλουμίνα, το νιτρίδιο του πυριτίου, ο μουλίτης και διάφορα τσιμέντα [4].

1.2 ΒΛΑΒΕΣ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα στις κατασκευές εν' συγκρίσει με τα μέταλλα, όμως εμποδίζεται η ευρεία χρήση τους, καθώς υπολείπεται ως έναν βαθμό, η γνώση του μηχανισμού αστοχίας τους, καθώς επίσης δεν έχουν τελειοποιηθεί οι τεχνικές ανίχνευσης βλάβης σε αυτά [6]. Τα σύνθετα υλικά αποτυγχάνουν με πολλούς και διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με τη φόρτισή τους, περιπλέκοντας αρκετά την ανάλυση του μηχανισμού αστοχίας τους [7]. Η διατριβή αυτή περιλαμβάνει την ανάλυση βλάβης σε ινώδη σύνθετα υλικά και ως εκ τούτου, η περιγραφή των βλαβών και αστοχιών εστιάζεται στα ινώδη σύνθετα.

Ορισμένες σημαντικές βλάβες ενός ινώδους συνθέτου υλικού προκαλούνται από ατέλειες που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία παραγωγής του και πρόκειται για πόρους ή ξένα σωματίδια μέσα στο σύνθετο υλικό. Ο σχηματισμός των πόρων ευνοείται από την εσφαλμένη διαδικασία σκλήρυνσης, ενώ η παρουσία ξένων σωμάτων οφείλεται συνήθως είτε στη σκόνη του μηχανήματος παραγωγής, είτε από σημάδια λιπαρών δακτύλων από τον χρήστη του μηχανήματος. Ο πόρος μέσα σε ένα έλασμα ινώδους υλικού, είναι ουσιαστικά μία περιοχή ασυνέχειας, όπου οι κύριες και διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του υλικού δεν μπορούν να μεταφερθούν και έτσι δημιουργείται μία συγκέντρωση τάσεων γύρω από αυτό. Αντίστοιχα, τα ξένα σώματα μέσα σε ένα σύνθετο, είτε αδυνατούν να αντέξουν τις αναπτυσσόμενες τάσεις, είτε διαβρώνουν το υλικό με αποτέλεσμα την αστοχία του συνολικού συνθέτου .

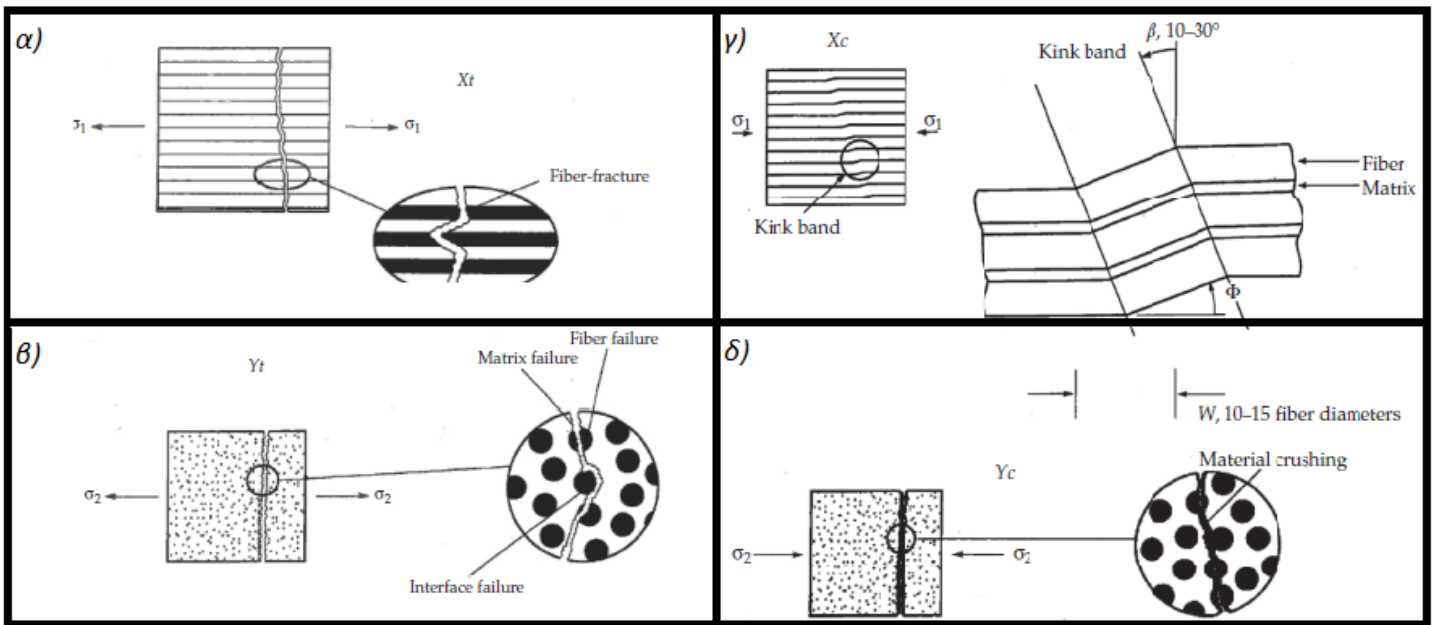
Οι βλάβες που προκύπτουν σε ένα ινώδες σύνθετο υλικό εν' λειτουργία, οφείλονται συνήθως σε κάποια ενδεχόμενη κρούση. Το κυριότερο αποτέλεσμα της κρούσης σε ένα σύνθετο, είναι η αποκόλληση των επιμέρους στρώσεων που προκαλεί σημαντική έκπτωση στις μηχανικές του ιδιότητες. Συνήθως μία τέτοιου είδους βλάβη δεν είναι ορατή και πολλές φορές οδηγεί στην καταστροφική αστοχία του υλικού [8]. Πέραν της αποκολλήσεως των στρώσεων, δημιουργούνται επίσης ρωγμές στη μήτρα, στη διεπιφάνεια μήτρας-ινών και στις ίνες [9].

Επιπλέον, η κόπωση και οι βλάβες από ρεύμα υψηλής έντασης (π.χ. αστραπές) περιλαμβάνονται στις κυριότερες βλάβες των ινωδών συνθέτων υλικών, εφόσον μειώνουν σημαντικά τη δομική τους ακεραιότητα.

Ο εφελκυσμός, η συμπίεση και η διάτμηση είναι οι τρεις βασικοί τρόποι φόρτισης στους οποίους αποτυγχάνουν τα υλικά, μεταξύ των οποίων και τα σύνθετα. Συγκεκριμένα τα πολυστρωματικά σύνθετα αποτελούνται από στρώσεις διαφορετικού προσανατολισμού των ινών, και ως εκ τούτου η προβολή των τάσεων στις κύριες διευθύνσεις κάθε στρώσης είναι διαφορετικές για κάθε στρώση. Έχει αποδειχθεί πως η διάταξη των στρώσεων ενός πολυστρωματικού ινώδους συνθέτου με βάση τον προσανατολισμό των ινών έχει άμεση σχέση με τη συγκέντρωση τάσεων, την κόπωση και τις μηχανικές ιδιότητες του συνθέτου [10]. Κατά την αύξηση του φορτίου ενός πολυστρωματικού υλικού, οι κύριες τάσεις σε κάθε στρώση αυξάνουν και ενδέχεται ορισμένες να φτάνουν τα όρια αντοχής μίας ή περισσότερων στρώσεων, οι οποίες αποτυγχάνουν χωρίς όμως να οδηγούν στην αποτυχία του συνολικού συνθέτου. Το φαινόμενο αυτό αποδεικνύει τη μη άμεση, αλλά προοδευτική αποτυχία ενός πολυστρωματικού συνθέτου υλικού, που αρχικά ενδέχεται να μην είναι ορατή, όμως εν τέλει οδηγεί στην ολική του αποτυχία [7].

Αστοχίες Εφελκυσμού

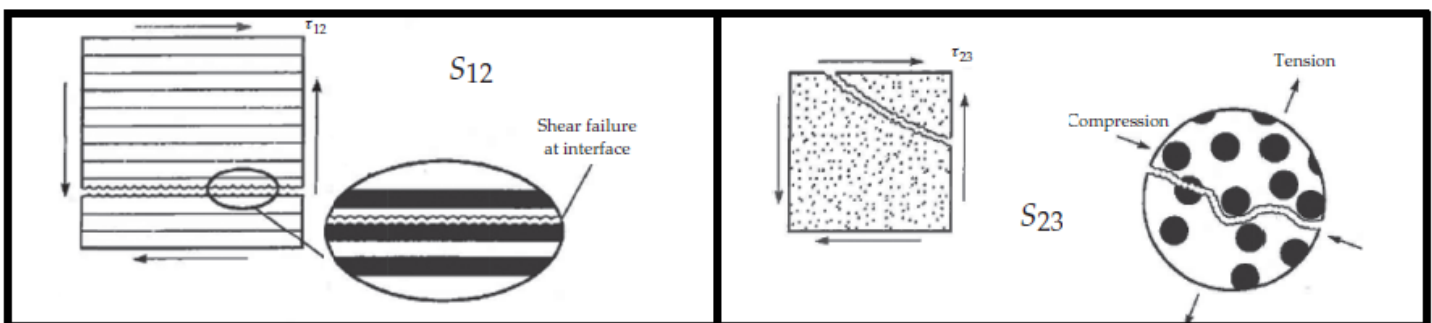
Αστοχίες Συμπίεσης



Σχήμα 2. Αστοχίες κατά τον εφελκυσμό α) παράλληλα και β) εγκάρσιως των ινών, και αστοχίες κατά τη συμπίεση γ) παράλληλα και δ) εγκάρσιως των ινών [7].

Παρόλα αυτά, η βλάβη και η αστοχία ενός συνθέτου υλικού μπορεί να προβλεφθεί, καθώς βασίζεται στην αστοχία των επιμέρους υλικών του και των διεπιφανειών τους, δηλαδή τις ίνες, τη μήτρα και τις διεπιφάνειες μήτρας-ινών. Ένα ινώδες πολυστρωματικό σύνθετο απαρτίζεται από πολλές στρώσεις ινωδών συνθέτων υλικών, οι οποίες συγκρατούνται από το υλικό της μήτρας. Κάθε στρώση αντιμετωπίζεται ως ένα ορθότροπο υλικό, που μπορεί να παρουσιάσει 6 διαφορετικούς τρόπους αστοχίας και 6 διαφορετικά όρια αντοχής. Η κάθε στρώση μπορεί να αποτύχει σε εφελκυσμό στη διεύθυνση παράλληλα ή εγκάρσιως των ινών, όπου τα όρια αντοχής συμβολίζονται με X_t και Y_t αντίστοιχα (Σχήμα 2). Αντίστοιχα, μπορεί να αποτύχει σε συμπίεση στη διεύθυνση παράλληλα ή εγκάρσιως των ινών, όπου τα αντίστοιχα όρια αντοχής συμβολίζονται με X_c και Y_c αντίστοιχα (Σχήμα 2). Σε διάτμηση αποτυγχάνει και πάλι, είτε παράλληλα, είτε εγκάρσιως των ινών, όπου τα αντίστοιχα όρια αντοχής συμβολίζονται με S_{12} και S_{23} αντίστοιχα (Σχήμα 3). Η κάθε στρώση είναι εγκάρσιως ισότροπη και ως εκ τούτου, οι ορθές και διατμητικές τάσεις που σχετίζονται με τη διεύθυνση z (κάθετη στο επίπεδο της στρώσης) είναι ίσες, δηλαδή $Z_t = Y_t$, $Z_c = Y_c$, $S_{13} = S_{12}$ [7].

Αστοχίες Διάτμησης



Σχήμα 3. Αστοχίες κατά τη διάτμηση α) παράλληλα και β) εγκάρσιως των ινών [7].

1.3 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΒΛΑΒΗΣ

Η προοδευτική αποτυχία ενός συνθέτου υλικού είναι συνήθως αποτέλεσμα μίας μη ορατής βλάβης, που είτε πρόκειται για αποκόλληση στρώσεων, είτε για δημιουργία ρωγμής θα καταλήξει τελικά στην ολική καταστροφή του συνθέτου. Η αυξανόμενη χρήση των συνθέτων υλικών στις κατασκευές, και ιδιαίτερα των πολύστρωτων συνθέτων υλικών, οδήγησε στην ανάπτυξη μη καταστροφικών τεχνικών ανίχνευσης βλάβης. Αρχικά, οι μέθοδοι αυτές αφορούσαν χειροκίνητο έλεγχο σε απλές κατασκευές συνθέτων υλικών, ενώ πλέον έχουν αναπτυχθεί συστήματα συνεχούς παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας (Structural Health Monitoring – SHM) πολύπλοκων κατασκευών από σύνθετα υλικά [11].

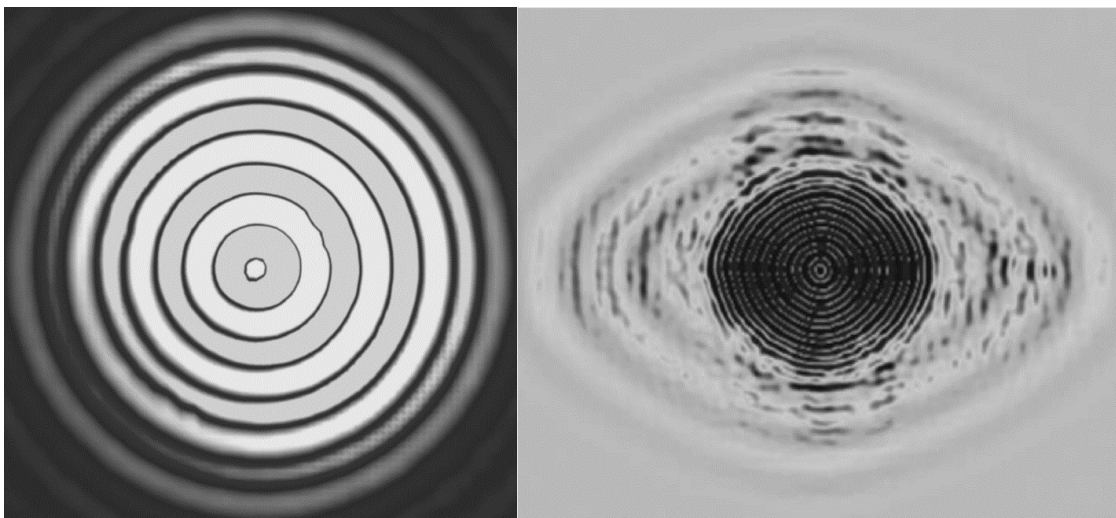
Τα SHM διακρίνονται σε ενεργητικά και παθητικά συστήματα. Τα δύο αυτά συστήματα περιλαμβάνουν αισθητήρια όργανα για την ανίχνευση βλαβών, και συγκεκριμένα τα ενεργητικά συστήματα χρησιμοποιούν γεννήτριες διαγνωστικών σημάτων και αισθητήρες, ενώ τα παθητικά συστήματα περιλαμβάνουν αισθητήρες που λαμβάνουν τα δημιουργούμενα σήματα από την ανάπτυξη ρωγμών ή αποκολλήσεων των στρώσεων του συνθέτου [12].

1.3.1 Μέθοδος ελαστικών κυμάτων Lamb

Η μέθοδος αυτή είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη, καθώς χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευαισθησία σε μικρές βλάβες, μεγάλο εύρος εφαρμογής και μικρή εξασθένηση σήματος. Συγκεκριμένα, η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ανάλυση των ελαστικών κυμάτων που διαδίδονται μέσα στα υλικά, που στην περίπτωση ατέλειας ή βλάβης ανακλώνται δημιουργώντας νέα σήματα, ικανά για την ανίχνευση της βλάβης. Γενικά, στα απεριόριστα τρισδιάστατα ομογενή υλικά παρατηρούνται δύο είδη κυμάτων - διαμήκη και εγκάρσια κύματα – τα οποία χαρακτηρίζονται με βάση την κατεύθυνση των κυμάτων και την κατεύθυνση της δόνησης. Στην περίπτωση των διαμηκών κυμάτων, η κατεύθυνση των κυμάτων συμπίπτει με αυτήν της δόνησεως, ενώ στην περίπτωση των εγκάρσιων κυμάτων, η κατεύθυνση των κυμάτων είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της δόνησεως. Στα πεπερασμένα στις διαστάσεις όμως σώματα, πέρα από αυτά τα είδη κυμάτων, παρατηρούνται ακόμη δύο είδη ελαστικών κυμάτων που είναι τα κύματα Rayleigh και Love. Τα εγκάρσια κύματα στα επίπεδα σώματα διαχωρίζονται σε διατμητικά οριζόντια και διατμητικά κάθετα κύματα. Τα δεύτερα ανακλώνται στο εσωτερικό των υλικών και παράγουν ένα άλλο είδος κυμάτων, που ονομάζονται κύματα Lamb. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτών των κυμάτων είναι η ιδιότητά τους να ακολουθούν την καμπύλη των σωμάτων στα οποία διαδίδονται, και για αυτό ονομάζονται επίσης καθοδηγούμενα κύματα [11].

Τα κύματα αυτά αποτελούν το κυριότερο μέσο για την ανίχνευση βλάβης, και παράγονται κυρίως από πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι ικανοί για την παραγωγή κυμάτων πέραν από την ανίχνευσή τους. Μία άλλη πηγή παραγωγής και ανίχνευσης κυμάτων είναι οι πομποί λέιζερ. Τυπικά παραδείγματα προκαλούμενων κυμάτων από πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες απεικονίζονται στην Εικόνα 1, όπου φαίνονται οι διαφορές στα προκαλούμενα κύματα μεταξύ ενός ομογενούς και ενός συνθέτου υλικού. Εν αντιθέσει

με το ομογενές υλικό, το σύνθετο υλικό παρουσιάζει δύο είδη κυμάτων, ένα με κυκλικό και ένα με ελλειψοειδές μέτωπο κύματος, το οποίο οφείλεται στην ανισοτροπία του υλικού [11].



Εικόνα 1. Ελαστικό κύμα διαδιδόμενο α) σε πλάκα αλουμινίου (αριστερά) και β) σε σύνθετο υλικό 5 μονοδιεύθυντων στρώσεων με ενίσχυση υαλονημάτων [11].

Η ανίχνευση βλάβης στα σύνθετα υλικά κατασκευών απαιτεί τη χρήση πολλών αισθητήρων, το οποίο αποτελεί ένα μεγάλο θέμα της μεθόδου αυτής, καθώς εγείρεται το ζήτημα της σωστής διάταξής τους, που σχετίζεται άμεσα με την ικανότητα ανίχνευσης βλάβης. Συγκεκριμένα υπάρχουν δύο τρόποι στοίχισης των αισθητήρων, είτε περιμετρικά του υλικού, είτε ομογενώς διασκορπισμένοι στο υλικό. Επίσης, διαχωρίζονται δύο μέθοδοι παραγωγής και ανίχνευσης κυμάτων, οι οποίες αναφέρονται ως μέθοδος εκπομπής-λήψης (pitch catch) και μέθοδος εκπομπής-αντήχησης (pulse echo). Στην πρώτη περίπτωση, ένας ή περισσότεροι αισθητήρες παράγουν ένα κύμα, το οποίο το λαμβάνουν ένας ή περισσότεροι διαφορετικοί αισθητήρες, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, οι αισθητήρες που παράγουν το κύμα λειτουργούν και ως δέκτες των ανακλώμενων κυμάτων. Στην μέθοδο εκπομπής-αντήχησης, ανήκει επίσης η μέθοδος συγχρονισμένης συστοιχίας (phased array method), όπου εκπέμπονται κύματα με συγκεκριμένη καθυστέρηση μεταξύ των πηγών, ώστε να δημιουργηθεί ένα γραμμικό μέτωπο κύματος [11].

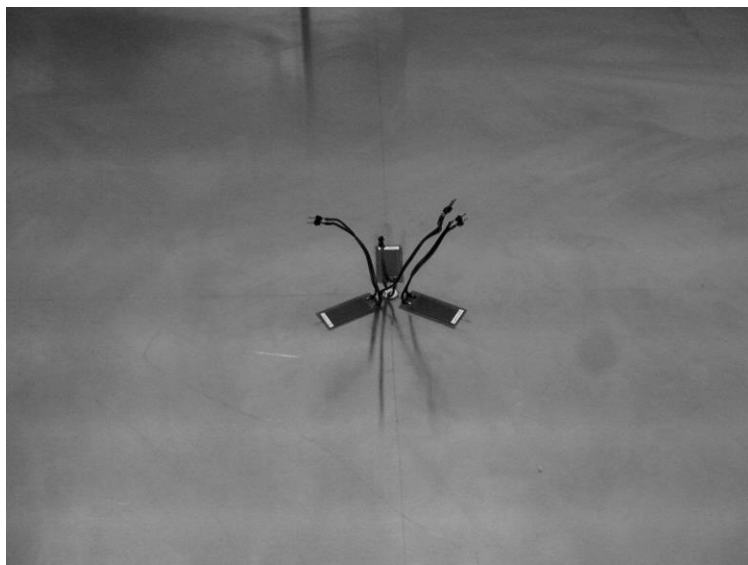
1.3.2 Μέθοδος ακουστικής εκπομπής

Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής είναι μία παθητική μέθοδος που χρησιμοποιεί τα ελαστικά κύματα που διαδίδονται μέσα στα υλικά, όπως η μέθοδος των ελαστικών κυμάτων. Η διαφορά της έγκειται στην πηγή παραγωγής των ελαστικών κυμάτων, που εν αντιθέσει με τη μέθοδο των ελαστικών κυμάτων, τα κύματα προέρχονται από απότομη αλλαγή των εσωτερικών τάσεων του υλικού, είτε από την ανάπτυξη ρωγμής, είτε από την αποκόλληση των στρώσεων. Επίσης, μία ακόμη πηγή ελαστικών κυμάτων είναι οι κρούσεις που είναι είτε υψηλής ταχύτητας, είτε χαμηλής, οι οποίες παρόλο που συνήθως αδυνατούν να καταστρέψουν τις ίνες ενός

συνθέτου υλικού, προκαλούν αποκολλήσεις μεταξύ των στρώσεων του. Παρά την ονομασία της μεθόδου αυτής ως μέθοδο ακουστικής εκπομπής, η συχνότητα των κυμάτων παρουσιάζει ένα μεγάλο φάσμα (μέχρι και megahertz) [13].

Πέραν της ανίχνευσης μίας ενδεχόμενης βλάβης, τα συστήματα παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των υλικών απαιτούν και τον εντοπισμό της. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται η χρήση ενός δικτύου αισθητήρων, αντίστοιχα με τη μέθοδο των ελαστικών κυμάτων. Οι πιεζοηλεκτρικοί δίσκοι ως αισθητήρια όργανα έχουν αποδειχθεί ικανοί για την ανίχνευση βλάβης, όμως υστερούν στον εντοπισμό της προέλευσης του σήματος. Ως εκ τούτου, ο εντοπισμός της βλάβης γίνεται χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο αισθητήρων με την προϋπόθεση ότι το μέτρο της ταχύτητας του κύματος είναι γνωστό. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μία αντίστοιχη τεχνική με αυτήν της συγχρονισμένης συστοιχίας της μεθόδου των ελαστικών κυμάτων. Συγκεκριμένα, για τον εντοπισμό της βλάβης χρησιμοποιούνται τα δεδομένα της χρονικής καθυστέρησης του σήματος σε κάθε αισθητήρα ώστε να προσδιοριστεί η απόσταση της πηγής από κάθε αισθητήρα. Ύστερα, με χρήση τριγωνομετρίας εντοπίζεται η βλάβη, αντίστοιχα με τη διαδικασία εντοπισμού με GPS [13].

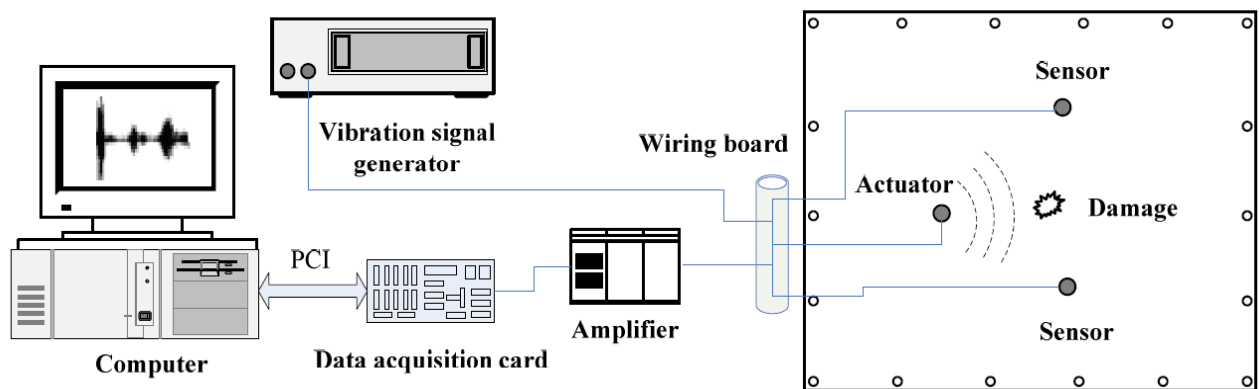
Το πρόβλημα της ανάγκης για γνώση του μέτρου της ταχύτητας του κύματος ξεπεράστηκε με τη χρήση των κατευθυντικών αισθητήρων με πιεζοηλεκτρικές ίνες που μπορούν να ανιχνεύουν τη συνιστώσα των κυμάτων που είναι παράλληλη με τη φορά τους. Έτσι, η απαίτηση της γνώσης της ταχύτητας των κυμάτων για την εξακρίβωση της θέσης της βλάβης έπαψε να ισχύει, καθώς η χρήση τριών κατευθυντήριων αισθητήρων διατεταγμένων σε γωνία 120° μοιρών τους καθιστά ικανούς να ανιχνεύσουν την κατεύθυνση της προέλευσης του σήματος (Εικόνα 2) [11].



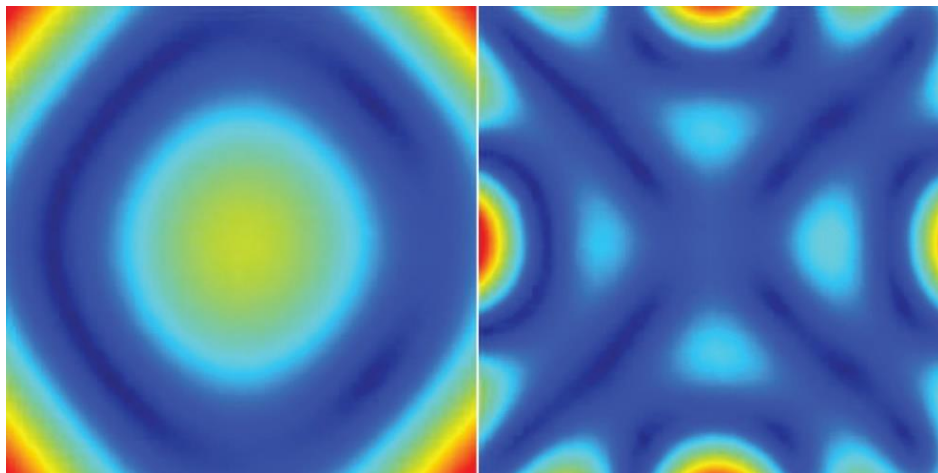
Εικόνα 2. Σύστημα ανίχνευσης της κατευθύνσεως των κυμάτων με χρήση κατευθυντικών αισθητήρων με πιεζοηλεκτρικές ίνες [11].

1.3.3 Μέθοδος δονήσεων

Η μέθοδος αυτή ανήκει στις κλασικές μεθόδους ανίχνευσης βλάβης σε σύνθετα υλικά και βασίζεται στην ανάλυση των δυναμικών δομικών χαρακτηριστικών του συνθέτου υλικού που εξαρτώνται από τις φυσικές του ιδιότητες, όπως η μάζα του, η δυσκαμψία του και ο συντελεστής απόσβεσης του. Συγκεκριμένα, η ύπαρξη αλλά και το είδος μίας ενδεχόμενης βλάβης επηρεάζει τις φυσικές και τις δυναμικές δομικές ιδιότητες του συνθέτου υλικού με αποτέλεσμα να δημιουργεί μία ανιχνεύσιμη διαφορά στην απόκριση της δόνησής του. Τέτοιου είδους δυναμικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν τη συχνότητα, το φάσμα ισχύος, το σχήμα του πλάτους δονήσεως, τη συνάρτηση απόκρισης συχνότητας, τον ρυθμό μεταφοράς ενέργειας μεταξύ άλλων. Η πρόκληση της δονήσεως γίνεται συνήθως μέσω πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων, ενώ η ανίχνευση των χαρακτηριστικών της δονήσεως επιτυγχάνεται είτε με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και επιταχυνσιόμετρα, είτε με λέιζερ μέτρησης του πλάτους της δονήσεως [11], [14].



Εικόνα 3. Τυπικό σύστημα παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας με τη μέθοδο των δονήσεων [14].

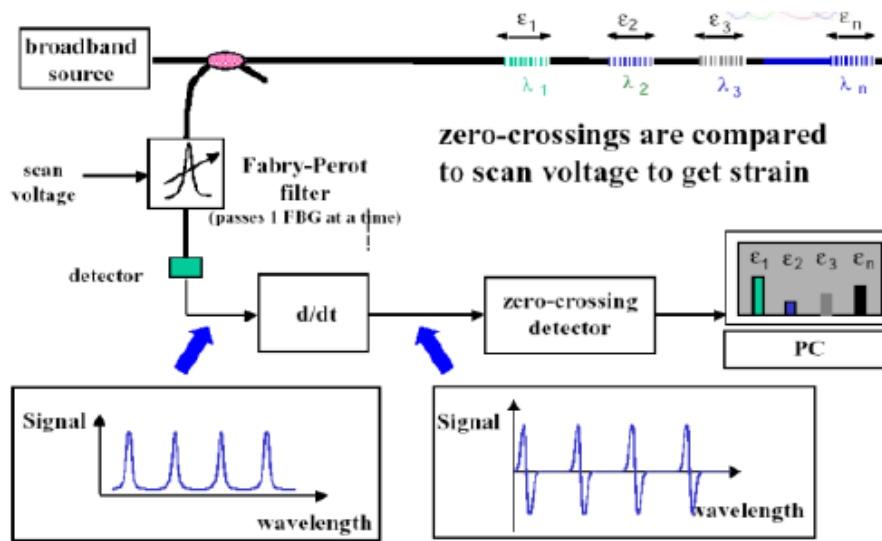


Εικόνα 4. Μορφές των κυμάτων σε περιπτώσεις δοκιμών carbon fiber reinforced plastics (CFRPs), μετρημένες με μετρητές δόνησης λέιζερ [11].

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της μεθόδου αυτής μπορεί να βασίζεται στα χαρακτηριστικά του υπό εξέταση μοντέλου του συνθέτου υλικού ή να είναι ανεξάρτητη από αυτό. Στην ανεξάρτητη από το μοντέλο ανάλυση, η ανίχνευση βλάβης βασίζεται σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που παρουσιάζει η απόκριση των δονήσεων σε βασικές περιπτώσεις βλάβης. Στην αντίθετη περίπτωση, λαμβάνεται υπόψη το σχήμα αλλά και τα δομικά χαρακτηριστικά του υλικού, ώστε το σφάλμα της ανίχνευσης βλάβης να ελαχιστοποιείται. Συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά του μοντέλου μπορούν να αξιοποιηθούν με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος βασίζεται στην επίλυση του ευθέως προβλήματος της απόκρισης δονήσεως του άθικτου μοντέλου σε διάφορες περιπτώσεις βλάβης και στη συνέχεια στη σύγκριση των πραγματικών μετρούμενων δεδομένων με τα προβλεπόμενα για κάθε είδος βλάβης. Ένας άλλος τρόπος είναι η χρήση κριτηρίων βλάβης που λαμβάνουν υπόψιν τα χαρακτηριστικά του μοντέλου. Τα κλασσικά κριτήρια που βασίζονται στη συχνότητα είναι το κριτήριο Cawley-Adams, το κριτήριο διασφάλισης της τοποθεσίας της βλάβης (damage location assurance criterion – DLAC) και το κριτήριο διασφάλισης της τοποθεσίας πολλαπλών βλαβών (multiple damage location assurance criterion – MDLAC). Αντίστοιχα, στα κλασσικά κριτήρια που βασίζονται στη συνάρτηση απόκρισης συχνότητας ανήκουν το κριτήριο διασφάλισης της απόκρισης συχνότητας (frequency response assurance criterion – FRAC), το κριτήριο διασφάλισης του πεδίου συχνότητας (frequency domain assurance criterion – FDAC), και δύο ακόμα συναρτήσεις συσχέτισης (global shape correlation (GSC) function, global amplitude correlation (GAC) function), καθώς επίσης υπάρχουν πολλά ακόμη διάφορα κριτήρια. Ο τελευταίος τρόπος περιλαμβάνει τη σύγκριση των μετρούμενων δεδομένων του υπό εξέταση μοντέλου με τα αντίστοιχα αποτελέσματα ενός όμοιου άθικτου μοντέλου.

1.3.4 Μέθοδος παραμορφώσεων

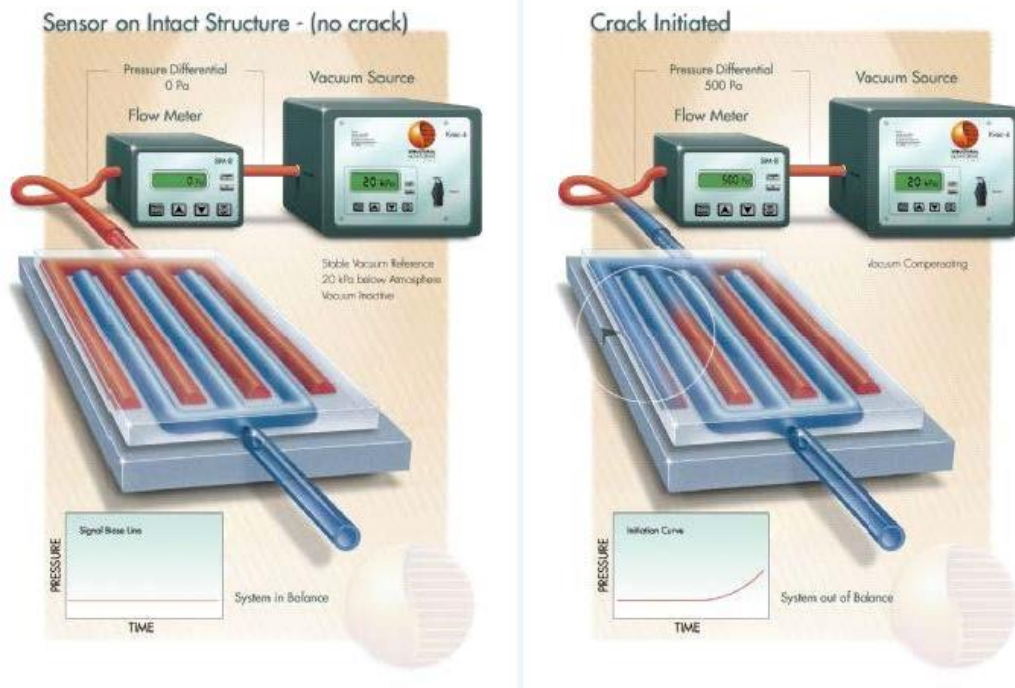
Όπως ορίζει και το όνομα της μεθόδου, η μέθοδος αυτή βασίζεται στις παραμορφώσεις του υλικού και ως εκ τούτου θεωρείται ως μία παθητική μέθοδος. Η μέθοδος αυτή εκμεταλλεύεται την κατανομή των παραμορφώσεων του συνθέτου υλικού που προκαλεί η παρουσία μίας βλάβης, που τις ανιχνεύει είτε με ένα πλήθος μετρητών αντίστασης-παραμόρφωσης, είτε με ένα σύστημα/πλέγμα ινών Bragg (Fiber Bragg Grating - FBG) (Σχήμα 4). Στην πρώτη περίπτωση, οι μετρητές παραμόρφωσης κατασκευάζονται από συγκεκριμένα υλικά τα οποία αλλάζουν την ηλεκτρική τους αντίσταση κατά την παραμόρφωσή τους, ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι ίνες Bragg αλλάζουν το φάσμα φωτός μίας διερχόμενης δέσμης κατά την παραμόρφωσή τους. Με τον ένα ή τον άλλον τρόπο επιτυγχάνεται η μέτρηση της κατανομής των παραμορφώσεων στο υλικό, ώστε να εκτιμηθεί μία ενδεχόμενη περίπτωση βλάβης.



Σχήμα 4. Τυπικό σύστημα παρακολούθησης των παραμορφώσεων με FBG αισθητήρες [14].

1.3.5 Μέθοδος παρακολούθησης κενού - CVM

Η μέθοδος αυτή (Comparative Vacuum Monitoring – CVM) είναι μία ολοκληρωμένη τεχνική ανίχνευσης βλάβης που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Structural Monitoring Systems Ltd. κατοχυρώνοντας την πατέντα το 1995. Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη χρήση ενός CVM αισθητήρα, ενός διαφορικού μετρητή πίεσης και μίας αντλίας κενού. Ο αισθητήρας CVM είναι ένα υλικό ισχυρά κολλημένο στην επιφάνεια του εξεταζόμενου συνθέτου υλικού, το οποίο ενσωματώνει ένα πλήθος παρατεταγμένων κυλινδρικών αυλών, τα οποία περιέχουν εναλλάξ ατμοσφαιρικό αέρα και κενό, όπως εικονογραφείται στην Εικόνα 5. *Περιπτώσεις αισθητήρα CVM σε άθικτο και ραγισμένο δοκίμιο [1], [15].* Η αντλία κενού δημιουργεί το κενό στους αντίστοιχους αυλούς και ο διαφορικός μετρητής πίεσης καταγράφει συνεχώς τη διαφορά πίεσης μεταξύ των αυλών με κενό και με ατμοσφαιρικό αέρα. Στην περίπτωση ανάπτυξης ρωγμής στην επιφάνεια του συνθέτου υλικού, δημιουργείται μία μικρή δίοδος μεταξύ των αυλών με το κενό και με την ατμοσφαιρική πίεση με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ροή αέρα προς τον αυλό με το κενό και να μειώσει τη διαφορά πίεσης στην ένδειξη του διαφορικού μετρητή. Σε μία τέτοια περίπτωση, γίνεται μετέπειτα έλεγχος στο σύνθετο υλικό για την ανίχνευση και εκτίμηση της βλάβης. Η διακριτική ικανότητα της ανίχνευσης ρωγμής των αισθητήρων CVM είναι ικανοποιητική καθώς η τυπική απόσταση των διαδοχικών αυλών κυμαίνεται στα 250 μm , ενώ υπάρχουν και αισθητήρες με δυνατότητα ανίχνευσης ρωγμών μέχρι και 100 μm [1], [14], [15].

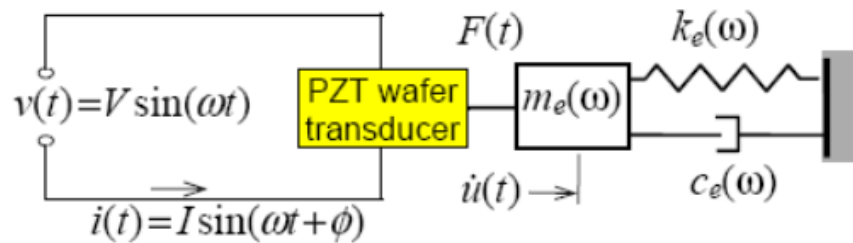


Εικόνα 5. Περιπτώσεις αισθητήρα CVM σε άθικτο και ραγισμένο δοκίμιο [1], [15].

Πέραν των συγκολλούμενων αισθητήρων CVM, πολλοί κατασκευαστές συνθέτων υλικών αλλά και μεταλλικών, σχηματίζουν τους αυλούς που απαιτούνται για την ανίχνευση βλάβης με τη μέθοδο αυτή στην επιφάνεια του ίδιου του υλικού, δημιουργώντας εξ αρχής ένα υλικό με ενσωματωμένους αισθητήρες CVM.

1.3.6 Μέθοδος ηλεκτρομηχανικής εμπέδησης

Η μηχανική εμπέδηση εκφράζει την αντίσταση ενός σώματος στην αλλαγή της κίνησής του, και ορίζεται ως ο λόγος της εφαρμοζόμενης δύναμης που ασκείται σε ένα σημείο του σώματος προς την προκύπτουσα ταχύτητα του σημείου αυτού. Οποιαδήποτε αλλαγή της κατάστασης του σώματος, όπως αποκόλληση ή ανάπτυξη ρωγμής στο σύνθετο υλικό, προκαλεί αλλαγή της μηχανικής του εμπέδησης. Η μέτρηση της μηχανικής του εμπέδησης γίνεται έμμεσα με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων. Συγκεκριμένα, οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι ικανοί να μεταφράσουν την ταχύτητα συγκεκριμένων σημείων του σώματος σε ηλεκτρικά σήματα, ώστε να καταστεί δυνατή η μέτρηση της μηχανικής εμπέδησης του σώματος στα σημεία αυτά. Ουσιαστικά, η διαδικασία αυτή περιγράφει τη σύζευξη της μηχανικής εμπέδησης του συνθέτου σώματος με την ηλεκτρική εμπέδηση του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα και από αυτό προκύπτει το όνομα της μεθόδου ως μέθοδος ηλεκτρομηχανικής εμπέδησης [11], [14].



Σχήμα 5. Σύστημα ηλεκτρομηχανικής σύζευξης του PZT αισθητήρα και του δοκιμίου [14]

Το Σχήμα 5 παρουσιάζει ένα ιδανικό σύστημα σύζευξης της ηλεκτρικής και της μηχανικής εμπέδησης, όπου ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας είναι συνδεδεμένος με ένα ιδανικό ελατήριο το οποίο έχει έναν βαθμό ελευθερίας [14].

1.3.7 Μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης

Η μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης βασίζεται στην ανάλυση των ηλεκτρικών παραμέτρων του συνθέτου υλικού. Οι ηλεκτρικές παράμετροι που εξετάζονται ποικίλουν και μπορεί να είναι η σύνθετη αγωγιμότητα, η αντίσταση, η αγωγιμότητα και η επιδεκτικότητα. Η μέτρηση των ηλεκτρικών παραμέτρων επιτυγχάνεται με τη τοποθέτηση ακροδεκτών ή αισθητήρων περιμετρικά του συνθέτου υλικού προς εξέταση, και αναλόγως το είδος των παραμέτρων που εξετάζονται, χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα όργανα μέτρησης. Τα δεδομένα των ηλεκτρικών μετρήσεων χρησιμοποιούνται από αλγορίθμους ανακατασκευής εικόνας για τη χαρτογράφηση της βλάβης του συνθέτου υλικού. Συγκεκριμένα, η δισδιάστατη αναπαράσταση της μετρούμενης ηλεκτρικής παραμέτρου αναφέρεται και ως χαρτογράφηση, με βάση την οποία γίνεται εκτίμηση του είδους και της τοποθεσίας μίας ενδεχόμενης βλάβης στο σύνθετο υλικό [16]. Περισσότερες πληροφορίες για τη μέθοδο αυτή αναφέρονται στη δεύτερη ενότητα.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των προαναφερθεισών μεθόδων συνοψίζονται στον Πίνακα 1. *Σύνοψη συστημάτων παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας για σύνθετα υλικά [14].*

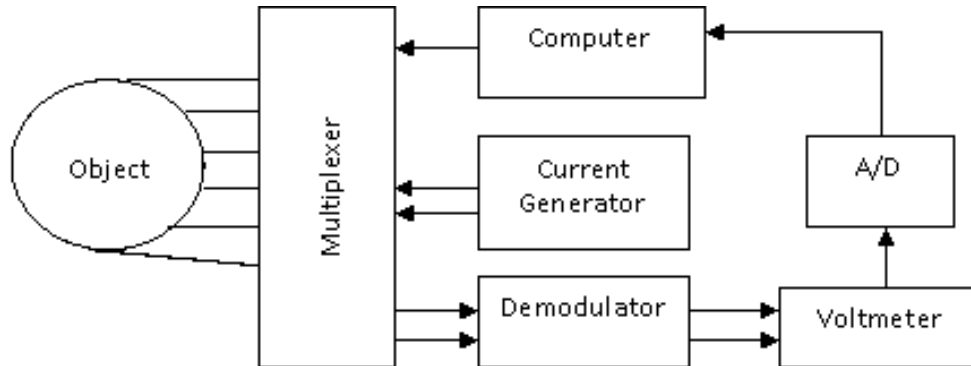
Methods	Used sensors	Monitoring objects					Characteristics
		Strain	Impact	Debonding	Delamination	Crack	
Lamb Wave method	Piezoelectric sensor	D	D	E	E	E	Global monitoring, high sensitivity, on-line & off-line
	FOS	D	D	E	E	E	Global monitoring, requiring PZT actuators, limited by high-frequency modulation
E/M impedance method	Piezoelectric sensor	D	D	E	E	E	Local monitoring, off-line
Active vibration-based method	Piezoelectric sensor & accelerometer	E	D	E	E	E	On-line & off-line, medium and high frequency vibration and acceleration monitoring
	FOS	E	D	E	E	E	On-line & off-line, low frequency (<1kHz) vibration monitoring
Strain-based method	Resistance strain gauge	E	D	E	E	E	On-line, relying on loads
	FOS	E	D	E	E	E	Distribution measurement, on-line, rely on loads
Acoustic emission	Piezoelectric sensor & AE sensor	D	E	D	E	E	On-line
CVM	CVM sensor	D	D	E	E	E	Local monitoring, mature method

Πίνακας 1. Σύνοψη συστημάτων παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας για σύνθετα υλικά [14].

ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΒΛΑΒΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΜΠΕΔΗΣΗΣ/ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

2.1 ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΜΠΕΔΗΣΗΣ

Η τομογραφία ηλεκτρικής εμπέδησης είναι μια μέθοδος που εφαρμόζεται για την ανακατασκευή της εσωτερικής ή επιφανειακής κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, διαπερατότητας ή αντίστασης ενός σώματος. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται μόνο σε αγώγιμα υλικά, και χρησιμοποιεί δεδομένα από την ηλεκτρική αντίδραση του εξεταζόμενου σώματος μετά από μία αλλαγή της ηλεκτρικής του κατάστασης, ώστε να ανακατασκευάσει την κατανομή των ηλεκτρικών παραμέτρων του σώματος. Για τον λόγο αυτό, η μέθοδος αυτή απαιτεί την εφαρμογή ηλεκτροδίων περιμετρικά της επιφάνειας του υπό εξέταση σώματος. Από αυτά, ορισμένα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία ρεύματος στο εξεταζόμενο υλικό, ενώ τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για την καταμέτρηση του επαγόμενου ηλεκτρικού δυναμικού. Όμως, στις περισσότερες περιπτώσεις τα ηλεκτρόδια επιτελούν έναν διττό ρόλο και χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή ρεύματος στα σημεία που εφαρμόζονται, αλλά και για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού δυναμικού στα σημεία αυτά. Το ρεύμα που εφαρμόζεται είθισται να είναι εναλλασσόμενο παρουσιάζοντας ένα πλάτος κύματος αρκετών mA και συχνότητα του εύρους 1-100 kHz [16].



Σχήμα 6. Διάγραμμα συστήματος τομογραφίας ηλεκτρικής εμπέδησης [16].

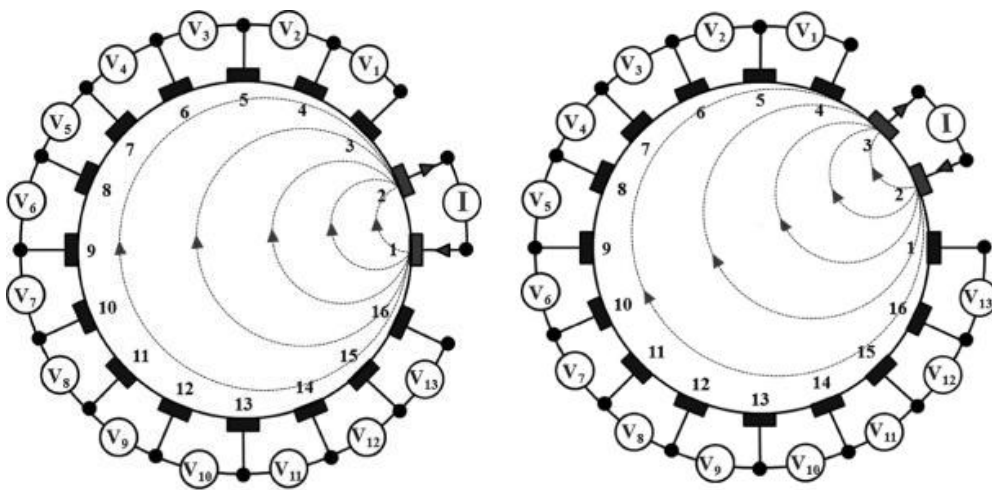
Το Σχήμα 6 παρουσιάζει τα βασικά μέρη ενός συστήματος τομογραφίας ηλεκτρικής εμπέδησης. Αναλυτικά, απαιτούνται μία σειρά ηλεκτροδίων, μία γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, ένα βολτόμετρο, ένα σύστημα/φίλτρο εξάλειψης του θορύβου, ένα σύστημα μετατροπής του αναλογικού σε ψηφιακό σήμα, ένα αλγόριθμο ανακατασκευής εικόνας (ηλεκτρικής εμπέδησης) και έναν υπολογιστή που ελέγχει όλη τη διαδικασία.

2.1.1 Διαδικασία συλλογής δεδομένων

Στη βιβλιογραφία εντοπίζονται διάφορες τεχνικές ανακατασκευής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των εξεταζόμενων υλικών που χρησιμοποιούν διαφορετικά πρότυπα στη διαδικασία τροφοδοσίας ρεύματος και μέτρησης του ηλεκτρικού δυναμικού, όπως η μέθοδος των γειτόνων, η μέθοδος των αντιθέτων, η μέθοδος του σταυρού και η τριγωνομετρική μέθοδος.

2.1.1.1 Μέθοδος των γειτόνων

Η πιο επικρατούσα μέθοδος είναι η μέθοδος των γειτόνων, σύμφωνα με την οποία τροφοδοτείται ρεύμα μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων και υπολογίζονται οι διαφορές δυναμικού των υπόλοιπων ζευγών ηλεκτροδίων που γειτνιάζουν, τα οποία δεν περιλαμβάνουν κάποιο από τα δύο ηλεκτρόδια που τροφοδοτούνται με ρεύμα. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται επαναληπτικά έως ότου εφαρμοστεί ρεύμα σε όλα τα διαδοχικά ζεύγη ηλεκτροδίων.



Σχήμα 7. Πρότυπο μετρήσεων με τη μέθοδο των γειτόνων στην α) πρώτη (αριστερά) και β) δεύτερη (δεξιά) επανάληψη των μετρήσεων [16].

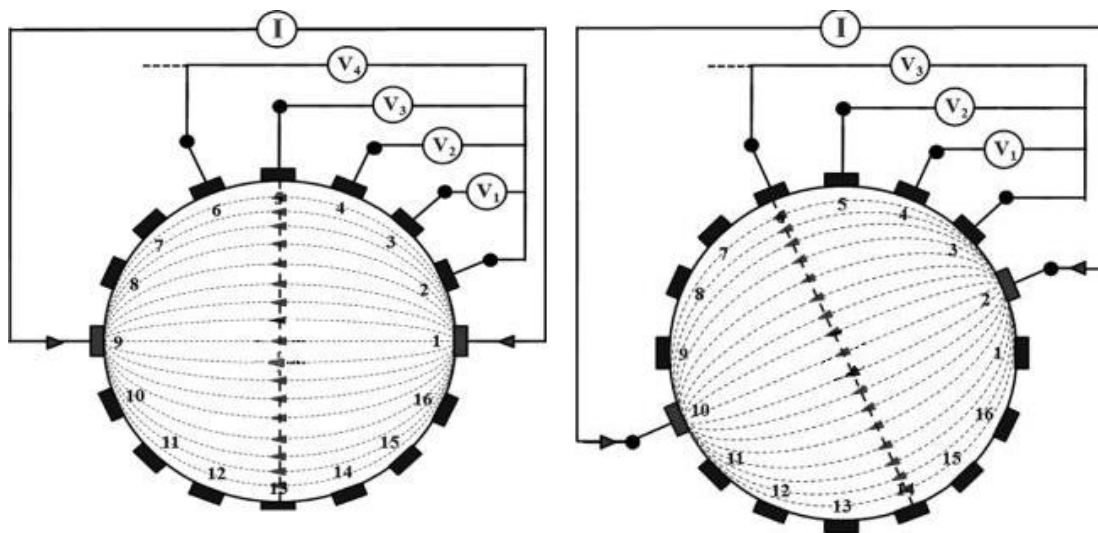
Το Σχήμα 7 αναπαριστά τη διαδικασία της μεθόδου των γειτόνων σε ένα σύστημα 16 ηλεκτροδίων. Σε αυτό το σύστημα, η διαδικασία ξεκινάει με την τροφοδοσία ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων 1 και 2, και τη μέτρηση των διαφορών δυναμικού στα υπόλοιπα 13 ζεύγη ηλεκτροδίων (3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-9, 9-10, 10-11, 11-12, 12-13, 13-14, 14-15, 15-16). Η διαφορά δυναμικού δεν υπολογίζεται στα ζεύγη ηλεκτροδίων που περιέχουν κάποιο από τα ηλεκτρόδια που τροφοδοτείται με ρεύμα, όπου στην περίπτωση αυτή είναι τα 3 ζεύγη 16-1, 1-2, 2-3. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται με τα υπόλοιπα ζεύγη ηλεκτροδίων, όπου το δεύτερο ηλεκτρικό ερέθισμα περιλαμβάνει την τροφοδοσία ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων 2 και 3, και τη μέτρηση των διαφορών δυναμικού στα υπόλοιπα 13 ζεύγη ηλεκτροδίων (4-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-9, 9-10, 10-11, 11-12, 12-13, 13-14, 14-15, 15-16, 16-1). Και πάλι η διαφορά δυναμικού δεν υπολογίζεται στα ζεύγη ηλεκτροδίων που περιέχουν

κάποιο από τα ηλεκτρόδια που τροφοδοτείται με ρεύμα, όπου στην περίπτωση αυτή είναι τα 3 ζεύγη 1-2, 2-3, 3-4. Η συνολική διαδικασία θα καταλήξει στη συγκέντρωση $16 \times 13 = 208$ τιμών διαφορών δυναμικού.

Γενικά η εφαρμογή της μεθόδου των γειτόνων καταλήγει στη συλλογή $N \cdot (N-3)$ μετρήσεων διαφοράς δυναμικού, όπου N είναι ο αριθμός των ηλεκτροδίων. Η τροφοδοσία ρεύματος μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων καταλήγει σε υψηλή πυκνότητα ρεύματος ανάμεσα στα ηλεκτρόδια αυτά και σε αρκετά χαμηλή πυκνότητα ρεύματος μακριά από αυτά. Ως εκ τούτου, η μέθοδος αυτή αποδεικνύεται ιδιαίτερα ευαίσθητη σε διαφορές αγωγιμότητας (άρα και βλάβες) περιμετρικά του εξεταζόμενου υλικού, ενώ παρουσιάζει χαμηλή ευαισθησία στην εσωτερική του περιοχή.

2.1.1.2 Μέθοδος των αντιθέτων

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ως επί των πλείστον στην τομογραφία ηλεκτρικής εμπέδησης εγκεφάλων, και σύμφωνα με αυτήν το ρεύμα τροφοδοτείται μεταξύ δύο αντικριστών ηλεκτροδίων, δικαιολογώντας το όνομα της μεθόδου αυτής ως μέθοδο αντιθέτων ή μέθοδο πόλων. Οι διαφορές δυναμικού υπολογίζονται μεταξύ των υπολοίπων ηλεκτροδίων και του ηλεκτροδίου που γειτνιάζει στο ηλεκτρόδιο στο οποίο εισέρχεται το ρεύμα. Καθώς όμως σε κάθε ηλεκτρόδιο γειτνιάζουν άλλα δύο ηλεκτρόδια, εξακριβώνεται πως το ηλεκτρόδιο αναφοράς για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού είναι το αμέσως επόμενο (με βάση την αντίθετη φορά από αυτήν του ρολογιού) του ηλεκτροδίου στο οποίο εισέρχεται το ρεύμα.



Σχήμα 8. Πρότυπο μετρήσεων με τη μέθοδο των αντιθέτων στην α) πρώτη (αριστερά) και β) δεύτερη (δεξιά) επανάληψη των μετρήσεων [16].

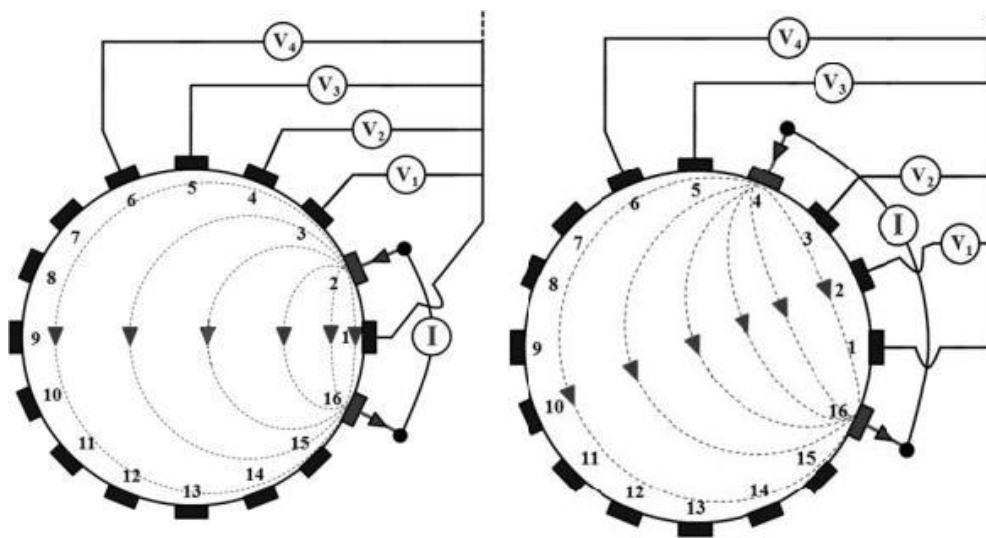
Το Σχήμα 8 αναπαριστά τη διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου των αντιθέτων σε ένα σύστημα 16 ηλεκτροδίων. Σε αυτό το σύστημα, η διαδικασία ξεκινάει με την τροφοδοσία ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων 1 και 9, και τη μέτρηση των διαφορών δυναμικού (13 μετρήσεις) μεταξύ των υπολοίπων ηλεκτροδίων και του

ηλεκτροδίου 2 (3-2, 4-2, 5-2 6-2, 7-2, 8-2, 10-2, 11-2, 12-2, 13-2, 14-2, 15-2, 16-2). Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται με τα υπόλοιπα ζεύγη ηλεκτροδίων, όπου το δεύτερο ηλεκτρικό ερέθισμα περιλαμβάνει την τροφοδοσία ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων 2 και 10, και τη μέτρηση των διαφορών δυναμικού (13 μετρήσεις) μεταξύ των υπολοίπων ηλεκτροδίων και του ηλεκτροδίου 3 (4-3, 5-3 6-3, 7-3, 8-3, 9-3, 11-3, 12-3, 13-3, 14-3, 15-3, 16-3, 1-3). Η συνολική διαδικασία θα καταλήξει στη συγκέντρωση $16 \times 13 = 208$ τιμών διαφορών δυναμικού, όπως και με τη μέθοδο των γειτόνων.

Συγκριτικά με τη μέθοδο των γειτόνων, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ομογένεια στην ευαισθησία ανίχνευσης των διαφορών αγωγιμότητας του εξεταζόμενου υλικού, καθώς η κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος δεν αλλάζει σημαντικά στο εξεταζόμενο σώμα σε σχέση με αυτήν της μεθόδου των γειτόνων.

2.1.1.3 Μέθοδος του σταυρού

Η μέθοδος αυτή είναι η λιγότερη χρησιμοποιούμενη μέθοδος, και σύμφωνα με αυτήν το ηλεκτρόδιο της γείωσης του ρεύματος και το ηλεκτρόδιο αναφοράς για τον υπολογισμό της διαφοράς δυναμικού γειτνιάζουν και παραμένουν σταθερά σε όλη τη διαδικασία. Το κάθε επαναληπτικό βήμα της μεθόδου αυτής περιλαμβάνει τη μετατόπιση της τροφοδοσίας ρεύματος ανά δύο επόμενα ηλεκτρόδια, και τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των υπολοίπων ηλεκτροδίων και του ηλεκτροδίου αναφοράς. Με το τέλος της διαδικασίας αυτής, η διαδικασία επαναλαμβάνεται μετατοπίζοντας στο επόμενο τα ηλεκτρόδια της γείωσης και αναφοράς του ηλεκτρικού δυναμικού.



Σχήμα 9. Πρότυπο μετρήσεων με τη μέθοδο του σταυρού στην α) πρώτη (αριστερά) και β) δεύτερη (δεξιά) επανάληψη των μετρήσεων [16].

Το Σχήμα 9 αναπαριστά τη διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου του σταυρού σε ένα σύστημα 16 ηλεκτροδίων. Σε αυτό το σύστημα, η διαδικασία ξεκινάει με την τροφοδοσία ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων 2 και 16, όπου το ηλεκτρόδιο 16 αποτελεί το ηλεκτρόδιο γείωσης, και τη μέτρηση των διαφορών δυναμικού (13

μετρήσεις) μεταξύ των υπολοίπων ηλεκτροδίων και του ηλεκτροδίου 1, που αποτελεί το ηλεκτρόδιο αναφοράς για τη διαφορά δυναμικού (3-1, 4-1, 5-1 6-1, 7-1, 8-1, 9-1, 10-1, 11-1, 12-1, 13-1, 14-1, 15-1). Το δεύτερο ηλεκτρικό ερέθισμα περιλαμβάνει την τροφοδοσία ρεύματος στο ηλεκτρόδιο 4, ενώ το ηλεκτρόδιο 16 παραμένει το ηλεκτρόδιο γείωσης. Η μέτρηση των διαφορών δυναμικού (13 μετρήσεις) γίνεται αντίστοιχα μεταξύ των υπολοίπων ηλεκτροδίων και του ηλεκτροδίου 1, που παραμένει το ηλεκτρόδιο αναφοράς για τη διαφορά δυναμικού (2-1, 3-1, 5-1 6-1, 7-1, 8-1, 9-1, 10-1, 11-1, 12-1, 13-1, 14-1, 15-1). Το ολοκληρωμένη διαδικασία θα καταλήξει στη συγκέντρωση $7 \times 13 = 91$ μετρήσεων. Η διαδικασία όμως επαναλαμβάνεται μετατοπίζοντας στο επόμενο τα ηλεκτρόδια της γείωσης και αναφοράς του ηλεκτρικού δυναμικού, και έτσι προκύπτουν συνολικά $91 + 91 = 182$ μετρήσεις που είναι λιγότερες από αυτές των προηγούμενων μεθόδων.

Η μέθοδος αυτή παρόλο που είναι η λιγότερη χρησιμοποιούμενη, παρουσιάζει την καλύτερη ευαισθησία στην ανίχνευση των διαφορών αγωγιμότητας στο σύνολο του εξεταζόμενου σώματος, με την εξαίρεση ότι για τα περιφερειακά σημεία η μέθοδος των γειτόνων παρουσιάζει καλύτερη ευαισθησία.

2.1.1.4 Τριγωνομετρική μέθοδος

Οι Gisser et al. πρότειναν ακόμα μία μέθοδο, που είναι γνωστή ως προσαρμοζόμενη ή τριγωνομετρική μέθοδος. Η συγκεκριμένη μέθοδος διαφέρει από τις προηγούμενες καθώς δεν διαχωρίζει τα ηλεκτρόδια σε ηλεκτρόδια τροφοδοσίας ρεύματος και ηλεκτρόδια μέτρησης του ηλεκτρικού δυναμικού. Πιο συγκεκριμένα, όλα τα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και για τις δύο λειτουργίες, ως τροφοδοτές ρεύματος και ως μετρητές ηλεκτρικού δυναμικού. Ως εκ τούτου, απαιτούνται N γεννήτριες ρεύματος για τα N ηλεκτρόδια, που να είναι ικανές να τροφοδοτούν ρεύμα με εύρος έντασης $(-I, I)$, ώστε να επιτρέπουν τη δημιουργία διαφορετικών κατανομών της πυκνότητας του ρεύματος. Για τη μέτρηση του δυναμικού κάθε ηλεκτροδίου επιλέγεται ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς, το οποίο διατηρείται σταθερό μέχρι το τέλος της διαδικασίας. Έτσι, για ένα σύστημα 16 ηλεκτροδίων συλλέγονται 15 μετρήσεις διαφοράς δυναμικού. Η διαδικασία όμως αυτή επαναλαμβάνεται, χρησιμοποιώντας τις ίδιες συντομικές συνθήκες της έντασης του ρεύματος, μετατοπισμένες όμως κατά ένα ηλεκτρόδιο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται $N/2$ φορές, όπου N ο αριθμός των ηλεκτροδίων και έτσι για ένα σύστημα 16 ηλεκτροδίων συλλέγονται $8 \times 15 = 120$ ανεξάρτητες μετρήσεις διαφοράς δυναμικού.

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει το σημαντικό μειονέκτημα της ανάγκης για N γεννήτριες ρεύματος, όπου N ο αριθμός των ηλεκτροδίων, ενώ εισάγει ένα περιθώριο σφάλματος στα δεδομένα καθώς η εμπέδηση των επαφών μεταξύ των ηλεκτροδίων και του εξεταζόμενου σώματος δεν υπολογίζεται στους αλγόριθμους ανακατασκευής εικόνας.

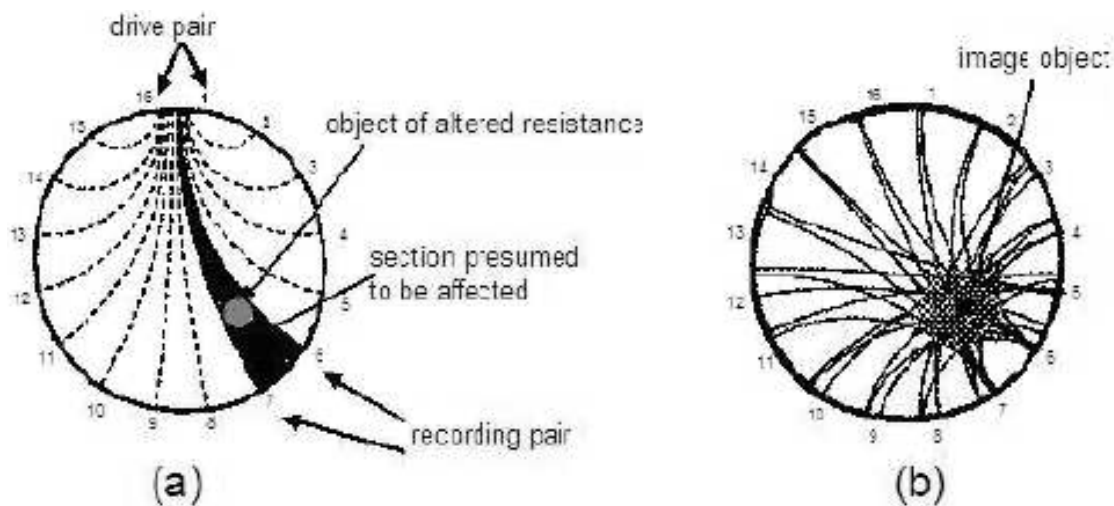
2.1.2 Διαδικασία ανακατασκευής εικόνας

Με τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων διαφοράς δυναμικού στα περιφερειακά ηλεκτρόδια, τίθεται το ζήτημα της ανακατασκευής της κατανομής της άγνωστης αγωγιμότητας ή αντίστασης του εξεταζόμενου

υλικού. Αυτό όμως είναι ένα κακώς τοποθετημένο πρόβλημα, καθώς αναζητείται η κατανομή της άγνωστης αγωγιμότητας ή αντίστασης από το μικρό σύνολο των δεδομένων διαφοράς δυναμικού στα σημεία των περιφερειακών ηλεκτροδίων. Ως εκ τούτου, οι αλγόριθμοι ανακατασκευής εικόνας χρησιμοποιούν τεχνικές τακτοποίησης του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, για να καταστεί δυνατή η επίλυση του κακώς τοποθετημένου προβλήματος, είναι απαραίτητη η εφαρμογή περιορισμών στο πρόβλημα, που να καταλήγουν σε μία δυνατή και αληθοφανή λύση. Αυτού του είδους τακτοποίηση του προβλήματος γίνεται μέσω τριών διαφορετικών μεθόδων, που είναι η μέθοδος οπίσθιας προβολής, η επαναληπτική μέθοδος και η μέθοδος γραμμικοποίησης ενός σταδίου.

2.1.2.1 Μέθοδος οπίσθιας προβολής

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στη θεώρηση πως η μετρούμενη διαφορά του ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ δύο ηλεκτροδίων είναι ανάλογη με την εμπέδηση μεταξύ των ηλεκτροδίων αυτών. Ουσιαστικά, σύμφωνα με αυτήν τη μέθοδο, η διαφορά του δυναμικού μεταξύ δύο ηλεκτροδίων προβάλλεται στην περιοχή που ορίζεται από τις δύο θεωρούμενες ισοδυναμικές γραμμές, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 10, και επαναλαμβάνεται για κάθε μία από τις διαθέσιμες μετρήσεις.



Σχήμα 10. Πρότυπο ανακατασκευής εικόνας με τη μέθοδο της οπίσθιας προβολής [16].

2.1.2.2 Επαναληπτική μέθοδος

Όπως ορίζει και το όνομά της, αυτή η μέθοδος δρα επαναληπτικά για τον προσδιορισμό της κατανομής της αγωγιμότητας ή της αντίστασης στο εξεταζόμενο υλικό. Η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί περισσότερο χρόνο συγκριτικά με τη μέθοδο της οπίσθιας προβολής, όμως μπορεί να υποστηρίξει μία μη γραμμική λύση. Αναλυτικά, η εύρεση της λύσης απαιτεί ως πρώτο βήμα την εκτίμηση της κατανομής της αγωγιμότητας. Το επόμενο βήμα, που είναι ιδιαίτερα χρονοβόρο συγκριτικά με τα υπόλοιπα, είναι η λύση του ευθέως προβλήματος των τιμών της διαφοράς δυναμικού στο άθικτο σώμα για τις δεδομένες τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος που χρησιμοποιήθηκαν. Μετά τη σύγκριση της εκτιμώμενης κατανομής με τη λύση του ευθέως προβλήματος, υπολογίζεται η διαφορά

τους που θεωρείται ως σφάλμα και χρησιμοποιείται για την επανεκτίμηση της κατανομής της αγωγιμότητας. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το σφάλμα γίνει μηδαμινό.

Συγκριτικά με τη μέθοδο γραμμικοποίησης ενός σταδίου, η επαναληπτική μέθοδος μπορεί να είναι χρονοβόρα, όμως παρέχει μία ακριβή αναπαράσταση της κατανομής της αγωγιμότητας. Το μείζον ζήτημα της μεθόδου αυτής αφορά τις ταλαντώσεις στο υπολογιζόμενο σφάλμα, που εμποδίζουν τη σύγκλιση της λύσεως.

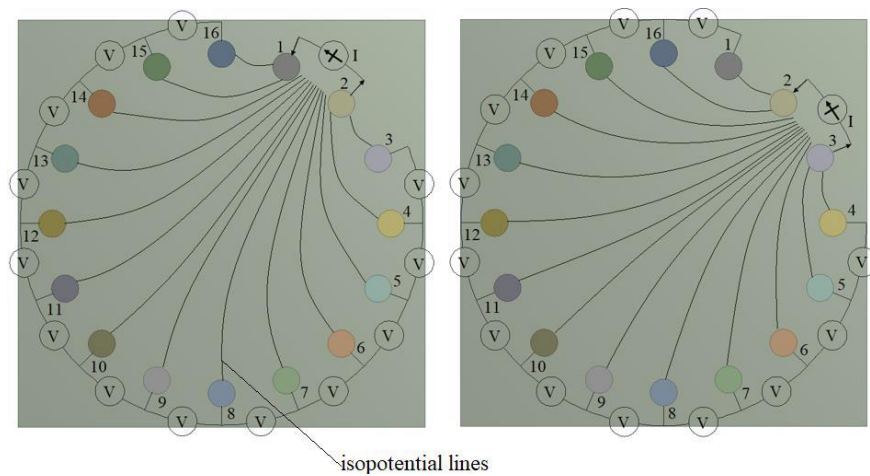
2.1.2.3 Γραμμική μέθοδος ενός σταδίου.

Η μέθοδος αυτή θεωρεί μία γραμμική σχέση μεταξύ της πυκνότητας του ρεύματος και της αγωγιμότητας του εξεταζόμενου υλικού, που επιτρέπει την ταχεία ανακατασκευή της εικόνας, ώστε να θεωρείται ως μέθοδος απεικόνισης σε πραγματικό χρόνο. Συγκεκριμένα, η ανακατασκευή της εικόνας αντιμετωπίζεται ως ένα πρόβλημα Gauss-Newton.

2.2 ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

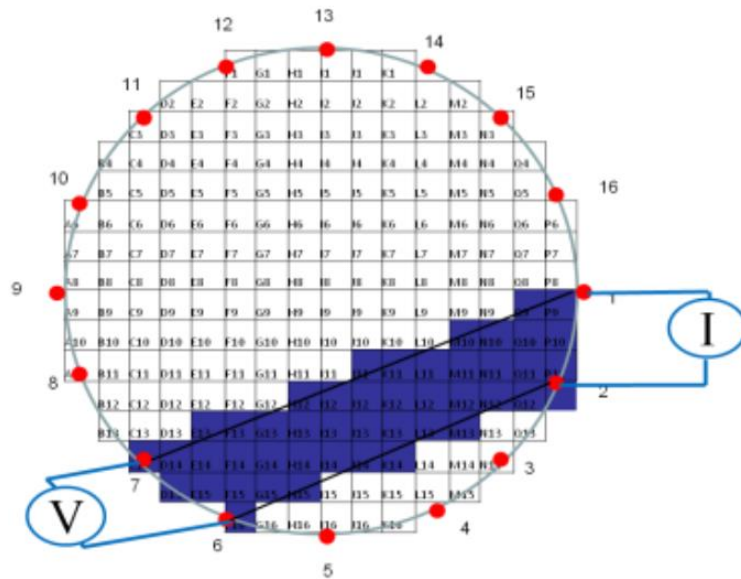
Μία άλλη μέθοδος ανίχνευσης βλάβης που βασίζεται στην ανάλυση των ηλεκτρικών φυσικών χαρακτηριστικών του εξεταζόμενου υλικού, έχει ιδιαίτερη απήχηση τα τελευταία χρόνια, καθώς μπορεί να ανιχνεύσει βλάβες σε πραγματικό χρόνο με μικρό κόστος [17]. Όπως παρουσιάστηκε και στην ενότητα της τομογραφίας ηλεκτρικής εμπέδησης, οι ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών σχετίζονται άμεσα με την κατάσταση του υλικού και πιο συγκεκριμένα με την ύπαρξη βλάβης σε αυτό. Η ύπαρξη οποιασδήποτε βλάβης μέσα σε ένα αγωγίμο υλικό προκαλεί αλλαγή των ηλεκτρικών παραμέτρων του υλικού και που επηρεάζει την κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος, άρα και της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού. Ως εκ τούτου, πέραν της ηλεκτρικής εμπέδησης και αγωγιμότητας, η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού δοκιμάστηκε ως μέσο για την ανίχνευση βλάβης αλλά και για την παρακολούθηση της εξέλιξης μίας ενδεχόμενης βλάβης. Τα αποτελέσματα της δοκιμής επιβεβαίωσαν την υπεροχή της χρήσης του ηλεκτρικού δυναμικού ως μέσο ανίχνευσης βλάβης σε σχέση με τη χρήση της ηλεκτρικής αντίστασης και εμπέδησης. Ως επακόλουθο, νέες και περισσότερες δοκιμές εκπονήθηκαν, ώστε να αξιολογηθεί η χρήση της μεθόδου με διαφορετικές παραμέτρους και συνθήκες, όπως η χρήση συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος, η εφαρμογή της μεθόδου σε ομογενή και ανισότροπα υλικά κ.α. Επίσης πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε σύνθετα υλικά, για την ανίχνευση ρωγμών, οπών αλλά και αποκολλήσεων σε πολυστρωματικά υλικά. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων ήταν θετικά και η ανακατασκευή της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού έγινε γνωστή ως χαρτογράφηση του ηλεκτρικού δυναμικού.

Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη χρήση απλών και μικρού κόστους συσκευών, όπως μία γεννήτρια ρεύματος ένα ψηφιακό βολτόμετρο και έναν υπολογιστή, ενώ για την ανίχνευση σε πραγματικό χρόνο απαιτείται επίσης ένα σύστημα πολυπλέκτη το οποίο με τη χρήση πολλών ηλεκτρονόμων (ρελέ) συνδέει κατάλληλα τα ηλεκτρόδια είτε με την πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, είτε με τη γείωση, είτε με το ψηφιακό βολτόμετρο, ώστε να γίνεται άμεσα και αυτόματα η διαδικασία της μέτρησης.



Σχήμα 11. Πρότυπο μετρήσεων με τη μέθοδο χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού

Η ανακατασκευή της εικόνας γίνεται με μεθόδους αντίστοιχες της τομογραφίας ηλεκτρικής εμπέδησης, όμως στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εξετάζεται μία πιο συγκεκριμένη μέθοδος που αναπτύχθηκε και δημοσιεύτηκε στην εργασία των Μπαλτόπουλου και Συνεργατών [17]. Η μεθοδολογία αυτή απαιτεί την τοποθέτηση ηλεκτροδίων περιφερειακά του εξεταζόμενου σώματος, και εφαρμόζεται η μέθοδος των γειτόνων που παρουσιάστηκε στην τομογραφία ηλεκτρικής εμπέδησης για τη συγκέντρωση των απαραίτητων δεδομένων διαφοράς δυναμικού. Επιγραμματικά, τροφοδοτείται ρεύμα μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων και υπολογίζονται οι διαφορές δυναμικού των υπολοίπων ζευγών ηλεκτροδίων που γειτνιάζουν και που δεν περιλαμβάνουν κάποιο από τα δύο ηλεκτρόδια που τροφοδοτούνται με ρεύμα. Στη συνέχεια, η ανακατασκευή της εικόνας γίνεται μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας. Κάθε καταγεγραμμένη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων προβάλλεται στην περιοχή που ορίζεται από τα ηλεκτρόδια τροφοδοσίας ρεύματος και τα ηλεκτρόδια καταμέτρησης της διαφοράς δυναμικού, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 12. Αναλυτικότερα, τα τέσσερα αυτά ηλεκτρόδια σχηματίζουν ένα τετράπλευρο, στο οποίο ανατίθεται η τιμή της διαφοράς δυναμικού των ηλεκτροδίων καταμέτρησης.



Σχήμα 12. Πρότυπο ανακατασκευής εικόνας με τη μέθοδο χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού [18].

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει το επόμενο ζεύγος καταμέτρησης, όπου πλέον η διαφορά δυναμικού που ανατίθεται στα σημεία του νέου τετράπλευρου είναι η παλαιά τους τιμή προσαυξημένη με τη νέα διαφορά δυναμικού των ηλεκτροδίων καταμέτρησης. Η διαδικασία αυτή εκτελείται επαναληπτικά για κάθε διαθέσιμη καταμέτρηση, ενώ στο τελευταίο βήμα η τιμή κάθε σημείου διαιρείται με τον αριθμό των προσαυξήσεων που έλαβε, ώστε να υπολογιστεί ο μέσος όρος των τιμών που του ανατέθηκαν. Χρησιμοποιώντας αυτήν τη διαδικασία γίνεται η χαρτογράφηση του ηλεκτρικού δυναμικού, και σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, κάθε σημείο με τιμή διαφοράς δυναμικού χαμηλότερου του μέσου όρου είναι ενδεχόμενο σημείο βλάβης. Στην εργασία [18] σύγκριναν τη χαρτογράφηση του ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ του άθικτου δοκιμίου και αυτού με βλάβες και πρότειναν ένα ακόμα βήμα στη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην εργασία [17]. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να επαναλαμβάνεται η διαδικασία για το άθικτο δοκίμιο και να γίνεται η αφαίρεση των τιμών ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ του εξεταζόμενου και του άθικτου δοκιμίου. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνει καλύτερη απεικόνιση της βλάβης και υιοθετείται στην εργασία αυτή.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΒΛΑΒΗΣ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ CFRP ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζεται η ικανότητα ανίχνευσης διαφόρων βλαβών σε σύνθετα πολυμερικά δοκίμια με ενίσχυση ανθρακονημάτων (carbon fiber reinforced polymers - CFRP) με τη μέθοδο χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού. Οι βλάβες που εξετάζονται αφορούν οπές σε διάφορα σημεία του συνθέτου. Πέραν των διαφόρων βλαβών εξετάζονται οι περιπτώσεις χρήσης επιφανειακών και διαμπερών ηλεκτροδίων για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με βάση την καταγραφή των διαφορών του ηλεκτρικού δυναμικού.

Το πρώτο στάδιο της μεθόδου χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού περιλαμβάνει την απόκτηση δεδομένων διαφοράς δυναμικού μέσω της μεθόδου των γειτόνων, όπου στη συνέχεια γίνεται η ανακατασκευή της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού και αξιολογούνται πιθανές περιοχές με βλάβη. Σε αυτήν την εργασία τα δεδομένα διαφοράς δυναμικού δεν εντοπίστηκαν πειραματικά, αλλά υπολογίστηκαν με την επίλυση του ευθέως προβλήματος.

3.1 ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μία υπολογιστική μέθοδο για τη λύση μερικών διαφορικών εξισώσεων στον δισδιάστατο ή/και τον τρισδιάστατο χώρο. Η μέθοδος αυτή επιλύει προβλήματα, υποδιαιρώντας το σύστημα σε μικρότερα απλά μέρη, τα οποία είναι τα πεπερασμένα στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται η λεγόμενη 'διακριτοποίηση' του προβλήματος, όπου το αντικείμενο μελέτης αντικαθίσταται από ένα πλέγμα με πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία απαρτίζονται από ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων που τα ορίζουν. Έτσι το συνολικό πρόβλημα διαιρείται σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, όπου κάθε εξίσωση αποτελεί ένα απλούστερο πρόβλημα συννοριακών τιμών για κάθε πεπερασμένο στοιχείο [19].

Η λύση του προβλήματος με τη μέθοδο αυτή είναι αποδεκτή όταν υπάρχει ισορροπία μεταξύ των τιμών των μεταβλητών στα κοινά σημεία γειτονικών πεπερασμένων στοιχείων. Δεδομένων αυτών, υπάρχουν δύο τρόποι επίλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα βασίζονται είτε στην ισορροπία δυνάμεων (implicit dynamics), είτε στη δυναμική ισορροπία των ταχυτήτων και των επιταχύνσεων σε κάθε στοιχείο (explicit dynamics) [19], [20].

Η επίλυση με βάση την ισορροπία των δυνάμεων, απαιτεί την αντιστροφή πινάκων. Για μη γραμμικά προβλήματα χρησιμοποιούνται επαναληπτικές αριθμητικές μέθοδοι, όπου κάθε βήμα βασίζεται στη λύση του προηγούμενου βήματος, ώστε να εξασφαλισθεί η ισορροπία των δυνάμεων μεταξύ των πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον, η αντιστροφή πινάκων για μεγάλα προβλήματα (μεγάλος αριθμός κόμβων) έχει πολύ μεγάλο υπολογιστικό κόστος, ώστε να χρησιμοποιούνται επαναληπτικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της. Παρόλο το

μεγάλο υπολογιστικό κόστος, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται αρκετά συχνά, καθώς καταλήγει σε αρκετά μικρό σφάλμα [19], [20].

Στην περίπτωση όμως που η λύση δεν συγκλίνει ή απαιτεί πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύ, χρησιμοποιείται η δεύτερη μέθοδος, όπου επιλύει το πρόβλημα λύνοντας ως προς τις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις των κόμβων των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας πολύ μικρά χρονικά βήματα σε κάθε επανάληψη. Η μέθοδος αυτή είναι εύκολο να καταλήξει σε λύσεις με μεγάλο σφάλμα καθώς, δεν λαμβάνεται υπόψη ισορροπία των δυνάμεων, όμως υπάρχουν κριτήρια που ελέγχουν τα σφάλματα των διαδοχικών λύσεων, ώστε να επιβεβαιώνεται η κατάληξη σε ρεαλιστικά αποτελέσματα. Ενδεικτικά, ένας βασικός κανόνας για τη μείωση του σφάλματος είναι η επιλογή ενός χρονικού βήματος μικρότερου του χρόνου Courant (χρόνος που είναι απαιτείται για να διαδοθεί ένα ηχητικό κύμα κατά μήκος ενός πεπερασμένου στοιχείου)) [19], [20].

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ CFRP

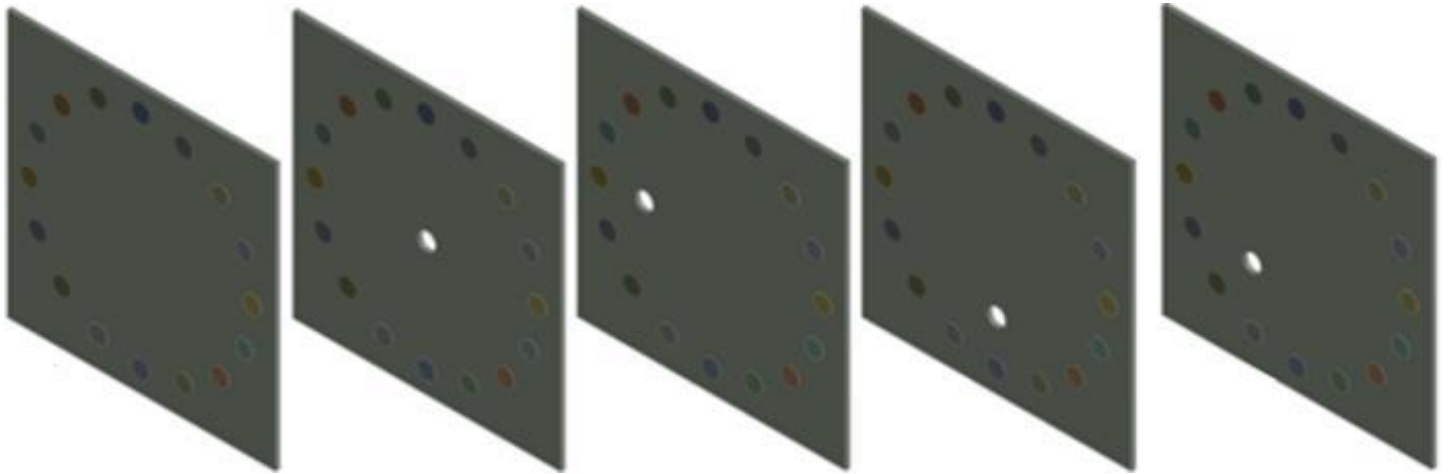
Τα CFRPs που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση αυτή αφορούν σύνθετα πέντε μονοδιέυθυντων στρώσεων με διευθύνσεις ινών $0^\circ-90^\circ-0^\circ-90^\circ-0^\circ$. Η κάθε στρώση έχει τετραγωνική μορφή με διαστάσεις 60mm x 60mm x 0.2mm. Ο τυπικός ογκομετρικός λόγος των ινών στο σύνθετο είναι περίπου 0.6. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των κατευθυντικών ηλεκτρικών αντιστάσεων που αναφέρονται στο έργο της ομάδας του Greenwood [21] και είναι σε συμφωνία με τις αντίστοιχες τιμές της υπάρχουσας βιβλιογραφίας (Πίνακας 2). Συγκεκριμένα σε κάθε στρώση, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (resistivity) κατά τη διεύθυνση των ινών είναι $1.85 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$, ενώ στην εγκάρσια διεύθυνση είναι $0.621 \Omega\text{cm}$. Στη διεύθυνση που είναι κάθετη στις επιφάνειες των στρώσεων, θεωρείται η ηλεκτρική αντίσταση των $6.21 \Omega\text{cm}$ για το συνολικό σύνθετο, που είναι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τη μέγιστή του ηλεκτρική αντίσταση.

Σύνθετο Υλικό	Αναλογία Ινών	ρ στις 0° (Ωcm)	ρ στις 90° (Ωcm)	Βιβλιογραφική Αναφορά
<i>Carbon-Epoxy</i>	0.61	0.0185	0.621	[21]
<i>Carbon-Epoxy</i>	0.55	0.08	0.4	[22]
<i>Carbon-Epoxy</i>	0.65	0.0025	1	[23]

Πίνακας 2. Πειραματικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης συνθέτων από ανθρακονήματα μονοδιέυθυντου προσανατολισμού και εποξικής ρητίνης.

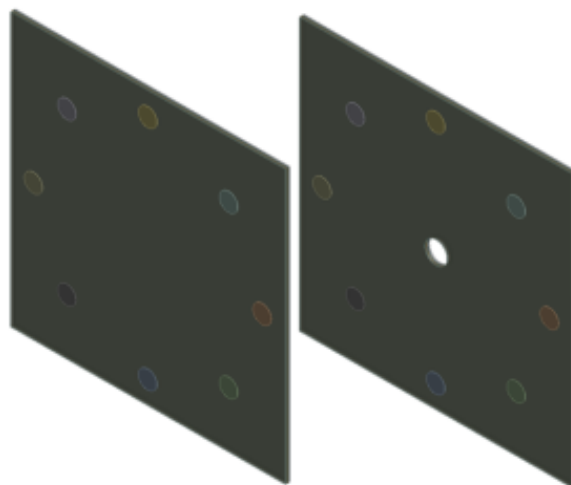
Στην περίπτωση των επιφανειακών ηλεκτροδίων, οι ακροδέκτες τοποθετήθηκαν περιμετρικά των δοκιμίων σε κυκλική μορφή, όπως ορίζει το πρωτόκολλο EPM. Συγκεκριμένα, η απόσταση κάθε ηλεκτροδίου από το κέντρο του CFRP αποφασίστηκε να είναι 2.5cm, ενώ η διάμετρος του ίδιου του ακροδέκτη είναι 0.4cm. Το υλικό των ακροδεκτών επιλέχθηκε να είναι ο χαλκός, καθώς παρουσιάζει αρκετά χαμηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση ($1.7 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$), ώστε να μην επηρεάζει τα δεδομένα των μετρήσεων.

Η μελέτη αυτή επικεντρώνεται στην ανάλυση της ανίχνευσης βλάβης σε δοκίμια με τη διαμόρφωση των δεκαέξι επιφανειακών ηλεκτροδίων, καθώς αυτή η διαμόρφωση έχει κατοχυρωθεί ως αξιόπιστη από αρκετές μελέτες. Ως εκ τούτου, σχεδιάστηκαν συνολικά 5 δοκίμια CFRP με τη διαμόρφωση των 16 ηλεκτροδίων, τα οποία πέραν του ενός σχεδιασμένου ως άθικτο, έφεραν μία οπή σε διαφορετικά σημεία (Εικόνα 6). Επιπλέον, εξετάστηκε η απόκριση της μεθόδου στην περίπτωση ενός ομογενούς υλικού με τη διαμόρφωση των 16 ηλεκτροδίων και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα του ομογενούς με το ανισότροπο CFRP δοκίμιο.



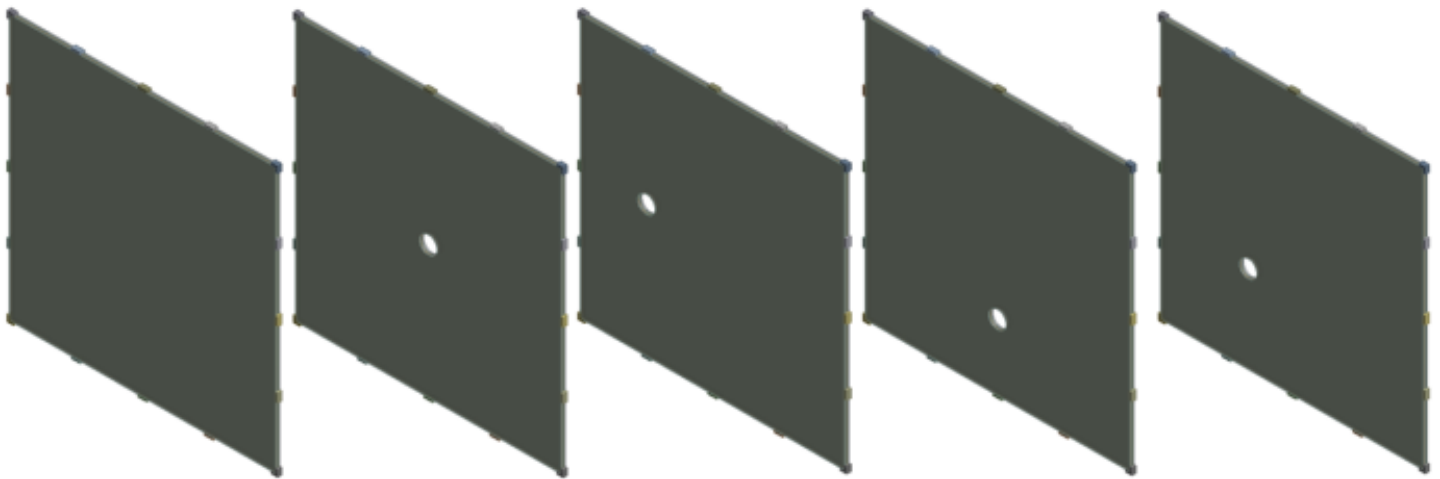
Εικόνα 6. Γεωμετρίες των δοκιμίων με τη διαμόρφωση των δεκαέξι επιφανειακών ηλεκτροδίων.

Πέρα από αυτά σχεδιάστηκαν 3 ακόμη δοκίμια CFRP με τη διαμόρφωση των 8 ηλεκτροδίων, ώστε να εξεταστεί η ικανότητα ανίχνευσης βλάβης στην περίπτωση λιγότερων δεδομένων μετρήσεων διαφοράς δυναμικού (Εικόνα 7).



Εικόνα 7. Γεωμετρίες των δοκιμίων με τη διαμόρφωση των οκτώ επιφανειακών ηλεκτροδίων.

Στην περίπτωση των περιμετρικών ηλεκτροδίων, οι ακροδέκτες τοποθετήθηκαν περιμετρικά των δοκιμίων, όπως εικονίζεται στο Εικόνα 8. Συνολικά σχεδιάστηκαν 5 δοκίμια CFRP με τη διαμόρφωση των 16 ηλεκτροδίων, τα οποία πέραν του ενός σχεδιασμένου ως άθικτο, έφεραν μία οπή σε διαφορετικά σημεία. Οι διαστάσεις κάθε ηλεκτροδίου ήταν 2mm x 1mm x 0.5mm και η μεταξύ τους απόσταση ήταν 15mm. Η ανάλυση των περιπτώσεων με τη διαμόρφωση των 8 και των 16 ηλεκτροδίων, καθώς επίσης και των περιπτώσεων με επιφανειακούς και περιμετρικούς ακροδέκτες σκοπεύει στη διεύθυνση της καλύτερης διαμόρφωσης για τη μέθοδο της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού.



Εικόνα 8. Γεωμετρίες των δοκιμίων με τη διαμόρφωση των δεκαέξι περιμετρικών ηλεκτροδίων.

3.3 ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Ως ευθύ πρόβλημα νοείται η εύρεση της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού δεδομένης της κατανομής των ηλεκτρικών παραμέτρων του υλικού και της έντασης του ρεύματος που τροφοδοτείται. Οποιαδήποτε αλλαγή των εσωτερικών ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υλικού συνεπάγεται και αλλαγή της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού. Σε αυτό βασίζεται η τομογραφία ηλεκτρικής εμπέδησης και η χαρτογράφηση του ηλεκτρικού δυναμικού, που καλούνται να λύσουν το αντίστροφο πρόβλημα που διατυπώνεται ως η εύρεση της κατανομής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υλικού δεδομένων της έντασης του ρεύματος που τροφοδοτείται και των τιμών της διαφοράς δυναμικού που καταγράφηκαν.

Το ευθύ πρόβλημα διατυπώνεται μαθηματικά από τις μερικές διαφορικές εξισώσεις και τις ανάλογες συνοριακές συνθήκες ((1)(2), (3) και (4)) [24]:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla u) = 0, \quad \bar{r} \in \Omega \quad (1)$$

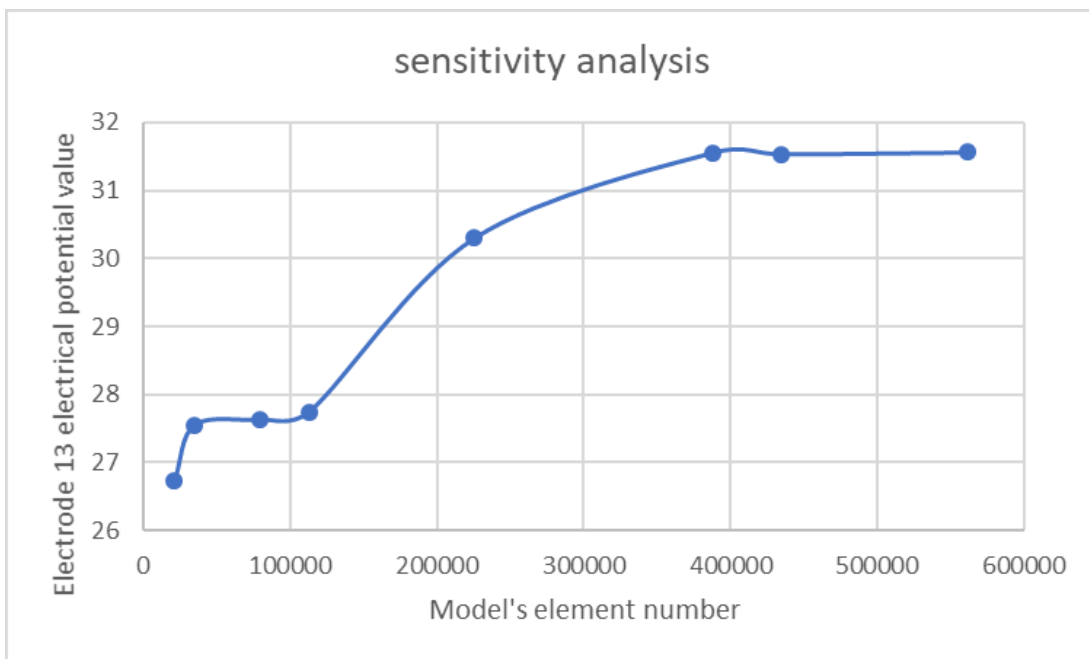
$$\int_{e_l} \sigma \frac{\partial u}{\partial \bar{n}} dS = I_l, \quad \bar{r} \in e_l, \quad l = 1, \dots, L \quad (2)$$

$$\sigma \frac{\partial u}{\partial \bar{n}} = 0, \quad \bar{r} \in \partial\Omega \setminus \bigcup_{l=1}^L e_l \quad (3)$$

$$u + \xi_l \sigma \frac{\partial u}{\partial \bar{n}} = U_l, \quad \bar{r} \in e_l, \quad l = 1, \dots, L \quad (4)$$

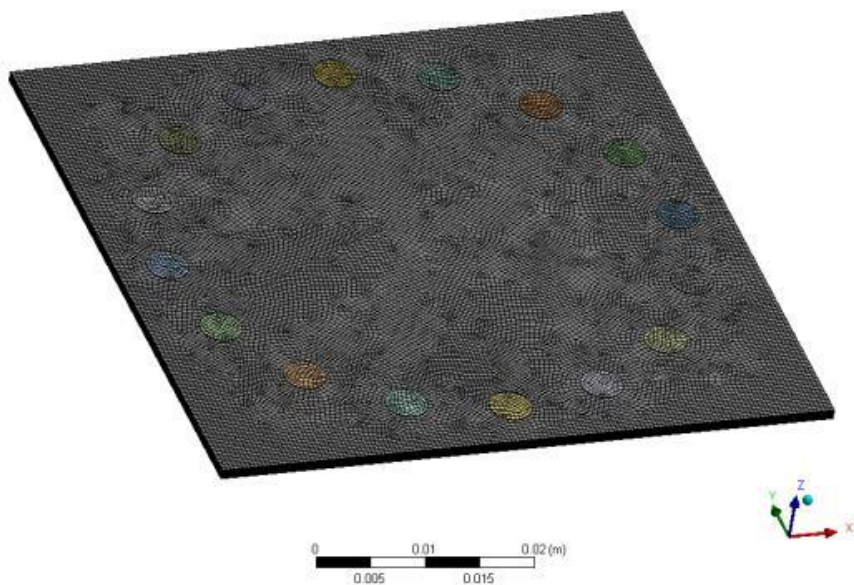
όπου σ είναι η αγωγιμότητα, \bar{r} είναι οι χωρικές συντεταγμένες, u είναι το ηλεκτρικό δυναμικό, U_l είναι το ηλεκτρικό δυναμικό στο ηλεκτρόδιο l , ξ_l είναι η εμπέδηση της επαφής στο ηλεκτρόδιο l , και n είναι το κάθετο διάνυσμα της επιφάνειας ελέγχου. Στην προκειμένη περίπτωση η διαδικασία συλλογής δεδομένων έγινε σύμφωνα με το έργο του κ. Γραμματικού [18], όπου τα εξεταζόμενα δοκίμια τροφοδοτούνταν με συνεχές ρεύμα έντασης 150 mA, οπότε στην εξίσωση (2) ισχύει $I_l = 150mA$, όπου $l = 1, \dots, L$.

Η επίλυση του παραπάνω προβλήματος συνωριακών τιμών έγινε με τη μέθοδο των πεπερασμένων και πιο συγκεκριμένα με το πρόγραμμα ANSYS. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί τη διακριτοποίηση του χωρίου του δοκιμίου, όπου στην περίπτωσή μας επιλέχθηκε διακριτοποίηση με εξάεδρα στοιχεία (hexahedral elements). Για τον υπολογισμό ενός αποδεκτού μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας του πλέγματος, όπου αποδείχθηκε ως ικανοποιητικό μήκος διακριτοποίησης των στοιχείων η τιμή 2×10^{-2} cm (Διάγραμμα 1).



Διάγραμμα 1. Τιμή του ηλεκτρικού δυναμικού ενός σημείου συναρτήσει του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων.

Επιπλέον, το πλέγμα βελτιστοποιήθηκε περαιτέρω με τη χρήση της τεχνικής εξώθησης πλέγματος, σύμφωνα με την οποία η επιφάνεια του δοκιμίου που εδρεύουν τα ηλεκτρόδια διακριτοποιείται αρχικά με τετράπλευρα πεπερασμένα στοιχεία, και στην συνέχεια γίνεται η εξώθησή της διδιάστατης γεωμετρίας των στοιχείων αυτών κατά το πάχος του δοκιμίου, ώστε να σχηματίσουν εξάεδρα πεπερασμένα στοιχεία. Η τεχνική αυτή συντελεί στην εξασφάλιση περισσότερων ορθών γωνιών στα εξάεδρα πεπερασμένα στοιχεία, που οδηγεί σε μικρότερο υπολογιστικό σφάλμα.



Εικόνα 9. Διακριτοποιημένο δοκίμιο.

Ο μέσος όρος των εξάεδρων στοιχείων σε κάθε δοκίμιο είναι 350.000 στοιχεία και ως εκ τούτου απαιτείται 13 GB RAM για κάθε προσομοίωση, ενώ ο απαραίτητος χρόνος που απαιτείται ξεπερνά τα 10min. Ο απαραίτητος αριθμός προσομοιώσεων για κάθε δοκίμιο ισούται με τον αριθμό των ηλεκτροδίων του, ώστε να απαιτούνται συνολικά περισσότερα από 160 min για κάθε δοκίμιο με τη διαμόρφωση των 16 ηλεκτροδίων.

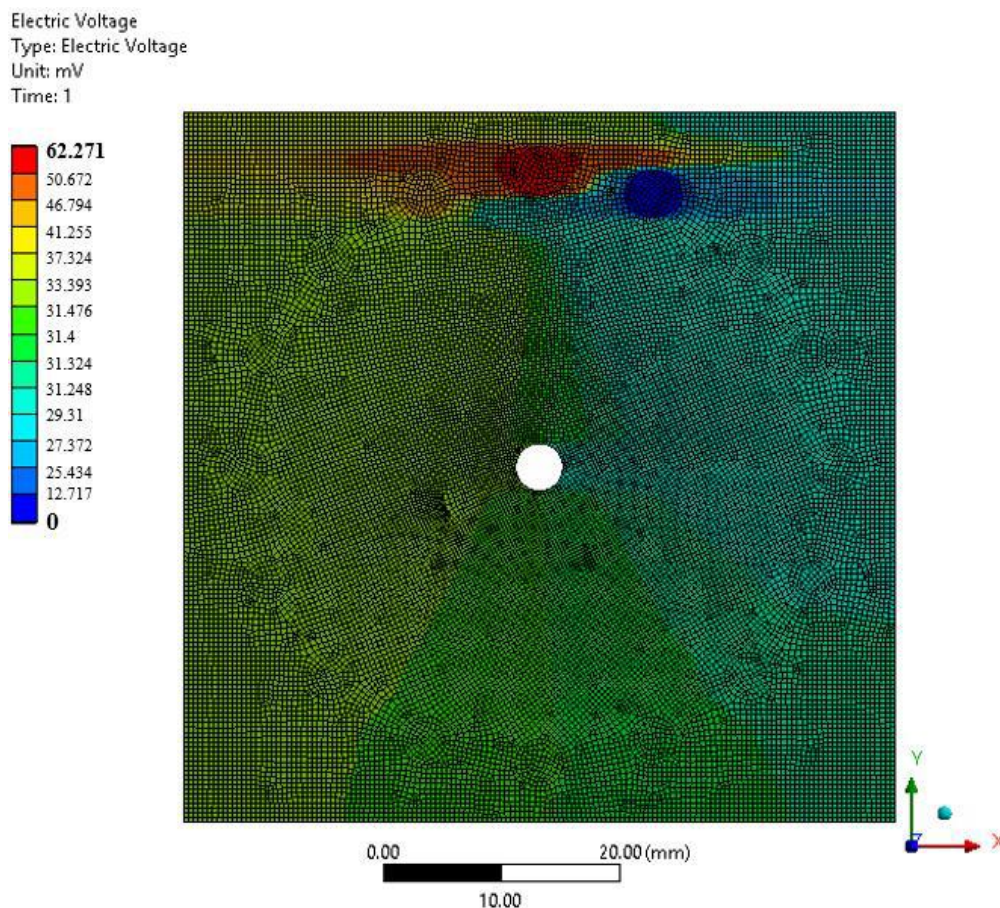
3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η προσομοίωση του ηλεκτρικού δυναμικού πραγματοποιήθηκε για κάθε μία από τις περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν, και συλλέχθηκαν τα δεδομένα διαφοράς δυναμικού των ηλεκτροδίων. Αναλυτικά, εξετάστηκαν οι περιπτώσεις δοκιμίων με επιφανειακούς και διαμπερείς ακροδέκτες, οι περιπτώσεις ομογενών δοκιμίων αντί του ανισότροπου CFRP, καθώς επίσης οι περιπτώσεις δοκιμίων με τη διαμόρφωση των 8 ηλεκτροδίων. Το πρώτο βήμα της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων με τη μέθοδο των γειτόνων, όπου απαιτείται η εφαρμογή μίας επαναληπτικής διαδικασίας με τόσες

επαναλήψεις όσα είναι τα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρόδια. Ως εκ τούτου, σε κάθε μία από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, εκτελέστηκαν τόσες προσομοιώσεις όσοι ήταν οι ακροδέκτες που έφεραν (Πίνακας 3).

Περιπτώσεις	Βλάβες	Αριθμός προσομοιώσεων
8 επιφανειακά ηλεκτρόδια	Άθικτο	24
	Κεντρική οπή	
16 επιφανειακά ηλεκτρόδια	Άθικτο	80
	Κεντρική οπή	
	Οπή αριστερά	
	Οπή κάτω	
	Οπή κάτω αριστερά	
16 διαμερή ηλεκτρόδια	Άθικτο	80
	Κεντρική οπή	
	Οπή αριστερά	
	Οπή κάτω	
	Οπή κάτω αριστερά	
16 ηλεκτρόδια/ομογενές υλικό	Άθικτο	80
	Κεντρική οπή	
	Οπή αριστερά	
	Οπή κάτω	
	Οπή κάτω αριστερά	

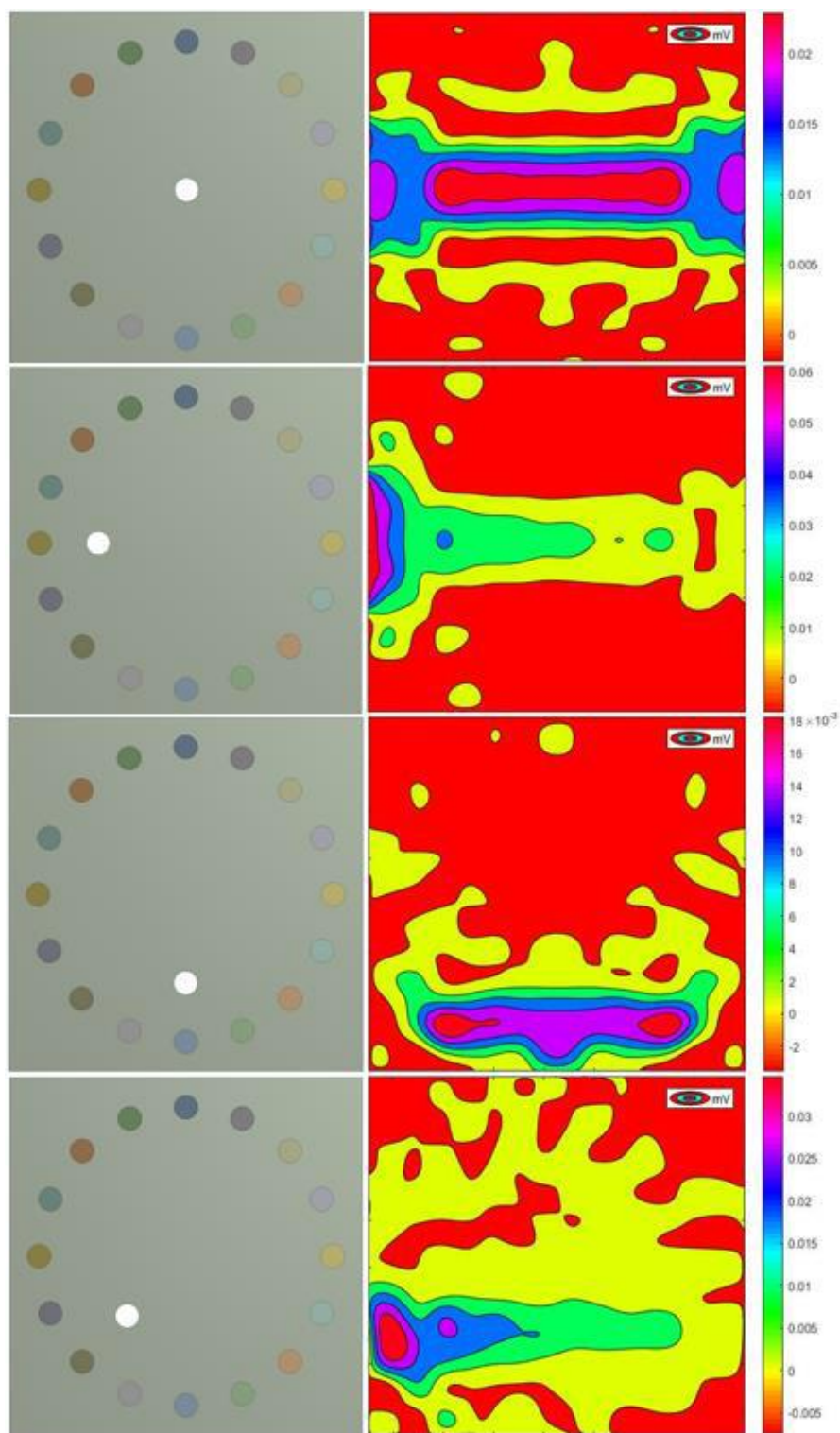
Πίνακας 3. Αναφορά των περιπτώσεων βλάβης και διαμόρφωσης των ηλεκτροδίων που εξετάστηκαν.



Εικόνα 10. Ενδεικτικό αποτέλεσμα της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού (mV) στο δοκίμιο σε μία από τις επαναλήψεις της μεθόδου των γειτόνων.

Με το πέρας της συλλογής των απαραίτητων δεδομένων, εφαρμόστηκε η χαρτογράφηση του ηλεκτρικού δυναμικού μέσω του κώδικα ανακατασκευής εικόνας που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της διπλωματικής αυτής εργασίας και παρατίθεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1. Στην Εικόνα 10 απεικονίζεται η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού σε μία από τις προσομοιώσεις που διεξήχθησαν για το δοκίμιο με τη διαμόρφωση των 16 επιφανειακών ηλεκτροδίων, που έχει κατοχυρωθεί ως αξιόπιστη για τη χαρτογράφηση του ηλεκτρικού δυναμικού.

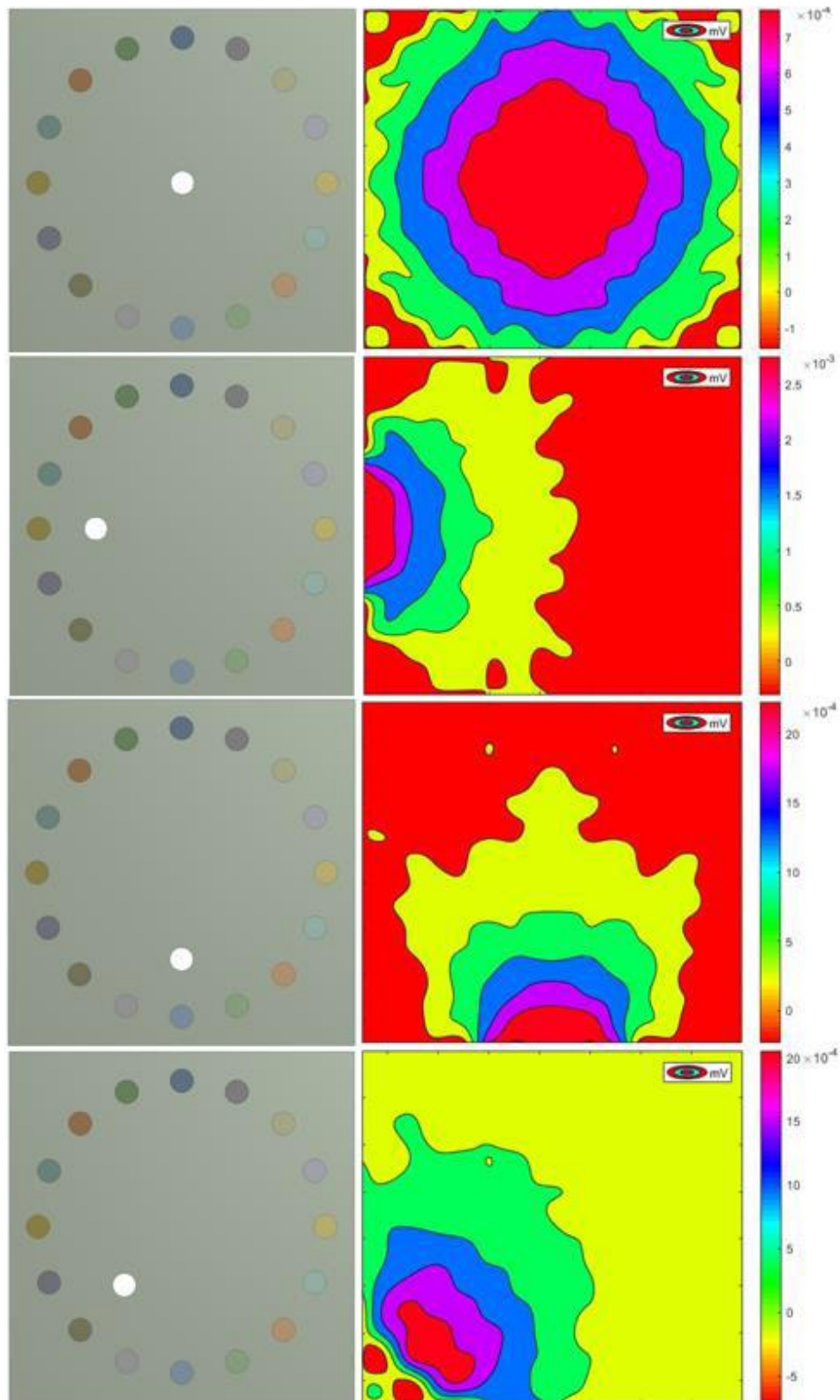
Η Εικόνα 11 απεικονίζει τα δοκίμια με σπές και τα προβλεπόμενα αποτελέσματα της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού. Παρατηρείται μεν πως η εξακρίβωση της θέσης αλλά και της έκτασης της βλάβης υστερεί με τη χρήση αυτής της μεθόδου ανίχνευσης βλάβης, όμως η μέθοδος αυτή προβλέπει τη σχετική θέση της βλάβης, που αρκεί σε πολλές εφαρμογές. Συγκεκριμένα, πολλές εφαρμογές συνθέτων υλικών διαθέτουν συστήματα συνεχούς παρακολούθησης της δομικής τους ακεραιότητας, όπου απαιτείται η ανίχνευση οποιασδήποτε βλάβης άμεσα, χωρίς να είναι αναγκαία η γνώση της ακριβούς θέσης της. Στα συστήματα αυτά, η ανίχνευση μίας ενδεχόμενης βλάβης ακολουθείται αργότερα από άλλες διαδικασίες για την εξακρίβωση της θέσης της.



Εικόνα 11. Συγκριτική απεικόνιση της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού (mV) στα ανισότροπα δοκίμια με τη διαμόρφωση των δεκαέξι επιφανειακών ηλεκτροδίων ανά περίπτωση βλάβης.

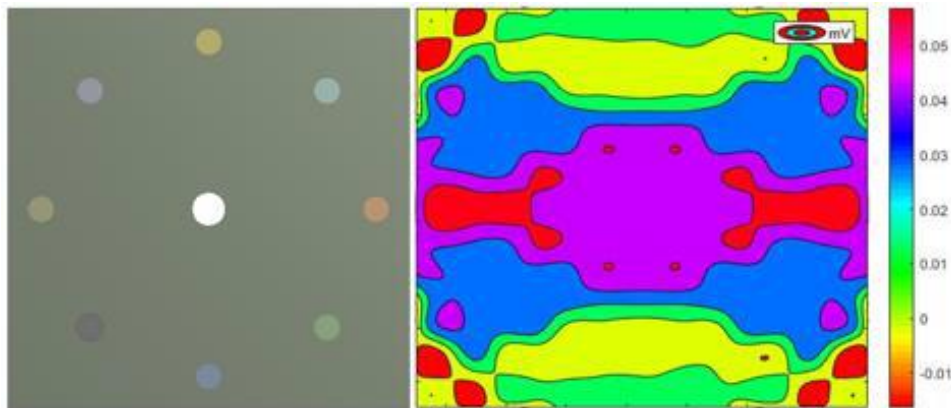
Επιπλέον, οι περιοχές χαμηλού δυναμικού της Εικόνα 11, φαίνεται πως διαχέονται κατά μήκος του άξονα x, το οποίο μπορεί να εξηγηθεί από την υψηλότερη τιμή αγωγιμότητας της άνω στρώσης κατά μήκος του άξονα x, καθώς κάθε στρώση είναι ηλεκτρικά ανισότροπη. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται από τη χαρτογράφηση του

ηλεκτρικού δυναμικού στα δοκίμια ισότροπου υλικού της Εικόνα 12, όπου δεν παρατηρείται η αντίστοιχη διάχυση των περιοχών χαμηλού δυναμικού προς κάποιον άξονα.



Εικόνα 12. Συγκριτική απεικόνιση της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού στα ισότροπα δοκίμια με τη διαμόρφωση των δεκαέξι επιφανειακών ηλεκτροδίων ανά περίπτωση βλάβης.

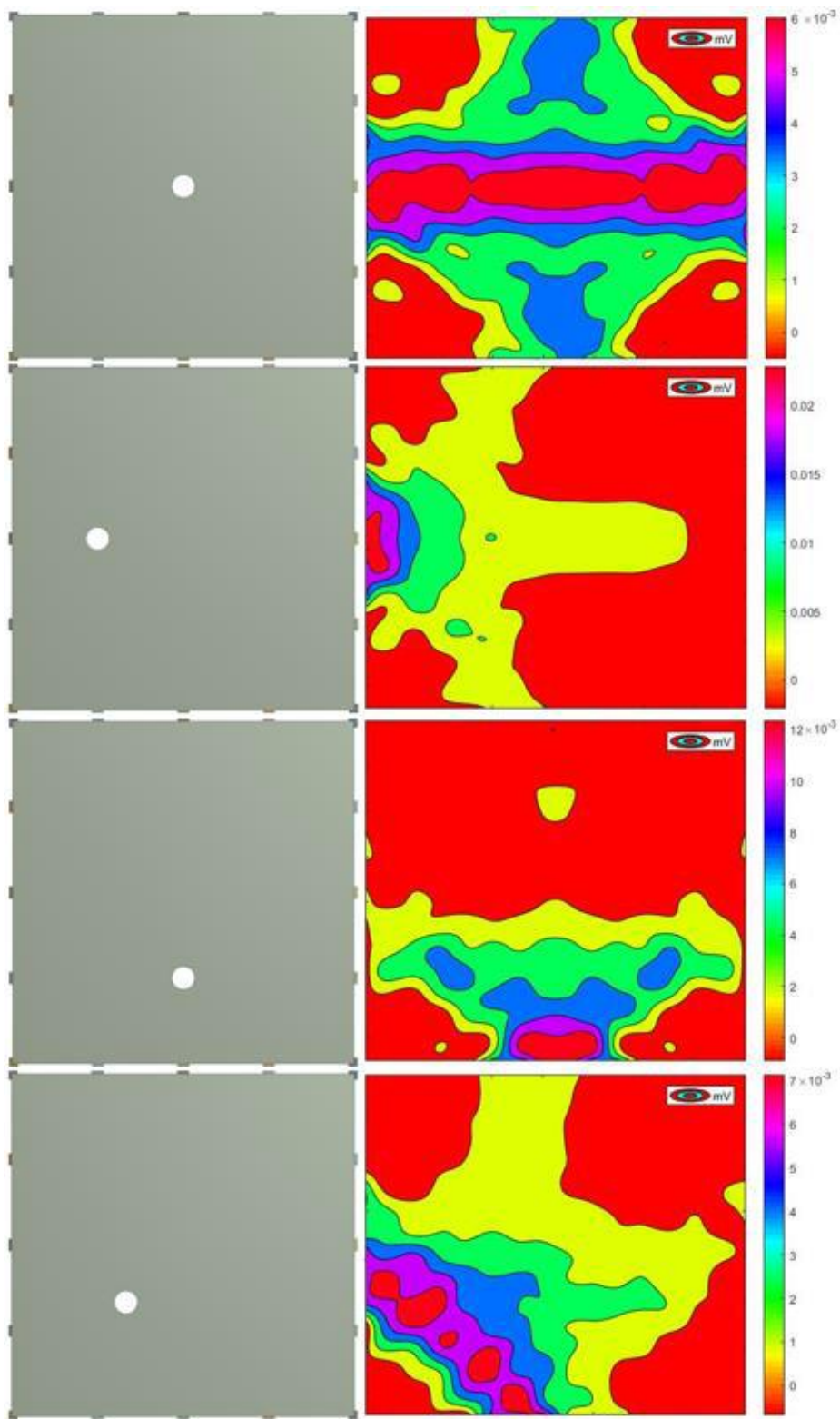
Η περίπτωση του δοκιμίου με τη διαμόρφωση των 8 ηλεκτροδίων εικονίζεται στην Εικόνα 13, και παρόλο που είναι περισσότερο ελκυστικό ως σύστημα λόγω των λιγότερων ακροδεκτών, καταλήγει σε χειρότερα αποτελέσματα.



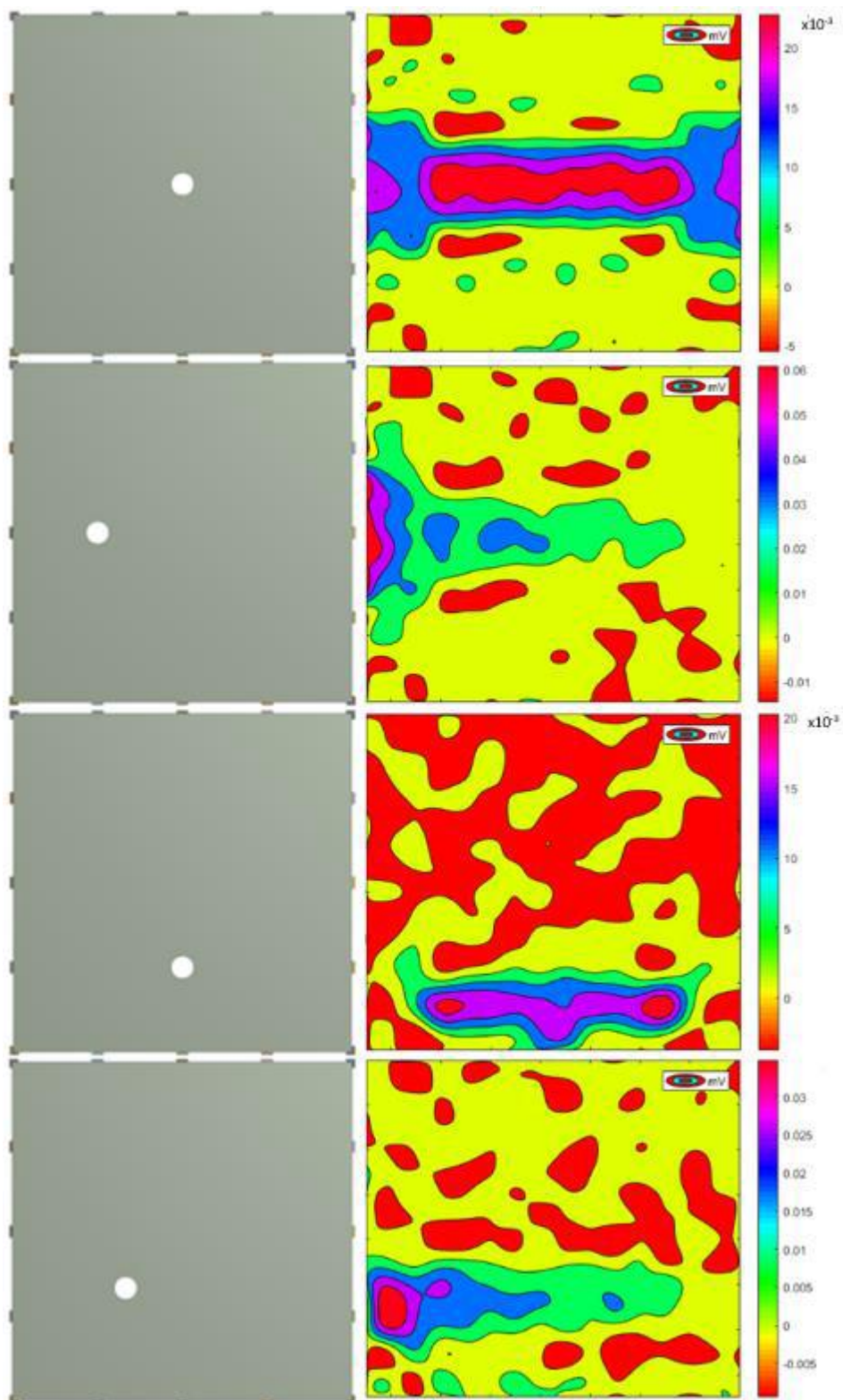
Εικόνα 13. Συγκριτική απεικόνιση της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού σε ισότροπο δοκίμιο με την διαμόρφωση των οκτώ επιφανειακών ηλεκτροδίων.

Στην περίπτωση των περιφερειακών ηλεκτροδίων (Εικόνα 14), η χαρτογράφηση του ηλεκτρικού δυναμικού επίσης κατέληξε σε χειρότερα αποτελέσματα συγκριτικά με την πρώτη περίπτωση των 16 επιφανειακών ηλεκτροδίων. Η διαμόρφωση των επιφανειακών ηλεκτροδίων αποδεικνύεται ως η καλύτερη, απλούστερη και μη καταστροφική μέθοδος, που δεν απαιτεί διαμπερή ηλεκτρόδια.

Πρέπει να επισημανθεί πως στην πραγματικότητα τα δοκίμια συνθέτων υλικών εμπεριέχουν κατασκευαστικές ατέλειες που επηρεάζουν την κατανομή της ηλεκτρικής τους αγωγιμότητας. Ως εκ τούτου, εισάγαμε ένα σφάλμα στα αποτελέσματα της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού, ώστε να επιβεβαιώσουμε την αποτελεσματικότητα της μεθόδου σε πιο αληθοφανή περίπτωση (Εικόνα 15). Το σφάλμα αυτό ακολουθεί μία γκαουσιανή κατανομή και παρουσιάζει ένα μέγιστο ίσο με το 5% της μέγιστη τιμής της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού. Η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού με το ενσωματωμένο σφάλμα αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου και την επικυρώνει ως αποτελεσματική μέθοδο ανίχνευσης οπών.



Εικόνα 14. Συγκριτική απεικόνιση της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού στα ανισότροπα δοκίμια με τη διαμόρφωση των δεκαέξι περιφερειακών ηλεκτροδίων ανά περίπτωση βλάβης.



Εικόνα 15. Συγκριτική απεικόνιση της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού με ενσωματωμένο σφάλμα στα ανισότροπα δοκίμια με τη διαμόρφωση των δεκαέξι περιφερειακών ηλεκτροδίων ανά περίπτωση βλάβης.

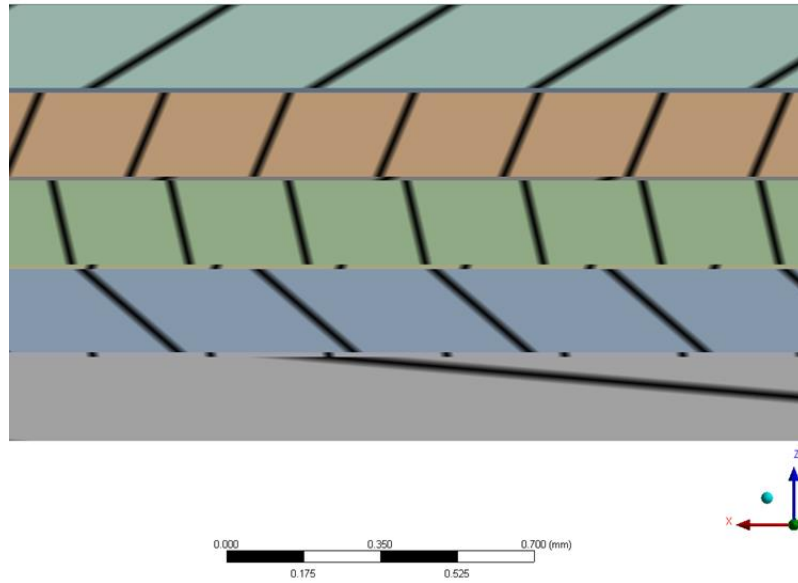
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΡΟΥΣΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΒΛΑΒΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Στην παρούσα μελέτη επεκτείνεται η δοκιμή της ανίχνευση βλάβης με τη μέθοδο της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού, εκτελώντας το υπολογιστικό πείραμα της ανίχνευσης βλάβης σε δοκίμιο που υπέστη κρούση χαμηλής ταχύτητας. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση και προσομοίωση της κρούσης χαμηλής ταχύτητας στο άθικτο δοκίμιο που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, την εξαγωγή της τελικής γεωμετρίας του δοκιμίου, την ανάλυση του ηλεκτρικού δυναμικού της τελικής γεωμετρίας σύμφωνα με τη μέθοδο των γειτόνων και τέλος την εφαρμογή της μεθόδου χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού μέσω της εκτέλεσης του κώδικα του παραρτήματος 1 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1).

Η κρούση δύο σωμάτων χαρακτηρίζεται από απότομες αλλαγές στην εντατική και παραμορφωτική κατάσταση του υλικού, καθώς επίσης και από την απότομη ανάπτυξη ρωγμών και αποκολλήσεων σε αυτό. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται επιλέγοντας τη μέθοδο επίλυσης με βάση της επιταχύνσεις των κόμβων των πεπερασμένων στοιχείων (explicit dynamics). Σε αντίθετη περίπτωση, η χρήση της μεθόδου επίλυσης με βάση την ισορροπία των δυνάμεων θα κατέληγε μεν σε πολύ μεγάλο χρόνο επίλυσης, αλλά και σε αδυναμία σύγκλισης της λύσεως, καθώς οι απότομες αλλαγές της εντατικής κατάστασης δεν επιτρέπουν την ισορροπία των δυνάμεων μεταξύ των κόμβων.

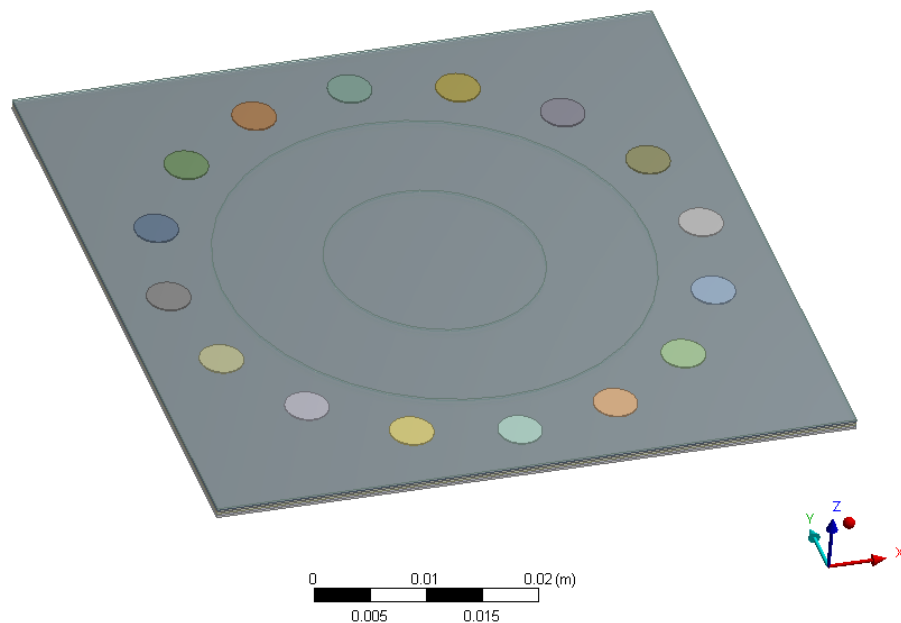
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ CFRP

Το δοκίμιο CFRP που χρησιμοποιήθηκε στο υπολογιστικό πείραμα της κρούσης χαμηλής ταχύτητας ήταν καθόλα όμοια με το αντίστοιχο άθικτο δοκίμιο με τη διαμόρφωση των 16 ηλεκτροδίων που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με τη διαφορά ότι στην προκειμένη περίπτωση το δοκίμιο απαρτίζεται πέρα από τις 5 στρώσεις και από και τις συμπαγείς διεπιφάνειές τους (Εικόνα 16). Αυτό γίνεται καθώς το νέο σχέδιο του δοκιμίου επιτρέπει την υλοποίηση του πειράματος. Συγκεκριμένα, η προσομοίωση της κρούσης με μη συμπαγείς, αλλά δισδιάστατες διεπιφάνειες καταλήγει μεν στην αποκόλληση των στρώσεων του συνθέτου, όμως πολλά από τα αποκολλημένα σημεία των διεπιφανειών παραμένουν ενωμένα στην προκύπτουσα γεωμετρία. Το γεγονός αυτό εμποδίζει την ορθή προσομοίωση του ηλεκτρικού δυναμικού με τη μέθοδο των γειτόνων, καθώς το πρόγραμμα προσομοίωσης δεν αναγνωρίζει τη ρήξη των διεπιφανειών που παραμένουν σε επαφή, και επιτρέπει τη δίοδο του ρεύματος από αυτά. Αντιθέτως, στην περίπτωση της συμπαγούς διεπιφάνειας, μία ενδεχόμενη ρήξη οδηγεί στην διαγραφή του πεπερασμένου στοιχείου όπου συμβαίνει, και έτσι το πρόγραμμα προσομοίωσης αναγνωρίζει το κενό αυτό, και αναθέτει τη συνθήκη της ηλεκτρικής μόνωσης στις αποκολλημένες διεπιφάνειες.



Εικόνα 16. Τομή της γεωμετρίας του δοκιμίου που χρησιμοποιείται για την κρούση χαμηλής ταχύτητας.

Με βάση αυτά, η κάθε στρώση του νέου δοκιμίου σχεδιάστηκε με διαστάσεις 60mm x 60mm x 0.19mm, ενώ η κάθε τρισδιάστατη διεπιφάνεια με διαστάσεις 60mm x 60mm x 0.01mm (Εικόνα 17). Το σύνθετο αποτελείται από μονοδιεύθυντες στρώσεις CFRP και ως εκ τούτου παρουσιάζουν ανισοτροπία στις μηχανικές τους ιδιότητες, ενώ οι τρισδιάστατες διεπιφάνειες αποτελούνται από εποξική ρητίνη που έχει ομογενή μηχανική συμπεριφορά. Στην επιφάνεια του δοκιμίου σχεδιάστηκαν 16 κυλινδρικοί χάλκινοι ακροδέκτες για την περαιτέρω εφαρμογή της μεθόδου χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού.



Εικόνα 17. Γεωμετρία του δοκιμίου που χρησιμοποιείται για την κρούση χαμηλής ταχύτητας.

Οι μηχανικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τις στρώσεις CFRP συνοψίζονται στον Πίνακα 4, ενώ οι αντίστοιχες για τις διεπιφάνειες εποξικής ρητίνης συνοψίζονται στον Πίνακα 5.

Ιδιότητες	Τιμή	Βιβλιογραφία
ρ [kg/m ³]	1600	[25], [26]
E_{11} [MPa]	149500	[26]
$E_{22}=E_{33}$ [MPa]	8430	
$G_{12}=G_{13}$ [MPa]	4200	
G_{23} [MPa]	2520	
$\nu_{12}=\nu_{13}$ [-]	0.3	
ν_{23} [-]	0.45	
ν_{21} [-]	0.0186	
X_T [MPa]	2143	
Y_T [MPa]	75	
Πάχος στρώσης [mm]	0.2	

Πίνακας 4. Δεδομένα ιδιοτήτων των στρώσεων του συνθέτου

Ιδιότητες	Τιμή	Βιβλιογραφία
ρ [kg/m ³]	1300	[27]
E [MPa]	3780	
G [MPa]	1520	
ν [-]	0.36	[28]
σ_Y [MPa]	95	[27]
Z_T [MPa]	62.3	[29]
S_{ILSS} [MPa]	92.3	[29]
G_{Ic} [kJ/m ²]	0.18	[26]
G_{IIc} [kJ/m ²]	0.5	[26]
G_{IIIc} [kJ/m ²]	0.5	[26]
C	0.2	[30]

Πίνακας 5. Δεδομένα ιδιοτήτων των διεπιφανειών/μήτρας του συνθέτου

4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΡΟΥΣΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Η θραύση σε ένα σύνθετο υλικό συμβαίνει είτε στο εσωτερικό κάθε στρώσης, είτε στη διεπιφάνειά τους. Η πρώτη περίπτωση θραύσης χαρακτηρίζεται από ψαθυρότητα και περιλαμβάνει την ανισότροπη ελαστική παραμόρφωση της στρώσης έως το σημείο αντοχής της, όπου και αποτυγχάνει. Η δεύτερη περίπτωση θραύσης περιλαμβάνει την ελαστική και πλαστική παραμόρφωση της εποξικής ρητίνης, έως το σημείο αντοχής της όπου αποτυγχάνει απελευθερώνοντας ένα μικρό ποσό ενέργειας που προκαλεί δονήσεις, αυξάνοντας τις εσωτερικές τάσεις στο υλικό [30].

Στην παρούσα μελέτη, η θραύση του συνθέτου περιγράφεται από την συμπεριφορά των επιμέρους υλικών που το απαρτίζουν, δηλαδή τις στρώσεις και των διεπιφανειών τους. Ως εκ τούτου, περιγράφονται δύο διαφορετικά μοντέλα μηχανικής συμπεριφοράς, που ορίζουν την αποτυχία στο εσωτερικό των στρώσεων, αλλά και στις διεπιφάνειές τους (αποκολλήσεις), και επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (explicit dynamics) στο πρόγραμμα AUTODYN.

4.2.1 Μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς των στρώσεων

Κάθε μονοδιεύθυνη στρώση ενός συνθέτου υλικού παρουσιάζει τρεις άξονες συμμετρίας, που είναι κάθετοι μεταξύ τους, και πρόκειται για τον παράλληλο άξονα στη διεύθυνση των ινών, τον κάθετο άξονα στην επιφάνεια της στρώσης και τον κάθετο άξονα στη διεύθυνση των ινών που είναι συνεπίπεδος με τη στρώση. Τα υλικά που παρουσιάζουν αυτόν τον τύπο συμμετρίας ονομάζονται ορθότροπα, που είναι μία ειδική κατηγορία των ανισότροπων υλικών. Η σχέση των τάσεων-παραμορφώσεων στα ορθότροπα υλικά, όπως είναι στην περίπτωσή μας η κάθε στρώση CFRP, εκφράζεται από την εξίσωση (5) [19].

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_{11} \\ \Delta\sigma_{22} \\ \Delta\sigma_{33} \\ \Delta\sigma_{23} \\ \Delta\sigma_{31} \\ \Delta\sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_{11} \\ \Delta\varepsilon_{22} \\ \Delta\varepsilon_{33} \\ \Delta\varepsilon_{23} \\ \Delta\varepsilon_{31} \\ \Delta\varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Όπου σ_{ij} και ε_{ij} είναι οι συνιστώσες των τανυστών των τάσεων και των παραμορφώσεων αντίστοιχα, και C_{ij} είναι οι όροι δυσκαμψίας του υλικού. Στην περίπτωση της κρούσης υψηλής ταχύτητας, όπου δημιουργούνται ισχυρά κρουστικά κύματα, η σχέση των τάσεων-παραμορφώσεων δεν παρουσιάζει γραμμικότητα και απαιτεί την τροποποίηση της εξίσωσης (5), ώστε να λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμική ογκομετρική απόκριση του υλικού [30]. Στην περίπτωσή μας, όπου η ταχύτητα της κρούσης χαρακτηρίζεται χαμηλή (2 m/s) και είναι αρκετά μικρότερη της ταχύτητας μετάδοσης του ήχου μέσα στα επιμέρους υλικά, δεν απαιτείται η τροποποίηση της εξίσωσης (5).

Οι στρώσεις από CFRP αποτυγχάνουν ψαθυρά και η αποτυχία τους συμβαίνει ακαριαία με την ικανοποίηση του ενός από τα τρία κριτήρια που παρουσιάζονται στις εξισώσεις (6) και (7) [19], [26], [30], [31].

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1 \quad (6)$$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (7)$$

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (8)$$

Όπου X_T , Y_T και Z_T είναι η αντοχή στη διεύθυνση παράλληλα και εγκάρσιως των ινών και στην διεύθυνση κατά το πάχος του δοκιμίου αντίστοιχα, ενώ S είναι η αντοχή στη διάτμηση. Το κριτήριο της εξίσωσης (6) αφορά την αποτυχία από τη φόρτιση παράλληλα στη διεύθυνσή των ινών και βασίζεται στην αντοχή των ινών, ενώ το κριτήριο της εξίσωσης (7) αφορά την αποτυχία από τη φόρτιση στην εγκάρσια διεύθυνση των ινών και βασίζεται στην αντοχή της μήτρας.

4.2.2 Μοντελοποίηση της μηχανικής συμπεριφοράς των διεπιφανειών

Η εποξική ρητίνη που αποτελεί τη μήτρα του CFRP συγκρατεί τις ίνες σε κάθε στρώση αλλά και τις στρώσεις μεταξύ τους. Η εποξική ρητίνη παραμορφώνεται ελαστο-πλαστικά και περιγράφεται από το κριτήριο von Mises, και εν τέλει παρουσιάζει μία προοδευτική αποτυχία, κατά την οποία παρατηρείται η σταδιακή αποσκλήρυνσή της και η ανάπτυξη ρωγμών [28], [32]. Στην περίπτωση μας, η ελαστοπλαστική συμπεριφορά της ρητίνης περιγράφεται από ένα γενικό ανισότροπο μοντέλο (εξίσωση (9)), καθώς ο συνδυασμός του κριτηρίου von Mises και του αλγορίθμου σταδιακής αποσκλήρυνσης και δημιουργίας ρωγμών δεν υποστηρίζεται στο πρόγραμμα AUTODYN. Όμως—με την κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων, το μοντέλο της εξίσωσης (9) καταλήγει στο κριτήριο von Mises [30], [33], [34].

$$f(\sigma_{ij}) = a_{11}\sigma_{11}^2 + a_{22}\sigma_{22}^2 + a_{33}\sigma_{33}^2 + 2a_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} + 2a_{23}\sigma_{22}\sigma_{33} + 2a_{13}\sigma_{11}\sigma_{33} + 2a_{44}\sigma_{23}^2 + a_{55}\sigma_{31}^2 + a_{66}\sigma_{12}^2 = k \quad (9)$$

$$k = \frac{2}{3}\bar{\sigma}^2 \quad (10)$$

Όπου, k είναι η παράμετρος σκλήρυνσης κατά την πλαστική παραμόρφωση, $\bar{\sigma}$ είναι η ενεργός τάση και a_{ij} είναι οι παράμετροι πλαστικότητας.

$$a_{11} = a_{22} = a_{33} = \frac{2}{3}, \quad a_{12} = a_{23} = a_{13} = \frac{1}{3}, \quad a_{44} = a_{55} = a_{66} = 1 \quad (11)$$

Με την αντικατάσταση της παραμέτρου σκλήρυνσης από την εξίσωση (10) και των επιλεγμένων παραμέτρων πλαστικότητας από την εξίσωση (11), η εξίσωση (9) μετασχηματίζεται στο κριτήριο διαρροής κατά von Mises [30], [35], [36]:

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2 + \sigma_{12}^2)] \quad (12)$$

Δεδομένων αυτών, η σχέση μεταξύ της που συνδέει την αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης με την τάση εκφράζεται από την εξίσωση (13) [19], [26], [30].

$$\begin{bmatrix} d\varepsilon_{11}^p \\ d\varepsilon_{22}^p \\ d\varepsilon_{33}^p \\ d\varepsilon_{23}^p \\ d\varepsilon_{31}^p \\ d\varepsilon_{12}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2a_{11}\sigma_{11} + 2a_{12}\sigma_{22} + 2a_{13}\sigma_{33} \\ 2a_{12}\sigma_{11} + 2a_{22}\sigma_{22} + 2a_{23}\sigma_{33} \\ 2a_{13}\sigma_{11} + 2a_{23}\sigma_{22} + 2a_{33}\sigma_{33} \\ 4a_{44}\sigma_{23} \\ 4a_{55}\sigma_{31} \\ 4a_{66}\sigma_{12} \end{bmatrix} \cdot d\lambda \quad (13)$$

Όπου, ε_{ij}^p είναι οι συνιστώσες του τανυστή των πλαστικών παραμορφώσεων και $d\lambda$ είναι ο παράγοντας πλαστικότητας. Η ενεργός πλαστική παραμόρφωση υπολογίζεται μέσω του πλαστικού έργου από την εξίσωση (14) [19], [30].

$$dW^P = \sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij}^p = \bar{\sigma} \cdot d\bar{\varepsilon}^P \quad (14)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (9), (13) και (14), καταλήγουμε στην εξίσωση (15) που προσδιορίζει την ενεργό πλαστική παραμόρφωση σε κάθε επανάληψη [19], [30].

$$(d\bar{\varepsilon}^P)^2 = \frac{8}{3} f(\sigma_{ij}) \cdot (d\lambda)^2 \quad (15)$$

Οι εξισώσεις (12) και (15) χρησιμοποιούνται επαναληπτικά, έως ότου βρεθεί ισορροπία στη λύση. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διαρροή υπολογίζονται αρχικά οι τάσεις και στη συνέχεια οι πλαστικές παραμορφώσεις, και σε περίπτωση που οι τελικές τάσεις δεν ικανοποιούν το κριτήριο von Mises, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος “backward-Euler” [19] που επαναφέρει τις τάσεις στην επιφάνεια που ορίζει η συνάρτηση διαρροής von Mises (εξίσωση (12)) [19], [30].

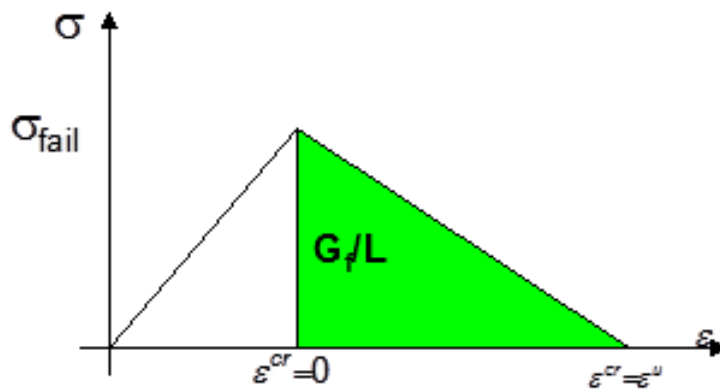
Η περίπτωση αποτυχίας στις διεπιφάνειες (αποκόλληση) εξετάζεται με βάση τα κριτήρια των εξισώσεων (16), (17) και (18) που ορίζουν την έναρξη της βλάβης [19], [30], [32].

$$e_{11f}^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{ILSS}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{ILSS}}\right)^2 \geq 1 \quad (16)$$

$$e_{22f}^2 = \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{ILSS}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{ILSS}}\right)^2 \geq 1 \quad (17)$$

$$e_{33f}^2 = \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{ILSS}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{ILSS}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{33}}{Z_T}\right)^2 \geq 1 \quad (18)$$

Όπου Z_T και S_{ILSS} είναι η αντοχή της μήτρας στον εφελκυσμό και στη διάτμηση αντίστοιχα. Η περίπτωση της βλάβης ακολουθείται από τη σταδιακή αποσκλήρυνση της μήτρας στα σημεία αυτά, όπως εικονίζεται στο διάγραμμα Διάγραμμα 2 που περιγράφει τη σχέση των τάσεων-παραμορφώσεων πριν και μετά την έναρξη της βλάβης ($\sigma < \sigma_{fail}$ και $\sigma > \sigma_{fail}$ αντίστοιχα) [19], [30], [32], [34].



Διάγραμμα 2. Σχηματική απεικόνιση της τάσης συναρτήσει της παραμόρφωσης βάσει του αλγορίθμου αποσκλήρυνσης

Το εμβαδόν της πράσινης περιοχής του διαγράμματος Διάγραμμα 2 εκφράζει την ενέργεια που εκπέμπεται από τη θραύση της μήτρας G_f και περιγράφεται από την εξίσωση (19), ενώ η βαθμίδα της αποσκλήρυνσης h δίνεται από την εξίσωση (20) [30], [32].

$$G_f = \int_{\varepsilon^{cr}=0}^{\varepsilon^{cr}=\varepsilon^u} \sigma L d\varepsilon^{cr} \quad (19)$$

$$h = \frac{L\sigma_{fail}^2}{2G_f} \quad (20)$$

Όπου L είναι ένα αντιπροσωπευτικό πλάτος των πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο ενσωματώνεται στις εξισώσεις ώστε να μειωθεί η εξάρτηση της λύσης από το πλέγμα διακριτοποίησης, ε^{cr} είναι η παραμόρφωση που συμβαίνει μετά την έναρξης της βλάβης $\sigma > \sigma_{fail}$ είναι και ε^u είναι η τελική τιμή της ε^{cr} πριν τη θραύση που δίνεται από την εξίσωση (21) [30], [32].

$$\varepsilon^u = \frac{2G_f}{\sigma_{fail}L} \quad (21)$$

Δεδομένων αυτών, μετά την έναρξη της βλάβης εφαρμόζεται ένας γραμμικός νόμος που περιγράφει την κατάσταση της βλάβης στο υλικό (εξίσωση (22)), και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της νέας μέγιστης τάσης που δύναται να αντέξει η μήτρα στα σημεία της βλάβης (εξίσωση (23)) [30], [32].

$$Dam = \frac{h \times \varepsilon^{cr}}{\sigma_{fail}} \quad (22)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{fail}(1 - Dam) \quad (23)$$

Ωστόσο, η νέα κατάσταση του υλικού απαιτεί την εκ νέου αξιολόγηση των εντατικών συνθηκών για την περαιτέρω συνέχιση της βλάβης στις περιοχές όπου έχει εκδηλωθεί αποσκλήρυνση, σύμφωνα με τα κριτήρια των εξισώσεων (24), (25) και (26) [19], [30], [32], [34].

$$e_{11f}^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{11fail}(1 - D_{11})} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12fail}(1 - D_{12})} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13fail}(1 - D_{13})} \right)^2 \geq 1 \quad (24)$$

$$e_{22f}^2 = \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12fail}(1 - D_{12})} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{\sigma_{22fail}(1 - D_{22})} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{\sigma_{23fail}(1 - D_{23})} \right)^2 \geq 1 \quad (25)$$

$$e_{33f}^2 = \left(\frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13fail}(1 - D_{13})} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{\sigma_{23fail}(1 - D_{23})} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{33}}{\sigma_{33fail}(1 - D_{33})} \right)^2 \geq 1 \quad (26)$$

Η κατάσταση της βλάβης μετά από κάθε νέα αποσκλήρυνση ορίζεται από την εξίσωση (27):

$$D_{11}^{n+1} = D_{11}^n + \Delta D_{11} + C \cdot \Delta D_{12} + C \cdot \Delta D_{31} \quad (27)$$

όπου C είναι ο συντελεστής σύζευξης βλάβης [19], [32].

Στην περίπτωση που η ε^{cr} υπερβεί την τιμή ε^u σε ένα πεπερασμένο στοιχείο, γίνεται η διαγραφή του στοιχείου αυτού, αντί να δημιουργείται ρωγμή. Η επιλογή αυτή εξυπηρετεί στη μετέπειτα ανάλυση του ηλεκτρικού δυναμικού στο δοκίμιο αυτό. Συγκεκριμένα, η αναγνώριση των ρωγμών που εξακολουθούν να είναι σε επαφή στο τελικό δοκίμιο δεν είναι δυνατή από το πρόγραμμα ANSYS Structural καθώς δεν μπορούν να μεταφερθούν τα δεδομένα βλάβης σε μία τέτοια γεωμετρία. Αντιθέτως, στην περίπτωση της διαγραφής των στοιχείων που αποτυγχάνουν, η γεωμετρία του τελικού δοκιμίου περιέχει κενά όπου υπάρχει αποκόλληση και ρωγμή και έτσι η ανάλυση του ηλεκτρικού δυναμικού είναι περισσότερο αληθοφανής.

4.2.3 Συνοριακές και Αρχικές Συνθήκες

Η προσομοίωση της κρούσης γίνεται κατά αντιστοιχία με την πειραματική διαδικασία κρούσης σε μηχανήματα INSTRON. Ως εκ τούτου, το εξεταζόμενο δοκίμιο είναι πακτωμένο στην επιφάνεια της τελευταίας στρώσης εκτός από το κέντρο της, όπου σε κυλινδρική περιοχή ακτίνας 20mm από το κέντρο της στρώσης, το δοκίμιο δεν πακτώνεται αλλά αφήνεται ελεύθερο ώστε να μπορεί να παραμορφωθεί και να αποτυγχάνει. Η πάκτωση αυτή είναι σύμφωνη με τα πρότυπα ASTM D5628 geometry FE, ISO 6603-1 και ISO 6603-2 [37].

Ως σώμα κρούσης επιλέγεται μία άκαμπτη σφαίρα ακτίνας 20mm, που αντιστοιχεί με ένα από τα διαθέσιμα σώματα κρούσης του εξοπλισμού INSTRON, η οποία τοποθετείται σε απόσταση 0.1mm από την επιφάνεια του δοκιμίου αντί για 204mm που ισχύει στα μηχανήματα INSTRON, ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος. Στη σφαίρα κρούσης ανατίθεται μάζα ίση με 2.5445kg και αρχική ταχύτητα ίση με 2m/s, ώστε η συνολική ενέργεια κρούσης να είναι 5.09J (εξίσωση (28)), αντίστοιχα με τη χρήση του Light Tup Holder στο INSTRON με 0.5kg επιπλέον βάρους (Εικόνα 18) [37].

$$E = \frac{1}{2} mu^2 \quad (28)$$

The operator can play with: **Impact Energy, Impact velocity, Falling Height**. Changing one, all the others will be automatically calculated

Tup Holder mass and additional mass (if any) are input by the operator

Tup Nominal Mass (tup with impact insert) is included in the calibration file

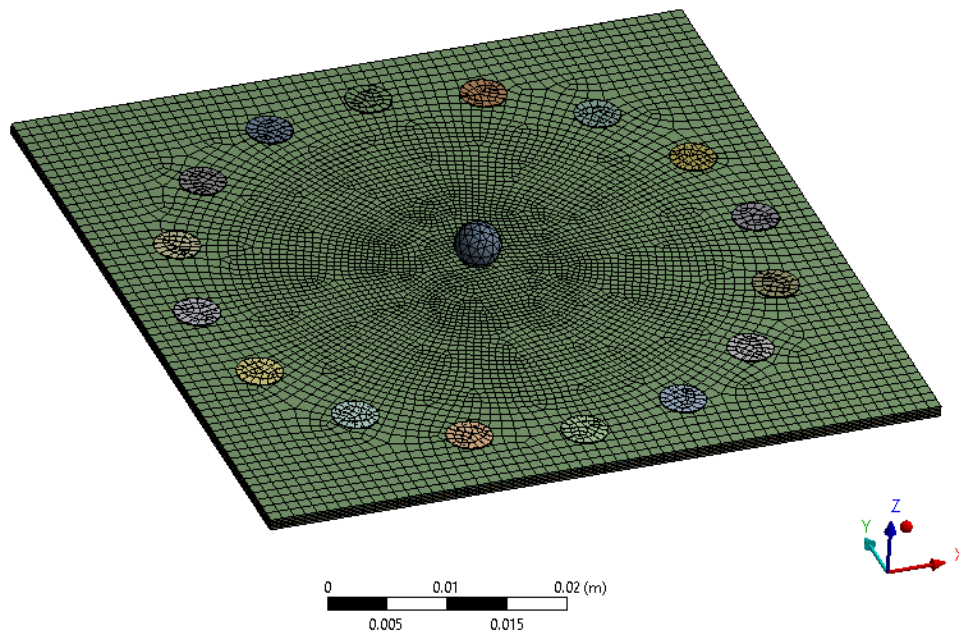
Impact Energy	<input type="text" value="5.09"/>	J	Tup holder mass	<input type="text" value="1.3"/>	kg
Impact Velocity	<input type="text" value="2"/>	m/s	Additional mass	<input type="text" value="0.5"/>	kg
Falling Height	<input type="text" value="204.000"/>	mm	Tup Nominal Mass	<input type="text" value="0.7445"/>	kg
Impact Point Offset	<input type="text" value="0.000"/>	mm	Total Mass	<input type="text" value="2.5445"/>	kg
Extension Length	<input type="text" value="0.000"/>	mm	Specimen support (
Extension Mass	<input type="text" value="0.0000"/>	kg	Support Type		

Total mass is automatically calculated

Εικόνα 18. Ενδεικτική εικόνα του λειτουργικού του μηχανήματος INSTRON για τον υπολογισμό των παραμέτρων κρούσης

4.2.4 Διακριτοποίηση

Το δοκίμιο διακριτοποιήθηκε με εξάεδρα πεπερασμένα στοιχεία διαφορετικού μεγέθους βάση περιοχής, ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την προσομοίωση. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν εξάεδρα με χαρακτηριστικό μέγιστο μήκος διακριτοποίησης 0.2mm στο κέντρο του δοκιμίου, όπου γίνεται η κρούση και δημιουργούνται πολλές ασυνέχειες στο υλικό από αποκολλήσεις και ρωγμές, ενώ στην περιφέρεια του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία με πλάτος 0.7mm. Αντίστοιχα με τη διαδικασία διακριτοποίησης που ακολουθήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το πλέγμα αυτού του δοκιμίου βελτιστοποιήθηκε περαιτέρω με τη χρήση της τεχνικής εξώθησης πλέγματος, ώστε να δημιουργηθούν στοιχεία με ορθές γωνίες τα οποία οδηγούν σε μικρότερο υπολογιστικό σφάλμα.

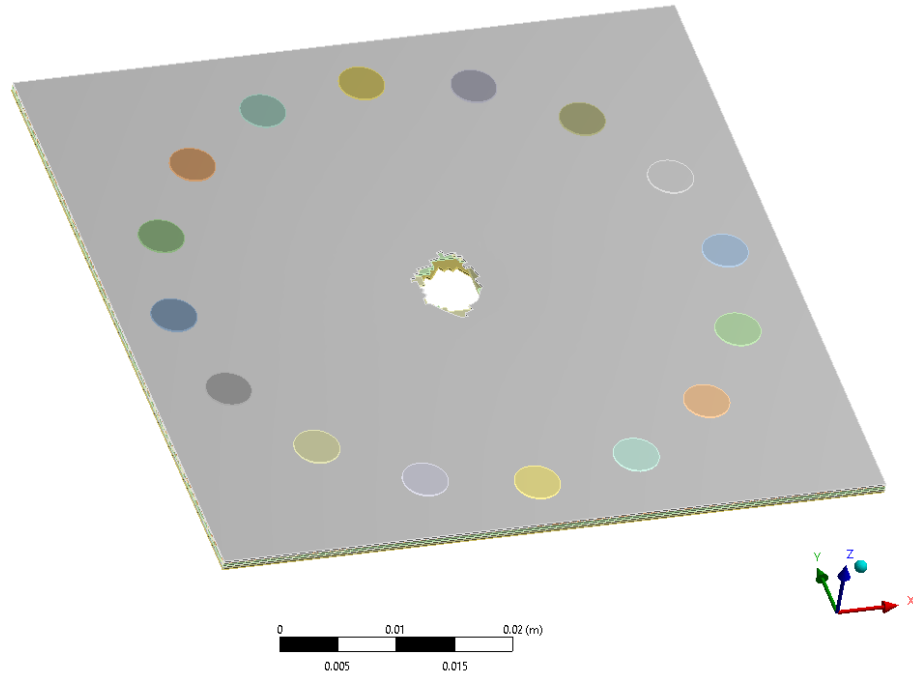


Εικόνα 19. Διακριτοποιημένο δοκίμιο

Στην περίπτωση της κρούσης διεκπεραιώθηκε ακόμα μία προσομοίωση με διαφορετική διακριτοποίηση, για την ανάλυση ευαισθησίας του πλέγματος, όπου χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα στοιχεία με πλάτος 1mm. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων διέφεραν σε μικρό βαθμό ως προς τις τιμές των μέγιστων τάσεων και παραμορφώσεων, όμως παρατηρήθηκε πως το δοκίμιο με μικρότερο αριθμό στοιχείων δεν είναι ικανό να αποτυπώσει με ακρίβεια τις περιοχές με βλάβη.

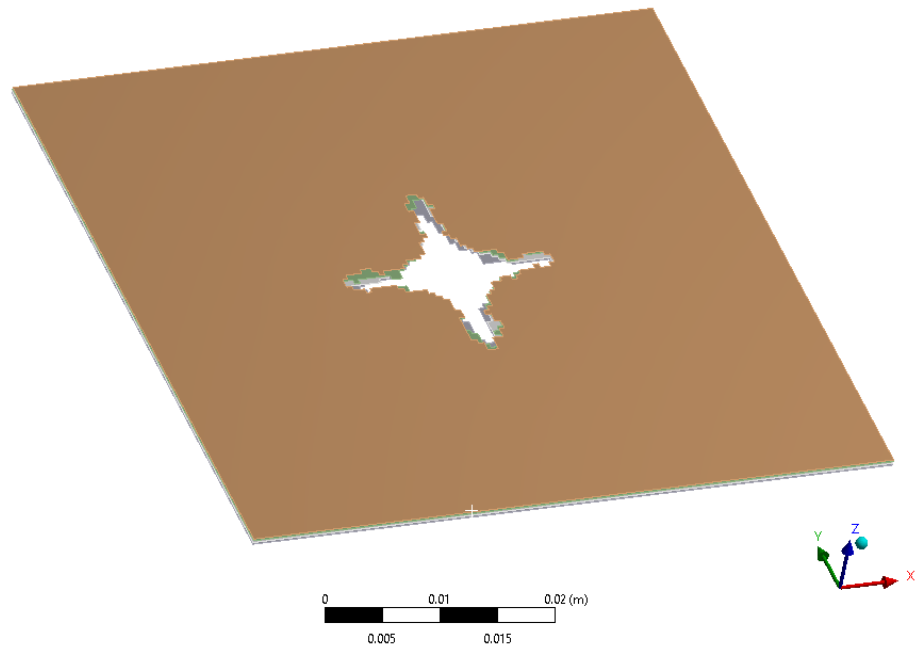
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΡΟΥΣΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Η προσομοίωση της κρούσης χαμηλής ταχύτητας στο δοκίμιο CFRP κατέληξε στη γεωμετρία της Εικόνα 20 όπου η σφαίρα διαπέρασε όλες τις στρώσεις του δοκιμίου και εξήλθε από το δοκίμιο.



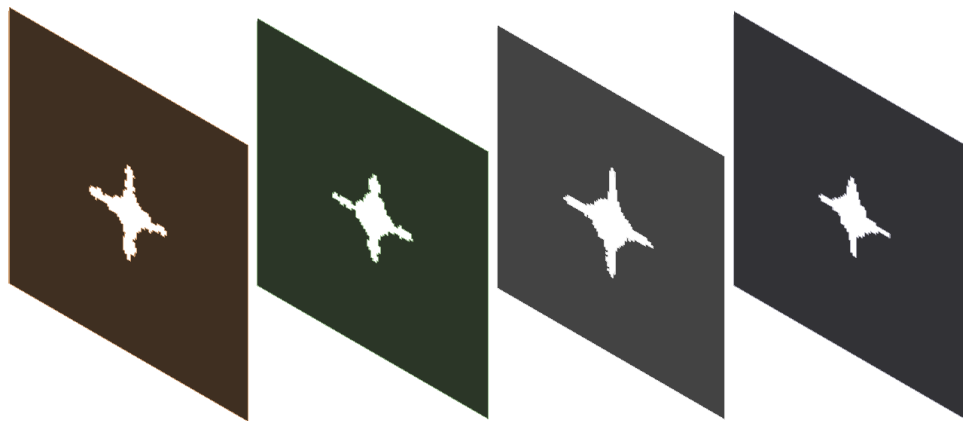
Εικόνα 20. Γεωμετρία δοκιμίου μετά την κρούση

Δεδομένων των συγκεκριμένων κριτηρίων βλάβης και της διαγραφής των στοιχείων στην περίπτωση της αποτυχίας τους, η προσομοίωση κατέληξε πέραν από τη δημιουργία οπής στο δοκίμιο, στην αποκόλληση όλων των στρώσεων στην περιοχή της βλάβης (Εικόνα 21).



Εικόνα 21. Γεωμετρίες διεπιφανειών μετά την κρούση

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της αποκόλλησης είναι πως εκτείνεται στις διεπιφάνειες των στρώσεων παρουσιάζοντας μία αστεροειδή μορφή, η οποία επιβεβαιώνεται από τη βιβλιογραφία (Εικόνα 22). Αυτό οφείλεται στη διαφορά του τανυστή δυσκαμψίας των στρώσεων, που δημιουργεί μεγάλη διαφορά στις παραμορφώσεις κάθε στρώσης σε συγκεκριμένες γωνίες από το κέντρο της κρούσεως, με αποτέλεσμα να αποτυγχάνει η διεπιφάνεια στις περιοχές αυτές.



Εικόνα 22. Μεμονωμένες γεωμετρίες διεπιφανειών μετά την κρούση

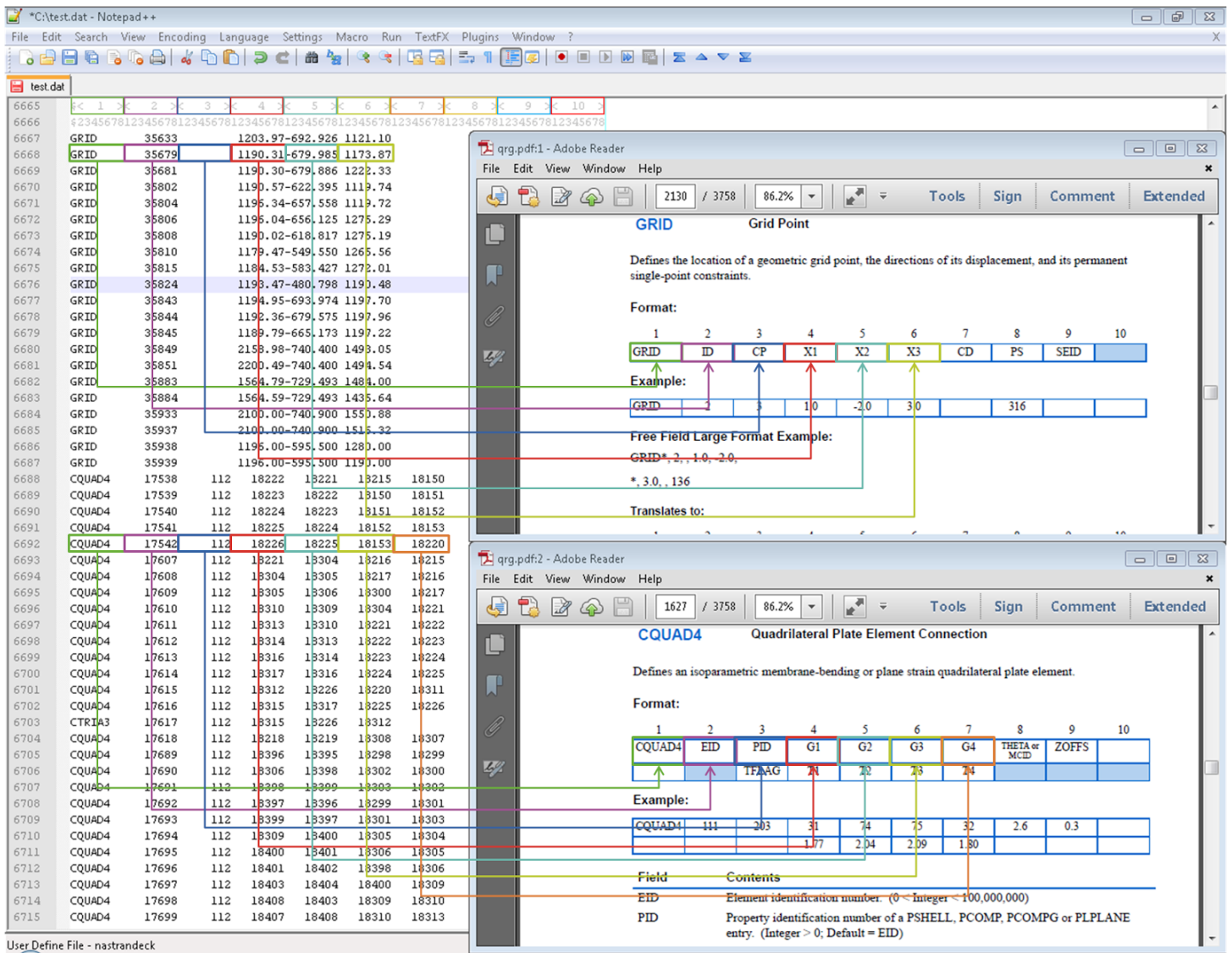
4.4 ΕΞΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Η χρήση του ANSYS AUTODYN εξυπηρετεί στην προσομοίωση της κρούσης χαμηλής ταχύτητας στο εξεταζόμενο δοκίμιο, όμως ενέχει ορισμένες ατέλειες που καταστούν δύσκολη την υλοποίηση της διατριβής. Αναλυτικά, τα λογισμικά του ANSYS εκτός του AUTODYN, έχουν τη δυνατότητα της διασύνδεσής τους, μέσω της μεταφοράς των δεδομένων του πλέγματος. Όμως το AUTODYN ως πρόγραμμα αναπτύχθηκε ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα λογισμικά του ANSYS και αυτό ίσως αποτέλεσε την αιτία για την έλλειψη της δυνατότητας εξαγωγής του παραμορφωμένου πλέγματος. Στην παρούσα διατριβή απαιτείται η χρήση του παραμορφωμένου πλέγματος από την κρούση, ώστε να επιτραπεί η ανάλυση του ηλεκτρικού δυναμικού για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού. Ως εκ τούτου, ήταν αναγκαία η ανάπτυξη κώδικα για την εξαγωγή του παραμορφωμένου πλέγματος από τα τελικά δεδομένα των κόμβων και των στοιχείων.

4.4.1 Καταγραφή πλέγματος στη μορφή NASTRAN

Ένα αρχείο NASTRAN περιέχει όλες τις πληροφορίες που ορίζουν ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, εκ των οποίων ορισμένες αφορούν τα δεδομένα του πλέγματος, όπως είναι οι κόμβοι, τα στοιχεία, κα. Στην περίπτωση μας, που απαιτείται μόνο το πλέγμα, το αρχείο NASTRAN περιέχει τους κόμβους, τα στοιχεία και τα διαφορετικά σώματα από τα οποία απαρτίζεται το δοκίμιό μας.

Η Εικόνα 23 περιέχει τμήματα του οδηγού αναφοράς NASTRAN 2012 για τη μορφή της καταγραφής των δεδομένων των κόμβων (GRID) και των τετράεδρων πεπερασμένων στοιχείων (CQUAD4). Επίσης, απεικονίζεται ένα παράδειγμα της δομής καταγραφής πλέγματος στη μορφή NASTRAN. Σύμφωνα με τον οδηγό NASTRAN, τα δεδομένα των κόμβων όλων των σωμάτων καταγράφονται στην αρχή του ορισμού του πλέγματος, ενώ στη συνέχεια ακολουθούν τα δεδομένα των στοιχείων για κάθε σώμα ξεχωριστά. Επίσης, οι τιμές για κάθε δεδομένο διαχωρίζονται με δύο τρόπους. Ο πρώτος περιλαμβάνει τη χρήση κόμματος μεταξύ των δεδομένων, ενώ ο δεύτερος όπου απουσιάζει το κόμμα, χρησιμοποιεί οκτώ θέσεις ψηφίων για κάθε δεδομένο και διαχωρίζει τη γραμμή δεδομένων με βάση το βήμα των οκτώ θέσεων για κάθε τιμή, όπως εικονίζεται στο αρχείο της Εικόνα 23 [38], [39].



Εικόνα 23. Παράδειγμα καταγραφής πλέγματος κατά NASTRAN [38]

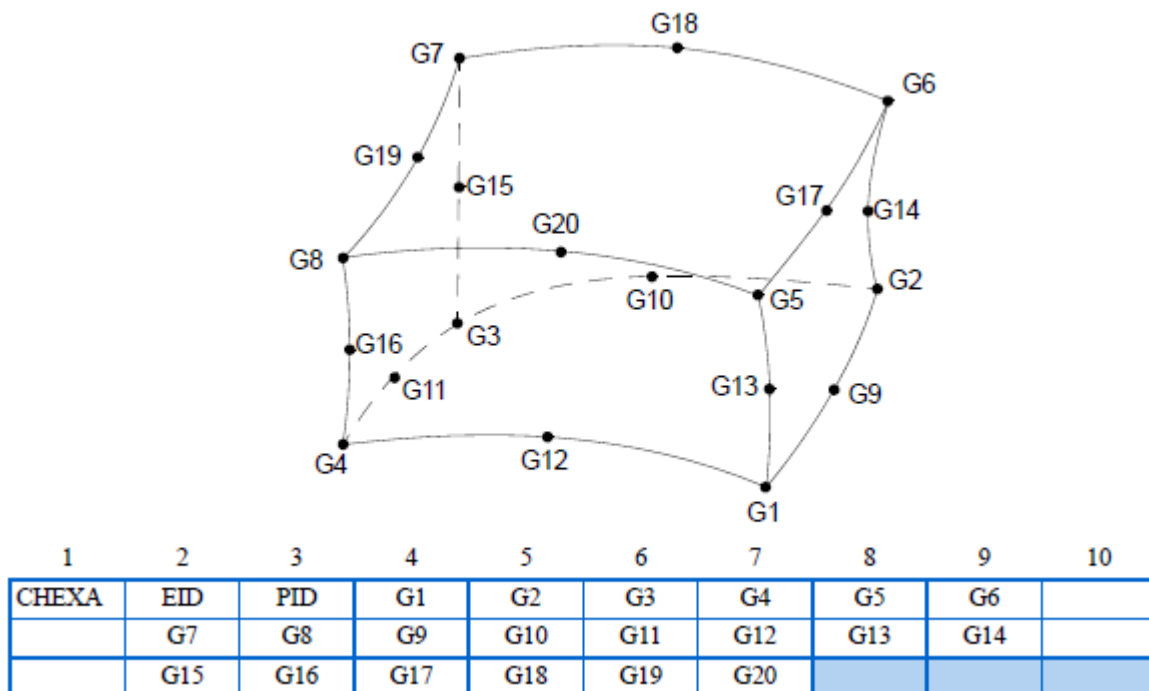
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
GRID	ID	CP	X1	X2	X3	CD	PS	SEID	

Εικόνα 24. Μορφή καταγραφής κόμβου κατά NASTRAN [39]

Τα δεδομένα κάθε κόμβου, καταγράφονται με την εξής μορφή (Εικόνα 24) [39]:

- Διακριτική ονομασία των κόμβων “GRID”
- Διακριτικός αριθμός κόμβου (ID)
- Διακριτικός αριθμός συστήματος συντεταγμένων, κατά τον οποίο ορίζονται οι συντεταγμένες του κόμβου (CP)

- Συντεταγμένη κόμβου X1
- Συντεταγμένη κόμβου X2
- Συντεταγμένη κόμβου X3
- Διακριτικός αριθμός συστήματος συντεταγμένων, κατά τον οποίο ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες (CD)
- Αριθμός συνοριακών συνθηκών που περιορίζουν τον κόμβο (PS)
- Διακριτικός αριθμός υπερ-στοιχείου



Εικόνα 25. Μορφή καταγραφής εξάεδρου στοιχείου κατά NASTRAN [39]

Τα δεδομένα κάθε εξάεδρου στοιχείου, καταγράφονται με την εξής μορφή (Εικόνα 25) [39]:

- Διακριτική ονομασία των εξάεδρων στοιχείων “CHEXA”
- Διακριτικός αριθμός στοιχείου (EID)
- Διακριτικός αριθμός σώματος που ανήκει το στοιχείο (PID)
- Διακριτικός αριθμός πρώτου κόμβου του στοιχείου (G1-G6)

Στην περίπτωση που το στοιχείο έχει ενδιάμεσους κόμβους καταγράφονται επίσης τα εξής:

- Διακριτικός αριθμός έβδομου κόμβου του στοιχείου (G7- G20)

Οι κόμβοι G1 έως G4 ενός εξάεδρου στοιχείου προσδιορίζουν την επιφάνεια μίας από τις έδρες του στοιχείου και δίνονται σε διαδοχική σειρά, ενώ οι κόμβοι G5 έως G8 προσδιορίζουν την επιφάνεια της απέναντι έδρας και δίνονται επίσης με διαδοχική σειρά (Εικόνα 25).

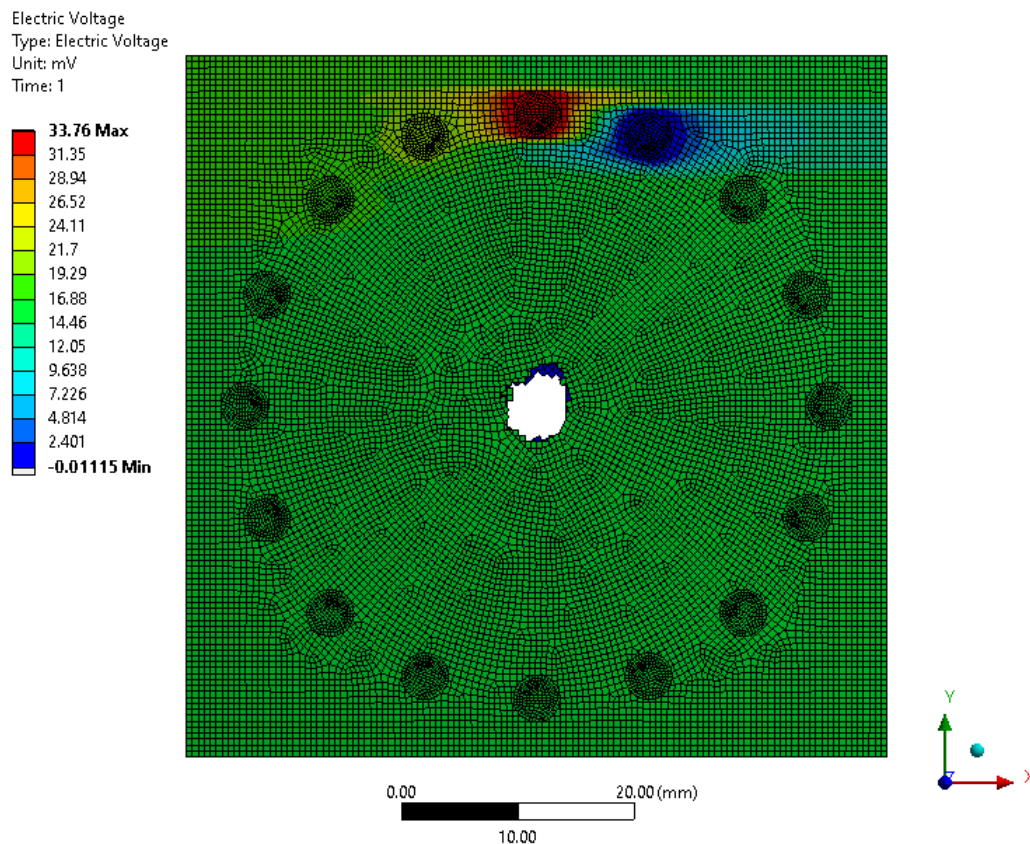
4.4.2 Δεδομένα πλέγματος του εξεταζόμενου δοκιμίου

Στην περίπτωση μας το πλέγμα του δοκιμίου αποτελείται αποκλειστικά από εξάεδρα στοιχεία χωρίς ενδιάμεσους κόμβους. Για αυτόν τον λόγο, ο κώδικας εξαγωγής του πλέγματος έχει αναπτυχθεί ώστε να εξάγει μόνο τα εξάεδρα στοιχεία. Επίσης, τα δεδομένα κάθε κόμβου δεν περιλαμβάνουν την καταγραφή του αριθμού των συνοριακών συνθηκών (PS), όπως επίσης και την καταγραφή ενός διακριτικού αριθμού του συστήματος συντεταγμένων κατά τον οποίο ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες (CD), καθώς δεν περιλαμβάνονται κανένα δεδομένο του μοντέλου πέραν από αυτά του πλέγματος.

Το εξαγόμενο πλέγμα στην περίπτωση μας αποτελείται από εννιά διαφορετικά σώματα, εκ των οποίων τα πέντε αφορούν τις στρώσεις συνθέτου υλικού και τα τέσσερα αφορούν τις διεπιφάνειες μεταξύ των στρώσεων. Το πλέγμα που αφορά τα σώματα των ακροδεκτών δεν εξάγεται, καθώς η γεωμετρία και το πλέγμα τους δεν αλλάζει κατά την κρούση, οπότε χρησιμοποιούνται όπως δημιουργήθηκαν πριν την κρούση.

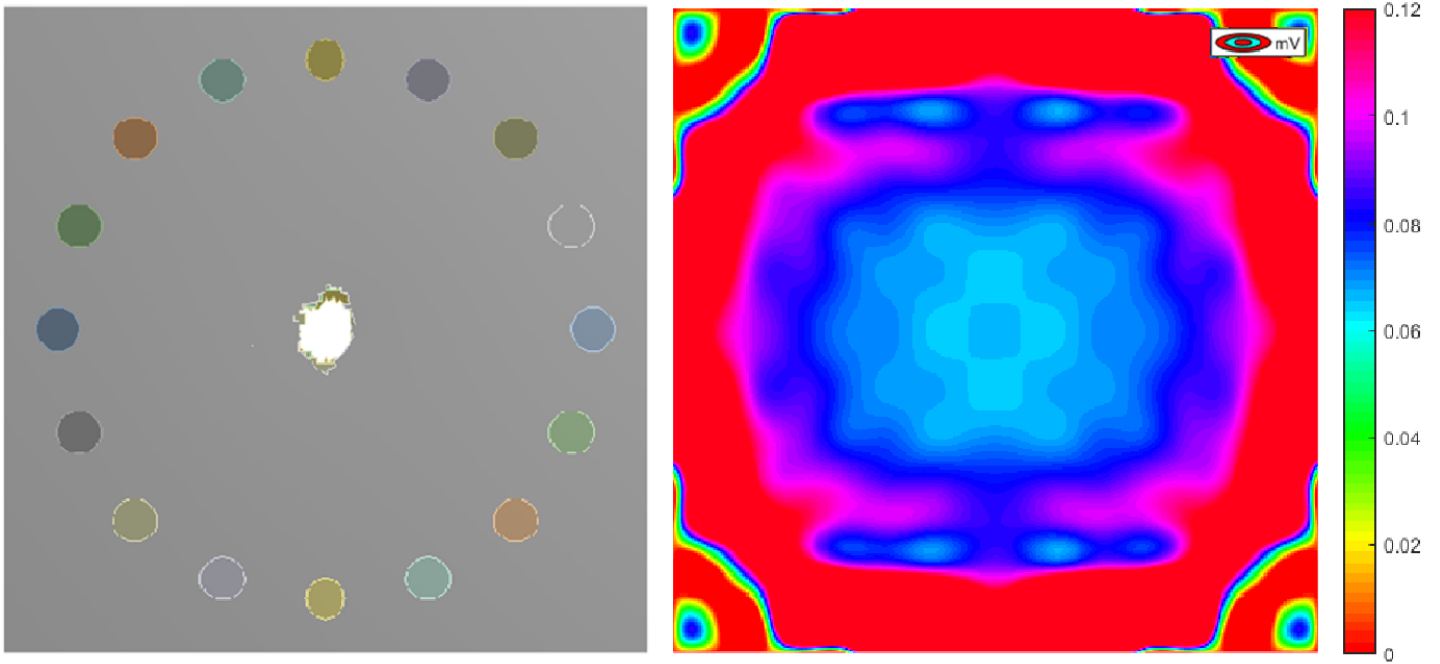
4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Χρησιμοποιώντας το δοκίμιο που προέκυψε από την προσομοίωση της κρούσης χαμηλής ταχύτητας, εφαρμόζεται το πρώτο βήμα της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού, που περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων με τη μέθοδο των γειτόνων. Όπως προαναφέρθηκε, απαιτείται η εφαρμογή μίας επαναληπτικής διαδικασίας με τόσες επαναλήψεις όσα είναι τα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρόδια. Στην Εικόνα 26 απεικονίζεται η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού σε μία από τις προσομοιώσεις που εκπονήθηκαν κατά τη διαδικασία συλλογής δεδομένων διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού.



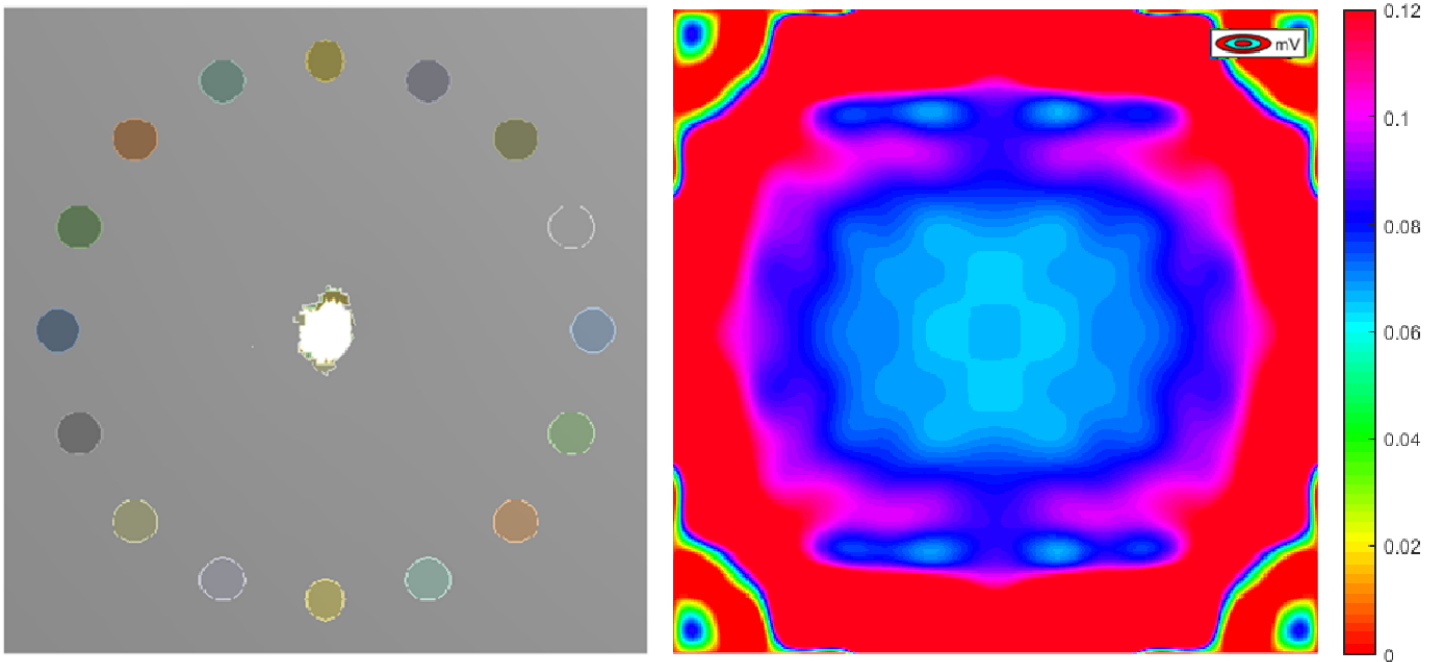
Εικόνα 26. Ενδεικτικό αποτέλεσμα της κατανομής του ηλεκτρικού δυναμικού στο δοκίμιο σε μία από τις επαναλήψεις της μεθόδου των γειτόνων.

Με το πέρας της συλλογής των απαραίτητων δεδομένων, εφαρμόστηκε η χαρτογράφηση του ηλεκτρικού δυναμικού μέσω του κώδικα ανακατασκευής εικόνας (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1), αντίστοιχα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην ενότητα 3.



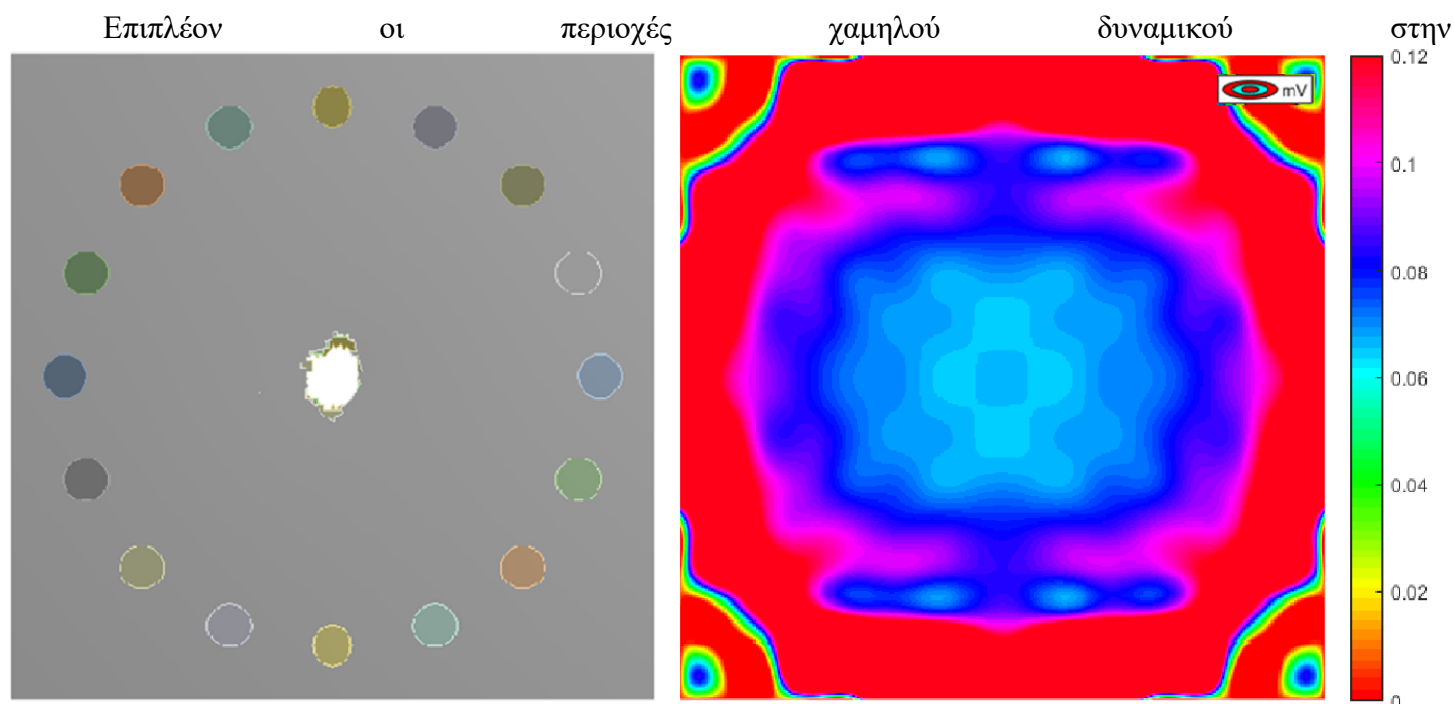
Εικόνα 27 Απεικόνιση της χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού σε ανισότροπο δοκίμιο με τη διαμόρφωση των δεκαέξι επιφανειακών ηλεκτροδίων που υπέστη κρούση.

Στην



Εικόνα 27 παρατίθεται η γεωμετρία του δοκιμίου που υπέστη κρούση χαμηλής ταχύτητας καθώς και το αποτέλεσμα από τη χαρτογράφηση του ηλεκτρικού δυναμικού. Παρατηρείται πως η μέθοδος αυτή προβλέπει μεν την ύπαρξη βλάβης, όχι όμως τη μορφή της. Συγκεκριμένα, πολλές εφαρμογές συνθέτων υλικών διαθέτουν συστήματα συνεχούς παρακολούθησης της δομικής τους ακεραιότητας, όπου απαιτείται η ανίχνευση οποιασδήποτε βλάβης άμεσα, χωρίς να είναι αναγκαία η γνώση της ακριβής θέσης της. Στα συστήματα αυτά, η

ανίχνευση μίας ενδεχόμενης βλάβης ακολουθείται αργότερα από άλλες διαδικασίες για την εξακρίβωση της θέσης της.



Εικόνα 27 διαχέονται σε μικρό βαθμό κατά μήκος του άξονα x, όπως παρατηρήθηκε στην περίπτωση του δοκιμίου με την κεντρική οπή, που αποδείχθηκε πως οφείλεται στην υψηλότερη τιμή αγωγιμότητας κατά μήκος του άξονα x της άνω στρώσης. Μεγάλης σημασίας όμως είναι η αστεροειδής μορφή του ηλεκτρικού δυναμικού που παρουσιάζεται στο κέντρο της ανακατασκευασμένης εικόνας, η οποία έχει μεγάλη ομοιότητα με την μορφή των αποκολλήσεων στην παραμορφωμένη γεωμετρία. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται η αστεροειδής περιοχή όπου στο κέντρο της εμφανίζεται μία σχεδόν κυκλική περιοχή, η οποία μπορεί να αναπαριστά την οπή που δημιουργήθηκε κατά την κρούση. Τα ευρήματα αυτά μαζί με αυτά της προηγούμενης ενότητας επικυρώνουν τα αποτελέσματα των υπολογιστικών μοντέλων που παρουσιάστηκαν στη διατριβή αυτή.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Στο παράρτημα αυτό παρατίθεται ο κώδικας χαρτογράφησης του ηλεκτρικού δυναμικού από τα δεδομένα των διαφορών δυναμικού των περιφερειακών ηλεκτροδίων, τα οποία συλλέχθηκαν σύμφωνα με τη μέθοδο των γειτόνων. Η χρήση του κώδικα απαιτεί την εισαγωγή των δεδομένων σε έναν πίνακα 16 x 16. Συγκεκριμένα, κάθε γραμμή του πίνακα περιέχει τα δεδομένα διαφοράς δυναμικού από μία προσομοίωση, ενώ κάθε στήλη περιέχει τη διαφορά δυναμικού ενός ζεύγους ηλεκτροδίων, όπως εικονίζεται στον Πίνακας 6. Πιο αναλυτικά, η στήλη 1 περιέχει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων 1 και 2, η στήλη 2 περιέχει τη διαφορά του δυναμικού

μεταξύ των ηλεκτροδίων 2 και 3, κτλ. Οι διαφορές δυναμικού δεν καταγράφονται στις περιπτώσεις που ένα από τα δύο ηλεκτρόδια καταμέτρησης είναι ηλεκτρόδιο ρεύματος ή ηλεκτρόδιο γείωσης, όπως ορίζει η μέθοδος των γειτόνων.

Μετρήσεις Διαφοράς Δυναμικού																	
Ηλεκτρόδιο ρεύματος	Ηλεκτρόδιο γείωσης	Ζεύγος ηλεκτροδίων καταμέτρησης															
		1_2	2_3	3_4	4_5	5_6	6_7	7_8	8_9	9_10	10_11	11_12	12_13	13_14	14_15	15_16	16_1
1	2	-	-	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	-
2	3	-	-	-	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value
3	4	value	-	-	-	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value
4	5	value	value	-	-	-	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value
5	6	value	value	value	-	-	-	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value
6	7	value	value	value	value	-	-	-	value	value	value	value	value	value	value	value	value
7	8	value	value	value	value	value	-	-	-	value	value	value	value	value	value	value	value
8	9	value	value	value	value	value	value	-	-	-	value	value	value	value	value	value	value
9	10	value	value	value	value	value	value	value	-	-	-	value	value	value	value	value	value
10	11	value	value	value	value	value	value	value	value	-	-	-	value	value	value	value	value
11	12	value	value	value	value	value	value	value	value	value	-	-	-	value	value	value	value
12	13	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	-	-	-	value	value	value
13	14	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	-	-	-	value	value
14	15	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	-	-	-	value
15	16	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	-	-	-
16	1	-	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	value	-	-

Πίνακας 6. Ενδεικτικός πίνακας καταγραφής των δεδομένων διαφοράς δυναμικού βάσει της μεθόδου των γειτόνων.

Κώδικας Χαρτογράφησης Ηλεκτρικού Δυναμικού σε C++

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

struct mapPoint {
    double value[208], final[208];
    double x[208], y[208];
    double times[208];
};

int main()
{
    const char *file_read="16pins_impacted.txt", *file_write="mapping_impacted.txt";
    int i=0, max=0, min=0, k=0, j=0, c=0, v=0;
    FILE *fr, *fw;
    char inpstr[90];
    double temp[16];
    double differences[16][16], pin[17][2];
    mapPoint map_point;
    int w[]={6, 10, 12, 14, 14, 16, 16, 16, 16, 16, 16, 14, 14, 12, 10, 6};

    fr=fopen(file_read,"r");
    if ((fr = fopen(file_read,"r")) == NULL){
        printf("file not found\n");
    }

    //diabasma timwn diaforas dynamikoy -pinaka 16x16- apo arxeio txt
    for (i = 0; i < 16 ; i++){
        fscanf(fr,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf", temp[0], temp[1], temp[2], temp[3],
temp[4], temp[5], temp[6], temp[7], temp[8], temp[9], temp[10], temp[11], temp[12], temp[13], temp[14], temp[15]);
        for (j = 0; j < 16; j++) {
```

```

        differences[i][j] = temp[j];
    }
}

// anathesh syntetagmenwn stoys akrodektes apo 1 ews 16
// anakataskeyazoume eikona 16x16 kai thewroyme pws ta hlektrodia vriskontai perimetrika se enan kyklo aktinas 8 kai
syntetagmenvn kentrou (8,8)
i = 0;
for (i=0; i<16; i++){

    pin[i][0] = 8+8*cos(-i*(2*3.14159265/16));
    pin[i][1] = 8+8*sin(-i*(2*3.14159265/16));
    //printf("%lf, %lf\n", pin[i][0], pin[i][1]);
}

//dhmioyrgia timwn kai gia to 17 pin- den yparxei -gia texnikous logous
pin[16][0] = pin[0][0];
pin[16][1] = pin[0][1];

//ekxwrhsh timwn syntetagmenwn twv kentrvn twv keliwn toy telikoy mapping
i = 0;
for (i=0; i<208; i++){

    //arxikopoihsh kapoiwn timwn
    map_point.times[i]=0.0;
    map_point.value[i]=0.0;
    map_point.x[i]=0.0;
    map_point.y[i]=0.0;
    map_point.final[i]=0.0;

    if (i<6){
        map_point.x[i] = i+5.5;
        map_point.y[i] = 0.5;
    }else if (i<16){
        map_point.x[i] = i-2.5;
        map_point.y[i] = 1.5;
    }else if (i<28){
        map_point.x[i] = i-13.5;
        map_point.y[i] = 2.5;
    }else if (i<42){
        map_point.x[i] = i-26.5;
        map_point.y[i] = 3.5;
    }else if (i<56){
        map_point.x[i] = i-40.5;
        map_point.y[i] = 4.5;
    }else if (i<72){
        map_point.x[i] = i-55.5;
        map_point.y[i] = 5.5;
    }else if (i<88){
        map_point.x[i] = i-71.5;
        map_point.y[i] = 6.5;
    }else if (i<104){
        map_point.x[i] = i-87.5;
        map_point.y[i] = 7.5;
    }else if (i<120){
        map_point.x[i] = i-103.5;
        map_point.y[i] = 8.5;
    }else if (i<136){
        map_point.x[i] = i-119.5;
        map_point.y[i] = 9.5;
    }else if (i<152){
        map_point.x[i] = i-135.5;
        map_point.y[i] = 10.5;
    }
}

```

```

}else if (i<166){
    map_point.x[i] = i-150.5;
    map_point.y[i] = 11.5;
}else if (i<180){
    map_point.x[i] = i-164.5;
    map_point.y[i] = 12.5;
}else if (i<192){
    map_point.x[i] = i-177.5;
    map_point.y[i] = 13.5;
}else if (i<202){
    map_point.x[i] = i-188.5;
    map_point.y[i] = 14.5;
}else if (i<208){
    map_point.x[i] = i-196.5;
    map_point.y[i] = 15.5;
}
}
fclose(fr);

```

//eyresh synarthsewn eytheiwn kai ekxwrhsh timwn keliwn toy telikoy mapping
//oi kata periptwsh dyo eytheies einai panta parallhles!

```

for (i=0; i<16; i++){
    printf("\n");
    for (j=0; j<16; j++){
        printf("%lf ", differences[i][j]);
        //den lambanontai ypopsin oi diafores dynamikoy tw'n pins otan ena apo ayta taytizetai me specific bounary pin
        c=i-1;
        if (c===-1){ c=15;}
        v=i+1;
        if (v==16){ v=0;}
        if ((j==c)|| (j==i)|| (j==v)){
            continue;
        }
        for (k=0; k<208; k++){
            //periptwsh katakoryfwn
            if (pin[j+1][0]==pin[i][0]){
                //eyresh deksias kai aristerhs eytheias
                if (pin[i][0]>pin[i+1][0]){
                    max=i;
                    min=i+1;
                }else {
                    max=i+1;
                    min=i;
                }
                X1=pin[min][0];
                X2=pin[max][0];
                if (map_point.x[k]>X1 && map_point.x[k]<X2){
                    map_point.value[k] += differences[i][j];
                    map_point.times[k] += 1;
                }
            }
            //periptwsh orizontiwn kai me klish
        }else {
            //eyresh anw kai katw eytheias
            if (pin[j+1][1]>pin[j][1]){
                max=j+1;
                min=j;
            }else {
                max=j;
                min=j+1;
            }
            A=(pin[j+1][1]-pin[i][1])/(pin[j+1][0]-pin[i][0]);
            B1=pin[max][1]-A*pin[max][0];

```

```

        B2=pin[min][1]-A*pin[min][0];
        Y1=A*map_point.x[k]+B1;
        Y2=A*map_point.x[k]+B2;
        if ((map_point.y[k]>=Y2) && (map_point.y[k]<=Y1)) {
            map_point.value[k] += differences[i][j];
            map_point.times[k] += 1.0;
        }
        // printf("%lf, %lf\n", map_point.value[6], map_point.times[6]);
    }
}

}

}
//eyresh meswn orwn
fw=fopen(file_write, "w");

int m=w[0];
i=0;
fprintf(fw, ".,.,.");
for (k=0; k<208; k++){
    map_point.final[k]=map_point.value[k]/map_point.times[k];
    if (k==m){
        printf("\n");
        fprintf(fw, "\n");
        for (c=1; c<=((16-w[i+1])/2); c++){
            fprintf(fw, ",");
        }
        i++;
        m+=w[i];
    }
    fprintf(fw, "%lf,", map_point.final[k]);
    //printf("%lf ", map_point.times[k]);
}

fclose(fw);
}

```

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] F. C. Campbell, Structural composite materials, ASM International, 2010.
- [2] I. M. Daniel and O. Ishai, Engineering mechanics of composite materials, 2nd ed., Oxford University Press, 2006.
- [3] H. Abramovich, “Introduction to composite materials,” in Stability and Vibrations of Thin Walled Composite Structures, Elsevier, 2017, pp. 1–47.
- [4] M. C. Tanzi, S. Farè, and G. Candiani, “Organization, Structure, and Properties of Materials,” in Foundations of Biomaterials Engineering, Elsevier, 2019, pp. 3–103.
- [5] C. T. Lynch, Metal Matrix Composites, 1st ed., CRC Press, 1972.
- [6] R. Talreja, “Fatigue of composite materials: damage mechanisms and fatigue-life diagrams,” Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 1981, vol. 378, no. 1775, pp. 461–475.
- [7] V. Giurgiutiu, “Damage and Failure of Aerospace Composites,” in Structural Health Monitoring of Aerospace Composites, Elsevier, 2016, pp. 125–175.
- [8] “Delamination,” Wikipedia, Accessed: Aug. 31, 2020. Available: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Delamination&oldid=961845032>.
- [9] D. Hull and T. W. Clyne, An Introduction to Composite Materials, 2nd ed. Cambridge University Press, 1996.
- [10] M. R. Khoshravan, M. Samaei, and A. Paykani, “Numerical investigation on the position of holes for reducing stress concentration in composite plates with bolted and riveted joints,” Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2011, vol. 1, no. 4, p 041005.
- [11] G. Rajan, Structural Health Monitoring of Composite Structures Using Fiber Optic Methods, 1st ed. CRC Press, 2016.
- [12] A. Ghobadi, “Common Type of Damages in Composites and Their Inspections,” WJM, 2017, vol. 07, no. 02, pp. 24–33.
- [13] X. Li, “A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, vol. 42, no. 2, pp. 157–165.
- [14] J. Cai, L. Qiu, S. Yuan, L. Shi, P. Liu, and D. Liang, “Structural Health Monitoring for Composite Materials,” in Composites and Their Applications, IntechOpen, 2012, pp 37-60.
- [15] “Comparative Vacuum Monitoring (CVM),” WikID, the Industrial Design Engineering wiki. Accessed Sep. 14, 2020. Available: [http://wikid.io.tudelft.nl/WikID/index.php/Comparative_Vacuum_Monitoring_\(CVM\)](http://wikid.io.tudelft.nl/WikID/index.php/Comparative_Vacuum_Monitoring_(CVM)).

- [16] R. Harikumar, R. Prabu, and S. Raghavan, "Electrical Impedance Tomography (EIT) and Its Medical Applications: A Review," *International Journal of Soft Computing and Engineering*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 193-198
- [17] A. Baltopoulos, A. Vavouliotis, V. Kostopoulos, N. Polydorides, and L. Pambaguian, "Electrical tomography as a tool for non-destructive assessment of composite structures," in *Emerging Technologies in Non-Destructive Testing V, Proceedings of the 5th Conference on Emerging Technologies in NDT*, 2012, pp. 389–394.
- [18] S. Grammatikos, "Structural Integrity assessment of aerostructures using innovative Non-Destructive Evaluation Techniques," Phd in University of Ioannina, 2012.
- [19] "Ansys® Academic Research Mechanical, Release 19.1, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc."
- [20] "Implicit vs. Explicit FEM: What Is the Difference?," *SimScale*, Accessed: Oct. 09, 2020. Available: <https://www.simscale.com/blog/2019/01/implicit-vs-explicit-fem/>.
- [21] J. H. Greenwood, S. Lebeda, and J. Bernasconi, "The anisotropic electrical resistivity of a carbon fibre reinforced plastic disc and its use as a transducer," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1975, vol. 8, no. 5, pp. 369–370.
- [22] R. Prakash and C. N. Owston, "Eddy-current method for the determination of lay-up order in cross-plyed crfp laminates," *Composites*, 1976, vol. 7, no. 2, pp. 88–92.
- [23] K. J. Lodge, "The electrical properties of joints in carbon fibre composites," *Composites*, 1982, vol. 13, no. 3, pp. 305–310.
- [24] A. Paipetis, *Emerging Technologies in Non-destructive Testing V*, CRC Press, 2011.
- [25] D. Ivančević and I. Smojver, "Explicit multiscale modelling of impact damage on laminated composites – Part II: Multiscale analyses," *Composite Structures*, 2016, vol. 145, pp. 259–268.
- [26] A. Sellitto, S. Saputo, F. Di Caprio, A. Riccio, A. Russo, and V. Acanfora, "Numerical–Experimental Correlation of Impact-Induced Damages in CFRP Laminates," *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 11, p. 2372.
- [27] "Hexcel® HexPly® 916 120°C Curing Epoxy Matrix datasheet.," Accessed: Oct. 08, 2020. Available: http://www.lookpolymers.com/polymer_Hexcel-HexPly-916-120C-Curing-Epoxy-Matrix.php.
- [28] R. Kamiya and T. Oya, "Mechanical behavior of fiber/matrix interfaces in CFRP sheets subjected to plastic deformation," *MATEC Web Conf.*, 2016, vol. 80, p. 16008.
- [29] Y. Shi, T. Swait, and C. Soutis, "Modelling damage evolution in composite laminates subjected to low velocity impact," *Composite Structures*, 2012, vol. 94, no. 9, pp. 2902–2913.

- [30] A. Cherniaev and I. Telichev, "Meso-scale modeling of hypervelocity impact damage in composite laminates," *Composites Part B: Engineering*, 2015, vol. 74, pp. 95–103.
- [31] E. J. Barbero and M. Shahbazi, "Determination of material properties for ANSYS progressive damage analysis of laminated composites," *Composite Structures*, 2017, vol. 176, pp. 768–779.
- [32] M. Wicklein, S. Ryan, D. M. White, and R. A. Clegg, "Hypervelocity impact on CFRP: Testing, material modelling, and numerical simulation," *International Journal of Impact Engineering*, 2008, vol. 35, no. 12, pp. 1861–1869.
- [33] J. K. Chen, F. A. Allahdadi, and C. T. Sun, "A Quadratic Yield Function for Fiber-Reinforced Composites," *Journal of Composite Materials*, 1997, vol. 31, no. 8, pp. 788–811.
- [34] S. Ryan and W. Riedel, "PRELIMINARY THEORETICAL MATERIAL CHARACTERIZATION FOR NUMERICAL MODELLING OF COMPOSITE STRUCTURES," *International Astronautical Federation - 56th International Astronautical Congress*, 2005, vol. 6, pp. 3805-3815.
- [35] G. Gopinath, "Progressive damage and failure of unidirectional fiber reinforced laminates under impact loading with composite properties derived from a micro-mechanics approach," Phd in Virginia Polytechnic Institute and State University, 2011.
- [36] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura, and J. J. M. S. Domingues, "Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs," *International Journal of Solids and Structures*, 2008, vol. 45, no. 5, pp. 1497–1512.
- [37] "Impact;" Accessed: Oct. 10, 2020. Available: <https://www.instron.us/en-US/Testing Solutions/By Test Type/Impact>.
- [38] "How to Decrypt the MSC Nastran .bdf or .dat Input File." Accessed: Oct. 10, 2020. Available: <http://mscnastrannovice.blogspot.com/2013/10/how-to-decrypt-msc-nastran-bdf-or-dat.html>.
- [39] "MSC NASTRAN 2012, Quick Reference Guide."