



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Εντοπισμός Ρωγμών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ρούσσος Βασίλειος Μάριος

του Αλκιβιάδη

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Εντοπισμός Ρωγμών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ρούσσος Βασίλειος Μάριος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10^η Ιουλίου 2024.

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Παναγόπουλος
Επίκουρος καθηγητής

.....
Εμμανουήλ Χουρδάκης
Επίκουρος καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2024

.....
Ρούσσος Βασίλειος Μάριος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ρούσσος Βασίλειος Μάριος, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ανάλυση και η περιγραφή τεχνικών για τον εντοπισμό ρωγμών. Αρχικά, γίνεται μία εισαγωγή στις ρωγμές ενώ έπειτα πραγματοποιείται μία κατηγοριοποίησή τους ανάλογα με το είδος, το μέγεθός τους και άλλα χαρακτηριστικά.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μία σκιαγράφηση των αισθητήρων με ιδιαίτερη έμφαση στους ακουστικούς αισθητήρες επειδή αυτοί βρίσκονται σε πολλές εφαρμογές που αφορούν την ανίχνευση σχισμών. Στο κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται μία εισαγωγή στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο καθώς και στα πιεζοηλεκτρικά υλικά. Επίσης, στην συνέχεια γίνεται μία περιγραφή στα ηλεκτροακουστικά ανάλογα και στους μορφομετατροπείς, των οποίων η λειτουργία στηρίζεται στον πιεζοηλεκτρισμό.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται μία εκτενής περιγραφή των πιο διαδεδομένων τεχνικών για τον εντοπισμό ρωγμών με χρήση αισθητήρων, κυρίως χρησιμοποιώντας ακουστικούς και ηλεκτρομαγνητικούς. Παράλληλα με την ανίχνευση διάφορων ειδών ρωγμών περιγράφεται και η διαδικασία προσδιορισμού των χαρακτηριστικών της κάθε ρωγμής, δηλαδή του μεγέθους, του σχήματος και του βάθους στο οποίο βρίσκεται. Στο κεφάλαιο 5 αναλύονται νέες μέθοδοι για τον εντοπισμό σχισμών, οι οποίες βασίζονται στην όραση υπολογιστών, στη μηχανική μάθηση και στα νευρωνικά δίκτυα.

Στο κεφάλαιο 6, αναφέρονται χειρονακτικοί τρόποι για τον εντοπισμό ρωγμών και κυρίως η ανάλυση και η επεξήγηση τεχνικών οι οποίες αφορούν την θερμογραφία. Επίσης, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται και στην περιγραφή του μοντέλου αντιστάθμισης του CSA.

Λέξεις – Κλειδιά

Ρωγμή, εντοπισμός ρωγμών, αισθητήρες, πιεζοηλεκτρισμός, θερμογραφία, σχισμές

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the analysis and description of techniques for the detection of cracks. First, an introduction to cracks is given, followed by their classification based on their type, size and other characteristics.

In the 2nd chapter an outline of the sensors is provided, with particular emphasis on acoustic sensors because they are found in many applications related to crack detection. In chapter 3, an introduction to the piezoelectric phenomenon as well as in the piezoelectric materials is provided. In addition, there is a description for the electro-acoustic analogues and the transducers, whose operation is based on piezoelectricity.

In chapter 4 an extensive description of the most widespread techniques for crack detection using sensors is provided, mainly focusing on acoustic and electromagnetic ones. Along with the detection of various types of cracks, the process of determining the characteristics of each crack such as size, shape and depth in which it is located, is also described. In chapter 5, new methods for crack detection are analyzed, which are based on computer vision, machine learning and neural networks.

In chapter 6, manual methods for crack detection are discussed, with particular focus on techniques involving thermography. Additionally, special emphasis is also placed on the CSA's compensation model.

Key-Words

Crack, crack detection, sensors, piezoelectricity, thermography, fractures

ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χριστοφόρου Ευάγγελο για την βοήθειά του στην διάρκεια της εργασίας, την καθοδήγησή του καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ώστε να εργαστώ και να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην υποψήφιο διδάκτορα Νεφέλη Μότση για την πολύτιμη καθοδήγησή της καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας, τον χρόνο που αφιέρωσε και τις συμβουλές και γνώσεις που μου μετέδωσε και συνέλαβαν τα μέγιστα στην προσπάθειά μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κοντινούς μου ανθρώπους και την οικογένειά μου για την συμπαράσταση και υποστήριξή τους τόσο κατά τη διάρκεια της εργασίας όσο και στη διάρκεια όλων αυτών των χρόνων.

Ρούσσος Βασίλειος Μάριος

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1	1
1. 1 Εισαγωγή	1
1.2 Ορισμός και κατηγοριοποίηση των ρωγμών	3
1.3 Ιστορικά για τεχνικές εντοπισμού ρωγμών	4
1.4 Είδη ρωγμών	6
Κεφάλαιο 2 Αισθητήρες.....	7
2.1 Ορισμός	7
2.2 Είδη Αισθητήρων.....	7
2.3 Ακουστικοί Αισθητήρες.....	8
2.3.1 Εφαρμογές ακουστικών αισθητήρων	8
2.3.1.1 Εντοπισμός βλαβών	8
2.3.1.2 Ρομποτική	9
2.3.1.3 Αυτοκίνητα και άλλα μέσα μεταφοράς	9
2.3.1.4 Υγεία.....	9
2.3.1.5 Ασφάλεια και επιτήρηση	9
2.3.1.6 Ψυχαγωγία	9
2.3.1.7 Αυτόματη οικία	9
Κεφάλαιο 3 Πιεζοηλεκτρισμός	11
3.1 Εντοπισμός ρωγμών και πιεζοηλεκτρισμός.....	11
3.2 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	11
3.3 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.....	12
3.4 Πιεζοηλεκτρικά υλικά	13
3.5 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών υλικών	14
3.6 Ηλεκτρομηχανοακουστικά Ανάλογα	16
3.7 Ισοδύναμα Κυκλώματα Μετατροπών.....	18
3.10.1 Παράδειγμα σύγχρονου μορφομετατροπέα	18
3.8 Αναπαράσταση Μορφομετατροπέα ως ηλεκτρικό κύκλωμα	19
3.9 Αμοιβαιότητα	20

Κεφάλαιο 4 Εντοπισμός ρωγμών με χρήση αισθητήρων.....	21
4.1 Τεχνικές Εντοπισμού Ρωγμών.....	21
4.2 Εντοπισμός ρωγμών σε υλικά με μαγνητικές ιδιότητες.....	22
4.3 Εντοπισμός ρωγμών βασισμένος σε αισθητήρες.....	23
4.4 Αισθητήρες για εντοπισμό ρωγμών.....	24
4.4.1 Παθητικοί Radio Frequency Identification – RFID αισθητήρες	24
4.4.3 Αισθητήρες υψηλής ευαισθησίας για ανίχνευση ρωγμών με βάση τα μικροκύματα	25
4.4 Σύγχρονος τρόπος κατασκευής ακουστικών αισθητήρων βασισμένος στις νανοίνες.....	27
4.5 Εντοπισμός μικρό-ρωγμών με χρήση ακουστικών αισθητήρων.....	28
4.5.1 Πειραματική ρύθμιση και ροή εργασίας αισθητήρα τύπου Vallen	30
4.6 Κριτήρια για διευκρίνιση βάθους, μεγέθους και άλλων χαρακτηριστικών μίας ρωγμής	33
4.7 Αρχή ανίχνευσης ρωγμών με BFET (Balanced Field Electromagnetic Technique - BFET).....	34
4.7.2 Μαθηματική επεξήγηση του μοντέλου αμοιβαίας επαγωγής.....	36
4.8.1 Νόμος διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου	39
4.9 Συμπεράσματα.....	39
Κεφάλαιο 5 Τεχνικές εντοπισμού ρωγμών με AI, βαθειά μάθηση και μηχανική μάθηση	43
5.1 Εισαγωγή.....	43
5.2 Κατηγοριοποίηση χαρακτηριστικών των ρωγμών για καθεμία μέθοδο.....	43
5.3.Εντοπισμός ρωγμών με βάση την επεξεργασία εικόνας:.....	45
5.3.1 Περιορισμοί των τεχνικών ανίχνευσης ρωγμών με βάση την επεξεργασία εικόνας	48
5.4 Εντοπισμός ρωγμών με βάση την μηχανική μάθηση:.....	49
5.8 Τεχνικές εντοπισμού ρωγμών.....	51
5.8.1 Εντοπισμός ρωγμών με βάση την μηχανική μάθηση.....	51
5.8.5 Ανίχνευση ρωγμών χρησιμοποιώντας βαθιά νευρωνικά δίκτυα.....	52
5.8.6 Τεχνικές τμηματισμού ρωγμών	53
5.7 Μέθοδοι εντοπισμού ρωγμών βασισμένοι σε φωτογραφίες.....	54

Κεφάλαιο 6 Χειρονακτικοί τρόποι για εντοπισμό ρωγμών	55
6.1 Εισαγωγή	55
6.2 Ανίχνευση ρωγμών με λέιζερ	55
6.3 Θερμογραφία Επαγωγής - Induction Thermography	58
6.4 Θερμογραφία Κλειδώματος -- Lock-in thermography (LIT).....	59
6.5 Παλμική Θερμογραφία - Pulsed Thermography (PT)	63
6.6 Περιγραφή ηλεκτρομαγνητικού συστήματος θερμογραφίας με παλμούς	64
6.7 Σύστημα τύπου κάψουλας με προκαθορισμένο εύρος συχνοτήτων για εντοπισμό ρωγμών	67
6.8 Μοντέλο αντιστάθμισης του CSA	69
Κεφάλαιο 7 Σύνοψη και Συμπεράσματα	71
7.1 Σύνοψη	71
7.2 Επίλογος	72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	73

Κεφάλαιο 1

1. 1 Εισαγωγή

Στη σύγχρονη εποχή, λόγω των αυξημένων κατασκευών και οικοδομημάτων προκύπτουν πολλά αντίστοιχα προβλήματα τα οποία καλούμαστε να λύσουμε. Κάποια από αυτά δεν καθίστανται καίριας σημασίας, ενώ άλλα είναι ουσιώδη και απαιτούν άμεση αντιμετώπιση. Ήδη από τα πρώτα χρόνια της ύπαρξης τους, οι άνθρωποι προκειμένου να βελτιώσουν και να απλοποιήσουν τη ζωή τους, δημιουργούσαν κατασκευές, στην αρχή μεγάλες όπως σπίτια και μηχανήματα, ενώ μετέπειτα μέχρι και σήμερα έχουν αναπτυχθεί και πολύ μικρές κατασκευές, όπως αισθητήρες, κινητά τηλέφωνα και άλλες μη ορατές στο γυμνό μάτι, οι οποίες είναι βασισμένες στην νανοτεχνολογία.

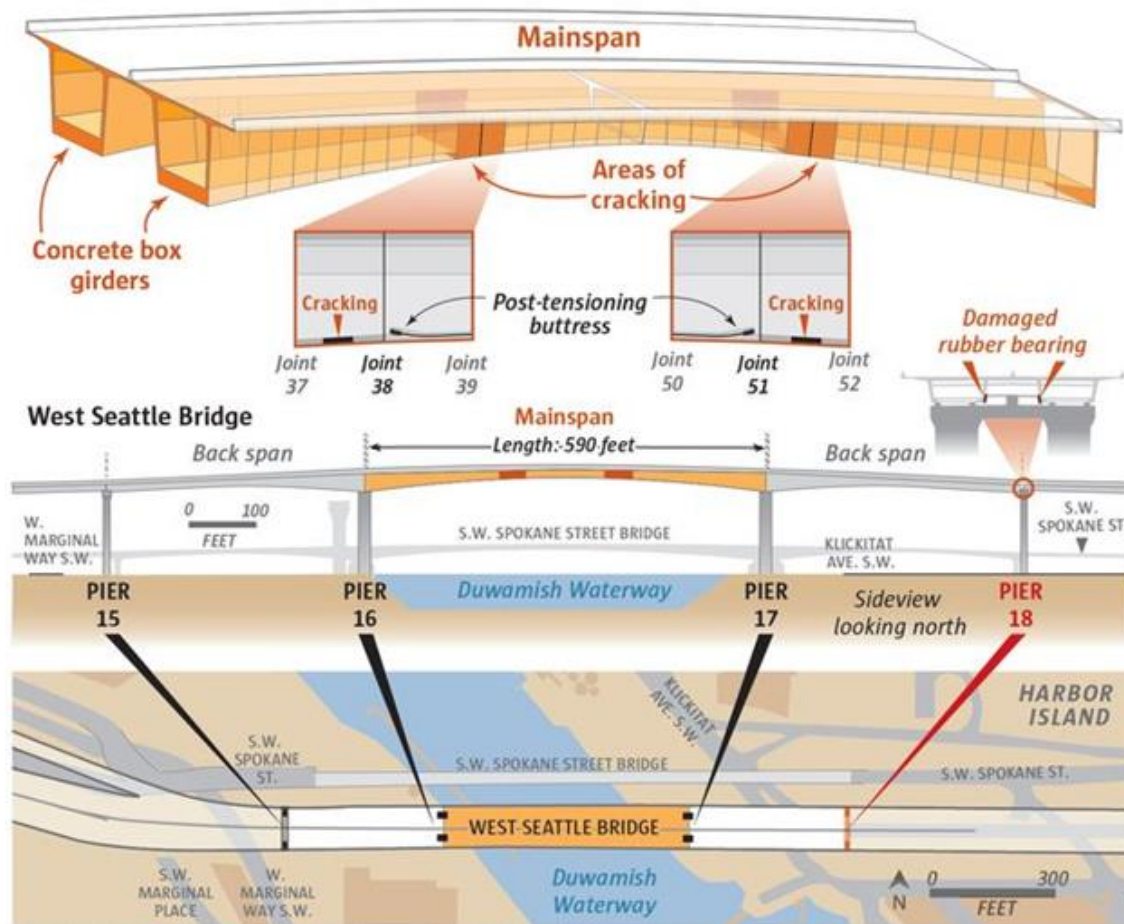
Προφανώς, όπως είναι αναμενόμενο, με τον ραγδαίο ρυθμό στον οποίο οι άνθρωποι κατασκευάζουν πράγματα, καθίσταται λογική η ύπαρξη δυσκολιών και προκλήσεων. Τα κατασκευαστικά προβλήματα μπορούν να προκύψουν σε κάθε στάδιο του έργου και να επηρεάσουν τόσο την ποιότητα όσο και το χρονοδιάγραμμα. Πιθανές αιτίες συνιστούν η ανεπαρκής προετοιμασία, η υπερβολική εμπιστοσύνη στην εμπειρία και όχι τόσο στις γνώσεις και τη φυσική καθώς και από την πρόωρη συλλογή δεδομένων αγνοώντας την θεωρία και την βιβλιογραφία που έχει αναπτυχθεί [1]. Ένα σοβαρό πρόβλημα μπορεί να είναι η ανεπάρκεια υλικών ή η κακή ποιότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις και υψηλότερα έξοδα. Παράλληλα, η κακή ποιότητα των υλικών σε συνδυασμό με την ελλιπή διαχείριση των αποβλήτων μίας οικοδομής προμηνύει σοβαρά ενδεχόμενα μόλυνσης στις αντίστοιχες περιοχές [2]. Επίσης, προβλήματα στον σχεδιασμό ή στην εκτέλεση μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητα αποτελέσματα, όπως διαρροές, συντρίμια ή ακόμα και ατυχήματα εργαζομένων. Επιπλέον, η κακή συντήρηση και η έλλειψη πρόληψης μπορούν να οδηγήσουν σε προβλήματα ασφαλείας ή σε βλάβες που είναι δύσκολο να διορθωθούν αργότερα.

Ένα από τα προβλήματα, και ίσως το κυριότερο όσον αφορά στις ανθρώπινες κατασκευές είναι η δημιουργία ρωγμών. Η ύπαρξή τους υφίσταται τόσο στις μεγάλες και οικοδομικές κατασκευές όσο και στις μικρές, ακόμα και σε αυτές που δεν είναι ορατές από το γυμνό μάτι. Χρειάζεται να ειπωθεί, ότι πολλές φορές η ύπαρξη σχισμών μπορεί να είναι και αμελητέας σημασίας, ή ακόμα και ανύπαρκτες, ενώ άλλες φορές η αργοπορημένη ανίχνευση και διόρθωσή τους μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες, από το να χαλάσει ένα μηχανήμα ή μία ηλεκτρονική συσκευή, μέχρι το να προκληθεί ένα ατύχημα, για παράδειγμα να χαλάσει μία γέφυρα, ή να σπάσουν κάποια από τα ερείσματα ενός κτηρίου.



Σχήμα 1: Παράδειγμα Ρωγμών στην γέφυρα West Seattle Bridge στην Ουάσινγκτον στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής [3]

Στο Σχήμα 1 απεικονίζονται οι ρωγμές που προκλήθηκαν στην στη γέφυρα West Seattle Bridge στην Ουάσινγκτον στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής . Οι πιο πιθανές αιτίες εξαιτίας των οποίων προκλήθηκαν οι βλάβες είναι ότι η γέφυρα των 220.000 τόνων αποδυναμώθηκε σταδιακά από τη μακροπρόθεσμη συρρίκνωση του σκυροδέματος εντός του τσιμέντου που υποστηρίζουν το δίκτυο πάνω από το Duwamish Waterway. Επιπλέον, με το πέρασμα των χρόνων και το πέρασμα εκατομμυρίων βαρέων οχημάτων είναι λογικό σταδιακά να καταπονούνται τα ερείσματα της. Τοπικοί εμπειρογνώμονες έχουν επισημάνει μια έμφυτη συμπεριφορά του σκυροδέματος που είναι γνωστή ως ερπυσμό, η οποία προκαλεί μερικές γέφυρες σε όλον τον κόσμο να καθίστανται επισφαλείς πριν το αναμενόμενο όριο που πρόβλεπαν τα σχέδια κατασκευής και οι μελέτες. Τέλος, ο κακός σχεδιασμός των καλωδίων πιθανότατα προκάλεσε τα καλώδια χάλυβα υψηλής τάσης εντός των πλαισίων, τα οποία συμπιέζουν και ενισχύουν τη γέφυρα, να χαλαρώσουν, όπως δήλωσε ο καθηγητής του Πανεπιστημίου της Ουάσινγκτον Τζον Στάντον. Αυτό με τη σειρά του αποδυναμώνει το σκυρόδεμα και το καθιστά ευάλωτο σε ρωγμές. Η ολική ζημία που προκλήθηκε στην γέφυρα αυτή φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2 αναλυτικά [3].



Σχήμα 2: Τα είδη των ρωγμών στην γέφυρα West Seattle Bridge [3]

1.2 Ορισμός και κατηγοριοποίηση των ρωγμών

Οι ρωγμές μπορούν να οριστούν ως ακαθόριστες διακοπές ή ασυνέχειες σε δομικά υλικά. Γενικά, αποτελούν συνέπεια της τοπικής αστοχίας του υλικού με την πάροδο του χρόνου. Μπορούν να προκληθούν από πολλούς παράγοντες, όπως είναι η πίεση από εξωτερικά φορτία, λυγισμό, κόπωση, φυσικές διαδικασίες και χημικές διαδικασίες, όπως η διάβρωση. Συνήθως, οι σχισμές που απαιτούν προσοχή ξεκινούν με μέγεθος ανοίγματος 0,05–0,1 χιλιοστών περίπου. Γίνονται πραγματικά ανησυχητικές σε περίπου 0,3–0,4 χιλιοστά ενώ μπορούν να εξελιχθούν σε επικίνδυνα μεγέθη από μερικά χιλιοστά έως μερικά εκατοστά. Κατά βάση οι μικρές ρωγμές μπορεί να οδηγήσουν σε ανεπαρκή λειτουργικότητα, ενώ οι μεγάλες μπορούν να οδηγήσουν σε δομικές αποτυχίες. Ειδικότερα, οι ρωγμές στο σκυρόδεμα στα αρχικά χρόνια μιας κατασκευής μπορούν να επηρεάσουν σοβαρά την αντοχή μιας κατασκευής. Σε εύθραυστα υλικά, η εμφάνιση σχισμών μπορεί να οδηγήσει σε άμεση αποτυχία. Ωστόσο, σε εύκαμπτα

υλικά, η ανάπτυξη των ρωγμών είναι συνήθως σταδιακή. Είναι σημαντικό να ανιχνεύονται όλοι τύποι ρωγμών πριν φτάσουν σε κρίσιμο επίπεδο και προκαλέσουν την αποτυχία δομικών στοιχείων ή ολόκληρων δομών.

Όπως προαναφέρθηκε, οι ρωγμές διακόπτουν την συνέχεια του υλικού, με άμεσο αποτέλεσμα την αλλοίωση των ιδιοτήτων του μιας και αυτές είναι κατανεμημένες ομοιόμορφα πάνω σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα, μια ρωγμή δεν αλλάζει μόνο το τοπικό πεδίο παραμόρφωσης στη δομή, αλλά επίσης επηρεάζει και άλλες ιδιότητες όπως είναι οι μαγνητικές ιδιότητες και η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Κάποιες από τις πιο συνήθεις επιπτώσεις τους είναι ότι μπορούν να αλλάξουν την τιμή της ηλεκτρικής και μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού, τη φυσική συχνότητα και το σχήμα της δομής. Αναλυτικότερα, σε ορισμένα υλικά, όπως σε ηλεκτρικούς αγωγούς ή ημιαγωγούς, οι ρωγμές μπορεί να μειώσουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ρωγμές μπορούν να διακόπτουν την ροή των φορτίων και να δημιουργούν αντιστάθμιση. Ωστόσο, σε άλλα υλικά, όπως σε μεταλλικούς αγωγούς, οι ρωγμές μπορεί να αυξήσουν την αγωγιμότητα λόγω της διαταραχής του κρυσταλλικού πλέγματος, η οποία διευκολύνει την κίνηση των φορτίων. Επιπλέον, η έναρξη και η εξάπλωση των ρωγμών μπορεί να παράγει ακουστικά κύματα, χαρακτηριστικό το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για τον εντοπισμό τους [4].

Πέρα από τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των υλικών, η ύπαρξη σχισμών προκαλεί αλλαγές και στις θερμικές ιδιότητες του υλικού. Σε πολλά υλικά, οι ρωγμές μπορούν να μειώσουν τη θερμική αγωγιμότητα επειδή διακόπτουν τη μετάδοση της θερμότητας από το ένα μέρος του υλικού στο άλλο. Ωστόσο, υπάρχουν εξαιρέσεις, όπως σε ορισμένα μεταλλικά υλικά, όπου οι ρωγμές μπορούν να αυξήσουν τη θερμική αγωγιμότητα επιτρέποντας στη θερμότητα να διαδίδεται μέσω αυτών [5].

Γενικά, η επίδραση των ρωγμών στις ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι ο τύπος του υλικού, το είδος και το πάχος των ρωγμών, και οι συνθήκες λειτουργίας. Τέλος, να σημειωθεί ότι κάποια υλικά και συνθετικά αυτών που είναι εκ φύσεως επιρρεπή σε ζημιές και με την πάροδο του χρόνου, η δημιουργία ρωγμών και μικροσκοπικών ζημιών επηρεάζει τις θερμομηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες τους, γεγονός που τελικά οδηγεί στην ολική αποτυχία των υλικών [5].

1.3 Ιστορικά για τεχνικές εντοπισμού ρωγμών

Είναι αντιληπτό ότι η ανίχνευση όλων των ειδών ρωγμών είναι καίριας σημασίας, ειδικότερα πριν φτάσουν σε κρίσιμο επίπεδο και προκαλέσουν την αποτυχία δομικών στοιχείων ή ολόκληρων δομών. Οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν, και επίσης εφαρμόζονται επί του παρόντος, για την ανίχνευση και χαρακτηρισμό των ρωγμών, περιλαμβάνουν τακτικούς οπτικούς ελέγχους και μη-καταστροφική αξιολόγηση (Non-

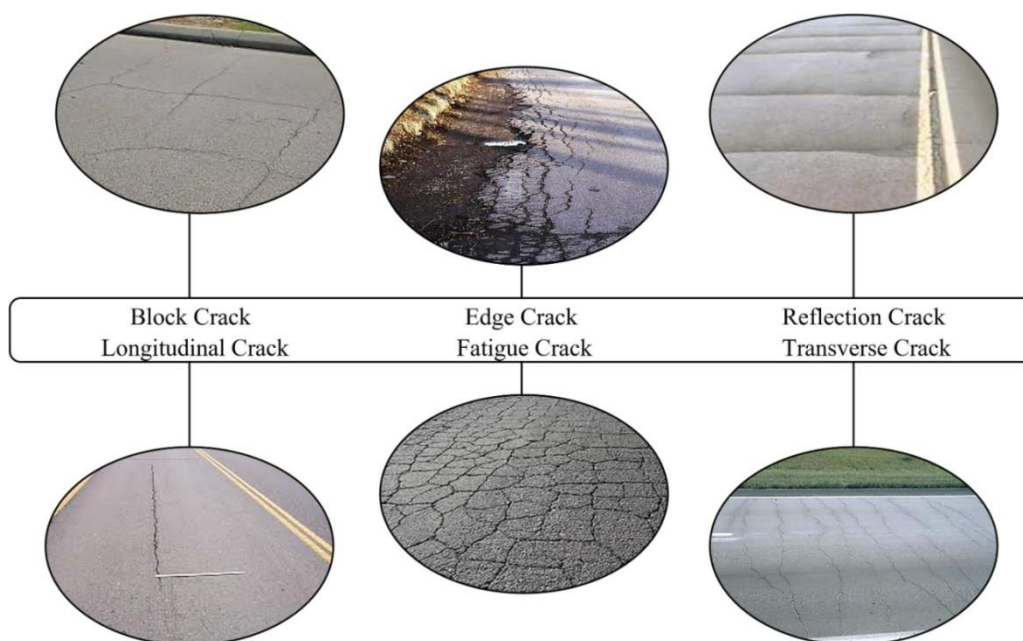
Destructive Evaluation - NDE), η οποία βασίζεται σε παραδοσιακά όργανα και προσεγγίσεις. Οι παραδοσιακές μέθοδοι μπορεί να είναι ακριβές, χρονοβόρες και συχνά αναξιόπιστες κατά τα αρχικά στάδια της δημιουργίας ρωγμών, αποτυγχάνοντας να ανιχνεύσουν ζημιές, ιδιαίτερα αυτές μικρού μεγέθους. Οι οπτικοί έλεγχοι μπορεί να είναι αναξιόπιστοι επειδή κάποια είδη ρωγμών είναι μικρά ή δυσδιάκριτα. Επιπλέον, αν ένας ρήγμα συμβεί μεταξύ δύο επιθεωρήσεων, μπορεί να εξαπλωθεί και να φτάσει σε κρίσιμο μέγεθος πριν ανιχνευθεί και χαρακτηριστεί επαρκώς. Ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη για πιο ακριβείς, αξιόπιστες και οικονομικές μεθόδους για την ουσιαστική ανίχνευση και χαρακτηρισμό των ρωγμών σε πραγματικό χρόνο. Επιβάλλεται να ειπωθεί, ότι η ουσιαστική αξιολόγηση σε πραγματικό χρόνο μπορεί να επιτευχθεί μέσω συνεχούς παρακολούθησης.

Στη σύγχρονη εποχή, για την ανίχνευση και τον χαρακτηρισμό των ρωγμών χρησιμοποιούνται όλες οι αλλαγές στις φυσικές και τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες που αυτές προκαλούν στο υλικό. Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές βασίζονται σε αισθητήρες παραμορφώσεων (ηλεκτρικούς ή οπτικής ίνας), πιεζοηλεκτρικούς και ακουστικούς αισθητήρες (εκπομπή ακουστικών κυμάτων και παρακολούθηση της διάδοσης του κύματος) και επιταχυνσιόμετρα (αναλυτική κατάσταση καμπύλης). Νέες προσεγγίσεις περιλαμβάνουν μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (Micro-Electromechanical System - MEMS), πιεζοηλεκτρικές βαφές, νανοτεχνολογία, ηλεκτρονικά μεγάλης επιφάνειας (large - Area Electronics - LAE) και τεχνικές ανιχνευτικών μεθόδων μη επαφής με χρήση λέιζερ.

Επιπρόσθετα, μπορούν να συνδυαστούν διάφοροι αλγόριθμοι ανάλυσης δεδομένων με τεχνολογίες ανίχνευσης προκειμένου να ανιχνευθούν και να χαρακτηριστούν ρωγμές [4]. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και της πληροφορικής έχουν αναπτυχθεί τεχνικές για εντοπισμό ελαττωμάτων οι οποίες βασίζονται στην επεξεργασία εικόνας και στο επιστημονικό πεδίο της όρασης υπολογιστών αλλά και στην μηχανική μάθηση. Όσον αφορά στην ανάλυση εικόνας, γίνεται χρήση φωτογραφιών υψηλής ακρίβειας οι οποίες έπειτα από κάποια επεξεργασία και λαμβάνοντας υπ' όψιν κάποια κριτήρια, εντοπίζεται αν υπάρχει κάποια σχισμή με πολύ υψηλή ακρίβεια [6]. Όσον αφορά στη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης για τον εντοπισμό ρωγμών η διαδικασία είναι λίγο διαφορετική. Αρχικά, εκπαιδεύεται ένας ταξινομητής με ένα σύνολο δεδομένων από εικόνες, άλλες με ρωγμές και άλλες χωρίς, μαζί με την πληροφορία σε κάθε εικόνα αν αυτή απεικονίζει το αντικείμενο με ρωγμή ή χωρίς. Επομένως, μετά την εκπαίδευση, ο ταξινομητής αυτός καθίσταται ικανός να κρίνει με μεγάλη ακρίβεια αν μία φωτογραφία δείχνει το υπό εξέταση αντικείμενο με ρωγμή ή άφθαρτο [7].

1.4 Είδη ρωγμών

Οι ρωγμές είναι λεπτές σκούρες γραμμές που εμφανίζονται στην επιφάνεια του στερεού υλικού κατά μήκος του οποίου έχει χωριστεί χωρίς να διασπάται. Οι ρωγμές σε οποιαδήποτε επιφάνεια σκυροδέματος μπορεί να προκύψουν λόγω συρρίκνωσης και επέκτασης υλικού, μετατόπισης θεμελίων, πρόωρης ξήρανσης, υπερφόρτωσης, υδροστατικής πίεσης, μη ισορροπημένου μείγματος, πρησμένου εδάφους, κακής υποδοχής εδάφης, δονήσεις και σεισμοί. Σύμφωνα με μια έκθεση, η οποία διεξήχθη από την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητόδρομων (Federal Highway Administration) των Ηνωμένων Πολιτειών τον Δεκέμβριο του 2019, οι ρωγμές κατηγοριοποιούνται κυρίως σε ρωγμές λόγω κόπωσης, σε ρωγμές σε σχήμα μπλοκ, ρωγμές σε σχηματισμό σαν κλαδιά άκρων, διαμήκεις ρωγμές, εγκάρσιες ρωγμές, και ρωγμές αντανάκλασης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3 [8].



Σχήμα 3: Είδη Ρωγμών [9]

Οι ρωγμές μπορεί να είναι ορατές στο ανθρώπινο μάτι ως ένα απλό ελάττωμα. Ωστόσο, μία μικρή ρωγμή μπορεί να μετατραπεί σε ένα μεγαλύτερο και πιο απειλητικό ελάττωμα. Μερικές ρωγμές είναι δύσκολο να παρατηρηθούν λόγω του πολύπλοκου μοτίβου υφής στο φόντο. Διαφορετικοί τύποι ρωγμών έχουν διαφορετικά μεγέθη. Παραδείγματος χάριν, οι γραμμικές ρωγμές έχουν πλάτος 0,1 mm και μπορούν να παρατηρηθούν σε καθαρό φόντο, αλλά είναι δύσκολο να το γίνει αντιληπτό με την ποικιλία φωτισμού, ενώ οι λεπτές ρωγμές έχουν πλάτος έως 1 mm. Μερικές ρωγμές πλάτους έως 5 mm δεν θεωρούνται επικίνδυνες και μπορούν να θεραπευτούν. Ωστόσο, αυτές οι ρωγμές άνω των 5 mm πλάτους μπορεί να προκαλέσουν εκτεταμένες ζημιές και απαιτούν κατάλληλες εργασίες επισκευής ή αντικατάστασης σε ορισμένες περιπτώσεις [9].

Κεφάλαιο 2 Αισθητήρες

2.1 Ορισμός

Ο αισθητήρας αποτελεί μια συσκευή η οποία είναι ικανή να ανιχνεύει φυσικά, χημικά και βιολογικά σήματα καθώς και να παρέχει μέσα για την καταγραφή και επεξεργασία αυτών των σημάτων. Τα τελευταία χρόνια, με την ταχεία εξέλιξη της τεχνολογίας, παρατηρήθηκε μια σημαντική μείωση στο μέγεθος των διαθέσιμων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, όπως και μια αποτελεσματική μείωση στο κόστος παραγωγής τους. Αυτή η πρόοδος στην τεχνολογία συνέβαλε στη δημιουργία αισθητήρων. Μεταξύ των φυσικών σημάτων που μπορεί να ανιχνεύσει ένας αισθητήρας περιλαμβάνονται η θερμοκρασία, η πίεση, οι δονήσεις ή ακόμα και ήχους, καθώς και το πλάτος ενός μαγνητικού ή ηλεκτρικού πεδίου. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι, οι αισθητήρες κατέχουν δυνατότητες, οι οποίες τους καθιστούν κατάλληλους για χρήση σε πολλές εφαρμογές στον τομέα της βιομηχανίας [10].

2.2 Είδη Αισθητήρων

Όπως είναι γνωστό, στις μέρες μας υπάρχουν πάρα πολλές διαφορετικές κατηγορίες αισθητήρων. Για παράδειγμα, συνήθως κατηγορία αποτελούν οι οπτικοί αισθητήρες, οι οποίοι χωρίζονται σε φωτοαντιστάσεις, φωτοδίοδους και φωτοτρανζίστορ και βοηθούν στο να ανιχνεύονται την ύπαρξη και την ένταση του φωτός στο συγκεκριμένο περιβάλλον που βρίσκονται. Ένα άλλο είδος αισθητήρα συνιστούν οι αισθητήρες θερμοκρασίας, όπως τα θερμίστορς και τα θερμοζεύγη, και αυτοί οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της θερμοκρασίας. Επιπρόσθετα, θεμελιώδης σημασίας κατηγορία στην σύγχρονη τεχνολογία συνιστούν οι ηλεκτρομαγνητικοί αισθητήρες, όπως οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου. Να ειπωθεί επίσης, ότι άλλη μία κατηγορία είναι οι αισθητήρες πίεσης και βάρους, με κυριότερα είδη τα μανόμετρα υγρού και αερίου, τους χωρητικούς αισθητήρες, τους επαγωγικούς αισθητήρες, τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και αισθητήρες πιεζοαντίστασης και τους μετρητές μηχανικής τάσης και κυψελίδες φορτίου. Τέλος, υπάρχουν οι αισθητήρες ανίχνευσης υπέρυθρης ακτινοβολίας, οι αισθητήρες ροής, οι οποίοι βασίζονται στην αρχή της επαγωγής του Faraday και χρησιμοποιούνται στη μελέτη αγώγιμων υγρών καθώς και οι βιολογικοί αισθητήρες (βιοαισθητήρες) οι οποίοι παρέχουν ποσοτικές ή ημιποσοτικές πληροφορίες χρησιμοποιώντας ένα στοιχείο βιολογικής αναγνώρισης [11].

2.3 Ακουστικοί Αισθητήρες

Γενικά, στη σύγχρονη εποχή υπάρχουν διάφορα είδη αισθητήρων για διαφορετικού τύπου σημάτων, καθώς και αισθητήρες που μετράνε το ίδιο είδος σήματος, απλά σε διαφορετική κλίμακα και ευαισθησία. Οι ακουστικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ηχητικών σημάτων. Αυτοί οι αισθητήρες λαμβάνουν τον ήχο και στην συνέχεια μετατρέπουν το συγκεκριμένο σήμα μετατρέπουν σε μορφή ηλεκτρικού σήματος. Έπειτα, αυτό το ηλεκτρικό σήμα μπορεί να δρομολογηθεί είτε προς μια ηλεκτρονική συσκευή για αποθήκευση, είτε προς μια οθόνη για την απεικόνιση του ήχου [10].

Από όλες τις διαφορετικές κατηγορίες αισθητήρων που έχουν αναπτυχθεί, οι κυριότεροι οι οποίοι χρησιμοποιούνται στον εντοπισμό ρωγμών είναι οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες. Η πιο γνωστή και βασική μέθοδος χρήσης τους είναι με την μετάδοση ενός ηλεκτρομηχανικού σήματος από έναν πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα σε έναν άλλο, με μέσο διάδοσης το υπό εξέταση αντικείμενο. Στη συνέχεια, εξετάζεται η μεταβολή της αντίδρασης ηλεκτρομηχανικής συχνότητας σε σύγκριση με τις παραμέτρους ρωγμών και κινούμενων φορτίων, και ανάλογα την τιμή της φαίνεται αν υπάρχει κάποια σχισμή στο εν λόγω αντικείμενο [12]. Να ειπωθεί, επίσης, ότι με παρόμοιο τρόπο λειτουργούν και οι αισθητήρες θερμοκρασίας και μαγνητοαντίστασης σε εφαρμογές που αφορούν στην ανίχνευση ρωγμών. Ειδικότερα, στους μαγνητικούς αισθητήρες η παρουσία ρωγμών ιδιαίτερα στις μεταλλικές δομές μεταβάλλει την αντίσταση εισόδου και την αντανάκλαστική φάση σήματος του αισθητήρα με άμεσο αποτέλεσμα να εξάγονται πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τη θέση και το μέγεθος της [13].

2.3.1 Εφαρμογές ακουστικών αισθητήρων

Στη σύγχρονη εποχή οι εφαρμογές των ακουστικών αισθητήρων ποικίλουν και χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος επιστημονικών και πρακτικών εφαρμογών. Πιο συγκεκριμένα, μερικές από αυτές που αφορούν τη συλλογή και την ανάλυση πληροφοριών ήχου είναι οι εξής:

2.3.1.1 Εντοπισμός βλαβών

Όταν σε κάποιο μέρος του εξοπλισμού ή του μηχανήματος εντοπίζεται κάποιος μη συνηθισμένος ήχος τότε υπάρχει περίπτωση να υπάρχει βλάβη και συνακόλουθα να χρειάζεται έλεγχος ή συντήρηση. Για παράδειγμα, στις ανεμογεννήτριες, ένα πιθανό εμπόδιο στη χρήση τους για τη συγκομιδή αιολικής ενέργειας είναι η συντήρηση των λεπίδων των ανεμόμυλων. Επομένως, για την ανίχνευση ζημιών χρησιμοποιούνται συχνά αισθητήρες, συμπεριλαμβανομένων των οπτικών ινών και των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων [14]. Μία ακόμη εφαρμογή αισθητήρων για τον εντοπισμό βλαβών, είναι

στα αυτοκίνητα και πιο συγκεκριμένα με την χρήση αισθητήρων ελέγχεται η ομαλή λειτουργία του στροφόμετρου, των δεικτών θερμοκρασίας, των καμερών καθώς και άλλων λειτουργιών ενός αυτοκινήτου [15].

2.3.1.2 Ρομποτική

Οι ακουστικοί αισθητήρες ενσωματώνονται πάνω στο ρομπότ προκειμένου αυτό να αντιλαμβάνεται το γύρω περιβάλλον του, να εντοπίζει τα εμπόδια και να τα αποφεύγει [16] [17].

2.3.1.3 Αυτοκίνητα και άλλα μέσα μεταφοράς

Στα οχήματα, οι ακουστικοί αισθητήρες βοηθούν στην ανίχνευση , μέσω της αναγνώρισης ήχου, πιθανών κινδύνων καθώς και χρησιμοποιούνται για υποβοήθηση στάθμευσης [18] [19]. Παράδειγμα αντίστοιχου αισθητήρα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.

2.3.1.4 Υγεία

Στον τομέα αυτό, οι ακουστικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για διαγνωστικούς σκοπούς στην μετάδοση και την ενίσχυση σωματικών ήχων και βρίσκονται πάνω σε διάφορα ιατρικά όργανα όπως τα στηθοσκόπια [20].

2.3.1.5 Ασφάλεια και επιτήρηση

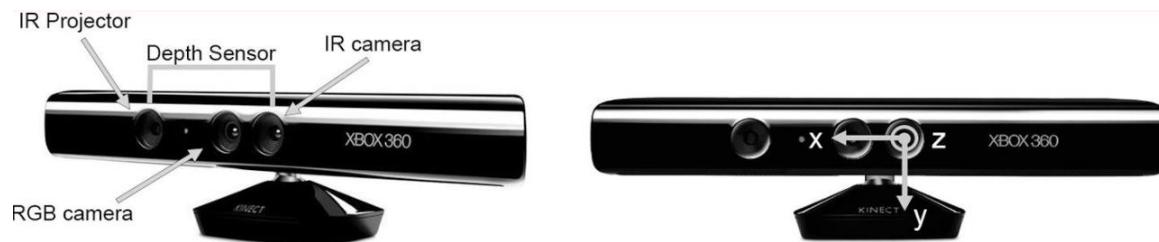
Πολλοί ακουστικοί αισθητήρες έχουν εφαρμογή στον εντοπισμό εισβολών και πυροβολισμών σε κάποια προκαθορισμένη περίμετρο ασφαλείας σε διάφορα περιβάλλοντα [21] [22].

2.3.1.6 Ψυχαγωγία

Είναι συνήθης η χρήση ακουστικών αισθητήρων σε συσκευές εγγραφής ήχου, σε μουσικά όργανα καθώς και σε διάφορες τεχνολογίες ήχου.

2.3.1.7 Αυτόματη οικία

Σε συστήματα έξυπνου σπιτιού γίνεται χρήση ακουστικών αισθητήρων με σκοπό να επιτρέπονται οι φωνητικές εντολές και ταυτόχρονα να εντοπίζονται συγκεκριμένοι ήχοι όπως καπνοί ή σπάσιμο τζαμιών [23].



Σχήμα 4: Ακουστικός αισθητήρας αυτοκινήτου για αυτόματη ακουστική χαρτογράφηση σε τρισδιάστατες επιφάνειες [24]

Κεφάλαιο 3 Πιεζοηλεκτρισμός

3.1 Εντοπισμός ρωγμών και πιεζοηλεκτρισμός

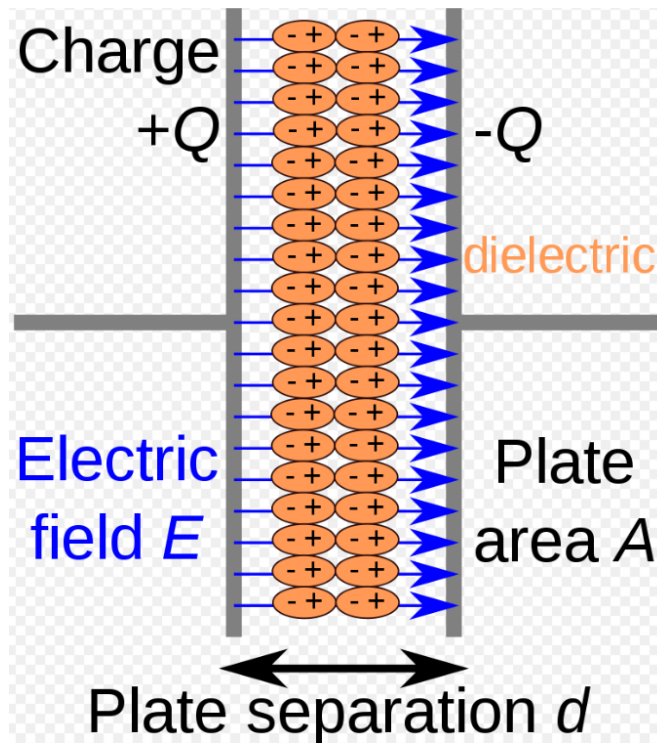
Όπως είναι προφανές, οι επιστήμονες και οι μηχανικοί στην προσπάθειά τους να ανιχνεύουν και εν συνεχεία να επιδιορθώνουν τυχόν σχισμές και ζημιές στις κατασκευές τους, πειραματίστηκαν και οργάνωσαν διάφορες μεθόδους για τον σκοπό αυτό. Οι περισσότερες από αυτές τις τεχνικές στηρίζονται στις αρχές του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Αυτό σημαίνει ότι χρησιμοποιούνται πιεζοηλεκτρικά υλικά, των οποίων οι ηλεκτρικές ιδιότητες μεταβάλλονται ανάλογα την μηχανική τάση που ασκείται σε αυτά, και αντίστροφα, και ανάλογα το μέγεθος της αλλαγής που υφίσταται κρίνεται αν υπάρχει κάποια ρωγμή. Κατά κύριο λόγο, οι τεχνικές εντοπισμού ρωγμών με βάση το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, έχουν ευρεία γκάμα εφαρμογών, είναι εύκολες και με μεγάλη ακρίβεια [25].

3.2 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Η αρχή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου ορίζεται από την ιδιότητα ενός υλικού να παράγει διαφορά δυναμικού όταν υποβάλλεται σε πίεση, γνωστή ως θετικό πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, ή να υφίσταται μηχανική καταπόνηση όταν εφαρμόζεται σε αυτό τάση, γνωστή ως αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Χαρακτηριστικό αποτελεί το γεγονός ότι η εφαρμογή υψηλής συχνότητας πίεσης παράγει ρεύμα υψηλής συχνότητας, ενώ αντίστοιχα η εφαρμογή υψηλής συχνότητας ηλεκτρικών σημάτων σε πιεζοηλεκτρικά κεραμικά οδηγεί στη δημιουργία ηχητικών σημάτων υψηλής συχνότητας, γνωστών ως υπερηχητικά σήματα. Ουσιαστικά, τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά επιτρέπουν τη μετατροπή μεταξύ μηχανικής και ηλεκτρικής ενέργειας διατηρώντας την κλίμακα της συχνότητας διέγερσης, προσφέροντας ένα ενδιαφέρον παράδειγμα αμοιβαίας αντιστοιχίας μεταξύ των δύο μορφών ενέργειας [10][26].

Από τις 32 κατηγορίες κρυστάλλων που υπάρχουν στη φύση, οι 21 δεν έχουν κέντρο συμμετρίας και από αυτές, οι 20 παρουσιάζουν άμεσα πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι λόγω τις ομοιομορφίας αυτών των 20 ειδών κρυστάλλων και της ύπαρξης ενός κέντρου συμμετρίας, η τοποθέτηση των μορίων γίνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε στην μία μεριά του κρυστάλλου να συσσωρεύονται τα θετικά ιόντα και στην άλλη τα αρνητικά, με άμεσο αποτέλεσμα την ύπαρξη πόλωσης. Η συσσώρευση αυτή των μορίων αναπαρίσταται στο Σχήμα 25, και όπως γίνεται και αντιληπτό από αυτό το σχήμα, Οποιοδήποτε χωρισμένο χωρικά φορτίο θα

οδηγήσει σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, και ως εκ τούτου σε μια ηλεκτρική δυναμική. Η πόλωση αυτή είναι ευαίσθητη σε ηλεκτρικές και μηχανικές διεγέρσεις [27].



Σχήμα 25: Παράδειγμα δομής κρυστάλλου με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες [27]

Για τους πολικούς κρυστάλλους, για τους οποίους η πόλωση είναι διαφορετική του μηδενός, το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο εκδηλώνεται αλλάζοντας το μέγεθος ή την κατεύθυνση της πόλωσης ή και τα δύο. Αντίθετα, για τους μη πολικούς αλλά πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους μια πόλωση διαφορετική από το μηδέν προκαλείται μόνο με την εφαρμογή ενός μηχανικού φορτίου [27].

3.3 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικού φαινομένου

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, όπως είναι προφανές μιας και αποτελεί ιδιότητα που συνδέει μηχανική και ηλεκτρική τάση, βρίσκει εφαρμογές σε πάρα πολλούς τεχνολογικούς τομείς. Ωστόσο, γίνεται κατά προσέγγιση ένας διαχωρισμός των εφαρμογών αυτού του φαινομένου σε δύο κατηγορίες: Η πρώτη περιλαμβάνει εφαρμογές μετατροπών ενέργειας υπερήχων δόνησης-ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων ηλεκτροακουστικών μορφοτροπών, υδροακουστικών

μορφοτροπέων και υπερηχητικών μορφοτροπέων κ.λπ., καθώς και άλλων αισθητήρων, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει εφαρμογές που αφορούν την ενέργεια δόνησης [26].

3.4 Πιεζοηλεκτρικά υλικά

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι κάποια στοιχεία, όπως ο χαλαζίας τα οποία διαθέτουν την ιδιότητα κατά την οποία όταν σε αυτό το υλικό ασκείται κάποιου είδους μηχανική τάση τότε ως αποτέλεσμα παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Μάλιστα αν η τάση που ασκηθεί είναι ανάλογη με την τοποθέτηση κάποιας μάζας πάνω στο υλικό, τότε το ηλεκτρικό φορτίο που προκύπτει είναι ανάλογο με την μάζα του αντικειμένου αυτού. Ιστορικά, η ανακάλυψη του άμεσου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου έγινε από τους αδελφούς Curie το 1880, ενώ το 1881, το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο απεικονίστηκε γραφικά. Αυτό συνέβη όταν εφαρμόζοντας τάση στον κρύσταλλο, ο κρύσταλλος αυτός παραμορφώθηκε λόγω της τάσης του πλέγματος που προκλήθηκε από το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Επιβάλλεται σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι, όταν αλλάζει κατεύθυνση η τάση η οποία ασκείται στο υλικό, τότε αλλάζει και φορά της ηλεκτρικής τάσης που δημιουργείται. Με λίγα λόγια, όταν η τάση αντιστρέφεται, αντιστοίχως αντιστρέφεται και η φορά της διαφοράς δυναμικού. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο λειτουργεί ως σύζευξη μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων του κρυστάλλου και του κυκλώματος [26] [28].

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας υλικών αποτελούν οι πιεζοηλεκτρικές κάψες (ή πιεζοηλεκτρικοί δίσκοι), οι οποίες αποτελούνται από ένα δισκίο πιεζοκεραμικού υλικού (PZT), στις επιφάνειες του οποίου γίνεται εναπόθεση λεπτού στρώματος ασημιού (που λειτουργεί ως προστασία του κεραμικού και ως ηλεκτρόδιο) και είναι τοποθετημένο σε μια μπρούτζινη βάση [29].

Τα σχήματα και οι διαστάσεις των πιεζοηλεκτρικών εξαρτημάτων μπορούν να επιλεγούν εντός των ορίων που καθορίζονται από τα εργαλεία, αν και οι διαστάσεις εξαρτώνται το ένα από το άλλο. Προφανώς, υπάρχουν ελάχιστες διαστάσεις οι οποίες καθορίζονται από φυσικά και τεχνολογικά όρια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πάχος του τοιχώματος καθώς αυτό περιορίζεται από τη μηχανική αντοχή του κεραμικού κατά την κατεργασία. Γενικός κανόνας είναι ότι όσο πιο μεγάλη είναι μία πιεζοηλεκτρική κάψα τόσο καλύτερη απόκριση έχει [30].

3.5 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών υλικών

1) Μετατροπέας

Ο μηχανικός μετατροπέας είναι ένα μηχανήμα που παράγει μηχανικούς κραδασμούς που κινούνται από ηλεκτρικά πεδία ή μετατρέπει τους μηχανικούς κραδασμούς σε ηλεκτρικά σήματα. Η αρχή σχεδίασης του μορφοτροπέα χρησιμοποιεί την κάμψη της δόνησης των πολυμερών πιεζοηλεκτρικών μονόμορφων ή πιεζοηλεκτρικών δίμορφων (συσκευές που αποτελούνται από ένα και δύο αντίστοιχα στρώματα πιεζοηλεκτρικού υλικού) που κινούνται από εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, ενώ οι πιεζοηλεκτρικές πολυμερείς ηλεκτροακουστικές συσκευές χρησιμοποιούν την πλευρική πιεζοηλεκτρική επίδραση των πολυμερών. Βασικός τομέας χρήσης των πολυμερών αποτελούν οι υποβρύχιοι ακουστικοί μετατροπείς οι οποίοι απευθύνονται σε στρατιωτικές εφαρμογές. Επιπρόσθετα, είναι αξιόλογη στον τομέα των βιοιατρικών αισθητήρων η εφαρμογή των πιεζοηλεκτρικών μετατροπέων πολυμερών, ιδιαίτερα της απεικόνισης με υπερήχους. Η εξαιρετική ευελιξία και διαμόρφωση των φιλμ PVDF καθιστούν εύκολη την εφαρμογή σε πολλά προϊόντα αισθητήρων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μορφομετατροπέα αναπαρίσταται στο Σχήμα 6, ο οποίο στις προδιαγραφές του έχει μέγιστο ρεύμα έντασης $I=15\text{mA}$, ονομαστική τάση $V_{dc}=12\text{V}$ και συχνότητα συντονισμού $f=2800\text{Hz}$.

Όλες ότι οι παραπάνω αρχές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και σε ακουστικές συσκευές όπως μικρόφωνα, στερεοφωνικά ακουστικά και tweeters. Όσον αφορά την τελευταία έρευνα σχετικά με τις ηλεκτροακουστικές συσκευές πιεζοηλεκτρικού πολυμερούς επικεντρώνεται κυρίως στη χρήση των χαρακτηριστικών των πιεζοηλεκτρικών πολυμερών για την ανάπτυξη συσκευών με ειδικές ηλεκτροακουστικές λειτουργίες που είναι δύσκολο να επιτευχθούν με άλλες τρέχουσες τεχνολογίες, όπως τηλέφωνα κατά θορύβου, ευζωνικά συστήματα υπερηχητικής μετάδοσης σήματος Wait.



Σχήμα 6: Ηλεκτροακουστικός Μετατροπέας (electroacoustic transducer) [31]

2) Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας πίεσης

Η αρχή κατασκευής του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα πίεσης είναι η εφαρμογή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου στο κατάλληλο υλικό. Μία σημαντική παρατήρηση που πρέπει να τονιστεί είναι ότι το ποσό του ηλεκτρικού φορτίου του πιεζοηλεκτρικού υλικού είναι σταθερό και θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή για να αποφευχθεί η διαρροή ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη σύνδεση.

Θεμελιώδες πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων πίεσης είναι το αυτοπαραγόμενο σήμα, το μεγάλο σήμα εξόδου, απόκριση υψηλής συχνότητας, μικρό μέγεθος και σταθερή δομή. Αντίθετα, ένας περιορισμός αυτού του αισθητήρα είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για μέτρηση κινητικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει γιατί ειδικά καλώδια και η αυτό-ανάκτηση είναι πιο αργή όταν υποβάλλεται σε ξαφνικούς κραδασμούς ή υπερβολική πίεση.

Επιπρόσθετα, εκτός από τα είδη αισθητήρων που προαναφέρθηκαν, υπάρχουν και άλλα είδη αισθητήρων των οποίων η αρχή λειτουργίας στηρίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Κάποιοι από αυτούς τους αισθητήρες είναι οι αισθητήρες υπερήχων και οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες επιτάχυνσης [32].

3) Εφαρμογή αισθητήρων εγγύτητας σε ρομπότ (αισθητήρας υπερήχων)

Οι αισθητήρες εγγύτητας, οι οποίοι βασίζονται πάνω στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, αποτελούν απαραίτητο και συνάμα τις περισσότερες φορές αναπόσπαστο στοιχείο για κάθε ρομπότ. Πρωταρχική τους εφαρμογή είναι ο εντοπισμός εμποδίων στον χώρο κίνησης με σκοπό την αποφυγή τους από το ρομπότ. Επιπλέον, πριν έρθει σε επαφή ο ρομποτικός βραχίονας με κάποιο αντικείμενο – στόχο, ο αισθητήρας λαμβάνει πληροφορίες για αυτό προκειμένου το ρομπότ να προετοιμαστεί για την επόμενη κίνηση. Κάποια βασικά στοιχεί για το αντικείμενο στόχο αποτελούν το σχήμα και το πάχος της επιφάνειάς του.

4) Πιεζοηλεκτρικό πρόγραμμα οδήγησης

Μία ακόμη συχνή εφαρμογή αυτού του φαινομένου αποτελούν οι πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές, των οποίων η λειτουργία βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό πρόγραμμα οδήγησης. Αυτές οι συσκευές, προκειμένου να μετατρέψουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια ή μηχανική τάση, χρησιμοποιούν το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Οι περιοχές εφαρμογής τους συμπεριλαμβάνουν συστήματα δημιουργίας μικρό-μετατόπισης, έλεγχο συσκευών οθόνης καθώς και άλλες εφαρμογές. Αξίζει επίσης να ειπωθεί, ότι οι ενεργοποιητές πολυμερών στηρίζονται κυρίως σε διμερή μορφές πολυμερών, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης πλευρικής επίδρασης και διαμήκους εφέ, και εφαρμογές οδήγησης βασισμένες σε διμερή μορφές πολυμερών.

Οι εφαρμογές των πιεζοηλεκτρικών υλικών δεν περιορίζονται μόνο στις παραπάνω, μιας και τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν πολλές ευρείες εφαρμογές. Μερικές από αυτές συνιστούν οι διακριτές συχνότητες, πιεζοηλεκτρικοί ταλαντωτές, μετασχηματιστές, φίλτρα κ.λπ. Όσον αφορά τον εντοπισμό ρωγμών, οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην δημιουργία συστημάτων και ηλεκτρικών κυκλωμάτων αποστολής και λήψης σημάτων. Τα σήματα αυτά διέρχονται διαμέσου των υπό εξέταση για πιθανές ρωγμές υλικών, και η αν υπάρξει κάποια αλλαγή στα χαρακτηριστικά τους, κατά κύριο λόγο στην συχνότητα ή στο πλάτος τους, τότε γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη ρωγμής πάνω σε αυτά [26].

3.6 Ηλεκτρομηχανοακουστικά Ανάλογα

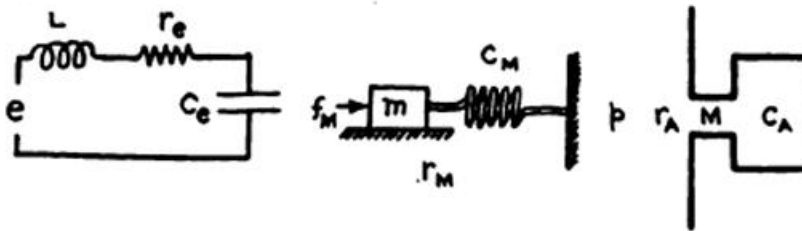
Στη σύγχρονη εποχή, η εξέλιξη στην ανάλυση ηλεκτρικών δικτύων διακριτών στοιχείων είναι ραγδαία. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την ανάγκη για την μελέτη διαφόρων ακουστικών συστημάτων και μετατροπών, οδήγησε στην ανάπτυξη συστημάτων ανάλυσης μηχανικών και ακουστικών κυκλωμάτων βασισμένα σε ηλεκτρικά δίκτυα διακριτών στοιχείων. Αυτή η προσπάθεια ολοκληρώθηκε με την αντιστοιχία ακουστικών και μηχανικών μεγεθών για το οποία ισχύουν οι μέθοδοι και οι

θεωρίες των ηλεκτρικών κυκλωμάτων (νόμοι Kirchhoff, θεωρήματα Thevenin και Norton κλπ.), υπό κάποιες προϋποθέσεις ή προσεγγίσεις [33]. Ολόκληρη η αντιστοίχιση αποτυπώνεται στον Πίνακα 1:

Πίνακας 1: Ηλεκτρομηχανοακουστικές αναλογίες [34]

Ηλεκτρικό Κύκλωμα	Μηχανικό Κύκλωμα	Ακουστικό Κύκλωμα
Τάση (V)	Μηχανική Δύναμη (f_m)	Πίεση (p)
Ρεύμα (I)	Ταχύτητα (u)	Ταχύτητα Όγκου (U)
Αντίσταση ($V=RI$)	Τριβή ($f_m=r_m u$)	Αντίσταση Ρευστού ($p=r_a U$)
Επαγωγή ($V=L \frac{dI}{dt}$)	Μάζα ($f_m=m \frac{du}{dt}$)	Αντίδραση ($p=M \frac{dU}{dt}$)
Χωρητικότητα ($I=C \frac{dV}{dt} \Rightarrow V=\frac{q}{C}$)	Ενδοτικότητα ($f_m=\frac{x}{C_m}$)	Ακουστική Χωρητικότητα ($p=\frac{X}{C_a}$)

όπου η ταχύτητα όγκου U δίνεται σε m^3/s , οι συντελεστές τριβής κανονικοποιημένοι ως προς την ταχύτητα r_m , r_a σε $N \cdot s/m$ και οι μάζες m , M σε kg και kg/m^4 αντίστοιχα. Η x είναι η μετατόπιση λόγω της f_m σε m , η X η μετατόπιση όγκου σε m^3 και οι χωρητικότητες C_m , C_a δίνονται σε m/N και m^5/N αντίστοιχα. Αυτή η αντιστοιχία ονομάζεται “Αναλογία Εμπέδησης”, και είναι η πιο συχνή και βρίσκει εφαρμογές σε μορφομετατροπείς ηλεκτρικής σύζευξης, όπως οι πιεζοηλεκτρικοί και οι πυκνωτικοί (ηλεκτροστατικοί). Επιπρόσθετα, υπάρχει και μια άλλη αντιστοιχία, που αντιστοιχεί την τάση V με την ταχύτητα u και το ρεύμα I με την πίεση p , η οποία ονομάζεται “Αναλογία Κινητικότητας” και χρησιμοποιείται συνήθως σε μορφομετατροπείς μαγνητικής σύζευξης, όπως οι μαγνητοσυστολικοί και κινητού πηνίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης ηλεκτρομηχανοακουστικών αναλογιών για μετατροπή ενός ηλεκτρικού κυκλώματος σε μηχανικό ή ακουστικό και αντίστροφα, αποτυπώνεται στο Σχήμα 7 [34].



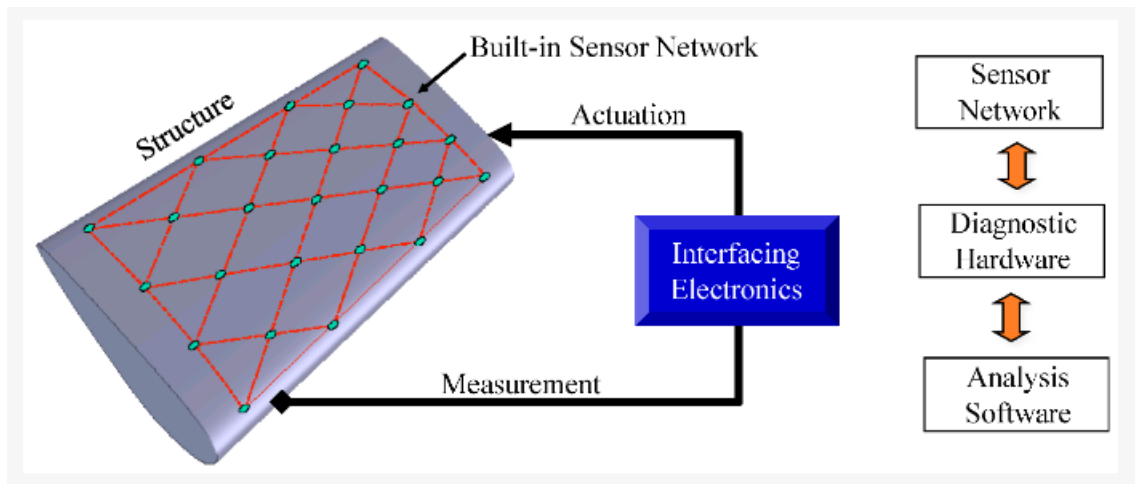
Σχήμα 7: Παράδειγμα μηχανικού και ακουστικού ανάλογου RLC κύκλωμα ενός βαθμού ελευθερίας [33].

3.7 Ισοδύναμα Κυκλώματα Μετατροπών

3.10.1 Παράδειγμα σύγχρονου μορφομετατροπέα

Όπως σκιαγραφήθηκε και παραπάνω, στο κεφάλαιο 3.5 που αφορά τις χρήσεις πιεζοηλεκτρικού φαινομένου σε συσκευές, ο μορφομετατροπέας συνιστά μία διάταξη η οποία μετατρέπει την ακουστική ή την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.

Γενικά, υπάρχουν διάφορα είδη μορφομετατροπών. Ένα σύγχρονο παράδειγμα είναι το τυπικό σύστημα πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα SHM (Structural Health Monitoring – SHM), το οποίο αποτελείται από ένα δίκτυο αισθητήρων τοποθετημένο ή ενσωματωμένο σε μια δομή υποδοχής με φορητό διαγνωστικό υλικό και λογισμικό ανάλυσης δεδομένων.



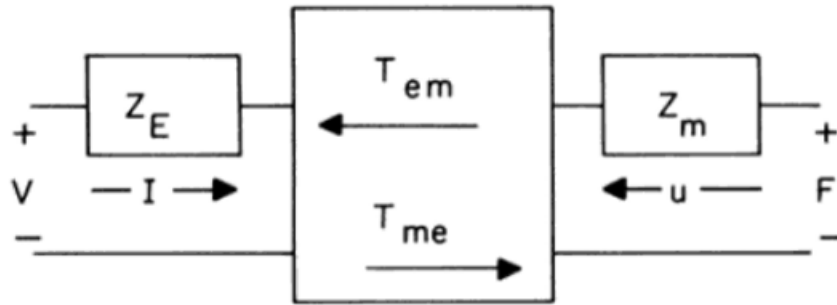
Σχήμα 8: Σύνθεση συστήματος SHM βασισμένου σε δίκτυο πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων [35].

Ο μορφομετατροπέας που απεικονίζεται στο Σχήμα 8 αποτελείται από ένα δίκτυο PZT αισθητήρων το οποίο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος SHM. Η ικανότητα των αισθητήρων και των ενεργοποιητών στο δίκτυο να επικοινωνούν μεταξύ τους καθορίζει την ευφυΐα του συστήματος ενώ ο τύπος, η θέση και ο αριθμός των αισθητήρων και των ενεργοποιητών επηρεάζουν σημαντικά την

ευαισθησία και την απόδοση του συστήματος SHM. Το δίκτυο αισθητήρων στην συνέχεια συνδέεται με ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα επεξεργασίας και το κατάλληλο λογισμικό για την ανάλυση των δεδομένων [35].

3.8 Αναπαράσταση Μορφομετατροπέα ως ηλεκτρικό κύκλωμα

Λόγω της λειτουργίας του μορφομετατροπέα, για την ακριβή μελέτη της λειτουργίας του, χρειάζεται η αναπαράσταση να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να συνδέει την ηλεκτρική με την μηχανική του πλευρά (σύζευξη). Αυτό επιτυγχάνεται, αναπαριστώντας τον μορφομετατροπέα ως ένα δίθυρο δίκτυο.



Σχήμα 9: Η αναπαράσταση ενός ηλεκτρομηχανικού μορφομετατροπέα ως δίθυρο δίκτυο [29]

Στο Σχήμα 9, τα ηλεκτρικά μεγέθη της αριστερής πλευράς (Τάση - V , Ένταση Ρεύματος - I) συνδέονται με τα μηχανικά μεγέθη της δεξιάς (Δύναμη - F , Μηχανική Ταχύτητα - u). Υποθέτοντας σταθερή αρμονική κατάσταση, τότε το σύστημα περιγράφεται μέσω των ακόλουθων σχέσεων [36]:

$$V = Z_E * I + T_{em} * u \quad (1)$$

$$F = T_{me} * I + Z_m * u \quad (2)$$

Με

$$Z_E = \left. \frac{V}{I} \right|_{u=0} \quad (3)$$

$$Z_m = \left. \frac{F}{u} \right|_{I=0} \quad (4)$$

Να σημειωθεί ότι Z_E είναι η ηλεκτρική αντίσταση εισόδου όταν η μηχανική ταχύτητα u είναι μηδενική (το μηχανικό μέρος αποτρέπεται από το να κινηθεί) και Z_m είναι η μηχανική αντίσταση εισόδου όταν το ηλεκτρικό ρεύμα I είναι μηδενικό (δηλαδή τα άκρα του ηλεκτρικού μέρους είναι ανοιχτοκυκλωμένα). Οι συντελεστές T_{em} και T_{me} ονομάζονται συντελεστές μετατροπίας και καθορίζουν την επίδραση του μηχανικού στο ηλεκτρικό μέρος και του ηλεκτρικού στο μηχανικό αντίστοιχα.

Επιπρόσθετα, υπάρχουν και τα εξής χρήσιμα ακόλουθα μεγέθη:

Η ελεύθερη ηλεκτρική εμπέδηση Z_{IN} ορίζεται ως η εμπέδηση που βλέπουν τα ηλεκτρικά άκρα όταν το μηχανικό μέρος είναι απολύτως ελεύθερο να κινηθεί και υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$Z_{IN} = \left. \frac{V}{I} \right|_{F=0} = Z_E - \frac{T_{em} * T_{me}}{Z_m} \quad (5)$$

Η μηχανική εμπέδηση βραχυκύκλωσης Z_{in} ορίζεται ως η εμπέδηση που βλέπουν τα μηχανικά άκρα όταν η τάση στα ηλεκτρικά άκρα είναι μηδενική (βραχυκύκλωμα) και υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$Z_{in} = \left. \frac{F}{u} \right|_{V=0} = Z_m - \frac{T_{em} * T_{me}}{Z_E} \quad (6)$$

3.9 Αμοιβαιότητα

Η αντιστρεψιμότητα του αποτελέσματος μίας εφαρμοζόμενης διέγερσης που παράγεται στην ηλεκτρική θεωρία κυκλωμάτων είναι γνωστό ως αμοιβαιότητα (reciprocity). Αυτό σημαίνει ότι η εφαρμογή διέγερσης ίσης με το αρχικό αποτέλεσμα στο σημείο όπου μετρίεται θα οδηγήσει σε αποτέλεσμα ίσο με την αρχική διέγερση στο σημείο που εφαρμόστηκε. Η αμοιβαιότητα μπορεί να συμβεί σε ένα γραμμικό στοιχείο ή σε ένα δίκτυο[37]. Αυτό το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό μπορεί να επεκταθεί για να συμπεριλάβει μορφομετατροπείς και, ειδικότερα, ηλεκτρομηχανικούς / ηλεκτροακουστικούς. Η εφαρμογή της αμοιβαιότητας στο προηγούμενο είδος μορφομετατροπών είναι γνωστή με την ονομασία "ηλεκτρομηχανική αμοιβαιότητα". Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να υπάρχει αναστρέψιμη διέγερση ανάμεσα στο ηλεκτρικό μέρος και στο μηχανικό μέρος. Η ιδιότητα αυτή απαντάται στους πιεζοηλεκτρικούς μορφομετατροπείς, όπως αποδεικνύει και η ύπαρξη του

αντιστρόφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Ως αποτέλεσμα, οι συντελεστές σύζευξης είναι ίσοι, δηλαδή:

$$T_{em} = T_{me} = T \quad (7)$$

Σε αυτό το σημείο χρειάζεται να σημειωθεί, ότι υπάρχει και η ιδιότητα της αμοιβαιότητας, κατά την οποία οι συντελεστές σύζευξης είναι αντίθετοι και ίσοι κατ' απόλυτη τιμή, αλλά όχι αλγεβρικά, δηλαδή, ισχύει:

$$T_{em} = -T_{me} \quad (8)$$

Αυτή η ιδιότητα συναντάται στους ηλεκτρομηχανικούς μορφομετατροπείς μαγνητοσυστολής ή κινητού πηνίου.

Κεφάλαιο 4 Εντοπισμός ρωγμών με χρήση αισθητήρων

4.1 Τεχνικές Εντοπισμού Ρωγμών

Ο εντοπισμός ρωγμών είναι καίριας σημασίας σε πάρα πολλούς διαφορετικούς τομείς της βιομηχανίας και όχι μόνο στην σύγχρονη εποχή. Είναι, λοιπόν, λογικό να έχουν μελετηθεί και στην συνέχεια να έχουν αναπτυχθεί πολλές αντίστοιχες τεχνικές οι οποίες βασίζονται σε προηγμένους και ευαίσθητους αισθητήρες, προκειμένου να καλύψουν την ζήτηση και να λύσουν τα προβλήματα στις αντίστοιχες βιομηχανίες.

Ένα από τα πιο θεμελιώδη υλικά που χρησιμοποιείται για κατασκευές στις βιομηχανίες είναι το αλουμίνιο. Συνεπώς, καθίσταται απαραίτητη η ανάπτυξη μίας τεχνικής με την οποία να φαίνεται αν μία κατασκευή δομημένη από αυτό διαθέτει κάποιες σχισμές. Να σημειωθεί, ότι με την πάροδο του χρόνου, μικρά ελαττώματα μπορούν να επεκταθούν σταδιακά σε μορφή μακρο-ρωγμών, προκαλώντας δομικά κατάγματα στην πλάκα και ακόμη και ζημιές στον κατασκευασμένο εξοπλισμό, με

αποτέλεσμα να υπάρξουν σοβαρές συνέπειες [38]. Επιπρόσθετα, οι πλάκες αλουμινίου είναι ευαίσθητες σε περιβαλλοντικά φορτία και φορτία κόπωσης που παράγουν τυχαία κατανεμημένες ρωγμές και έτσι θέτουν σε κίνδυνο τις επιδόσεις ασφαλείας [39]. Συνεπώς, για την ανίχνευσή τους προτείνεται μια μέθοδος που βασίζεται στην εξισορροπημένη ηλεκτρομαγνητική τεχνική πεδίου (Balanced Field Electromagnetic Technique - BFET) για τον εντοπισμό ρωγμών στις άνω και πίσω επιφάνειες. Το BFET μπορεί να ανιχνεύσει ρωγμές κάτω από το βάθος του δέρματος, κάτι το οποίο είναι πολύ πιο δύσκολο σε σύγκριση με τον εντοπισμό σχισμών στην επιφάνεια, και παρέχει μια αναφορά για την αύξηση του βάθους διείσδυσης ανίχνευσης για άλλες ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους ανάλυσης [39].

Η εξισορροπημένη ηλεκτρομαγνητική τεχνική πεδίου (BFET) είναι μια αναδυόμενη ηλεκτρομαγνητική τεχνική NDT (Noise Equivalent Temperature Difference – NTD) που συνδυάζει τη διαρροή μαγνητικού ρεύματος εναλλασσόμενης ροής με εναλλασσόμενη ηλεκτρομαγνητική τεχνολογία. Αυτός ο χαρακτήρας της κατασκευής του επιτρέπει τη διατήρηση μιας εξόδου σήματος με, και ταυτόχρονα ανεξάρτητη από την επίδραση ανύψωσης [40]. Η τεχνική χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από την TesTex η οποία ανέπτυξε έναν ανιχνευτή ρωγμών BFET κατασκευασμένο ως ζεύγος αμοιβαία ορθογώνιων σπειρών. Στην προηγούμενη έρευνα των συγγραφέων, διαπιστώθηκε ότι η χρήση κυλίνδρων ως στοιχείο λήψης και η προσθήκη ενός μαγνητικά αγωγίμου μέσου, καθώς και η χρήση υψηλής συχνότητας διέγερσης, επέτρεψαν στο BFET να έχει υψηλή ευαισθησία για την ανίχνευση και διάκριση μικρών ρωγμών [41]. Προηγούμενες μελέτες των συγγραφέων σχετικά με τη μέθοδο επεξεργασίας σήματος BFET και την in-line επιθεώρηση (In Line - ILI) των ρωγμών σε αγωγούς έχουν επίσης αποδείξει την καλή εφαρμοσιμότητα της τεχνικής ισορροπημένου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου για την πραγματική ανίχνευση ρωγμών [42] [43]. Το BFET είναι εφικτό για την ανίχνευση ρωγμών σε πλάκες αλουμινίου καθώς και σε σιδηρομαγνητικά υλικά όπως οι πλάκες χάλυβα. Προκειμένου η τεχνολογία να ανταποκριθεί στις τρέχουσες ανάγκες εφαρμογής, είναι απαραίτητο να μελετηθεί η τεχνική για την επίτευξη ανίχνευσης ρωγμών σε πλάκες αλουμινίου.

4.2 Εντοπισμός ρωγμών σε υλικά με μαγνητικές ιδιότητες

Γενικά, υπάρχουν πολλά υλικά στον πλανήτη με μαγνητικές ιδιότητες. Αυτές οι ιδιότητες είναι συνεχείς κατά μήκος του υλικού. Αντίθετα, μία ρωγμή αποτελεί μία φυσική ασυνέχεια πάνω στο υλικό. Συνεπώς, προκύπτει το συμπέρασμα ότι όταν πάνω σε μαγνητισμένα αντικείμενα υπάρχουν ρωγμές, τότε οι μαγνητικές του ιδιότητες παρουσιάζουν μία ασυνέχεια στις περιοχές όπου υπάρχουν οι ρωγμές.

Αναλυτικότερα, ο εντοπισμός ρωγμών σε υλικά με μαγνητικές ιδιότητες μπορεί να γίνει με τη χρήση της μεθόδου μαγνητικών σωματιδίων (Magnetic Particle Inspection - MPI). Αυτή η μη καταστροφική δοκιμή χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει ρωγμές και άλλες επιφανειακές ή υποεπιφανειακές ατέλειες σε μαγνητικά υλικά, όπως ο χάλυβας και ο σίδηρος [44].

Η διαδικασία ξεκινάει μαγνητίζοντας το υπό εξέταση υλικό είτε με τη χρήση ενός μαγνητικού πεδίου συνεχούς ρεύματος (DC) είτε εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Η μαγνήτιση μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθόδους, όπως η χρήση ηλεκτρομαγνητών ή μαγνητικών πηνίων. Στη συνέχεια, μαγνητικά σωματίδια (συνήθως σκόνη ή αιωρήματα σε υγρό) εφαρμόζονται στην επιφάνεια του υλικού. Τα σωματίδια αυτά συσσωρεύονται στα σημεία όπου το μαγνητικό πεδίο διακόπτεται, όπως στις ρωγμές ή άλλες ατέλειες, δημιουργώντας ορατά μοτίβα. Η επιφάνεια επιθεωρείται οπτικά υπό κανονικό ή υπεριώδες φως, ανάλογα με τον τύπο των σωματιδίων που χρησιμοποιούνται. Τέλος, οι ρωγμές εμφανίζονται ως συσσωρεύσεις σωματιδίων που δημιουργούν διακριτά μοτίβα.

Η μέθοδος αυτή είναι πολύ αποτελεσματική, μιας και εντοπίζεται η ακριβής θέση των ρωγμών και των ατελειών. Αν και η μέθοδος MPI είναι κυρίως ποιοτική, μπορεί να δώσει ενδείξεις για το μήκος και το πλάτος των ρωγμών μέσω της οπτικής επιθεώρησης των συσσωρευμένων σωματιδίων. Με βάση την καταγραφή και την αξιολόγηση των ρωγμών, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την έκταση της ζημιάς και τη σοβαρότητα των ατελειών [44].

4.3 Εντοπισμός ρωγμών βασισμένος σε αισθητήρες

Όπως είναι προφανές, η ανίχνευση κάποιας σχισμής σε ένα υλικό, τις περισσότερες των περιπτώσεων, μπορεί να γίνει μέσω αισθητήρων. Μάλιστα, έχει αποδειχθεί ότι ο εντοπισμός ρωγμών με αισθητήρες είναι πιο αποτελεσματικός όταν το ρήγμα βρίσκεται πάνω στην επαφή του αισθητήρα. Το ρήγμα ανιχνεύεται και τοποθετείται απευθείας ως μια ασυνήθιστη αλλαγή στην έξοδο από τους αισθητήρες που επηρεάζονται από το ρήγμα. Ο συγκεκριμένος τρόπος για την εύρεση ρωγμών ονομάζεται άμεση αισθητηριακή ανίχνευση. Τυπικά παραδείγματα τεχνολογιών που επιτρέπουν την άμεση αισθητηριακή ανίχνευση περιλαμβάνουν αισθητήρες παρακολούθησης κυμάτων (ακουστική εκπομπή και αισθητήρες προαπαγορεύσεως κύματος), διακριτούς αισθητήρες παραμόρφωσης (ηλεκτρικούς ή οπτικής ίνας, μικρόμετρους ή μακρόμετρους), κατανεμημένους αισθητήρες παραμόρφωσης (ηλεκτρικούς ή οπτικής ίνας), και αισθητήρες επικουρικών ρευμάτων. Οι αισθητήρες παρακολούθησης κυμάτων και επικουρικών ρευμάτων μπορούν να ανιχνεύσουν τις

ρωγμές ως διαταραχή στα πρότυπα ελαστικών κυμάτων ή ηλεκτρικού πεδίου, ενώ οι διακριτοί και κατανεμημένοι αισθητήρες παραμόρφωσης πρέπει να είναι σε άμεση επαφή με τις πιθανές ρωγμές για να τις ανιχνεύσουν [45] [46].

4.4 Αισθητήρες για εντοπισμό ρωγμών

4.4.1 Παθητικοί Radio Frequency Identification – RFID αισθητήρες

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί ραγδαία τα συστήματα αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων , RFID (Frequency Identification – RFID). Αυτό συμβαίνει γιατί έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής, έχουν κάποια παθητικά χαρακτηριστικά και λειτουργούν ασύρματα χωρίς καλώδιο. Οι RFID αισθητήρες έχουν τεράστια προοπτική σε εφαρμογές ανίχνευσης σχισμών, ιδιαίτερα σε μια υποδομή μεγάλης κλίμακας, σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες οι οποίες λειτουργούν καλώδια και μπαταρία για ενσωματωμένες ή επιφανειακές εφαρμογές. Υπάρχουν πάρα πολλά συστήματα αισθητήρων RFID χωρίς τροφοδοσία, όπως τα συστήματα αισθητήρων ρωγμών βασισμένα σε κεραίες RFID υπερύψηλης συχνότητας, (UltraHighFrequency-UHF), τα οποία αναφέρονται με περισσότερη έμφαση από τα υπόλοιπα μιας και διαθέτουν διάφορα οφέλη όπως πολύ χαμηλό κόστος και ταυτόχρονα αυξημένη εμβέλεια επικοινωνίας έως και από αρκετά μέτρα, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 2. Οι τεχνολογίες RFID μπορούν, επίσης, να ενσωματωθούν σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων(Wireless Sensor Network - WSN), του οποίου κύρια χρήση είναι η αντιμετώπιση θεμάτων εξοικονόμησης ενέργειας, πραγματικού χρόνου απόδοσης, καθαρισμού και φιλτραρίσματος δεδομένων, εντοπισμού, αντισύγκρουσης και πιστοποίησης [22].

Πίνακας 2: Είδη RFID αισθητήρων μαζί με τις συχνότητες και τα εύρη λειτουργίας τους [47]

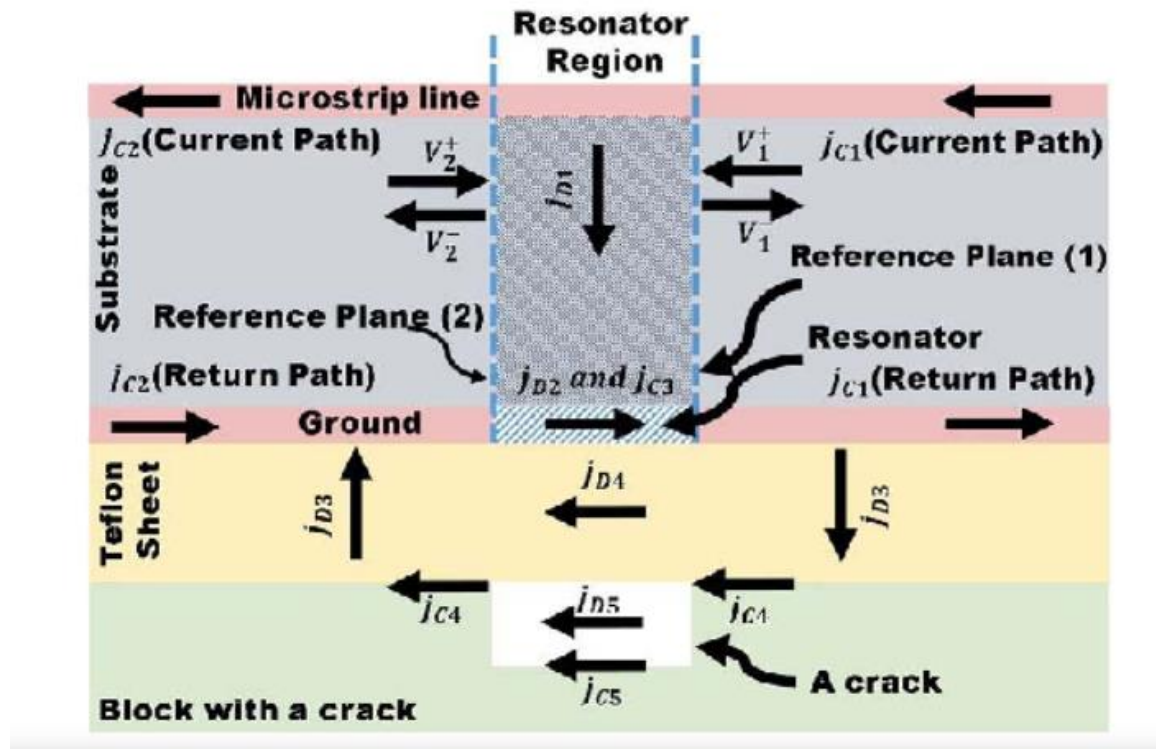
RFID frequencies and ranges		
FREQUENCY	BAND	RANGE
LF RFID	30-500 KHz, typically 125 KHz	Less than three feet
HF RFID	3-30 MHz, typically 13.56 MHz	Less than six feet
UHF RFID	300-960 MHz, typically 433 MHz	25+ feet
Microwave	2.45 GHz	30+ feet

4.4.3 Αισθητήρες υψηλής ευαισθησίας για ανίχνευση ρωγμών με βάση τα μικροκύματα

Ένα άλλο είδος αισθητήρων, οι οποίοι χρησιμεύουν για τον εντοπισμό ρωγμών, κατά κύριο λόγο σε μεταλλικές επιφάνειες και υλικά, είναι αυτοί που βασίζονται στα μικροκύματα. Πιο συγκεκριμένα, με βάση το άρθρο ‘Microwaves-Based High Sensitivity Sensors for Crack Detection in Metallic Materials’, [48], μελετήθηκε ένας αισθητήρας ο οποίος αποτελείται από δακτυλίους, των οποίων η περίμετρος, και συνακόλουθα και η διάμετρος, είναι αρκετά μικρότερες από το μήκος κύματος της ενέργειας που τους ενεργοποιεί. Η αναφορά σε αυτόν τον αισθητήρα όσον αφορά την κατηγορία αισθητήρων που λειτουργούν με βάση τα μικροκύματα δεν είναι τυχαία, αλλά γίνεται επειδή αυτός ο αισθητήρας έχει πολλά κύρια πλεονεκτήματα. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι η υψηλή ευαισθησία, η αυξημένη δυναμική εύρους, η δυνατότητα επεκτασιμότητας, η απλότητα σχεδιασμού, η ικανότητα για χωρική ανάλυση και η εκλεκτικότητα. Ολόκληρος ο αισθητήρας κατασκευάστηκε με τεχνολογία πλακέτας εκτύπωσης και αναγλυφική πάνω στο επίπεδο γείωσης ενός γραμμικού μικροταινιακού κυκλώματος.

Όσον αφορά την λειτουργία αυτού του αισθητήρα, αυτός λαμβάνει τα σήματα τα οποία στέλνονται και διαπερνούν μέσα το μέταλλο, τα οποία στην συνέχεια αποτυπώνονται στο πεδίο συχνότητας Fourier. Πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι ένας επιφανειακός ρήγμα πλάτους 200 μm και βάθους 2 mm προκαλεί μια μετατόπιση στη συχνότητα αντίστοιχη μετατόπισης συντονισμού των 1,5 GHz. Αυτή η μετατόπιση της συχνότητας αντίστοιχης συντονισμού υπερβαίνει σημαντικά αυτό που μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας άλλους αισθητήρες που λειτουργούν στο χαμηλό εύρος συχνοτήτων των μερικών GHz. Επιπλέον, με την χρήση αριθμητικής προσομοίωσης,

φάνηκε καθαρά ότι ο συγκεκριμένος αισθητήρας είναι σε θέση να ανιχνεύσει ένα ρήγμα πλάτους 10 μm (ισοδύναμο με $\lambda/4000$, όπου λ το μήκος κύματος) με μετατόπιση 180 MHz στη συχνότητα συντονισμού [48].

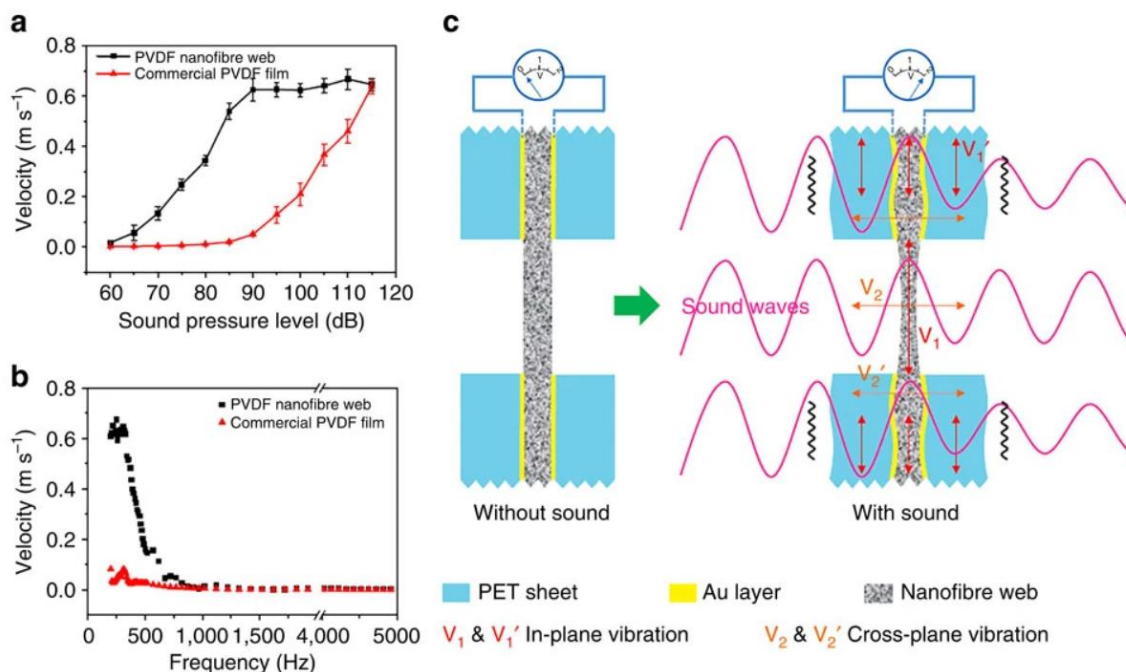


Σχήμα 10: Φυσικό μοντέλο βάσει πολλαπλών στρωμάτων ενός αισθητήρα με βάση τα μικροκύματα για τον εντοπισμό ελαττωμάτων [48].

Η λειτουργία του αισθητήρα με βάση τα μικροκύματα, όπως γίνεται αντιληπτό και από το Σχήμα 10, βασίζεται στις αλλαγές της πυκνότητας ρεύματος J . (Με J συμβολίζεται η πυκνότητα ρεύματος και έχει μονάδες μέτρησης A / m^2). Η περιοχή του συντονιστή δείχνει την περιοχή διακοπής που προκαλείται από το ελάττωμα. Η διαταραχή στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή του συντονιστή μοντελοποιείται από μια πυκνότητα ρεύματος μετατόπισης J_{D1} η οποία ξεκινάει από το αντηχείο (Resonator). Το J_{D3} μοντελοποιεί την επίδραση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ του αισθητήρα που βασίζεται σε ελαττώματα και του μπλοκ αλουμινίου μέσω της περιοχής από τεφλόν (το τεφλόν είναι ένα υλικό το οποίο έχει υψηλή αντοχή στην θερμοκρασία και χρησιμοποιείται σε αισθητήρες θερμοκρασίας). Το J_{C4} είναι η πυκνότητα ρεύματος αγωγιμότητας που διεγείρεται από J_{D3} στην μεταλλική επιφάνεια. Τα J_{D5} και J_{C5} προκύπτουν από τις επιδράσεις διακοπής που προκαλείται από την ρωγμή στο μεταλλικό υλικό, και λόγω αυτών ο αισθητήρας οδηγείται στον εντοπισμό της ρωγμής [48].

4.4 Σύγχρονος τρόπος κατασκευής ακουστικών αισθητήρων βασισμένος στις νανοίνες

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει πολυάριθμες προσπάθειες για την ανίχνευση και την παρακολούθηση ακουστικών κυμάτων. Ωστόσο, μία μέθοδος που έχει ξεχωρίσει είναι η χρήση πολυμερών νανοϊνών, με κυριότερες τις poly(vinylidenefluoride) (PVDF), poly(vinylidenefluoride-co-hexafluoropropene) (PVDF-HFP) and poly(vinylidenefluoride-co-trifluoroethylene) (P(VDF-TrFE)), για την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Αυτός είναι ακριβώς και ο ορισμός του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Ειδικότερα, οι πιεζοηλεκτρικές νανοίνες που παράγονται με τη μέθοδο της ηλεκτροστατικής ίνωσης έχουν επιδείξει σημαντική ικανότητα μετατροπής μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Παρόλα αυτά τα δεδομένα σχετικά με αυτήν την μέθοδο είναι ανεπαρκή ακόμα. Αναλυτικότερα, για την κατασκευή των ακουστικών αυτών αισθητήρων γίνεται πρώτα σύνδεση των πιεζοηλεκτρικών ιστών νανοϊνών και εν συνεχεία χρησιμοποιώντας το πολυ(βινυλιδένιο φθορίδιο) ως πολυμερές μοντέλο μαζί με έναν αισθητήρα που μεταφέρει τον ήχο απευθείας στο στρώμα των νανοϊνών, δημιουργείται μία συσκευή κατάλληλη για τον εντοπισμό ακουστικών κυμάτων. Αυτοί οι ακουστικοί αισθητήρες διακρίνονται για την υψηλή τους ευαισθησία, καθώς μπορούν να ανιχνεύσουν ήχο χαμηλής συχνότητας με ευαισθησία έως και 266 mV Pa^{-1} . Επιπλέον, μπορούν να διακρίνουν με ακρίβεια κύματα ήχου στη χαμηλή έως μεσαία περιοχή συχνοτήτων. Αυτά τα χαρακτηριστικά τους καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλους για την ανίχνευση θορύβου. Τέλος, να σημειωθεί ότι η νανοίνα έχει περισσότερο από πέντε φορές υψηλότερη ευαισθησία από μια εμπορική πιεζοηλεκτρική μεμβράνη (πολύ-βινυλιδένιο φθορίδιο). Οι πιεζοηλεκτρικές νανοίνες που παράγονται με ηλεκτροστατική ίνωση μπορεί να είναι χρήσιμες για την ανάπτυξη υψηλής απόδοσης ακουστικών αισθητήρων [49].



Σχήμα 11: Αναπαράσταση ταχύτητας δόνησης των νανοϊνών [49]

Στο Σχήμα 11 απεικονίζεται ταχύτητα δόνησης του ιστού νανοϊνών PVDF (poly(vinylidene fluoride)) και εμπορικής πιεζοηλεκτρικής μεμβράνης PVDF. Στο διάγραμμα (a) δείχνει την ταχύτητα δόνησης σε διαφορετικά SPLs (sound pressure level) και στο διάγραμμα (b) σε διαφορετικές συχνότητες ήχου (SPL, 85 dB). Στα δεξιά δύο σχήματα (c) απεικονίζονται οι προτεινόμενες καταστάσεις δόνησης ήχου και ο μηχανισμός μετατροπής πιεζοηλεκτρικότητας για τη συσκευή νανοϊνών (Οι γραμμές σφάλματος αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση που προέκυψε από τα αποτελέσματα δοκιμής τουλάχιστον τριών αναπαραγωγών) [49].

4.5 Εντοπισμός μικρό-ρωγμών με χρήση ακουστικών αισθητήρων

Τις τελευταίες δεκαετίες, με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας αυξάνεται η χρήση ηλεκτρονικών συσκευών, των οποίων μάλιστα τα δομικά στοιχεία όλο και μικραίνουν. Η συνεχής τάση προς μικρότερες διαστάσεις σε πυκνά συσκευασμένες μικροηλεκτρονικές συσκευές συμβαδίζει με αυξημένες προκλήσεις για την αξιοπιστία των συσκευών. Συγκεκριμένα, οποιαδήποτε αύξηση στο μέγεθος και την αποδοτικότητα συμβαίνει εις βάρος της μηχανικής σταθερότητας όταν εισάγονται νέα υλικά (π.χ. χαμηλής επιλεκτικότητας διηλεκτρικά υλικά, τα οποία δεν επιδεικνύουν μεγάλη μεταβολή των ιδιοτήτων τους με την αλλαγή της συχνότητας του ηλεκτρικού πεδίου.) [50]. Ήδη στην παραγωγή, κατά τη διάρκεια της ανίχνευσης (ηλεκτρική δοκιμή λειτουργικότητας) και της σύνδεσης καλωδίων, αυτό αντικατοπτρίζεται άμεσα σε έναν αυξημένο κίνδυνο ρωγμών σε στρώματα οξειδίου ενσωματωμένα στο πίσω άκρο της γραμμής των πλακιδίων. Μόλις μια ρωγμή οξειδίου είναι παρούσα και εξαπλώνεται

κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της συσκευής υπό εξωτερική πίεση, το μέταλλο μπορεί μέχρι και να καταστραφεί. Σε πολλές περιπτώσεις αυτό τελικά οδηγεί σε ηλεκτρική βλάβη. Ομοίως, η εγγενής μηχανική πίεση, η οποία προκύπτει από μια ασυμφωνία των συντελεστών θερμικής επέκτασης (Coefficients of Thermal Expansion-CTE) στις διεπαφές ή από τις διακυμάνσεις θερμοκρασίας, τείνει να μειώσει τη μηχανική αντοχή της στοίβας και να προκαλέσει αποσύνθεση των υλικών που ήταν ενωμένα μεταξύ τους [51].

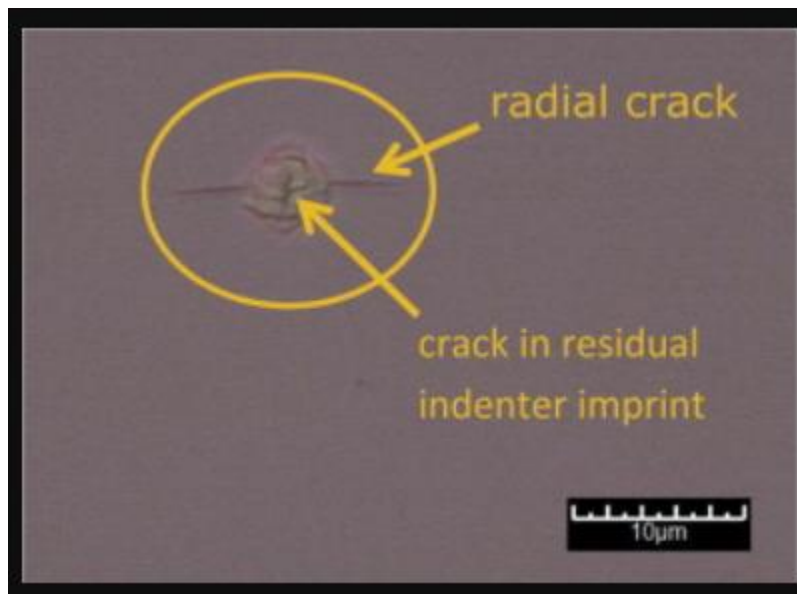
Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτή η ανάγκη για την ανάπτυξη τεχνικών με σκοπό την άμεση ανίχνευση των μικρό-ρωγμών (τάξης μεγέθους μερικών μικρομέτρων) και η διόρθωση τους. Επομένως, προκειμένου να προβλεφθεί και να βελτιωθεί η μηχανική σταθερότητα και, ως εκ τούτου, να αυξηθεί η αξιοπιστία των μικροηλεκτρονικών συσκευών, είναι απαραίτητες οι κατάλληλες διαδικασίες δοκιμής αντοχής γρήγορης προόδου, όπως η ανίχνευση ρωγμών *in-situ*, δηλαδή απευθείας μέσω ανιχνευτή πάνω στην συσκευή. Αρχικά, εφαρμόζοντας με ακρίβεια ελεγχόμενες βλάβες σε οχήματα δοκιμής χρησιμοποιώντας ένα νανοδείκτη (Ο *nanoindenter* ή νανοενδεικτής είναι ένα επιστημονικό όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων υλικών σε κλίμακα νανομέτρων, δηλαδή 10^{-9} m) καταγράφεται το εύθραυστο κάταγμα των λεπτών στρωμάτων με τη βοήθεια ενός υπερηχητικού αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού υλικού, ο οποίος είναι σε θέση να ανιχνεύσει μικρές ρωγμές τη στιγμή που εμφανίζονται, δηλαδή ακαριαία. Αυτή η δοκιμή αντοχής δεν απαιτεί περαιτέρω προετοιμασία που μπορεί να προκαλέσει πρόσθετη πίεση σε ένα δείγμα ή να το τροποποιήσει φυσικά, αναστέλλοντας την σαφή ανάλυση αποτυχίας. Όσον αφορά την εφαρμογή και τους περιορισμούς του, τοποθετούνται τις ακουστικές εκπομπές στο πλαίσιο των τυποποιημένων πειραματικών διαδικασιών για τον χαρακτηρισμό ρωγμών σε μικροηλεκτρονικές δομές [51].

Η τεχνική αυτή της ανίχνευσης ρωγμών της τάξης μεγέθους μερικών μικρομέτρων με χρήση ακουστικών αισθητήρων υλοποιείται μέσω της ακουστικής εκπομπής ως μέσο ταχείας δοκιμής αντοχής για μικρές ηλεκτρονικές συσκευές. Αναλυτικότερα, αυτή η μέθοδος βασίζεται στην ξαφνική απελευθέρωση ελαστικής ενέργειας υπό την μορφή των ελαστικών κυμάτων πίεσης. Τοποθετώντας ένα δείγμα πάνω από έναν υπερηχητικό αισθητήρα και δημιουργώντας πάνω σε αυτό μικρές χαρακιές με ακριβή έλεγχο με τη βοήθεια ενός νανοδείκτη, ανιχνεύονται εύθραυστα κατάγματα σε δοκιμαστικά οχήματα λεπτής μεμβράνης και στοίβες πλακιδίων τύπου BEOL (*back-end of line* BEOL) κατά την εμφάνιση [51]. Αυτή η τεχνική εκτίμησης ζημιών είναι καινούργια στη βιομηχανία ημιαγωγών και τα πρώτα αποτελέσματα έχουν αναφερθεί μόλις πρόσφατα. Επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς βλάβης και του κατώτατου ορίου φορτίου στα στοίβες καλωδίων τσιπ IC (*Integrated Circuits – IC*), καθώς επιτρέπει μια άμεση επικύρωση των μοντέλων προσομοίωσης. Ταυτόχρονα, έχει

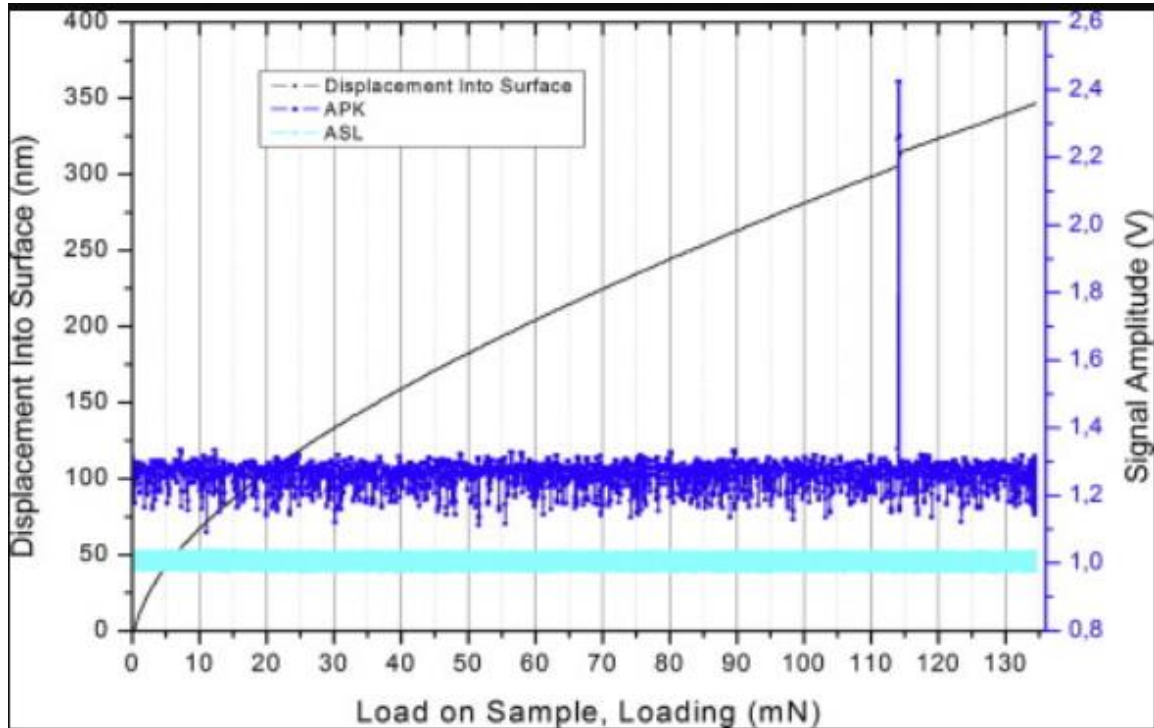
τη δυνατότητα να μειώσει σημαντικά την προσπάθεια ανάλυσης αποτυχίας μετά τη δοκιμή, ιδίως όσον αφορά στο μέγεθος του δείγματος [51].

4.5.1 Πειραματική ρύθμιση και ροή εργασίας αισθητήρα τύπου Vallen

Η συγκεκριμένη εγκατάστασή αποτελείται από ένα Agilent G200 νανοδείκτη (nanoindenter) και ένα πιεζοηλεκτρικό ακουστικό αισθητήρα τύπου Vallen. Ο αισθητήρας τύπου Vallen είναι ένα εξειδικευμένο όργανο που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και την ανάλυση της ακουστικής εκπομπής (Acoustic Emission - AE) με απώτερο σκοπό τη παρακολούθηση της κατάστασης των υλικών και των δομών. Ο αισθητήρας είναι ευαίσθητος σε ένα εύρος συχνοτήτων 100–300 kHz, το οποίο είναι γνωστό ότι είναι επαρκές για την ανίχνευση εύθραυστων ρωγμών σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Το υπό εξέταση για ρωγμές δείγμα τσιπ τοποθετείται πάνω από τον αισθητήρα με τη βοήθεια ενός ιξώδους κόλλας συμπλέκτη, για παράδειγμα μέλι, για να επιτρέψει επαρκή μετάδοση υπερήχων. Κατά τη διάρκεια της διεξόδου της επιφάνειας με τη βοήθεια μιας πολύ λεπτής βελόνας, καταγράφονται συνεχώς τόσο η καμπύλη φορτίου- βάθους όσο και το ακουστικό μέγιστο εύρος σήματος APK (Acoustic Signal Peak -Amplitude APK) και ο μέσος όρος ASL (Average Signal Level - ASL) όπως ακριβώς φαίνεται και στα Σχήματα 12 και 13 [4]. Σε περίπτωση ρωγμής, η καμπύλη βάθους φορτίου εμφανίζει ένα χαρακτηριστικό σχήμα, και μια χαρακτηριστική κορυφή πάνω από το κατώτατο όριο θορύβου βρίσκεται στο σήμα APK. Και τα δύο αυτά γεγονότα είναι χρονικά συσχετισμένα και χαρακτηριστικά για το εύθραυστο κάταγμα. Μετά την ανίχνευση μίας ρωγμής, η αφαίρεση σταματά αυτόματα και το δείγμα υποβάλλεται σε ανάλυση αποτυχίας προκειμένου να επαληθευτεί η βλάβη με οπτικά μέσα. Στην συνέχεια η έτσι αποκτηθείσα εικόνα αποτυχίας συσχετίζεται με τα αποκτηθέντα δεδομένα αφαίρεσης [51].



Σχήμα 12: Απαλή ρωγμή ενός λεπτού φιλμ τύπου Si₃N₄ (πυκνότητα 1 μm) στο υπόστρωμα πυριτίου Si μετά από νανοδείκτη: οπτική μικροσκοπία (1000×) της εικόνας αποτυχίας [51].



Σχήμα 13: Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου με χρήση nonoindentor σε λεπτή ταινία Si₃N₄ (πυκνότητα 1 μm) στο υποστρώμα πυριτίου Si [51]

Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 13, στον οριζόντιο άξονα είναι το φορτίο στο υπό εξέταση δείγμα, στον κάθετο δεξιά άξονα είναι η μετατόπιση πάνω στην επιφάνεια και στον κάθετο άξονα αριστερά είναι το ύψος του σήματος που διαπερνά το υλικό. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, με φορτίο 115 mN, ο ακουστικός αισθητήρας ανιχνεύει εύθραυστες ρωγμές (σημείο APK/ Peak, σκούρες μπλε γραμμές και ASL/ Average Signal Level, ελαφριά μπλε Γραμμές). Η καμπύλη μετατόπισης φορτίου-αποστολής (μαύρη γραμμή) εμφανίζει ένα χαρακτηριστικό πλάτος που εμφανίζεται ταυτόχρονα με το ηχητικό σήμα ρωγμής, υποδηλώνοντας με αυτόν τον τρόπο την ύπαρξη της ρωγμής [51].

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου ανίχνευσης μικρό – ρωγμών με ακουστικούς αισθητήρες σε σύγκριση με άλλες τυποποιημένες μεθόδους ανάλυσης:

1. Λόγω της απουσίας της προετοιμασίας των δειγμάτων, μιας και η συγκεκριμένη τεχνική είναι έμφυτη (in – situ) πάνω στο δείγμα, δεν δημιουργούνται μικρό -

καταστροφές όπως πιθανώς σε άλλες μεθόδους εντοπισμού ρωγμών όπου η προετοιμασία του δείγματος καθίσταται απαραίτητη. Αναλυτικότερα, ως συνέπεια της προετοιμασίας για οπτική ανάλυση, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι απαραίτητη για την ανάλυση ελαττωμάτων, ένα δείγμα τροποποιείται φυσικά. Αυτό μπορεί να εκφραστεί οπτικά, για παράδειγμα όταν το σχήμα, το μέγεθος, ή κάποιο άλλο χαρακτηριστικό μιας ρωγμής τροποποιούνται τεχνητά, ή μέσω της προσθήκης ή απελευθέρωσης υπολειμματικής πίεσης στο δείγμα. Με άλλα λόγια, η προετοιμασία των δειγμάτων συχνά ενέχει τον κίνδυνο δημιουργίας πολύ μικρών τροποποιήσεων πάνω σε αυτά οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τις μετρήσεις, και για αυτόν το λόγο τα ευρήματα πρέπει να αξιολογηθούν προσεκτικά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα όπου το υλικό αφαιρείται είναι η χημική σφυρηλάτηση της μεταλλικοποίησης ενός πλακιδίου για να ανακτήσει μια ρωγμή οξειδίου, και εστιασμένη ακτίνα ιόντων (FIB) ή μηχανική διατομή. Κατά συνέπεια, η αιτία για την οποία προκλήθηκαν ρωγμές δεν μπορεί πλέον να ανοικοδομηθεί χωρίς αμφιβολία. Για το λόγο αυτό, οι μέθοδοι μέτρησης in-situ, όπως η ακουστική ανίχνευση ρωγμών, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν ως συμπλήρωμα στην επεμβατική ανάλυση ελαττωμάτων, επιτρέποντας να αναλυθεί το ιστορικό εμφάνισης και εξάπλωσης των ρωγμών [51].

2. Η αποδοτικότητα ανίχνευσης ρωγμών της συγκεκριμένης τεχνικής είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με άλλες μεθόδους. Τα πειράματα σχετικά με την ανίχνευση ακουστικών ρωγμών έχουν παράσχει μέχρι στιγμής αποδοτικότητα ανίχνευσης έως και 90–100%. Ωστόσο, συνήθως προκύπτουν καταστάσεις στις οποίες δεν ανιχνεύονται ρωγμές. Το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται στο σήμα μικρής έντασης και λόγω της αποδυνάμωσης και της διασποράς του πακέτου ακουστικών κυμάτων ήδη μέσα στο δείγμα, το σήμα μπορεί να πνιγεί στον θόρυβο υποβάθρου. Ένας περαιτέρω πιθανός περιορισμός που προκύπτει λόγω της ρύθμισης μέτρησης, π.χ. όταν το εύρος ζώνης του αισθητήρα δεν καλύπτει το πλήρες εύρος συχνοτήτων υπερήχων. Η αντίθετη περίπτωση ενός τεχνητού σήματος ρήξης χωρίς να υπάρχει ρήξη είναι πολύ λιγότερο πιθανή, αλλά πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη [51].

Όσον αφορά τις μεθόδους ανάλυσης αποτυχίας ex-situ, τα ποσοστά ανίχνευσης ρωγμών είναι επίσης πολύ κάτω από το 100%. Για παράδειγμα, η μέθοδος της υγρής χημικής σφυρηλάτησης και της οπτικής ανίχνευσης ρωγμών είναι δεσμευμένη στην προϋπόθεση ότι οι σχισμές οξειδίου είναι αρκετά μεγάλες, δηλαδή, σε κλίμακα μικρομέτρων, για να έρθουν σε επαφή με το μέταλλο το οποίο εξετάζεται για την ύπαρξη ρωγμών. Εδώ το μέγιστο ποσοστό ανίχνευσης είναι περίπου 80–90%. Επιπλέον, αναζητούνται μόνο ρωγμές στο ανώτερο στρώμα οξειδίου, ενώ ενδέχεται να εξακολουθούν να είναι παρούσες και σχισμές στα χαμηλότερα στρώματα οξειδίου στο στοίβα BEOL. Αντίθετα, η ακουστική εκπομπή είναι κυρίως σε θέση να ανιχνεύσει όλα τα γεγονότα της εύθραυστης ρωγμής [51].

Μελετώντας τη σάρωση ακουστικής μικροσκοπίας SAM (Scanning Acoustic Microscopy – SAM), λαμβάνεται το συμπέρασμα πως η χωρική ανάλυση των ρωγμών εξαρτάται από το μήκος κύματος υπερήχων που χρησιμοποιείται. Το μέγιστο εφικτό μήκος κύματος συνήθως περιορίζεται σε περίπου 100 MHz. Πέρα από αυτό το εύρος το βάθος διείσδυσης του υπερήχου σε ένα στερεό περιορίζεται έντονα λόγω της αποδυνάμωσης. Έτσι, ακόμη και αν το SAM είναι μια μη επεμβατική μέθοδος ανίχνευσης ρωγμών, η αποτελεσματικότητα ανιχνεύσεως των ρωγμών μετά την εξέταση είναι πεπερασμένη. Κατά συνέπεια, και αυτή η μέθοδος ex-situ θα πρέπει να συμπληρωθεί με κατάλληλες προσεγγίσεις ανίχνευσης in-situ [51].

Συνεπώς, η μέθοδος ανίχνευσης ακουστικών ρωγμών in-situ επιτρέπει την ποσοτική σύγκριση της αντοχής με τη διεξαγωγή δοκιμών nanoindenter μέχρι ένα σήμα ρήξης να ανιχνεύεται ακουστικά. Η σκοπιμότητα αυτής της μεθόδου αποδεικνύεται με τη βοήθεια ενός nanoindenter και ενός ακουστικού αισθητήρα υπερήχων. Εκτός από την επίδειξη της γενικής σκοπιμότητας της μεθόδου, και σε επίπεδο προϊόντος, έχουν γίνει βήματα για τη ποιοτική εξάρτηση των κρίσιμων φορτίων κατάγματος από τις ακτίνες αποκόλλησης καθώς και για ποιοτικό συσχετισμό μεταξύ της έντασης αιχμής του σήματος (Σχήμα 12) και της παρατηρούμενης εικόνας αποτυχίας (Σχήμα 13). Τα ευρήματα αυτά υποστηρίζουν τη σκοπιμότητα της ακουστικής ανίχνευσης ρωγμών στον τομέα των μικροηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Επιπλέον, έχουν μελετηθεί το πόσο εύχρηστη και την εφαρμόσιμη είναι αυτή η τεχνική, καθώς και οι περιορισμοί της ανίχνευσης ακουστικών ρωγμών σε σύγκριση με εκείνη των τυπικών μεθόδων ανάλυσης αποτυχίας ex-situ, όσον αφορά την επεμβατικότητα σε ένα δείγμα και την αποτελεσματικότητα του εντοπισμού ρήξης, αφήνοντας πολλά θετικά και υποσχόμενα αποτελέσματα [51].

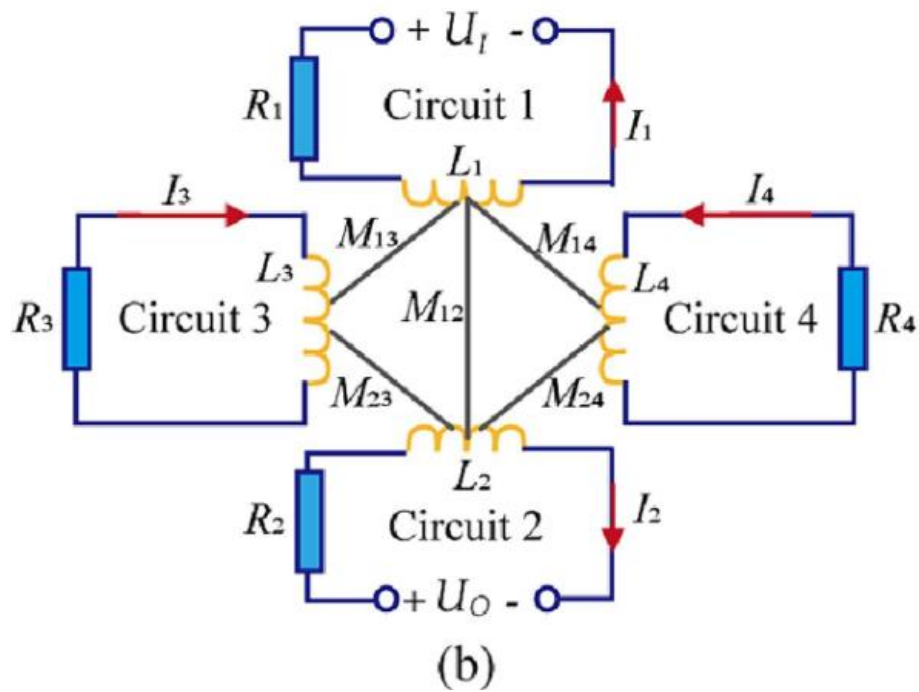
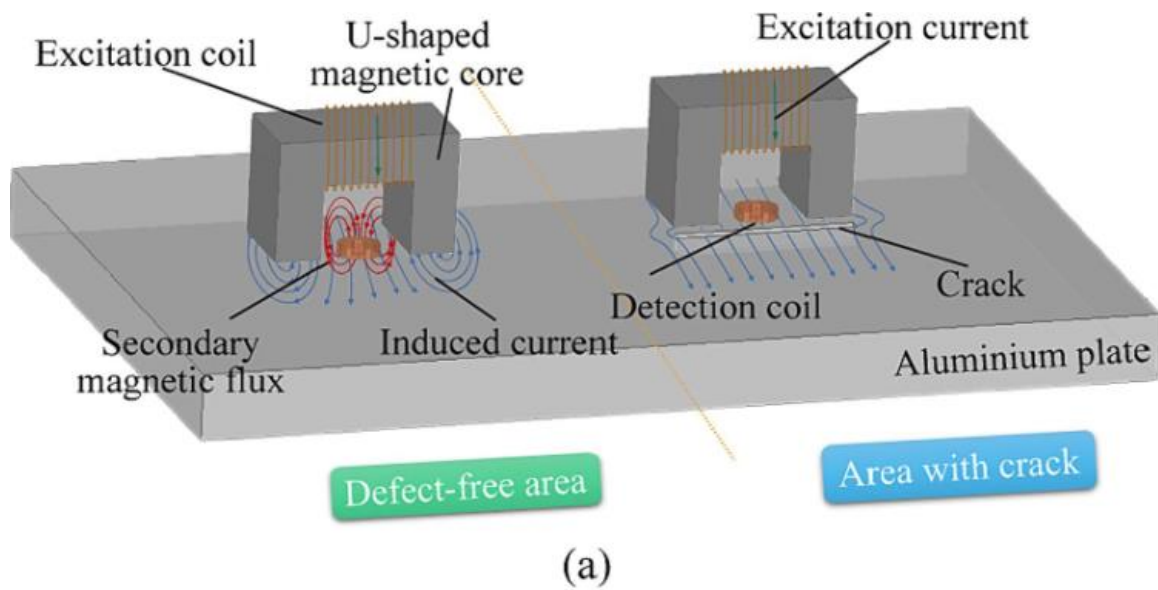
4.6 Κριτήρια για διευκρίνιση βάθους, μεγέθους και άλλων χαρακτηριστικών μίας ρωγμής

Σε σύγκριση με την ανίχνευση ρωγμών επιφάνειας σε πλακάκια αλουμινίου, ο εντοπισμός ρωγμών κάτω από την επιφάνεια επαφής είναι επίσης πιο συνηθισμένος, μιας και συνήθως οι ρωγμές κατά κύριο λόγο δημιουργούνται στο εσωτερικό παρά στην επιφάνεια του υλικού. Το γεγονός αυτό συνιστά μια σημαντική δυσκολία για τον εντοπισμό. Εν τω μεταξύ, η ανίχνευση επιφανειακών και βαθέων ρωγμών θα πρέπει να είναι σε θέση να διαφοροποιήσει και να τις εντοπίσει ταυτόχρονα, προκειμένου να είναι πιο ακριβής η ανίχνευση και να ταιριάζει καλύτερα στο περιβάλλον εφαρμογής μηχανικής. Επί του παρόντος, οι διαφορές στις μορφές κυμάτων σήματος χρησιμοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό του τύπου ρωγμών στις πλάκες αλουμινίου [52]. Να διευκρινιστεί ότι, η διαφορά στη μορφή κύματος

αντικατοπτρίζεται περισσότερο στο εύρος του σήματος, ενώ η διάσταση της ρωγμής, καθώς και το βάθος της μέσα στο υλικό, μπορεί να επηρεάσει το εύρος σημάτων. Εκτός από τα χαρακτηριστικά του μεγέθους του σήματος, η ανίχνευση και η διάκριση μεταξύ ρωγμών τόσο στην επιφάνεια, όσο και στο εσωτερικό του υλικού μπορεί επίσης να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας το γεγονός ότι οι διαφορετικές συχνότητες έχουν διαφορετική ευαισθησία σε ρωγμές σε διαφορετικά βάθη [53]. Ειδικότερα, μία έρευνα που διεξήχθη το 2018, εξακρίβωσε τη σχέση μεταξύ συχνότητας και βάθους ρωγμών με την τεχνική του παλμικού ρεύματος και πέτυχε έναν προσδιορισμό βάθους ρήξης με σχετικό σφάλμα που δεν υπερβαίνει το 2% [54].

4.7 Αρχή ανίχνευσης ρωγμών με BFET (Balanced Field Electromagnetic Technique - BFET)

Η αρχή της ανίχνευσης ρωγμών υψηλής ευαισθησίας χρησιμοποιεί αντίστοιχα αισθητήρες υψηλής ευαισθησίας BFET - Balanced Field Electromagnetic Technique - BFET) . Αυτοί αποτελούνται από ένα ζευγάρι κυλίνδρων που είναι κάθετοι μεταξύ τους. Οι κύλινδροι διέγερσης υπόκεινται σε εναλλασσόμενα ρεύματα για να παράγουν ένα μεταβλητό μαγνητικό πεδίο, το οποίο μεταδίδεται στην πλάκα αλουμινίου από έναν πυρήνα σχήματος U για να δημιουργήσει ένα δυνατό (υψηλής έντασης) ρεύμα που ποικίλλει ως λειτουργία της κατεύθυνσης του ρεύματος διήθησης. Η ανίχνευση επιτυγχάνεται μέσω της αλληλεπίδρασης του ελαττώματος με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Δηλαδή, ελλείψει ελαττωμάτων στην πλάκα αλουμινίου, η συμμετρική δομή επιτρέπει τα αιωρούμενα ρεύματα και από τις δύο πλευρές του άξονα του πηνίου ανίχνευσης να είναι ίσου μεγέθους και σε αντίθετες κατευθύνσεις. Η προκύπτουσα δευτερογενής μαγνητική ροή εισέρχεται και φεύγει από την σπείρα ανίχνευσης σε ίσες ποσότητες και η συνολική ηλεκτρομαγνητική ισορροπία είναι τέτοια που δεν παράγεται προκαλούμενη τάση όπως φαίνεται στο Σχήμα 14(α). Η ανίχνευση μη σιδηρομαγνητικών υλικών όπως το αλουμίνιο βασίζεται στις αγωγικές ιδιότητες τους. Η δομή ανίχνευσης του BFET μπορεί να εξομοιωθεί με το σχήμα ενός κυκλώματος με μια αντίσταση σε σειρά με έναν επαγωγέα, και ένα μοντέλο αμοιβαίας επαγωγής μπορεί να αναπτυχθεί από την άποψη της ανάλυσης αντοχής για να αναλύσει περαιτέρω τη διαδικασία παραγωγής της τάσης ανοίξεως όπως φαίνεται στο Σχήμα 14 (β) [39].



Σχήμα 14: Αρχή ανίχνευσης ρωγμών για πλάκες αλουμινίου με BFET. α) Σχετική απεικόνιση της ανίχνευσης ρωγμών BFET. β) Μοντέλο αμοιβαίας επαγωγής ανίχνευσης πλακιδίων αλουμινίου [39].

4.7.2 Μαθηματική επεξήγηση του μοντέλου αμοιβαίας επαγωγής

Όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 14(α), τα κυκλώματα 1-4 αναπαριστούν τα ισοδύναμα κυκλώματα για τον κύλινδρο διέγερσης, τον κύλινδρο ανίχνευσης, την πλάκα αλουμινίου κάτω από το αριστερό πόδι του μαγνητικού πυρήνα σχήματος U, και την πλακέτα αλουμινίας κάτω από τον δεξί πόδι του μαγνητικού πυρήνα σχήματος U, αντίστοιχα. Ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής M_{12} μεταξύ του κυκλώματος 1 και του κυκλώματος 2 και είναι ανάλογος με το γινόμενο των αντίστοιχων μονάδων ρεύματος των δύο κυκλωμάτων με βάση τον τύπο Neumann [40]. Λόγω της ορθογώνιας θέσης των κυλίνδρων διέγερσης και ανίχνευσης, ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής M_{12} είναι μηδέν. Ως εκ τούτου, η U_0 επαγωγικής τάσης του αισθητήρα και η ισοδύναμη U_1 τάσης κυκλώματος του πηνίου διέγερσης μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$U_1 = Z_1 * I_1 + j * \omega * M_{13} * I_3 + j * \omega * M_{14} * I_4 \quad (9)$$

$$U_1 = Z_2 * I_2 + j * \omega * M_{23} * I_3 + j * \omega * M_{24} * I_4 \quad (10)$$

όπου Z : η σύνθετη αντίσταση και είναι ίση με το άθροισμα της ισοδύναμης αντίστασης και της επαγωγικής αντίστασης.

I : το ρεύμα του κυκλώματος.

M : ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των κυκλωμάτων.

Οι αριθμοί υπογραφής στις εξισώσεις (9) και (10) υποδεικνύουν τα αντίστοιχα ισοδύναμα κυκλώματα [39].

Σύμφωνα με το Σχήμα 14(β), όταν η πλάκα αλουμινίου είναι απαλλαγμένη από ελαττώματα, τα κυκλώματα 3 και 4 έχουν ίση αμοιβαία επαγωγή με το κύκλωμα 2, και τα ρεύματα I_3 και I_4 είναι ίσα σε μέγεθος και αντίθετη κατεύθυνση, με αποτέλεσμα το ρεύμα I_2 να είναι μηδέν. Από την εξίσωση (10), είναι σαφές ότι η τάση U_0 είναι μηδέν. Σε συνδυασμό με την παραπάνω ανάλυση του συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής M_{12} , μπορεί να αποδειχθεί ότι το BFET είναι και αυτό ίσο με το μηδέν. Δηλαδή, ελλείψει ελαττωμάτων, η επαγωγική τάση του κυλίνδρου ανίχνευσης είναι μηδενική. Αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες τεχνικές ηλεκτρομαγνητικής ανίχνευσης απόλυτης τιμής. Αυτό ισχύει, επειδή άλλες μέθοδοι ηλεκτρομαγνητικής ανίχνευσης απόλυτης τιμής εμφανίζουν στην έξοδο τάση με τιμή ίση με αυτή της μέσης τιμής σε απουσία ελαττωμάτων.

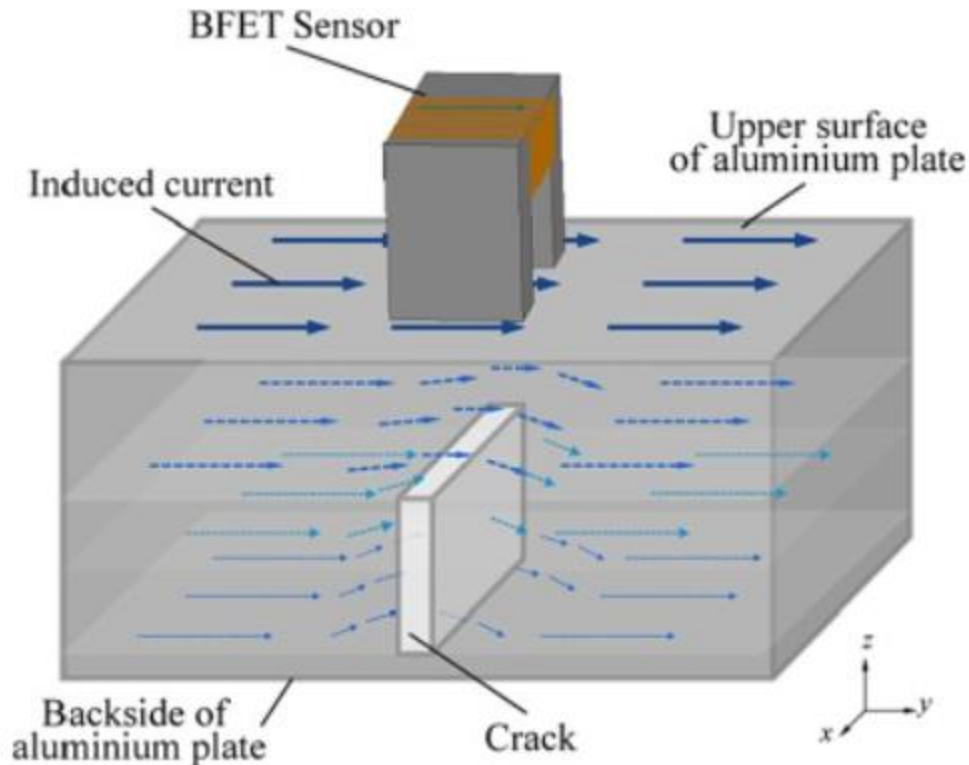
Όταν υπάρχει ρωγμή στην πλάκα αλουμινίου, οι διακοπές στην αγωγιμότητα στην αριστερά και δεξιά από τη ρωγμή θα προκαλέσουν τα αρχικά ομοιόμορφα ρεύματα αιθάλης να συγκεντρωθούν στις άκρες της ρωγμής, δημιουργώντας στρεβλώσεις, και

έτσι η δευτερογενής μαγνητική ροή εισέρχεται και φεύγει από τον σωλήνα ανίχνευσης σε άνισες ποσότητες (Σχήμα 14(α)). Η αντίστοιχη αμοιβαία επαγωγικότητα των κυκλωμάτων 3 και 4 είναι άνιση, με αποτέλεσμα την ανισότητα μεταξύ των ρευμάτων I_3 και I_4 , διαταράσσοντας την αρχική ηλεκτρομαγνητική ισορροπία, και επειδή το I_2 είναι μη μηδενικό συνεπάγεται ότι ούτε και η τάση U_0 είναι μηδενική. Δηλαδή, παράγεται μία προκαλούμενη τάση .

Συνοψίζοντας, το σήμα ανίχνευσης του BFET αλλάζει από το τίποτα σε κάτι, αντί να αλλάζει ξανά σε μια ορισμένη βασική τιμή. Αυτή η αυτό-μηδενική φύση καθιστά το BFET να έχει υψηλή ευαισθησία σε ρωγμές με αδύναμο εύρος σήματος, ο οποίος είναι ο θεμελιώδης λόγος για τον οποίο μπορεί να ανιχνεύσει ραγάδες σε πλάκες αλουμινίου, ειδικά την ανίχνευση των ρωγμών κάτω από την επιφάνεια.

4.8 Διαδικασία παραγωγής σημάτων ανίχνευσης ρωγμών

Θεμελιώδης προϋπόθεση του BFET για την ανίχνευση είναι ότι το ηλεκτρικό ρεύμα εξαπλώνεται στη θέση της ρωγμής και αλληλεπιδρά με αυτό για να δημιουργήσει ένα σήμα. Για ρωγμές στην ανώτερη επιφάνεια των πλακών αλουμινίου, το σήμα που προκύπτει λόγω αυτών σχηματίζεται από το σύστημα λήψης που λαμβάνει την στρέβλωση του ρεύματος άμεσα από την επιφάνειά της πλάκας και το βάθος της επιφανειακής ρωγμής είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει την κλίμακα του σήματος ανάλυσης. Για να διευκρινιστεί περαιτέρω η διαδικασία δημιουργίας του σήματος ανίχνευσης για μια ρωγμή στην πίσω πλευρά, στο Σχήμα 15 απεικονίζεται η διαδικασία της εξάπλωσης του ρεύματος επαγωγής παράλληλα με την επιφάνεια της πλάκας αλουμινίου όπως [39].



Σχήμα 15: Η διαδικασία παραγωγής σήματος ανίχνευσης ρωγμών για πλάκες αλουμινίου με BFET [39].

Στο Σχήμα 15, το προκαλούμενο ρεύμα που παράγεται από τον αισθητήρα BFET αποσυντίθεται σταδιακά κατά μήκος της κατεύθυνσης του άξονα z από την άνω επιφάνεια της πλάκας αλουμινίου σύμφωνα με τον βασικό νόμο της ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης πεδίου. Για ρωγμές στην πίσω πλευρά της πλάκας αλουμινίου, δεδομένου ότι το ρήγμα έχει ύψος προς την κατεύθυνση z , τα αιωρούμενα ρεύματα στη διαμήκη θέση του ρήγματος θα ρέουν γύρω από την ρήξη για να διατηρήσουν τη συνέχεια, με αποτέλεσμα την παραμόρφωση των αρχικά συμμετρικά ισορροπημένων αιωρούμενων ρευμάτων. Η προκαλούμενη στρέβλωση ρεύματος που προκαλείται από την ρωγμή στην πίσω πλευρά προκαλεί άνισες δευτερογενείς μαγνητικές ροές που εισέρχονται και φεύγουν από την σπείρα ανίχνευσης. Η συνδυασμένη επίδραση της προκαλούμενης στρέβλωσης ρεύματος σε κάθε θέση της ρωγμής προς την κατεύθυνση του ύψους λαμβάνεται από τον πηνίο ανίχνευσης, με αποτέλεσμα ένα σήμα ανίχνευσης [39].

Σύμφωνα με όσα σκιαγραφήθηκαν παραπάνω, η μέθοδος BFET βασίζεται στην επίδραση των προκαλούμενων ρευμάτων για τον εντοπισμό ρωγμών σε πλάκες αλουμινίου. Επιπλέον, η αρχή αλλά και η διαδικασία ανίχνευσης για ρωγμές στην ανώτερη επιφάνεια της πλάκας αργιλίου είναι η ίδια με αυτή της BFET για τον

προσδιορισμό των αξονικών ρυτίδων στις πλάκες χάλυβα. Οι ρωγμές στο πίσω μέρος της πλάκας αλουμινίου συνεπάγονται την εξάπλωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και παράλληλα τις πολύπλοκες επιδράσεις του ρήγματος, οι οποίες καθίστανται ιδιαίτερα χρήσιμες για τη μέθοδο επίτευξης ανίχνευσης ρωγμής στο πίσω μέρος της πλάκας αλουμινίου.

4.8.1 Νόμος διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

Η προϋπόθεση για την ανίχνευση ρωγμών στο πίσω μέρος της πλάκας αλουμινίου με BFET είναι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο να εξαπλώνεται στην τοποθεσία των ραγάδων. Δεδομένου ότι το αλουμίνιο είναι ένα μη σιδηρομαγνητικό υλικό, η ανίχνευση BFET των πλακών αργιλίου παράγει ένα σήμα ανίχνευσης λόγω της στρέβλωσης της πυκνότητας ρεύματος που προκαλείται από τις ρωγμές. Ως εκ τούτου, η ανάλυση του νόμου διάδοσης επικεντρώνεται στο ηλεκτρικό πεδίο. Δεδομένου ότι το BFET χρησιμοποιεί ημιτονική διέγερση, εμπίπτει στο πεδίο των μελετών του χρόνου-αρμονικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Ως εκ τούτου, για την περιγραφή συγκεκριμένα της σχέσης μεταξύ του βάθους διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και των ποσοτήτων πεδίων, οι εξισώσεις του Maxwell εκφράζονται στο πεδίο της συχνότητας ή πεδίο Fourier [39].

Συμπερασματικά, ισχύει ότι το εύρος και η φάση της πυκνότητας του προκαλούμενου ρεύματος θα αλλάξει σε σχέση με την πυκνότητα του ενδεχόμενου ρεύματος που διαρρέει την ανώτερη επιφάνεια της πλάκας αλουμινίου όταν η ρωγμή βρίσκεται οπουδήποτε κάτω από την άνω επιφάνειά της. Επίσης, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, το σήμα ανίχνευσης BFET οφείλεται στη μεταβολή της πυκνότητας του προκαλούμενου ρεύματος. Ως εκ τούτου, το εύρος και η φάση του σήματος ανίχνευσης BFET μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση μεταξύ επιφανειακών ρωγμών και ρωγμών που βρίσκονται στο πίσω μέρος των πλακών αλουμινίου και για τον εντοπισμό του βάθους τους. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να σημειωθεί ότι αντίστοιχα με το αλουμίνιο, και στα υπόλοιπα αγώγιμα υλικά το βάθος μέσα στο οποίο βρίσκεται η ρωγμή επηρεάζει με παρόμοιο τρόπο την πυκνότητα του ρεύματος ανίχνευσης. Με βάση, λοιπόν, αυτήν την ανάλυση, κατά την διαδικασία ανίχνευσης ρωγμών στο πίσω μέρος της πλάκας αλουμινίου με BFET, ένας σπειροειδής ανιχνευτής λαμβάνει το συνδυασμένο αποτέλεσμα της στρέβλωσης του ρεύματος και της αλλαγής της πυκνότητάς του που παράγεται σε όλες τις θέσεις που αντιστοιχούν στο πλήρες ύψος του ίδιου του ρήγματος. Συνεπώς, με αυτόν τον τρόπο εντοπίζεται με πολύ καλή ακρίβεια το βάθος και το μέγεθος της ρωγμής στο πίσω μέρος της πλάκας [39].

4.9 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, περιγράφηκαν οι τεχνικές που εφαρμόζονται για τον

εντοπισμό ρωγμών, όπως αυτή με την χρήση αισθητήρα τύπου Vallen, αυτή με νανοδείκτη, αυτή με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες καθώς και αυτή με τη χρήση της μεθόδου μαγνητικών σωματιδίων MPI. Ωστόσο, ιδιαίτερη έμφαση χρειάζεται να δοθεί στην μέθοδο ανίχνευσης που βασίζεται στο BFET για την ανάλυση ρωγμών στην άνω επιφάνεια και στο πίσω μέρος των πλακών αλουμινίου. Με την ανάλυση της αρχής ανίχνευσης της πλάκας αλουμινίου με BFET και το νόμο διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, η διαδικασία παραγωγής σήματος για την εύρεση των ρωγμών στην άνω επιφάνεια και πίσω πλευρά καθορίζεται θεωρητικά. Οι λόγοι για τη διαφορά των χαρακτηριστικών σήματος μεταξύ ρωγμών στην άνω επιφάνεια και στην πίσω πλευρά διευκρινίζονται από την εξίσωση διείσδυσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, εξίσωση (11) σε συνδυασμό με προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων. Ο νόμος της μεταβολής των βασικών δύο χαρακτηριστικών, δηλαδή του πλάτους και της φάσης των ανιχνευόμενων σημάτων μεταξύ των δύο λαμβάνεται και ανάλογα την διακύμανση των τιμών τους κρίνεται αν και σε τι βάθος υπάρχει ρωγμή [39]. Με βάση τα πειράματα που διεξήχθησαν για την επαλήθευση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθόδου, προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα συμπεράσματα:

1. Η στρέβλωση της πυκνότητας ρεύματος που προκαλείται από ρωγμές σε πλάκες αλουμινίου είναι πιο συγκεντρωμένη στα άκρα των ρωγμών. Οι ρωγμές που βρίσκονται κάτω από το βάθος του δέρματος παράγουν επίσης λιγότερη στρέβλωση ρεύματος. Ο βαθμός στρέβλωσης του ρεύματος μειώνεται απότομα με την αύξηση του βάθους ταφής ρωγμών. Η αυτό-μηδενική φύση του BFET, δηλαδή η ιδιότητά του να διατηρεί μηδενική τάση σε θέσεις χωρίς ελαττώματα, βελτιώνει την ευαισθησία ανίχνευσης, η οποία είναι ο λόγος για τον οποίο το BFET είναι σε θέση να ανιχνεύσει ρωγμές σε πλάκες αλουμινίου, ειδικά ρωγμές που βρίσκονται πιο βαθιά μέσα στο υλικό.
2. Καθώς το βάθος της ρωγμής στην άνω επιφάνεια της πλάκας αλουμινίου αυξάνεται, η κλίμακα του σήματος ανίχνευσης αυξάνει γραμμικά και η φάση μειώνεται γραμμικώς και είναι θετική. Καθώς το βάθος της ρωγμής στην πίσω πλευρά αυξάνεται, το εύρος του σήματος ανίχνευσης μειώνεται εκθετικά και η φάση αυξάνει γραμμικά και είναι αρνητική. Οι χαρακτηριστικές γραφικές παραστάσεις απεικονίζονται στο Σχήμα 16(α) και 16(β).
3. Το δισδιάστατο διάγραμμα φάσης και πλάτους μπορεί να διακρίνει μεταξύ ρωγμών στην άνω επιφάνεια και το πίσω μέρος της πλάκας αλουμινίου. Η γωνία τροχιάς του διαγράμματος δισδιάστατης φάσης φάσματος της ανώτερης επιφάνειας και των πίσω ρωγμών περιστρέφεται σε μια σταθερή τιμή εντός του εύρους κατανομής. Αυτή η γωνία τροχιάς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της απόστασης μεταξύ της ρωγμής και της επιφάνειας ανίχνευσης, επιτρέποντας έτσι τον εντοπισμό της ρήξης. Οι χαρακτηριστικές γραφικές παραστάσεις απεικονίζονται στο Σχήμα 16(γ) και 16(δ).

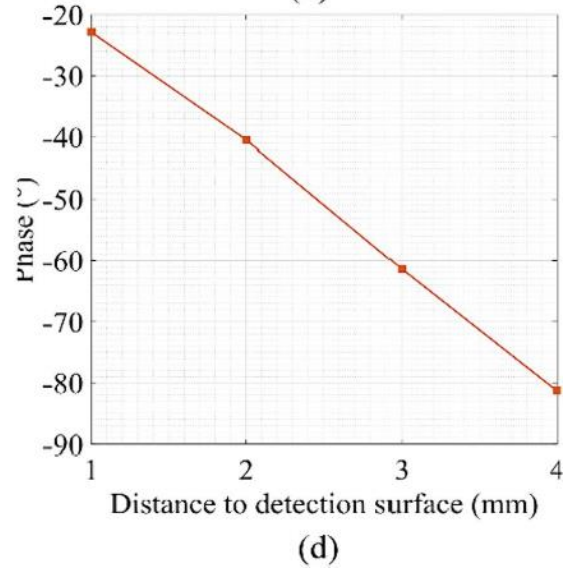
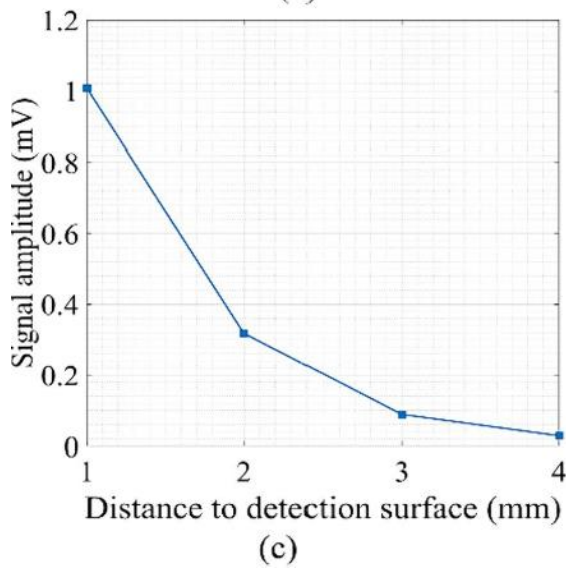
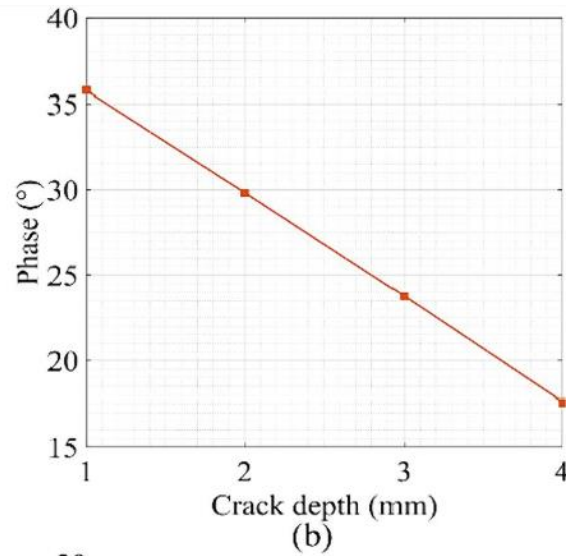
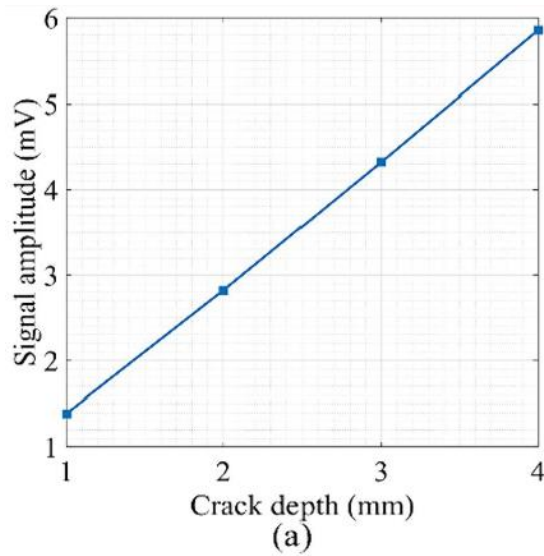
$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (11)$$

Όπου:

$\mathbf{H}$: η πυκνότητα ροής του μαγνητικού πεδίου,

$\mathbf{J}_f$: η πυκνότητα ροής του μαγνητικού ρεύματος στο υλικό,

$\mathbf{D}$: η πυκνότητα του διηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 16: Χαρακτηριστικά διαγράμματα πλάτους και φάσης του σήματος ανίχνευσης προσομοίωσης ρωγμών για την πλάκα αλουμινίου a) Διάγραμμα πλάτους του σήματος ανίχνευσης των ρωγμών της ανώτερης επιφάνειας ως προς το βάθος ρωγμής. b) Διάγραμμα φάσης του σήματος ανίχνευση των ρωγμών της ανώτερης επιφάνειας ως προς το βάθος ρωγμής. c) Διάγραμμα πλάτους του σήματος ανίχνευσης των ρωγμών της πίσω επιφάνειας ως προς το βάθος ρωγμής. d) Διάγραμμα φάσης του σήματος ανίχνευσης των ρωγμών της πίσω επιφάνειας ως προς το βάθος ρωγμής [39].

Κεφάλαιο 5 Τεχνικές εντοπισμού ρωγμών με ΑΙ, βαθειά μάθηση και μηχανική μάθηση

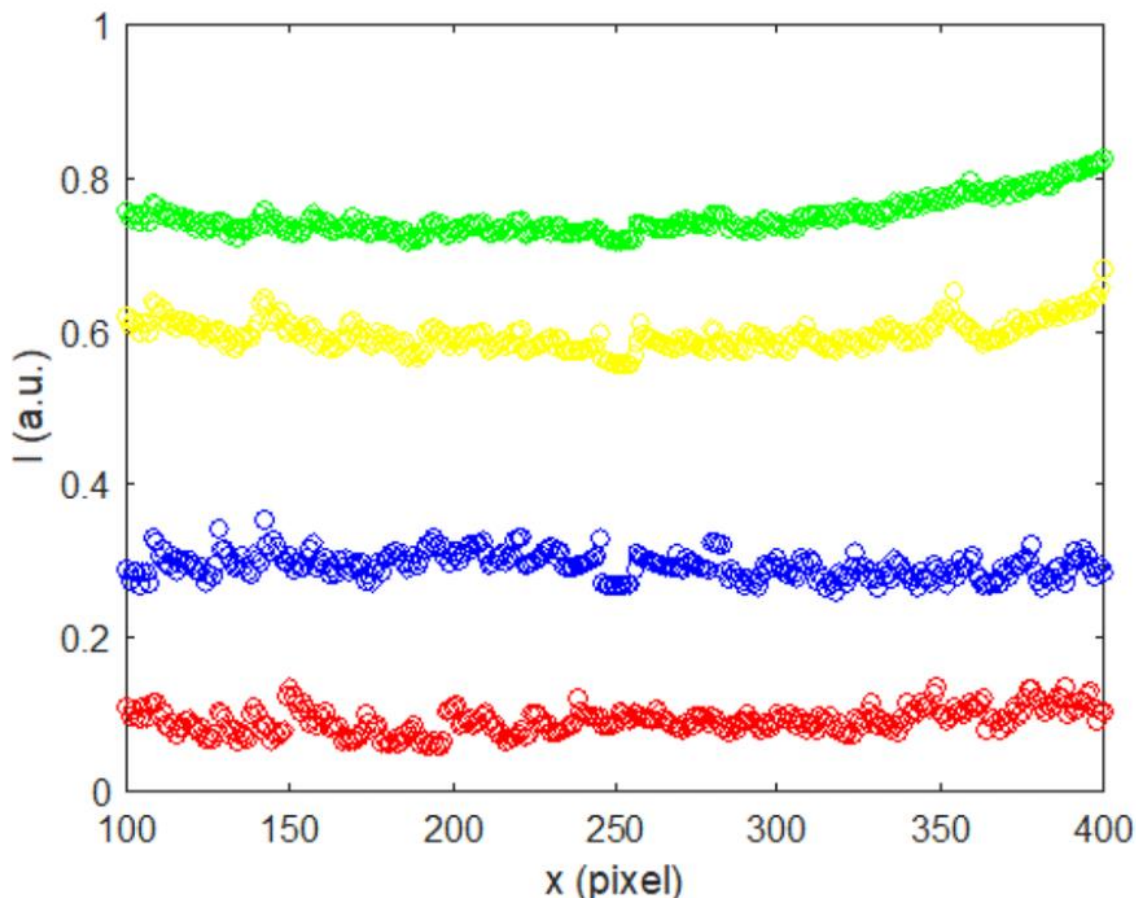
5.1 Εισαγωγή

Όπως σκιαγραφήθηκε και παραπάνω, ο εντοπισμός ελαττωμάτων στις κατασκευές αποτελεί ένα σοβαρό θέμα για όλους τους επιστήμονες και τους μηχανικούς. Ωστόσο, η ανίχνευση ρωγμών είναι ένα πολύ επίπονο έργο εάν εκτελείται μέσω χειροκίνητης οπτικής επιθεώρησης. Πολλά στοιχεία της υποδομής πρέπει να ελέγχονται τακτικά και, ως εκ τούτου, δεν είναι εφικτό, καθώς θα απαιτούν σημαντικούς ανθρώπινους πόρους. Αυτό μπορεί, επίσης, να οδηγήσει σε περιπτώσεις όπου οι ρωγμές δεν ανιχνεύονται. Ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη για την αυτόματη ανίχνευση ελαττωμάτων στην υποδομή για να εξασφαλιστεί η αποτελεσματικότητά της και η αξιοπιστία της. Χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας εικόνων, οι εικόνες που έχουν συλλεχθεί από τα μέρη της υποδομής μπορούν να αναλυθούν για τον εντοπισμό πιθανών ελαττωμάτων. Εκτός από την επεξεργασία εικόνων, οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης εφαρμόζονται όλο και περισσότερο για να εξασφαλίσουν καλύτερα αποτελέσματα απόδοσης και ανθεκτικότητα στην ανίχνευση ρωγμών. Παρακάτω παρέχεται μια ανασκόπηση των τεχνικών ανίχνευσης ρωγμών με βάση την εικόνα που εφαρμόζουν επεξεργασία εικόνας ή / και μηχανική μάθηση. Συνολικά 30 ερευνητικά άρθρα έχουν συγκεντρωθεί για την ανασκόπηση που δημοσιεύεται σε κορυφαία περιοδικά και συνέδρια την τελευταία δεκαετία. Μια ολοκληρωμένη ανάλυση και σύγκριση αυτών των μεθόδων διεξάγεται για να επισημανθούν οι πιο ελπιδοφόρες αυτοματοποιημένες προσεγγίσεις για την ανίχνευση ρωγμών, καθώς και για να αναδειχθούν ποιες τεχνικές είναι πιο διαδεδομένες και αποτελεσματικές [55].

5.2 Κατηγοριοποίηση χαρακτηριστικών των ρωγμών για καθεμία μέθοδο

Χαρακτηριστικά είναι τα κομμάτια των πληροφοριών που αντιπροσωπεύουν την ταυτότητα ενός αντικειμένου είτε για ταξινόμηση είτε για ανίχνευση. Το σύστημα μαθαίνει αυτά τα χαρακτηριστικά για να κατανοήσει τη δομή ενός αντικειμένου και να διαφοροποιήσει κάθε αντικείμενο στην κατηγορία στην οποία ανήκει. Η διαφοροποίηση είναι ένα εύκολο έργο για τους ανθρώπους, αλλά μια μηχανή απαιτεί

πολλά χαρακτηριστικά για να κατανοήσει την μοναδικότητα ενός αντικειμένου. Η επεξεργασία εικόνας χρησιμοποιεί μορφολογικές λειτουργίες όπως η διάβρωση (erosion) και τη διεύρυνση (dilation) για να εξαγάγει χαρακτηριστικά εικονοστοιχείων από την εικόνα. Οι μορφολογικές λειτουργίες αυξάνουν επίσης την αντίθεση μεταξύ των pixels που αντιπροσωπεύουν μία ρωγμή και αυτών που δεν αντιπροσωπεύουν. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν πληροφορίες άκρων, την αντίθεση μεταξύ του εμπροσθεν τμήματος και φόντο, και την ένταση των εικονοστοιχείων. Η μηχανική μάθηση χρησιμοποιεί χειροποίητα χαρακτηριστικά για να εξαγάγει πληροφορίες ρωγμών από την εικόνα. Για τα νευρωνικά δίκτυα, τα κρυμμένα στρώματα εξαγουν αυτόματα πληροφορίες χαρακτηριστικών από τις εικόνες. Τα χαρακτηριστικά μιας εικόνας είναι συνήθως οι τιμές των εικονοστοιχείων στην εικόνα. Το CNN (Convolutional Neural Network) χρησιμοποιεί τους πυρήνες για να εξαγάγει χαρακτηριστικά χαμηλού επιπέδου σε αρχικά στρώματα και χαρακτηριστικά υψηλού επιπέδου ή περίπλοκα χαρακτηριστικά σε υψηλότερα επίπεδα. Σε κάθε επίπεδο, αυτά τα χαρακτηριστικά παρέχουν συγκεκριμένες πληροφορίες όπως άκρες, υφή, γωνία, ένταση, χρώμα, θέση και πληροφορίες τοποθεσίας κάθε εικονοστοιχείου. Το τελικό στρώμα διαφοροποιεί ανάμεσα σε pixels τα σημεία που αντιπροσωπεύουν ρωγμή και αυτών που δεν αντιπροσωπεύουν. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να ταξινομηθούν σε ισχυρή θετική ενεργοποίηση, ισχυρή αρνητική και ουδέτερη, η οποία υποδεικνύει τη δύναμη ενεργοποίησης κάθε καναλιού [56]. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 17, ανάλογα την ενεργοποίηση στην οποία βρίσκεται το κάθε χαρακτηριστικό, αναπαρίσταται και με διαφορετικό χρώμα στο διάγραμμα. Ο δείκτης I είναι μια αυθαίρετη μονάδα μέτρησης κατά μήκος της ρωγμής μιας καμπυλωτής ρήξης (ακτίνα 20 mm) για 4 τιμές βάθους. Με κόκκινο χρώμα αναπαρίστανται χαρακτηριστικά ρωγμής βάθους έως και 0.5 mm, με μπλε χρώμα χαρακτηριστικά βάθους έως και 1 mm, με κίτρινο χρώμα έως και 2, και με πράσινο έως και 3. Σημειώνεται ότι ένα εικονοστοιχείο αντιπροσωπεύει 100 μm .



Σχήμα 17: Κατηγορίες ενεργοποίησης κάθε ρixel ανάλογα τα χαρακτηριστικά του [57]

5.3.Εντοπισμός ρωγμών με βάση την επεξεργασία εικόνας:

Το Σχήμα 18 δείχνει τη βασική αρχιτεκτονική μιας μεθόδου επεξεργασίας εικόνας για την ανίχνευση ρωγμών. Αρχικά, χρησιμοποιώντας μια κάμερα ή οποιοδήποτε άλλο μηχανισμό απεικόνισης, συλλέγονται εικόνες υψηλής ανάλυσης του στοιχείου υπό εξέταση. Οι εικόνες στη συνέχεια προεπεξεργάζονται, διαδικασία η οποία περιλαμβάνει τη χρήση φίλτρων, την τμηματοποίηση και άλλες προσεγγίσεις για την απομάκρυνση του θορύβου και των σκιών από την εικόνα. Η εικόνα μπορεί να μετατραπεί σε γκριζα ή δυαδική μορφή εάν απαιτείται από τη συγκεκριμένη μέθοδο ανίχνευσης ρωγμών που χρησιμοποιείται. Στην συνέχεια, η προκύπτουσα εικόνα εφαρμόζεται στη διαδικασία ανίχνευσης ρωγμών, η οποία χρησιμοποιεί τεχνικές επεξεργασίας εικόνας όπως ο εντοπισμός άκρων, η τμηματοποίηση ή η ανάλυση εικονοστοιχείων για να επισημάνει ή να τμηματίζει το ραγισμένο μέρος της εικόνας [58]. Η εκτίμηση των παραμέτρων περιλαμβάνει τον υπολογισμό των ειδικών ιδιοτήτων της ανιχνευόμενης ρωγμής, όπως το μήκος, το πλάτος, το βάθος και την πυκνότητα. Τέτοια μέτρα βοηθούν σημαντικά στη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη σοβαρότητα μιας ρωγμής.

Figure 1. Image Processing Methods for Crack Detection.



Σχήμα 18: Βήματα μεθόδου εντοπισμού ρωγμών βασισμένη στην επεξεργασία εικόνας [59]

Αναλυτικότερα, οι τεχνικές που ριζώνουν από την επεξεργασία εικόνας για την ανίχνευση ρωγμών περιλαμβάνουν κυρίως την προετοιμασία εικόνας, τη διαίρεση σε επιμέρους τμήματα, την εξαγωγή χαρακτηριστικών από την εικόνα, και την αναγνώριση ρωγμών. Τεχνικές επεξεργασίας εικόνας χρησιμοποιούν την ανίχνευση άκρων (σκανάρισμα για τον εντοπισμό της ξαφνικής αλλαγής στην ένταση των εικονοστοιχείων των pixel) και τη διαίρεσή τους (identify the object). Αυτού του είδους η μέθοδος, είναι μία από τις πρώτες τεχνικές για τον εντοπισμό, την ταξινόμηση και την κατανομή της ρωγμής από τα οπτικά δεδομένα μέσω των εικόνων που συλλαμβάνονται για την επίλυση του προβλήματος ανίχνευσης.

Πολλές τεχνικές χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση ρωγμών μέσω μεθόδων επεξεργασίας εικόνας. Από τις εικόνες, οι ρωγμές μπορούν να ανιχνευθούν χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες των άκρων, τις μορφολογικές λειτουργίες, τις στατιστικές μεθόδους, την ψηφιακή συσχέτιση εικόνας, και την αντιστοιχία μοτίβων [56, 60]]. Η διαδικασία διεξάγεται από τη σύλληψη της εικόνας, την επεξεργασία, την εξαγωγή χαρακτηριστικών ρωγμών και την αναγνώριση της ρωγμής. Τα pixels που περιέχουν σχισμές υποτίθεται ότι είναι πιο σκούρα σε ένταση σε σύγκριση με άλλα κοντινά pixels. Η αντίθεση μεταξύ των γειτονικών εικονοστοιχείων μιας εικόνας συγκρίνεται για την ταξινόμηση των περιοχών ρωγμής και μη ρήξης. Βάσει της έντασης των εικονοστοιχείων, ένα κατώτατο όριο καθορίζεται για την ταξινόμηση μεταξύ των pixels ρωγμών και μη ρωγμών χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους [50]. Διαφορετικές εντάσεις χρησιμοποιούνται για να καθοριστεί η πιθανότητα του εικονοστοιχείου να ταξινομηθεί ως εικονίδιο που απεικονίζει μία περιοχή όπου υπάρχουν ρωγμές ή μία που δεν υπάρχουν.

Αναπτύσσεται μια διαδικασία τριών σταδίων βασισμένη στη μαθηματική μορφολογία και την αξιολόγηση καμπυλότητας. Η μορφολογία βελτιώνει την ποιότητα της εικόνας με ρωγμές, και στη συνέχεια εκτελείται μια λειτουργία καμπυλότητας. Η τελευταία εικόνα περνά μέσα από ένα γραμμικό φίλτρο για να διακρίνει τις ρωγμές από το ανάλογο φόντο. Αναπτύσσεται μια μέθοδος ποσοτικοποίησης των ρωγμών της 2D εικόνας με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης γκρίζας κλίμακας. Η μαύρη και λευκή

εικόνα διαχωρίζεται, φιλτράρεται και ποσοτικοποιείται για να ενισχυθεί μέσω πέντε μορφολογικών επεμβάσεων. Τα συνδεδεμένα εξαρτήματα επισημαίνουν τις ρωγμές και καθορίζουν το πλάτος, το μήκος, την περιοχή, την αναλογία πλευρών και τον προσανατολισμό [61].

Η εξαγωγή στατιστικών ιδιοτήτων από εικόνες πεζοδρόμων χρησιμοποιείται επίσης για τη διαίρεση των εικόνων ρωγμών. Για τη συντήρηση και την επισκευή των δρόμων, έχει σχεδιαστεί μία μέθοδος ανίχνευσης ρωγμών και ταξινόμησης η οποία πρώτα υποβαθμίζει τον θόρυβο από την εικόνα και στη συνέχεια επισημαίνει τις ρωγμές [62]. Μετά την εκμάθηση των χαρακτηριστικών χρησιμοποιώντας ένα δέντρο αποφάσεων, ο στατιστικός ταξινομητής εφαρμόζεται για την ανίχνευση ρωγμών σε οδικές εικόνες.

Όσον αφορά στη μέθοδο ανίχνευσης ρωγμών σε δύο βήματα, αυτή έχει σχεδιαστεί με βάση το στατιστικό φιλτράρισμα. Πρώτα, γίνεται εξαγωγή των χαρακτηριστικών ρωγμών και στη συνέχεια ο τμηματισμός τους [56]. Επιπρόσθετα, μία άλλη μέθοδος που βασίζεται σε γραφήματα χρησιμοποιείται για να εντοπίσει τις ιδιότητες των ρωγμών και αργότερα να ανιχνεύσει την ρωγμή, ωστόσο αυτή η διαδικασία απαιτεί τη χειροκίνητη εισαγωγή του σημείου έναρξης και λήξης της ρωγμής. Αυτό το πρόβλημα επιλύθηκε όταν ο προτεινόμενος αλγόριθμος ανίχνευσης ρωγμών και παρακολούθησης άρχισε να εξάγει τις ιδιότητες ραγών για τον εντοπισμό κρυφών. Η ταξινόμηση εκτελείται επίσης με τη μέθοδο ιστογράφησης χρησιμοποιώντας μια Υποστηρικτική Μηχανή Διανυσμάτων (Supported Vector Machine - SVM) για να ταξινομήσει την ρωγμή και την εικόνα χωρίς ρήξη [56]. Οι μέθοδοι ταξινόμησης βασίζονται σε δυαδικό δέντρο και backpropagation (backpropagation ή αναδρομική διάδοση είναι μια θεμελιώδης μέθοδος εκπαίδευσης στα νευρωνικά δίκτυα που επιτρέπει τη βελτίωση της ακρίβειας του μοντέλου), η οποία διαιρεί την εικόνα σε περιοχές ρωγμών και μη, συγκρίνοντας τις τιμές της κλίμακας του γκρι.

Αξίζει, τέλος, να αναφερθεί η μέθοδος του Otsu, η οποία παρέχει μια καλή βοήθεια στη διαίρεση των εικόνων [60]. Αρχικά, αξιοποιείται το πρωτόκολλο Protocol Component Analysis (PCA), που χρησιμοποιείται συνήθως για τη μείωση των διαστάσεων, χρησιμοποιείται επίσης για τον προσδιορισμό ρωγμών από το σύνολο εικόνων. Στην συνέχεια, τα φίλτρα χρησιμοποιούνται επίσης για την ανίχνευση ρωγμών συνδυάζοντας τις δυαδικές εκδόσεις της εικόνας. Η αρχική εικόνα είναι επεξεργασμένη με φίλτρα διαφορετικών προσανατολισμών [62]. Με βάση μια τιμή κατώτατου ορίου, τα εικονοστοιχεία φόντου διαχωρίζονται από τα εικονίδια εμπρός, και το φίλτρο του Sobel εξαλείφει τον θόρυβο. Τέλος, η μέθοδος του Otsu εφαρμόζεται για την ανίχνευση μεγάλων ρωγμών [62]. Μια ανίχνευση ρωγμών με βάση το πρόγραμμα MATLAB και το εργαλείο CrackIT προτείνεται για να ανιχνεύσει και να χαρακτηρίσει τις λεπτές ρωγμές με τουλάχιστον 2 mm πλάτος. Οι ρωγμές στη δομή του σκυροδέματος ανιχνεύονται πρώτα μετατρέποντας την εικόνα σε κλίμακα γκρι και στη συνέχεια εφαρμόζοντας το φίλτρο του Sobel για την ανίχνευση της ρήξης [56].

5.3.1 Περιορισμοί των τεχνικών ανίχνευσης ρωγμών με βάση την επεξεργασία εικόνas

Για την ασφάλεια των πολιτικών υποδομών, χαμηλού κόστους αυτόματη ανίχνευση ρωγμών έχει σχεδιαστεί για σκοπούς συντήρησης. Η ανίχνευση ρωγμών μέσω τεχνικών επεξεργασίας εικόνas δεν είναι απλή. Πολλές περιβαλλοντικές συνθήκες όπως σκιά, σκόνη, θόρυβος λεκέδων, πολύχρωμες κηλίδες, ανομοιογενής φωτισμός, πολλαπλές σκηνές φόντου και αλλαγές στο σύνολο δεδομένων μπορούν να αποτελέσουν τροχοπέδη στην ανίχνευση ρωγμών από την εικόνα. Κατά το σχεδιασμό ενός αλγορίθμου, πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν τα χαρακτηριστικά τόσο της ρωγμής όσο και του φόντου, συμπεριλαμβανομένης της θέσης της κάμερας, της ανάλυσης της φωτογραφικής μηχανής, του μήκους της ρωγμής, του πλάτους της, και της γωνίας μιας ρωγμής στην καταγεγραμμένη εικόνα. Μια ρωγμή μπορεί να είναι ένα ή μερικά εικονοστοιχεία στην εικόνα και μια γραμμή με κάποιο πλάτος, η οποία είναι γενικά πιο σκούρα από τα εικονίδια φόντου.

Οι μέθοδοι ανίχνευσης ρωγμών χωρίζονται σε δύο κατηγορίες με βάση τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούν: σε αυτές που χρησιμοποιούν χαρακτηριστικά χαμηλού επιπέδου και σε αυτές που χρησιμοποιούν χαρακτηριστικά υψηλού επιπέδου. Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν δύο μέρη: ανίχνευση άκρων και κατανομή εικόνas. Ρωγμές με καλή συνέχεια γενικά έχουν υψηλή αντίθεση και για αυτό είναι εύκολο να ανιχνευθούν με υψηλή ακρίβεια, αλλά το πρόβλημα στην ανίχνευση ρωγμών είναι ο θόρυβος στο παρασκήνιο (κακή συνέχεια λόγω του θορύβου και χαμηλή αντίσταση λόγω της σκιάς και την κατεύθυνση της έκθεσης) που οδηγεί στην υποβάθμιση των μεθόδων. Αυτά βασίζονται σε χαρακτηριστικά χαμηλού επιπέδου. Η ανίχνευση ρωγμών μέσω τεχνικών επεξεργασίας εικόνas είναι προκλητική, ιδιαίτερα όταν το ρήγμα έχει κακή συνέχεια και χαμηλή αντίθεση μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων [56].

Τα προβλήματα με ένταση και με αλγόριθμους που βασίζονται στην αντίθεση περιλαμβάνουν τα εξής [56]:

1. Η αλλαγή στον προσανατολισμό της εικόνas επηρεάζει την έξοδο.
2. Δισδιάστατες εικόνες δεν διαθέτουν σε βάθος πληροφορίες.
3. Δεν διαθέτουν κατάλληλη μεθοδολογία που να προσδιορίζει το καθολικό κατώτατο όριο.
4. Το αποτέλεσμα κυμαίνεται με την αλλαγή της απόστασης μεταξύ της πηγής και της κάμερας.
5. Για θορυβώδεις εικόνες, αυτοί οι αλγόριθμοι δεν επιτυγχάνουν αξιοσημείωτες επιδόσεις σε σύγκριση με τις εικόνες με λιγότερο θόρυβο.
6. Σκούρα εικονοστοιχεία στην εικόνα που δεν αποτελούν μέρος των γραμμών ρωγμών μπορούν επίσης να ανιχνευθούν λανθασμένα ως τμήμα ρήξης.
7. Ορισμένοι αλγόριθμοι ανίχνευσης ρωγμών που βασίζονται σε εικόνες για την τελική κρίση απαιτούν ανθρώπινη επιθεώρηση.

8. Ένας αλγόριθμος μπορεί να εκτελεστεί καλά για ένα συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων, αλλά η απόδοσή του μπορεί ακόμα να υποβαθμιστεί για άλλα σύνολα δεδομένων λόγω διαφορετικών συνθηκών.
9. Λίγες μέθοδοι απαιτούν επίσης χειροκίνητη εισαγωγή του σημείου έναρξης και λήξης της ρωγμής, η οποία απαιτεί πρόσθετη προσπάθεια όσον αφορά την επεξεργασία και το χρόνο.
10. Τα χειροποίητα χαρακτηριστικά δεν είναι ανθεκτικά και συνεπάγονται χρονοβόρο υπολογισμό. Ως εκ τούτου, αυτά τα χαρακτηριστικά δεν είναι αρκετά για να διαφοροποιήσουν τη ρωγμή και σύνθετο φόντο, ειδικά στην εικόνα χαμηλής ανάλυσης.

5.4 Εντοπισμός ρωγμών με βάση την μηχανική μάθηση:

Τα βασικά βήματα για την κατασκευή ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης για την ανίχνευση ρωγμών απεικονίζονται Σχήμα 19. Στο πρώτο βήμα, πρέπει να συγκεντρωθεί ένα σύνολο δεδομένων που να δείχνει ρωγμές επιφάνειας, οι οποίες πρέπει να ανιχνευθούν χρησιμοποιώντας το μοντέλο μηχανικής μάθησης, δηλαδή αρχικά γίνεται εκπαίδευση του μοντέλου ταξινομητή και εν συνεχεία ελέγχεται το πόσο καλή και ακριβής ήταν η εκπαίδευσή του. Για παράδειγμα, μια μελέτη με επικεφαλής τον Linetal χρησιμοποίησε 30.000 εικόνες χαμηλής ανάλυσης για εκπαίδευση [63]. Οι εικόνες προεπεξεργάζονται χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας εικόνας για τη μείωση του θορύβου, την αφαίρεση των σκιών και τη ρύθμιση άλλων ιδιοτήτων όπως το μέγεθος και η φωτεινότητα των εικόνων. Οι ρωγμές σε αυτές τις εικόνες υποβάλλονται στη συνέχεια σε εικονογράφηση ή σήμανση, όπου οι ελαττωματικές περιοχές σημειώνονται στην εικόνα. Αυτό το βήμα μπορεί να γίνει χειροκίνητα ή χρησιμοποιώντας ένα εργαλείο επισήμανσης.

Ένα τέτοιο παράδειγμα επισήμανσης είναι η ρύθμιση των εικονοστοιχείων ρωγμών ως λευκά ή «1» στην εικόνα, ενώ τα υπόλοιπα εικονίδια θα οριστούν ως μαύρα ή «0». Μετά από αυτό το βήμα, πρέπει να επιλεγεί ένα μοντέλο μηχανικής μάθησης, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ρωγμών. Σε προηγούμενες μελέτες διάφορα μοντέλα μηχανικής μάθησης, όπως υποστηρικτικές μηχανές SVM (Support Vector Machine - SVM), CNN (Convolution Central Networks- CNN), και δέντρα λήψης αποφάσεων έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ρωγμών [59]. Έπειτα, διατυπώνεται μια λειτουργία βελτιστοποίησης κόστους/απώλειας για να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια ή το κόστος κατάρτισης του μοντέλου. Για το σκοπό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια σταθμισμένη συνάρτηση απώλειας [63] [64] [65] [66]. Το σχεδιασμένο μοντέλο θα εκπαιδευτεί στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το σύνολο των σημειωμένων εικόνων που συλλέγονται στο σύνολο δεδομένων. Μετά την κατάρτιση του μοντέλου, ένα νέο σύνολο εικόνων θα εφαρμοστεί στο μοντέλο για να μπορέσει να αξιολογηθεί αν το πρότυπο ταξινομεί με επιτυχία τις ραγισμένες περιοχές στην εικόνα.



Σχήμα 19: Βήματα μεθόδου εντοπισμού ρωγμών βασισμένη στην μηχανική μάθηση [59]

Γενικότερα, η μηχανική μάθηση είναι ένα ισχυρό εργαλείο σε σχεδόν κάθε ερευνητικό πεδίο. Το κύριο καθήκον αυτών των μεθόδων είναι η εξαγωγή χαρακτηριστικών και η επισήμανση εκείνων των περιοχών στην εικόνα που περιέχουν ρωγμές. Η μέθοδος διαχωρισμού διαγράμματος διαχωρίζει την εικόνα σε εικονοστοιχεία ρωγμής και φόντου για να ταξινομήσει την εικόνα σύμφωνα με τα εξαγόμενα χαρακτηριστικά. Για την ταξινόμηση, ένα SVM μπορεί να ταξινομήσει ρωγμές διαφορετικών προσανατολισμών και να υπολογίσει τις γεωμετρικές τιμές των ρωγμών. Μια άλλη τεχνική βασισμένη στη μηχανική μάθηση που στηρίζεται στην τμηματοποίηση ρωγμών χρησιμοποιείται για την αφαίρεση στοιχείων φόντου πρώτα και στη συνέχεια τα χαρακτηριστικά υπολογίζονται με βάση το χρώμα και την υφή. Αυτά τα χαρακτηριστικά βοηθούν στην ταξινόμηση των ρωγμών εικόνων με την εκπαίδευση του SVM [56].

Άλλες τεχνικές ανίχνευσης ρωγμών που βασίζονται σε μεθόδους μηχανικής εκμάθησης περιλαμβάνουν το Deep Belief Network (DBN) για ανίχνευση σχισμών, την ταξινόμηση εντοπισμού και χαρακτηρισμού διαδρομών κρυπτογράφησης, τη μέθοδο με βάση την τεχνική Markov, τη δυαδικότητα εικόνας, το τυχαίο δάσος (μέθοδος η οποία συνδυάζει το αποτέλεσμα πολλών δέντρων απόφασης προκειμένου να καταλήξει στη κατηγοριοποίηση της εικόνας), επαναλαμβανόμενο εντοπισμό ρωγμών σε 3D επιφάνεια ασφάλτου και AdaBoost (προσαρμοστικός αλγόριθμος ο οποίος κάνει δυαδική ταξινόμηση) μέσω αναγνώρισης μοτίβων υφής [67] [68] [69] [70]. Αυτές οι μέθοδοι εκτελούνται καλά σε αυτές τις εικόνες που έχουν σαφείς και ορατές ρωγμές. Η επεξεργασία βασίζεται στην εξαγωγή χαρακτηριστικών, επομένως καθίσταται δύσκολο και αναποτελεσματικό να εξάγονται χαρακτηριστικά ρωγμών από ασαφείς εικόνες. Ωστόσο, οι μέθοδοι βαθιάς μάθησης έχουν δείξει καλά αποτελέσματα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους που βασίζονται στην επεξεργασία εικόνας και άλλες μεθόδους που βασίζονται στη μηχανική μάθηση [56].

Πολλές μέθοδοι μηχανικής μάθησης έχουν εκτελεστεί με ικανοποιητική ακρίβεια, αλλά λόγω αρκετών περιορισμών, το αποτέλεσμα δεν είναι πειστικό σε σύγκριση με αυτά στα νευρωνικά δίκτυα. Κατά κανόνα, οι περισσότερες από τις μεθόδους μηχανικής μάθησης απαιτούν μεγάλο αριθμό δομημένων ετικετών. Για τη σύνθετη μη γραμμική παλινδρόμηση, είναι δύσκολο να διατυπωθούν ξεχωριστές αποφάσεις στα

όρια της εικόνας. Για τις μεθόδους που βασίζονται στο SVM (Support Vector Machine - SVM), τα χειροποίητα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται για τη διάκριση μεταξύ εικόνων με ρωγμές και εικόνων χωρίς ρωγμές. Αυτά τα χειροποίητα χαρακτηριστικά στο SVM δεν μπορούν να διεξάγουν ιεραρχική επεξεργασία στα χαρακτηριστικά εισόδου. Ως εκ τούτου, τα ακατέργαστα δεδομένα που είναι διαθέσιμα για επεξεργασία μέσω προσεγγίσεων μηχανικής μάθησης δεν μπορούν να δημιουργήσουν σημασιολογικά χαρακτηριστικά ρωγμών [56].

5.8 Τεχνικές εντοπισμού ρωγμών

5.8.1 Εντοπισμός ρωγμών με βάση την μηχανική μάθηση

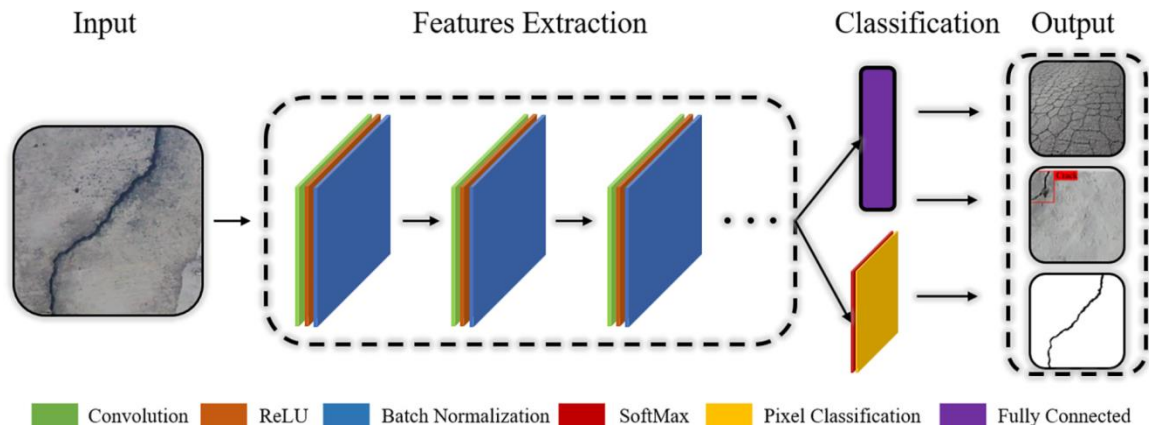
Ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα, ιδίως στις πολιτικές υποδομές όπως η κατασκευή και η συντήρηση δρόμων και τούνελ, είναι η ανίχνευση ρωγμών. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο, και ταυτόχρονα με την εξέλιξη της τεχνητής νοημοσύνης, πραγματοποιούνται έρευνες στην αυτόματη ανίχνευση ρωγμών σε επίπεδο pixel [71]. Ωστόσο, επιβάλλεται να ειπωθεί ότι αυτός ο τομέας βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη, ενώ επίσης υπάρχουν ακόμα αρκετά προβλήματα τα οποία προκύπτουν λόγω της ετερογενούς έντασης των pixel, της πολύπλοκης τοπολογίας των ρωγμών, των κακών συνθηκών φωτισμού και του θορύβου που μπορεί να υπάρχει λόγω του υποβάθρου της υφής. Παρόλα αυτά, προτείνεται μια νέα προσέγγιση για την αυτόματη ανίχνευση ρωγμών σε επίπεδο pixel, που χρησιμοποιεί πληροφορίες πολυεπίπεδης γειτονιάς, δηλαδή σύγκριση μίας ομάδας γειτονικών pixel με μία άλλη, και έντασης pixel, τεχνικές γνωστές από την ανάπτυξη του κλάδου της όρασης υπολογιστών.

Χρησιμοποιώντας πληροφορίες που αφορούν στην ένταση των pixels, έχει αναπτυχθεί μια μέθοδος βασισμένη σε πιθανοτικό γεννητικό μοντέλο (Probabilistic Graphical Model - PGM) για τον υπολογισμό της πιθανότητας μίας σχισμής για κάθε pixel. Αυτό παράγει έναν χάρτη πιθανοτήτων που αποτελείται από την πιθανότητα κάθε pixel να ανήκει σε ρωγμή. Σκοπός είναι ναδειχθεί ότι οι γειτονιές κάθε pixel περιέχουν κρίσιμες πληροφορίες για την ανίχνευση ρωγμών και συνεπώς προτείνεται μια μέθοδος βασισμένη σε μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machine - SVM) (ταξινομητή) για τον υπολογισμό των χαρτών πιθανοτήτων χρησιμοποιώντας πληροφορίες πολυεπίπεδης γειτονιάς. Στην συνέχεια χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος σύντηξης για την συνένωση των πολλαπλών χαρτών πιθανοτήτων, που προκύπτουν από τις προσεγγίσεις PGM και SVM, σε έναν συγχωνευμένο χάρτη, ο οποίος είναι ικανός να ανιχνεύσει ρωγμές με ακρίβεια υψηλότερη από οποιονδήποτε από τους αρχικούς χάρτες πιθανοτήτων. Βάσει πειραματικών δεδομένων φαίνεται ότι ο αλγόριθμός επιτυγχάνει καλύτερη απόδοση ως προς την ακρίβεια, το f1-score (το οποίο είναι ένας μετρικός όρος που συνδυάζει την ακρίβεια (precision) και την ανάκληση (recall) για την αξιολόγηση μοντέλων μηχανικής μάθησης σε προβλήματα

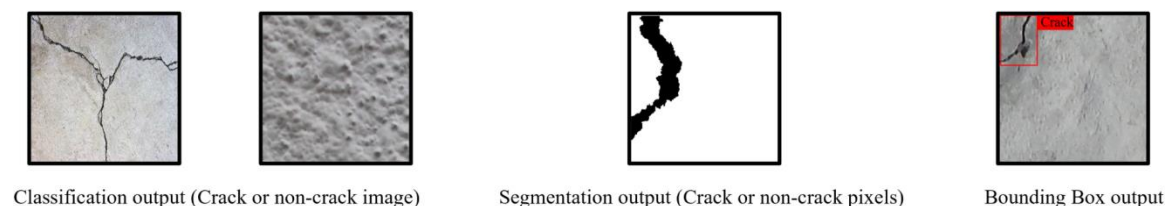
ταξινόμησης), την ανάκληση και τον δείκτη χαρακτηριστικών λειτουργίας δέκτη, σε σύγκριση με τους αλγορίθμους ανίχνευσης ρωγμών τελευταίας τεχνολογίας [72].

5.8.5 Ανίχνευση ρωγμών χρησιμοποιώντας βαθιά νευρωνικά δίκτυα

Η βαθιά μάθηση DL (Deep Learning – DL) μπορεί να ανιχνεύσει ρωγμές μέσω ταξινόμησης, εντοπισμού ή κατακερματισμού (ή κατάτμησης). Όσον αφορά στην ταξινόμηση οι εικόνες έχουν επισημανθεί ως εικόνες που απεικονίζουν μία περιοχή με ρωγμές ή χωρίς ρωγμές. Για την κατανομή σε επίπεδο εικονοστοιχείων, τα pixels ταξινομούνται ως pixels με ρωγμές ή ως pixels χωρίς ρωγμές. Αντίθετα, ο εντοπισμός καθορίζει τις συντεταγμένες των ρωγμών μέσα στην εικόνα και δημιουργεί περιφερειακά πλαίσια γύρω από τις ρωγμές για ανίχνευση. Το Σχήμα 21 δείχνει τη μορφή εξόδου της ταξινόμησης, της κατακερματισμού και του πλαισίου οριοθέτησης, αντίστοιχα. Από τη βιβλιογραφία σχετικά με την ανίχνευση ρωγμών χρησιμοποιώντας το CNN (Convolutional Neural Network – CNN), συνάγεται το συμπέρασμα ότι ο εντοπισμός ρηγματών χωρίζεται σε δύο ομάδες. Ο πρώτος τρόπος ανίχνευσης ρωγμών μέσω της αρχιτεκτονικής του CNN είναι μια τεχνική κυλιόμενων παραθύρων και η δεύτερη μέθοδος είναι η ανίχνευση ρηγματών σε επίπεδο εικονοστοιχείων [56].



Σχήμα 20: Δομή του Convolutional Neural Network CNN [56]



Σχήμα 21: Παράδειγμα εξόδου ενός Convolutional Neural Network CNN [56]

Το Deep Convolutional Neural Network (DCNN) μπορεί να καταγράψει τη μη γραμμική και δυναμική σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου. Έτσι, μπορούν να ταξινομήσουν και να διαχωρίσουν τα δεδομένα μαθαίνοντας από τη διαδικασία κατάρτισης. Η διαδικασία ανίχνευσης ρωγμών εντοπίζει τις ρωγμές στο επίπεδο της εικόνας (ταξινόμηση) ή στο επίπεδο των εικονοστοιχείων (segmentation).

Το CNN μαθαίνει τα λεπτομερή χαρακτηριστικά και τα μοτίβα της ρωγμής από τις εικόνες για να εκτελέσει τα καθήκοντα ταξινόμησης. Εάν η εισερχόμενη εικόνα έχει υψηλή ανάλυση, τότε απαιτεί μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης και δύναμη επεξεργασίας. Ως εκ τούτου, ένας μεγάλος αριθμός εικόνων δεν συνιστάται να εισάγεται ταυτόχρονα στο δίκτυο. Η τεχνική του κυλιόμενου παραθύρου περιβάλλει την εικόνα εισόδου με τους πυρήνες, οι οποίοι σκοπεύουν να παρουσιάσουν την εικόνα σε μια υπολογιζόμενη μορφή ή μια μικρή ομάδα εικονοστοιχείων που στη συνέχεια τροφοδοτείται στο δίκτυο. Ο πυρήνας μετατοπίζεται ένα pixel δεξιά και επιλέγει το επόμενο πακέτο των εικονοστοιχείων που θα εισαχθούν στο δίκτυο. Έτσι, η διαδικασία εξοικονομεί υπολογιστικό κόστος και επεξεργασία. Τα τελευταία χρόνια, η ταξινόμηση κρυπτογράφησης χρησιμοποιώντας το CNN με μια τεχνική κυλιόμενου παραθύρου έχει πολλές λύσεις CNN - κυλιόμενο παράθυρο. [56].

5.8.6 Τεχνικές τμηματισμού ρωγμών

Ο κατακερματισμός (ή κατάτμηση) συνιστά μια εναλλακτική μέθοδος για την ανίχνευση ρωγμών. Είναι μια τεχνική που βασίζεται σε επίπεδο εικονοστοιχείων που χρησιμοποιείται για αναγνώριση προτύπων μέσω υπολογιστή. Δημιουργεί μάσκες ετικετών ως έξοδο για τμηματικές ρωγμές καθώς και για pixel που δεν έχουν ρωγμή. Η βασική ιδέα είναι ότι καθορίζει τη γεωμετρία των ρωγμών και εντοπίζει τις ρωγμές με την παραγωγή της τμηματικής εικόνας. Τα τελευταία χρόνια, το CNN έχει σημειώσει μεγάλη επιτυχία στον τομέα της κατακερματισμού pixel με ρωγμές [56].

Η διαίρεση εικόνας έχει εξωτερικά εκτελέσει τις μεθόδους ταξινόμησης και οριοθέτησης τετράγωνων ορίων που μόνο ταξινομούν ή δημιουργούν ένα ορθογώνιο κουτί γύρω από την ρωγμή στη δεδομένη εικόνα. Ο διαχωρισμός ρωγμών παράγει μια ετικέτα για κάθε εικονοστοιχείο που απεικονίζει, ή όχι. Αρκετές αρχιτεκτονικές δικτύων που βασίζονται στο CNN έχουν προταθεί για την τμηματοποίηση των ρωγμών τα τελευταία χρόνια. Μεταξύ αυτών των αρχιτεκτονικών, το U-Net (U-Net – Fully Convolutional Network), το δίκτυο VGG (VGG – Very Deep Convolutional Network), και οι παραλλαγές τους είναι οι πιο ευρέως υιοθετημένες για τη διασπορά. Παρ' όλο που η απόδοση των δικτύων τμηματισμού ρωγμών είναι υπερεκτιμημένη, εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετές προκλήσεις για τους ερευνητές [56].

5.7 Μέθοδοι εντοπισμού ρωγμών βασισμένοι σε φωτογραφίες

Από τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης του ανθρώπινου πολιτισμού, τα φυσικά φαινόμενα αποτέλεσαν, και αποτελούν, βασικό τροχοπέδη για την κατασκευή κτηρίων και έργων υποδομής. Οι συνέπειες των φυσικών καταστροφών όπως οι πλημμύρες και οι σεισμοί οδηγούν σε σοβαρές ζημιές στις αστικές υποδομές [55]. Ετησίως, για την ανίχνευση ελαττωμάτων σε βασικές υποδομές, όπως δρόμοι, γέφυρες και κτίρια, καθώς και για την απόκτηση διαφόρων εργαλείων και την εξασφάλιση οικονομικών πόρων για τη διεξαγωγή ανίχνευσης ελαττωμάτων από βασικές υποδομές που περιλαμβάνουν δρόμους, γέφυρες, κτήρια και υδάτινα σώματα δαπανώνται μεγάλα χρηματικά ποσά[73]. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι άνθρωποι πρώτον να προσαρμόζουν τα οικοδομικά τους έργα έτσι ώστε να είναι ανθεκτικά και να αντέχουν, όσο περισσότερο γίνεται, τα φυσικά φαινόμενα και δεύτερον να εξελίσσουν τις τεχνικές και τα εργαλεία τους με σκοπό την ανίχνευση ελαττωμάτων, ατελειών και ρωγμών στις κατασκευές τους.

Κατά κύριο λόγο, μία συνήθης συνέπεια των φυσικών φαινομένων είναι η πρόκληση μεγάλων και φανερών ζημιών, ή και σχισμών μεγέθους μη ορατού για το ανθρώπινο μάτι. Οι πολιτικές δομές όπως οι δρόμοι, οι γέφυρες, τα κτήρια και τα πεζοδρόμια εκτίθενται συχνά σε ακραία σωματική πίεση που μπορεί να προκληθεί από φυσικές καταστροφές όπως σεισμοί, καταστροφικά συμβάντα όπως εκρήξεις ή καθημερινή χρήση. Τέτοια συμβάντα μπορούν είτε να προκαλέσουν πλήρη κατάρρευση της δομής είτε να οδηγήσουν σε υλικές βλάβες που συχνά αντιπροσωπεύονται με τη μορφή ρωγμών. Συνήθως, εμφανίζονται ρωγμές σε μικροσκοπικό επίπεδο στην επιφάνεια του στοιχείου υποδομής [74]. Αυτές οι ρωγμές καθιστούν το στοιχείο αδύναμο, μειώνουν την ικανότητα φόρτωσης και οδηγούν σε ασυνέχεια του υλικού στην επιφάνεια [75] [76] [77]. Όπως και στις περισσότερες περιστάσεις στην ζωή, εάν αυτές οι ρωγμές εντοπιστούν σε πρώιμο στάδιο, οι περαιτέρω ζημιές μπορούν να μειωθούν [68]. Οι ανεξερεύνητες ρωγμές, ωστόσο, μπορούν να εξαπλωθούν στην επιφάνεια και να οδηγήσουν στην πλήρη κατάρρευση της δομής, με αποτέλεσμα θανάτους, τραυματισμούς και οικονομικές επιπτώσεις. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτή η άμεση ανάγκη για την ανάπτυξη και την εξέλιξη των τεχνικών για τον εντοπισμό αλλά και την διόρθωση των σχισμών.

Κεφάλαιο 6 Χειρονακτικοί τρόποι για εντοπισμό ρωγμών

6.1 Εισαγωγή

Προφανώς, η πρώτη λύση που δόθηκε, καθώς και ο πρώτος τρόπος που υπάρχει, για τον εντοπισμό ρωγμών, συνιστά την άμεση επαφή του ανθρώπου με το υπό εξέταση για ρωγή αντικείμενο. Πιο συγκεκριμένα, οι χειροκίνητες μέθοδοι ανίχνευσης ρωγμών περιλαμβάνουν ειδικούς που εξετάζουν το στοιχείο οπτικά και τη χρήση ειδικών εργαλείων για τον εντοπισμό τυχόν ελαττωμάτων στο στοιχείο. [68] Βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν μπορεί να αυτοματοποιηθεί και συνεπώς αν δημιουργηθεί κάποια ρωγή σε ευαίσθητο σημείο μπορεί να αργήσει να εντοπισθεί και συνακόλουθα να υπάρχουν επιπτώσεις. Επιπρόσθετα, αυτή η μέθοδος είναι αρκετά κοπιαστική, απαιτεί εκτεταμένη εργασία και προσοχή και είναι επιρρεπής στο ανθρώπινο σφάλμα.

Χρησιμοποιώντας τις παραδοσιακές διαδικασίες επιθεώρησης, οι οποίες συνεπάγονται χειροκίνητο έλεγχο, είναι πολύ χρονοβόρο να προσδιοριστούν τα μέτρα ρωγμών που καθιστούν δύσκολο να εξαχθεί συμπέρασμα σχετικά με το επίπεδο της υποβάθμισης. Επομένως, για μια γρήγορη, αποτελεσματική και αξιόπιστη αξιολόγηση ζημιών, η διαδικασία ανίχνευσης ρωγμών πρέπει να αυτοματοποιηθεί για να αντικαταστήσει τις μεθόδους χειροκίνητης επιθεώρησης ελαττωμάτων.

Στην προσπάθειά τους να αυτοματοποιήσουν την διαδικασία εντοπισμού ρωγμών, οι μηχανικοί δοκίμασαν μεθόδους ανίχνευσης όπως λέιζερ, υπέρυθρη ακτινοβολία, θερμική, ακτινογραφική και θερμικές προσεγγίσεις.

6.2 Ανίχνευση ρωγμών με λέιζερ

Μία από τις μεγαλύτερες και πιο σημαντικές προτεραιότητες μίας χώρας συνιστά η διασφάλιση της καλής κατάστασης του οδικού της δικτύου. Δεν είναι άλλωστε κρυφό ότι η καλή και ασφαλής κατάσταση του οδικού δικτύου μίας χώρας έχει άμεσο θετικό αντίκτυπο στην οικονομία της, αλλά και στο βιοτικό επίπεδο των κατοίκων της. Συνεπώς, για αυτόν τον λόγο οι ευρωπαϊκές χώρες δαπανούν μεγάλα χρηματικά ποσά στα οδικά τους δίκτυα για την ανοικοδόμηση, την ανακαίνιση και τις σημαντικές επισκευές υποδομών. Τα ευρωπαϊκά οδικά δίκτυα συνέχισαν να επεκτείνονται και το κόστος συντήρησης αντιπροσωπεύει τώρα ένα σημαντικό μέρος των προϋπολογισμών του Υπουργείου Μεταφορών. Επίσης, ο τομέας οδικών μεταφορών έχει αρχίσει να εξετάζει μια νέα προσέγγιση στη συντήρηση των οδών, υιοθετώντας μια «κουλτούρα

διατήρησης» η οποία συνίσταται στην άμεση προστασία των δομών μόλις κατασκευαστούν ή ανανεωθούν.

Όπως γίνεται αντιληπτό, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη για την ανάπτυξη μίας μεθόδου με σκοπό την αυτοματοποιημένη ανίχνευση και στην συνέχεια την διόρθωση τυχόν ατελειών πάνω στους δρόμους, στις γέφυρες καθώς και σε όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του οδικού δικτύου. Μία απάντηση που δόθηκε σε αυτό το ζήτημα είναι η χρήση κάμερας με την προσθήκη λέιζερ για καλύτερη ακρίβεια [78]. Αναλυτικότερα, όπως ακριβώς απεικονίζεται και στο Σχήμα 22, σχεδιάστηκε ένα όχημα εξοπλισμένο με κάμερες σάρωσης γραμμών, φωτισμό λέιζερ και την απόκτηση HW-SW(Hardware-Software–HW-SW) το οποίο χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των ψηφιακών εικόνων που θα υποβληθούν σε περαιτέρω επεξεργασία για τον εντοπισμό ρωγμών στο δρόμο. Η προεπεξεργασία εκτελείται αρχικά τόσο για την εξομάλυνση της υφής όσο και για την ενίσχυση των γραμμικών χαρακτηριστικών.



Σχήμα 22: Ανίχνευση ρωγμών στους αυτοκινητόδρομους με χρήση της τελευταίας τεχνολογίας σκαναρίσματος με laser [79]

Προτείνεται μια προσέγγιση με βάση τους σπόρους για την αντιμετώπιση της ανίχνευσης ρωγμών στους δρόμους, συνδυάζοντας την πολλαπλή κατευθυντική μη ελάχιστης καταστολής (Multiple Directional Non-MinimumSuppression - MDNMS) με έναν έλεγχο συμμετρίας. Ουσιαστικά οι σπόροι (seeds) είναι σημεία δεδομένων που χρησιμοποιούνται ως σημεία αφετηρίας σε αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται με τη σειρά τους για να αναγνωρίσουν ή να τμηματοποιήσουν αντικείμενα σε μια εικόνα. Όσον αφορά στη χρήση σπόρων, αυτοί αποτελούν μία συνήθη τεχνική στον τομέα της όρασης υπολογιστών και κύριες τους εφαρμογές άπτονται στην διαίρεση εικόνας και στην ανίχνευση αντικειμένων. Αυτό συμβαίνει καθώς παρέχουν έναν απλό αλλά αποτελεσματικό τρόπο για τον διαχωρισμό της εικόνας σε σημαντικές περιοχές με βάση τις τοπικές ιδιότητές της καθώς και την καθορισμένη καθοδήγηση του χρήστη [80].

Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος των σπόρων αναφέρεται σε μία τεχνική τμηματισμού της εικόνας στην οποία τα σημεία τα οποία επιλέγονται για την εκκίνηση της διαίρεσης της εικόνας ονομάζονται σπόροι. Οι σπόροι βρίσκονται συνήθως μέσα σε περιοχές ενδιαφέροντος στην εικόνα και η επιλογή τους γίνεται είτε χειροκίνητα από τον χρήστη είτε αυτόματα μέσω ορισμένων προκαθορισμένων κριτηρίων. Στην συνέχεια, ο αλγόριθμος επανειλημμένα επεκτείνει τις περιοχές ενσωματώνοντας γειτονικά pixels που ικανοποιούν ορισμένα κριτήρια τα οποία συνήθως βασίζονται στην ομοιότητα έντασης, ομοιότητας χρώματος, χαρακτηριστικών υφής ή άλλων χαρακτηριστικών της εικόνας. Η διαδικασία ανάπτυξης της περιοχής συνεχίζεται μέχρι να εκπληρωθούν ορισμένα κριτήρια. Ορισμένα από αυτά είναι να μην μπορούν να προστεθούν περισσότερα εικονοστοιχεία στις περιοχές, όταν έχει επιτευχθεί ένας ορισμένος αριθμός επαναλήψεων, ή όταν πληρούνται μια συγκεκριμένη ή παραπάνω προϋποθέσεις. Τέλος, μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία ανάπτυξης της περιοχής, η εικόνα τμηματίζεται σε διαφορετικές περιοχές ή αντικείμενα με βάση τους σπόρους και τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη περιοχής.

Η πολλαπλή κατευθυντική συνιστά μια τεχνική που χρησιμοποιείται στον τομέα της επεξεργασίας εικόνας και της ανίχνευσης αντικειμένων για να επιλέξει τα κύρια σημεία ή τις κύριες περιοχές ενός αντικειμένου από μια σειρά πιθανών ανακλίσεων ή αντικείμενων. Αυτό βοηθά στη μείωση των ψευδών ανακλίσεων ή αντικειμένων που ενδέχεται να προκύψουν από την ανίχνευση [81]. Στην συνέχεια, οι σπόροι συνδέονται υπολογίζοντας τις διαδρομές με το χαμηλότερο κόστος που πληρούν τους περιορισμούς συμμετρίας. Η όλη διαδικασία ανίχνευσης περιλαμβάνει τη χρήση αρκετών παραμέτρων. Η σωστή ρύθμιση καθίσταται απαραίτητη για τη λήψη βέλτιστων αποτελεσμάτων χωρίς χειροκίνητη παρέμβαση. Προτείνεται μια πλήρως αυτόματη προσέγγιση μέσω ενός γραμμικού συνόλου ταξινομητή με βάση το SVM(Support Vector Machine–SVM), ικανό να διακρίνει έως και 10 διαφορετικούς τύπους πεζοδρόμων που εμφανίζονται στους δρόμους. Ο βέλτιστος φορέας χαρακτηριστικών περιλαμβάνει διαφορετικά χαρακτηριστικά με βάση την υφή. Οι παράμετροι στη συνέχεια προσαρμόζονται ανάλογα με την έξοδο που παρέχεται από τον ταξινομητή. Όσον αφορά στην ανίχνευση χαρακτηριστικών που αντιστοιχούν σε περιοχές που δεν υφίστανται ρωγμές, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εισαγωγή μιας τέτοιας ενότητας μειώνει τον αντίκτυπο των ψευδών θετικών λόγω των χαρακτηριστικών μη ρωγμών έως και έναν παράγοντα. Επιπλέον, η παρατηρούμενη απόδοση του συστήματος ανίχνευσης ρωγμών ενισχύεται σημαντικά με την προσαρμογή των παραμέτρων στον τύπο του πεζοδρόμου.

6.3 Θερμογραφία Επαγωγής - Induction Thermography

Μία από τις πιο διαδεδομένες και πλέον καθιερωμένες μεθόδους για τον εντοπισμό ρωγμών στην επιφάνεια των μετάλλων αποτελεί η Θερμογραφία Επαγωγής (Induction Thermography). Μάλιστα, επιβάλλεται να σημειωθεί ότι αυτή η μέθοδος έχει χαρακτηριστεί ως μη καταστροφική για το μέταλλο. [82]

Η επαγωγική θέρμανση είναι μια γνωστή τεχνική, καθώς είναι πολύ αποτελεσματική, γρήγορη, καθαρή και επακριβώς ελεγχόμενη. [83] Σήμερα, χρησιμοποιείται όχι μόνο στη βιομηχανία, αλλά και για οικιακές εφαρμογές, ως επαγωγικές εστίες, και για ιατρικούς σκοπούς, ως θεραπεία υπερθερμίας [83].

Στην περίπτωση της θερμογραφίας επαγωγής, το δείγμα που πρόκειται να επιθεωρηθεί τοποθετείται μέσα ή κοντά σε μια σπείρα επαγωγής, η οποία αποτελείται από μία ή περισσότερες στρόφες σύρματος αγωγού, τυλιγμένες γύρω από έναν πυρήνα και μοιάζει με πηνίο. Κατά τη διάρκεια και μετά την εφαρμογή ενός σύντομου παλμού θέρμανσης, ο οποίος έχει συνήθως διάρκεια μεταξύ 50 ms και 1 s, η θερμότητα θα προκληθεί μέσα στο υλικό και μια υπέρυθρη κάμερα καταγράφει την κατανομή της θερμοκρασίας. Η αξιολόγηση των εικόνων θερμοκρασίας και των χρονικών αλλαγών αποτελεί μια εξαιρετική τεχνική για την ανίχνευση ρωγμών, καθώς είναι μια μη καταστροφική, χωρίς επαφή τεχνική και μπορεί πολύ καλά να αυτοματοποιηθεί πλήρως χρησιμοποιώντας μεθόδους επεξεργασίας εικόνας, οι οποίες τον τελευταίο καιρό έχουν εξελιχθεί ραγδαία.

Τα τελευταία χρόνια, έχουν δημοσιευθεί αρκετές έρευνες από διάφορες ομάδες που αποδεικνύουν την εφαρμογή αυτής της μεθόδου. Η πρώτη βιομηχανική εφαρμογή καταγράφηκε πριν από περίπου 30 χρόνια [84]. Κατά την πραγμάτωσή της, δοκιμάστηκαν χαλύβδινες ράβδοι και πινακίδες με σκοπό την ανίχνευση ή μη ρωγμών στην επιφάνειά τους. Για να γίνει αυτό, τοποθετήθηκαν γύρω από τις χαλύβδινες ράβδους και πινακίδες τέσσερις σαρωτές υπέρυθρων και κατά τη διάρκεια της κίνησης μέσω ενός κυλίνδρου επαγωγής και αξιολογώντας το σήμα που προέκυπτε από τους σαρωτές έβγαине το συμπέρασμα αν οι ράβδοι (ή πινακίδες) είχαν ρωγμές ή ήταν άφθαρτες.

Τα τελευταία 20 χρόνια, οι κάμερες FPA (FPA – Focal Plane Array) (εστίαση-επιφάνεια-αριθμός) έγιναν πιο ισχυρές και μειώθηκαν σε τιμή, και χρησιμοποιούνται στην επιστημονική έρευνα στον τομέα της θερμογραφικής επιθεώρησης. Γενικότερα, στην θερμογραφική επιθεώρηση, οι κάμερες FPA χρησιμεύουν ως πολύτιμα εργαλεία για τον εντοπισμό ελαττωμάτων, ανωμαλιών ή αναποτελεσματικότητας μέσω της απεικόνισης των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας σε επιφάνειες ή μέσα σε

αντικείμενα. Η ικανότητά τους να συλλαμβάνουν λεπτομερείς θερμικές εικόνες γρήγορα και με ακρίβεια συμβάλλει στη βελτίωση της ασφάλειας, του ποιοτικού ελέγχου και της αποδοτικότητας σε διάφορες βιομηχανίες [43] [85]. Ειδικότερα, στις μέρες μας τα τελευταίας τεχνολογίας FPA υψηλότερης ανάλυσης παρέχουν πιο λεπτομερείς θερμικές εικόνες, επιτρέποντας στους επιθεωρητές να ανιχνεύουν μικρότερα ελαττώματα ή διακυμάνσεις θερμοκρασίας, και συνακόλουθα σχισμές, με μεγαλύτερη ακρίβεια.

6.4 Θερμογραφία Κλειδώματος -- Lock-in thermography (LIT)

Η θερμογραφία κλειδώματος (Lock-in Thermography - LIT) αποτελεί μία μέθοδο για τον εντοπισμό ελαττωμάτων κυρίως σε μέταλλα αλλά και σε συνθετικά πολυμερή υλικά ενισχυμένων ινών [86]. Η θερμογραφία προσφέρει πλεονεκτήματα έναντι άλλων τεχνικών επιθεώρησης, καθώς είναι γρήγορη, μη επαφής και μπορεί να παρέχει ποσοτικά πλήρη δεδομένα πεδίου [86].

Αναλυτικότερα, η θερμογραφία κλειδώματος (Lock-in Thermography) ή modulated thermography, είναι ένας τύπος ενεργού θερμογράφου, ο οποίος χρησιμοποιεί μια εξωτερική προσαρμοσμένη πηγή ενέργειας, συνήθως με τη μορφή λαμπτήρων υψηλής ισχύος, για να θερμαίνει την επιφάνεια του εξαρτήματος και να παρέχει την απαραίτητη θέρμανση για την ανίχνευση ελαττωμάτων [87] [86]. Τα θερμικά κύματα εξαπλώνονται στο στοιχείο με τη συχνότητα της διαμόρφωσης και αντανακλώνται σε διεπαφές όπου υπάρχει αλλαγή στις θερμικές ιδιότητες του προς εξέταση υλικού, π.χ. στην πίσω επιφάνεια του στοιχείου, ή σε ένα ελάττωμα. Τα αντανακλαστικά κύματα εξαπλώνονται πίσω στην μπροστινή επιφάνεια, όπου στην συνέχεια μια υπέρυθρη IR (Infrared Radiation – IR ή Infrared Thermal Imaging Cameras) κάμερα παρακολουθεί την θερμική απόκριση της επιφάνειας [88].



Σχήμα 23: Infared Radiation – IR ή Infared Thermal Imaging Camera [89]



Σχήμα 24: Παράδειγμα IR φωτογραφίας [89]

Τα αποκτηθέντα θερμικά δεδομένα υποβάλλονται στη συνέχεια σε επεξεργασία χρησιμοποιώντας ψηφιακή διαδικασία λήψης δεδομένων, η οποία εφαρμόζει φιλτράρισμα δεσμών στη συχνότητα της θερμικής διαμόρφωσης. Ουσιαστικά, τα αποκτηθέντα θερμικά σήματα, τα οποία αποτελούνται από τα εικονοστοιχεία μιας κάμερας IR, συσχετίζονται με το σήμα διέγερσης για να επιτευχθεί το εύρος και η

φάση της αντίδρασης. Τέλος, πραγματοποιείται μια συγκριτική αξιολόγηση είτε του πλάτους είτε της φάσης σε ένα πεδίο όρασης όπου η ανταπόκριση σε ελαττωματικές και μη ελαττωματικές περιοχές είναι διαφορετική, επιτρέποντας έτσι τον εντοπισμό της ρωγμής και τον χαρακτηρισμό του σχήματός της [86]. Ειδικότερα, Οι ρωγμές κόπωσης εμφανίζονται ως περιοχές τοπικής συγκέντρωσης θερμότητας ή διακύμανσης της θερμοκρασίας σε σύγκριση με το περιβάλλον υλικό. Αυτές οι περιοχές μπορούν να απεικονιστούν ως θερμικές εικόνες, αποκαλύπτοντας την παρουσία και την έκταση των επιφανειακών ρωγμών.

Το βάθος ανίχνευσης των θερμογραφικών επιθεωρήσεων των πολυμερών σύνθετων υλικών μέσω της θερμογραφίας κλειδώματος περιορίζεται από τη χαμηλή θερμική διάχυση. Από τις διαθέσιμες τεχνικές, το LIT έχει δείξει ίσως μεγαλύτερα βάθη ανίχνευσης από άλλες μεθόδους θερμογραφικής επιθεώρησης [90]. Ενώ το βάθος ανίχνευσης είναι τελικά περιορισμένο από το μήκος θερμικής διάχυσης ενός θερμικού κύματος, η θερμική ή η φασική αντίθεση, η οποία επιτρέπει τον εντοπισμό ελαττωμάτων, αυξάνεται συνήθως με την πρόσθετη θερμοενέργεια εισόδου, δηλαδή στην αύξηση της ενέργειας μέσω της αύξησης της θερμικής διέγερσης.

Σε αυτό το σημείο, επιβάλλεται να ειπωθεί ένα βασικό μειονέκτημα της θερμογραφίας LIT, η οποία έχει καθιερωθεί σε ορισμένες βιομηχανίες ως μια κοινή τεχνική NDT (Noise Equivalent Temperature Difference – NTD) . Πιο συγκεκριμένα οι λαμπτήρες θέρμανσης μπορεί να είναι επίπονοι και απαιτούν σαφείς γραμμές όρασης στο ελεγχόμενο στοιχείο. Αυτό περιορίζει την εφαρμογή του LIT σε περιοχές μιας δομής με καλή πρόσβαση όπου οι ογκώδεις κάμερες και οι λαμπτήρες μπορούν να τοποθετηθούν κατάλληλα. Επιπρόσθετα, μέχρι και πρόσφατα η LIT έχει διεξαχθεί χρησιμοποιώντας φωτογραφικές κάμερες με βάση τον ανιχνευτή φωτονίων, οι οποίες ψύχονται χρησιμοποιώντας ένα ενσωματωμένο σύστημα ψύξης. Ωστόσο οι κάμερες αυτές είναι πολύ δαπανηρές (~100 k USD), εύθραυστες και ογκώδεις, συνιστώντας με αυτόν τον τρόπο την μέθοδο της θερμογραφίας κλειδώματος αρκετά δυσκολότερη [86].

Παρ' όλα τα παραπάνω μειονεκτήματα της θερμογραφίας κλειδώματος, η τεχνική αυτή έχει εξελιχθεί και έχει και πολλά προτερήματα. Αρχικά, η ενσωμάτωση νέων, μη αντιληπτών εντοιχισμένων στοιχείων θέρμανσης, δηλαδή ενεργοποιητών, μειώνει σημαντικά τη περιοχή πρόσβασης που απαιτείται για τη διεξαγωγή επιθεωρήσεων. Επιπλέον, η τοποθέτηση των στοιχείων θέρμανσης μέσα σε ένα στοιχείο επιτρέπει τη μείωση του πραγματικού πάχους του στοιχείου, υπό την προϋπόθεση ότι είναι δυνατή η διπλή επιθεώρηση. Το γεγονός αυτό έχει ως άμεσο πλεονέκτημα την αύξηση του βάθους ανίχνευσης του LIT, καθώς η εξάπλωση των θερμικών κυμάτων είναι μια λειτουργία του πάχους του υλικού [86]. Παράλληλα, η χρήση μη ψυχρών μικρό-βολομέτρων καμερών IR (Uncooled micro-bolometer IR-Infrared Radiation cameras) ως εναλλακτική λύση για τις φωτογραφικές κάμερες με βάση τον ανιχνευτή φωτονίων,

καθιστούν τον εξοπλισμό για την θερμογραφία κλειδώματος σχετικά φθηνό, ελαφρύ και ανθεκτικό. Αυτά τα πλεονεκτήματα έχουν παρακινήσει πρόσφατες μελέτες σχετικά με τη χρήση μικρό-βολόμετρων ερευνητικής κατηγορίας σε εφαρμογές θερμογραφικής επιθεώρησης [86] [91] . Τέλος, να συμπληρωθεί ότι η τυπική ευαισθησία και ανταπόκριση των μικρό-βολόμετρων είναι εγγενώς χαμηλότερη από τους ανιχνευτές φωτονίων, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται μιας και μια χαμηλού κόστους μικροσκοπική θερμική κάμερα πυρήνα έχει επαρκή ευαισθησία για να εκτελέσει την μέθοδο LIT και έτσι να μειώσει το συνολικό κόστος των θερμογραφικών επιθεωρήσεων κατά περισσότερο από δύο τάξεις μεγέθους.



Σχήμα 25: Κάμερα μικρο-βολομέτρου (SWIR Microbolometer Camera) [92]

6.5 Παλμική Θερμογραφία - Pulsed Thermography (PT)

Η παλμική Θερμογραφία, ή Pulsed Thermography (PT), συνιστά μία μέθοδο για γρήγορο και ολοκληρωμένο χαρακτηρισμό ελαττωμάτων. Συμπεριλαμβάνει πολλαπλά φυσικά φαινόμενα όπως η διαρροή μαγνητικής ροής, το προκαλούμενο ηλεκτρικό ρεύμα και τη θέρμανση επαγωγής που συνδέονται με τη φυσική, καθώς και αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος για να παρέχουν άφθονες πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες και τα ελαττώματα των υλικών καθώς και για τη σωστή ταξινόμησή τους [93].

Η παλμική Θερμογραφία είναι μία υποκατηγορία της μη καταστροφικής αξιολόγησης (Nondestructive Evaluation - NDE), η οποία αποτελεί μια τυπική αποτελεσματική προσέγγιση ανίχνευσης για την αναγνώριση των χαρακτηριστικών υλικών και της διαρθρωτικής υποβάθμισης χωρίς να καταστρέφεται η χρησιμότητα ενός στοιχείου ή συστήματος [94] [95]. Παρόλα αυτά, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η συμβατική NDE που βασίζεται στην ανίχνευση ενός είδους ρωγμής ή ιδιότητας του υλικού δεν είναι επαρκής για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας με την απαιτούμενη χωρική ανάλυση, κάλυψη και ακρίβεια.

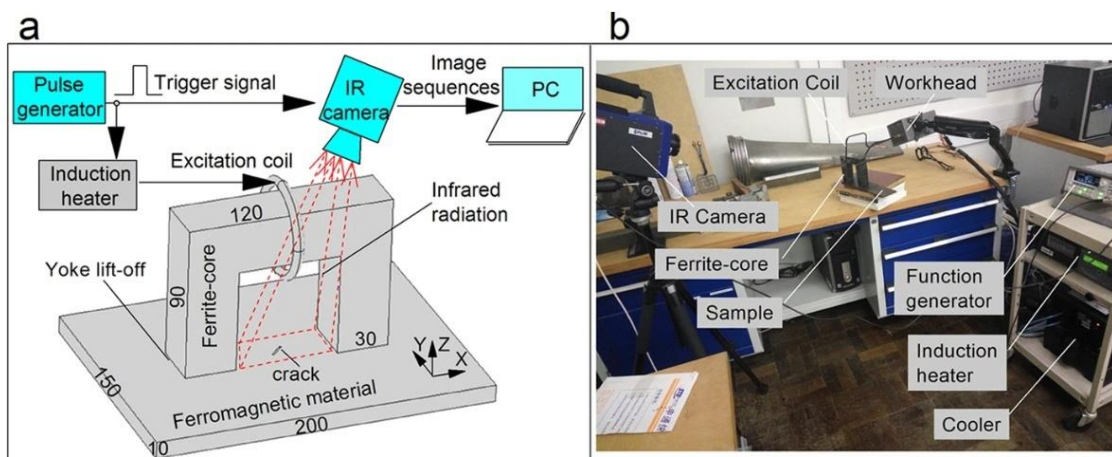
Η θερμογραφία παλμών με βάση το προκαλούμενο ηλεκτρικό ρεύμα (Eddy current pulsed thermography - ECPT) είναι μια αναδυόμενη τεχνική πολλαπλών μορφών NDE για αγωγίμο υλικό που συνδυάζει τα δύο πλεονεκτήματα του προκαλούμενου ηλεκτρικού παλμού και της υπέρυθρης θερμότητας [96] [93]. Αρχικά, θερμαίνεται η επιφάνεια του προς εξέταση υλικού μέσω ενός παλμού ενέργειας πολύ μικρής διάρκειας. Η πηγή της θερμικής αυτής ενέργειας συνήθως είναι ένας λαμπτήρας flash και ή μία λάμπα ξενίου (Xenon Lamps). Στην συνέχεια, όλη αυτή η θερμική ενέργεια προκαλεί ρεύματα (Eddy currents) πάνω στην επιφάνεια του υλικού, ιδιαίτερα στις περιοχές όπου είναι ηλεκτρικά αγωγίμο. Τα προκαλούμενα ρεύματα επηρεάζουν τη κατανομή της θερμότητας πάνω στο υλικό. Βάσει του φαινομένου Joule, η ηλεκτρική ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω των αντιστάσεων που συναντά στην επιφάνεια του υλικού. Αυτού του είδους η θερμική ενέργεια, σε συνδυασμό με την εκπεμπόμενη θερμότητα πάνω σε αυτό, και κυρίως ο καταμερισμός τους πάνω στην επιφάνεια του υλικού, φανερώνουν τυχόν ανωμαλίες και ρωγμές σε αυτό. Ο καταμερισμός αυτός, καθώς και άλλα χαρακτηριστικά του υλικού όπως η δομική πίεση, η κόπωση ή η ζημιά καταγράφονται αποτελεσματικά και αποδεικνύονται μέσω σειρών θερμικής εικόνας που μπορούν να αξιολογηθούν με θέρμανση Joule μέσω ρεύματος αιθάλης, αγωγιμότητας θερμότητας και υπέρυθρης θερμογραφίας [97]. Τα θερμικά πρότυπα, συμπεριλαμβανομένης της αντίθεσης στο φόντο του δοκιμασμένου αντικειμένου, αναλύονται με επεξεργασία εικόνας και με αυτόν τον τρόπο εξάγονται τα

χαρακτηριστικά του υλικού και συνακόλουθα εντοπίζονται τυχόν πιθανές σχισμές. Μερικοί από τους πιο συνηθισμένους τρόπους εντοπισμού και κατηγοριοποίησης χαρακτηριστικών μέσω της επεξεργασίας εικόνας είναι οι εξής:

1. διαφορική απόλυτη αντίθεση [93],
2. θερμογραφική ανακατασκευή σήματος [93],
3. αρχική θερμογράφιση συστατικών[93] και
4. θερμογράφιση παλμών φάσης [96] [98].

6.6 Περιγραφή ηλεκτρομαγνητικού συστήματος θερμογραφίας με παλμούς

Για την εφαρμογή της πολυφυσικής προσέγγισης ανίχνευσης ρωγμών μέσω της μη καταστροφικής αξιολόγησης (Nondestructive Evaluation - NDE) NDE, χρησιμοποιείται ένα νέο ηλεκτρομαγνητικό σύστημα παλματικής θερμογραφίας, το οποίο απεικονίζεται στο παρακάτω σχηματικό διάγραμμα στα Σχήματα 29(α) και 29 (β). Το συγκεκριμένο σύστημα βασίζεται στις συγκριτικές μελέτες της διαρροής μαγνητικής ροής και των τεχνικών ECPT και του συνδυασμού των δύο πλεονεκτημάτων. Ένα υψηλής ισχύος και υψηλής συχνότητας εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα παράγεται από μια γεννήτρια παλμών και τον θερμαντήρα επαγωγής για να οδηγήσει το πηνίο διέγερσης. Το γεγονός αυτό φέρει ως αποτέλεσμα μια πολύ έντονη και ταχέως μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή να παράγεται στο χώρο μέσα στο πηνίο. Σε σύγκριση με το προηγούμενο ECPT, η πιο σημαντική βελτίωση αυτής της διαδικασίας είναι η χρήση ενός πυρήνα φερριτών για να συγκεντρώσει το μεγαλύτερο μέρος της μαγνητικής ροής σε ένα μαγνητικό κύκλωμα και καθοδηγώντας τους να ρέουν στο αντικείμενο δοκιμής με μια ευρεία και ομοιόμορφη κατανομή πεδίου. Επιπλέον, η χρήση ενός πυρήνα φερρίτη (μαγνητικό ζυγό) επιτρέπει τη μείωση της μαγνητικής αντίστασης στο μαγνητικό κύκλωμα και αυξάνει την ένταση της μαγνητικής ροής στο αντικείμενο δοκιμής για αποτελεσματική επαγωγή θέρμανσης. Επιπλέον, η τοπική περιοχή μεταξύ των δύο πόλων του μαγνητικού ζυγού παρέχει μια ευρεία ανοικτή περιοχή για την ανίχνευση ελαττωμάτων και σχισμών και την απεικόνιση μέσω της πλήρους κάλυψης υπέρυθρης απεικόνισης, η οποία θα ωφελήσει σημαντικά για την ποσοτική NDE. Εν συνεχεία, οι σειρές θερμικών εικόνων, συμπεριλαμβανομένων των χωρικών και χρονικών αντιδράσεων της πολυφυσικής και των χαρακτηριστικών ελαττωμάτων, μεταδίδονται σε έναν υπολογιστή για την επεξεργασία σήματος και την εξαγωγή χαρακτηριστικών σφαλμάτων.



Σχήμα 26: Κατασκευή ηλεκτρομαγνητικού συστήματος θερμογραφίας με παλμούς [93]

Στο Σχήμα 26 (α), απεικονίζεται το σχηματικό διάγραμμα με καθιερωμένη διαμόρφωση διέγερσης και ανίχνευσης. Ο πυρήνας φερριτών σχήματος U ενεργεί ως επαγωγέας. Η απόσταση μεταξύ των παλμών και του σιδηρομαγνητικού αντικειμένου δοκιμής ορίζεται ως ανύψωση ζυγού [93]. Το μέγεθος του πυρήνα και το δείγμα απεικονίζονται επίσης για περαιτέρω μοντελοποίηση πολυφυσικής, προσομοίωση και πειραματική διάταξη. Στο Σχήμα 26 (β), το πειραματικό σύστημα παρουσιάζεται για να δείξει περαιτέρω δυνατότητες της προσέγγισης για τις ιδιότητες των υλικών και τον χαρακτηρισμό ελαττωμάτων.

Τα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου συστήματος ηλεκτρομαγνητικής παλμικής θερμογραφίας επιτρέπουν την ενσωμάτωση πολλαπλών φυσικών φαινομένων για τον χαρακτηρισμό υλικών και ρωγμών. Αυτές περιλαμβάνουν:

1. Διαρροή μαγνητικής ροής με χαμένη απώλεια: Οποιαδήποτε γεωμετρική διακοπή ή τοπικές ανωμαλίες που υφίστανται στην περιοχή που μετράται οδηγούν σε διαρροές μαγνητικής ροής στον αέρα γύρω από την ελαττωματική περιοχή λόγω των απότομων αλλαγών της μαγνητικής διαπερατότητας [99]. Γύρω από την ελαττωματική περιοχή, η τοπική κατανομή μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του αντικειμένου δοκιμής διαταράσσεται και συνεπώς διαχωρίζεται ως υψηλή / χαμηλή πυκνότητα μαγνητικής ροής. Βάσει της απώλειας διαφυγής λόγω της διαρροής μαγνητικής ροής, αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί το εναπομείναν μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του αντικειμένου δοκιμής γύρω από την ελαττωματική περιοχή για να προκαλέσει διαφορετικές αντιδράσεις θέρμανσης κίνησης και επαγωγής για την ανίχνευση σφαλμάτων.

2. Προκαλούμενο ηλεκτρικό ρεύμα: σημαντική ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος θα προκληθεί από ταχέως εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο και θα κατανέμεται ορθογώνια ενάντια στις γραμμές μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια και την υποεπίπεδη περιοχή του αντικειμένου δοκιμής [100]. Παρόμοια με τη διαρροή μαγνητικής ροής (Magnetic flux leakage – MFL), τα χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος που εκδηλώνονται ως μια απότομη αλλαγή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας θα οδηγήσει στην διαταραχή του ηλεκτρικού πεδίου που υπάρχει λόγω ηλεκτρικού ρεύματος και αντιπροσωπεύουν ως αυξημένη / μειωμένη πυκνότητα γύρω από την ελαττωματική περιοχή. Με βάση την απώλεια ηλεκτρικού ρεύματος, η επίδραση της θέρμανσης στο ηλεκτρικό ρεύμα χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της διανομής ηλεκτρικών ρευμάτων πεδίου και έντασης, συμπεριφορές ικανές για την ανίχνευση ελαττωμάτων και σχισμών.
3. Επαγωγική θέρμανση με πολυφυσική: Το επαγωγικό ρεύμα αιθάλης θα αυξήσει την τοπική αντίσταση θερμότητας. Λόγω του φαινομένου υστέρησης του σιδηρομαγνητικού υλικού, προσφέρει φυσικά αντίσταση σε έντονο εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο λόγω των επαναλαμβανόμενων διαδικασιών μαγνήτισης/απομαγνήτισης [101]. Η ταχεία περιοδική δημιουργία και εξάλειψη των μαγνητικών περιοχών από τις κινήσεις τοιχώματος προκαλεί σημαντική εσωτερική καταστολή τριβής, μετακίνηση με μαγνητοστρεπτική κίνηση και θέρμανση στο εσωτερικό του υλικού, η οποία είναι ιδανική για γρήγορη και αποτελεσματική θερμογραφική NDE λόγω της δευτερογενούς πηγής θερμότητας [102]. Επιπλέον, η διαρροή της μαγνητικής ροής με την απώλεια χαλάρωσης προκαλεί επίσης διαφορετική επαγωγική αντίδραση θέρμανσης λόγω της κατανομής μαγνητικού πεδίου και της μεταβολής έντασης στο εσωτερικό του αντικειμένου δοκιμής. Πάνω απ' όλα, η μαγνητική ροή και η απόσπαση του πεδίου ρεύματος και οι αλλαγές έντασης γύρω από την ελαττωματική περιοχή θα οδηγήσουν σε διαφορετική πυκνότητα θερμότητας και θερμική αντίθεση μεταξύ της ελάττωσης και της περιοχής χωρίς ελατήριο, η οποία καθιστά το σφάλμα ορατό χρησιμοποιώντας μια κάμερα IR. Η φυσική κατανομή πεδίων, οι δυναμικές συμπεριφορές του μαγνητικού πεδίου και το πεδίο ηλεκτρικού ρεύματος φωτίζονται από το παραπάνω φαινόμενο θέρμανσης και απεικονίζονται μέσω της θερμικής απεικόνισης. Η δυναμική θερμική συμπεριφορά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει ελαττωματικά χαρακτηριστικά και ρωγμές λόγω της μεταβολής της θερμικής αγωγιμότητας και της θερμότητας του υλικού. Όταν το προτεινόμενο σύστημα εγκαθίσταται σε ένα όχημα επιθεώρησης που κινείται γρήγορα γύρω από τον χώρο εξέτασης η μόνιμη ηλεκτρομαγνητική παλμική θέρμανση και η θερμική

απεικόνιση λειτουργούν συνεχώς για τον εντοπισμό και τον χαρακτηρισμό των φυσικών ρωγμών.

6.7 Σύστημα τύπου κάψουλας με προκαθορισμένο εύρος συχνοτήτων για εντοπισμό ρωγμών

Μία καινούρια και αναπτυσσόμενη τεχνική για την ανίχνευση σχισμών είναι η χρήση ενός συστήματος με ενσωματωμένες κάψουλες (σαν τις πιεζοηλεκτρικές κάψουλες όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.4) το οποίο λειτουργεί μετρώντας την αντίσταση, και ανάλογα με το μέγεθός της κρίνεται αν υφίσταται ρωγμή ή όχι [103]. Γενικότερα, τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές τοπικής παρακολούθησης για τις δομές σκυροδέματος [104] [105]. Μεταξύ αυτών των τεχνικών, η παρακολούθηση ζημιών με βάση την αντίσταση έχει θεωρηθεί ως μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος [106]. Το θεωρητικό υπόβαθρο της παρακολούθησης με βάση την επίδραση προτάθηκε από τον Liang et al. και στη συνέχεια ακολουθήθηκε από πολλούς ερευνητές.

Στην συγκεκριμένη μέθοδο για εντοπισμό ρωγμών, αναπτύσσεται και περιγράφεται ένας νέος έξυπνος συσσωρευτής (Capsule-like Smart Aggregate - CSA) που μοιάζει με κάψουλα για την παρακολούθηση της καταπόνησης των υλικών με βάση την αντίσταση σε ένα προκαθορισμένο εύρος συχνοτήτων μικρότερο των 100 kHz. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των υφιστάμενων μοντέλων έξυπνων συνόλων συζητούνται για να καθοριστεί η εφαρμογή για το βελτιωμένο μοντέλο CSA. Ο εννοιολογικός σχεδιασμός και το μοντέλο μέτρησης αντοχής του έξυπνου συστήματος (CSA) που μοιάζει με κάψουλα παρουσιάζονται για την παρακολούθηση ζημιών από σκυρόδεμα (το σκυρόδεμα είναι ένα μείγμα ορυκτών υλικών με νερό και σε κάποιες περιπτώσεις συνδετικών, τυχόν πρόσθετων, όπου για συνδετικό χρησιμοποιείται συνήθως τσιμέντο) [103].

Σε αυτό το μοντέλο, η αλληλεπίδραση μεταξύ του CSA και της υπό εξέταση δομής θεωρείται ως σύστημα αντοχής 2 βαθμών ελευθερίας (2-DOF). Οι μηχανικές αντιδράσεις του CSA περιγράφονται για δύο συνθήκες: (α) κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης σκυροδέματος και (β) κάτω από φορτία συμπίεσης. Στη συνέχεια, το πρωτότυπο του CSA έχει σχεδιαστεί για την παρακολούθηση του υλικού με βάση την

αντίσταση σε δομές σκυροδέματος. Οι τοπικές δυναμικές ιδιότητες του CSA προσομοιώνονται αριθμητικά για τον προκαθορισμό των ευαίσθητων ζωνών συχνότητας των σημάτων αντίστασης. Διεξάγονται αριθμητικές και πειραματικές αναλύσεις αντοχής για τη διερεύνηση της ευαισθησίας του CSA υπό φορτία συμπίεσης. Οι αλλαγές στα σήματα αντίστασης του CSA που προκαλούνται από τα φορτία συμπίεσης αναλύονται για να εκτιμηθεί η επίδραση των κατευθυντήριων γραμμών φόρτωσης στην απόδοση της CSA. Οι συσχετισμοί μεταξύ στατιστικών χαρακτηριστικών αντιστάθμισης και συμπιεστικών πιέσεων γίνονται επίσης για να εξεταστεί η σκοπιμότητα της CSA για την ποσοτικοποίηση της πίεσης [103].

Παραδοσιακά, επιφανειακά συνδεδεμένα PZT έχουν εφαρμοστεί ευρέως για την παρακολούθηση ζημιών σε δομές σκυροδέματος, όπως ανίχνευση ρωγμών επιφάνειας από σκυρόδεμα και ανάπτυξη της αντοχής του σκύρου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας τήξης [107]. Τα έμπλαστρα PZT τοποθετήθηκαν απευθείας στην επιφάνεια της δομής-στόχου χρησιμοποιώντας κόλλα όπως είναι η κόλλα στιγμής ή η ρητίνη. Η ρητίνη είναι ιδανική για τέτοιες εφαρμογές, μιας και είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού και καλός αγωγός της θερμότητας.

Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά της αντίστασης που μετρώνται από τους αισθητήρες PZT που συνδέονται με την επιφάνεια επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες. Αυτοί οι παράγοντες σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του PZT, όπως η ευθραυστότητα, η αστάθεια κάτω από τη θερμοκρασία και οι αλλαγές υγρασίας [108]. Επιπρόσθετα, βασικό στοιχείο που επηρεάζει τις μετρήσεις συνιστά η ποιότητα του συνδετικού στρώματος μεταξύ του πακέτου PZT και των δομών υποδοχής. Με την πάροδο του χρόνου φθείρεται η σύνδεση μεταξύ του συστήματος του αισθητήρα και του σκυροδέματος αλλοιώνοντας έτσι τα αποτελέσματα των μετρήσεων [103].

Για την αντιμετώπιση των ελαττωμάτων των επιφανειακά δεσμευμένων PZT, τα επικαλυμμένα PZT (προστατευμένα από στρώματα επώδυνης ρητίνης) ενσωματώνονται σε σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας χύτευσης σκυροδέματος [109] [110]. Ταυτόχρονα, τα επικαλυμμένα PZT εγκαθίστανται σε μπλοκ από σκυρόδεμα για να σχηματίσουν συνολικά στιβαρές ενώσεις (Smart Aggregates - SAs). Συνεπώς, ο ενσωματωμένος αισθητήρας PZT μπορεί να μετρήσει όλες τις αλλαγές στις υπογραφές αντίστασης που προκαλούνται από αλλαγές σε εσωτερικές πιέσεις κοντά στην τοποθεσία του αισθητηρίου.

Πολλοί ερευνητές έχουν εφαρμόσει τους ενσωματωμένους αισθητήρες PZT για την παρακολούθηση της αντοχής του σκυροδέματος, την εσωτερική επιτήρηση της ζημιάς από σκυρόδεμα και την ποσοτική εκτίμηση της βλάβης από σκύρο [111] [112] [113] [114] [115]. Επίσης, οι επιδράσεις του προσανατολισμού των αισθητήρων και της μεταβολής της θερμοκρασίας στα σήματα αντίστασης έχουν επίσης διερευνηθεί για τους ενσωματωμένους αισθητές PZT [116].

Ωστόσο, ότι παρά τις εκτεταμένες ερευνητικές προσπάθειες, υπάρχουν σημαντικά ζητήματα σχετικά με την τεχνική SA (Smart Aggregates) που πρέπει να επιλυθούν για να διασφαλιστεί η εφαρμογή της σε πραγματικές δομές. Το πρώτο ζήτημα είναι ο προκαθορισμός των περιοχών συχνότητας των αντιδράσεων αντοχής οι οποίες είναι ευαίσθητες σε τοπικές δομικές βλάβες πριν εγκατασταθούν σε δομές σκυροδέματος. Για την παρακολούθηση της αντοχής χρησιμοποιώντας ενσωματωμένους αισθητήρες PZT, οι περισσότερες προηγούμενες μελέτες χρησιμοποίησαν τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος για την αναζήτηση ευαίσθητων περιοχών συχνότητας [116]. Υπάρχουν όμως και ορισμένες μελέτες που έχουν προκαθορίσει τις κατάλληλες ζώνες συχνότητας χρησιμοποιώντας αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους [114] [115]. Το δεύτερο ζήτημα είναι η μέτρηση των σημάτων αντίστασης σε περιοχές χαμηλής συχνότητας μικρότερες από 100 kHz, η οποία απαιτείται για τον κόμβο του αισθητήρα ασύρματης αντίστασης. Σε πρόσφατες μελέτες για τους ενσωματωμένους αισθητήρες PZT, οι περισσότερες από τις αντιδράσεις αντοχής μετρήθηκαν σε ζώνες συχνότητας μεγαλύτερες από 100 kHz [111] [114] [115] [117]. Ως εκ τούτου, υπάρχει ένα ερευνητικό κίνητρο για να εξασφαλιστούν τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων SA με τη βελτίωση των περιορισμών στις μετρήσιμες περιοχές συχνότητας.

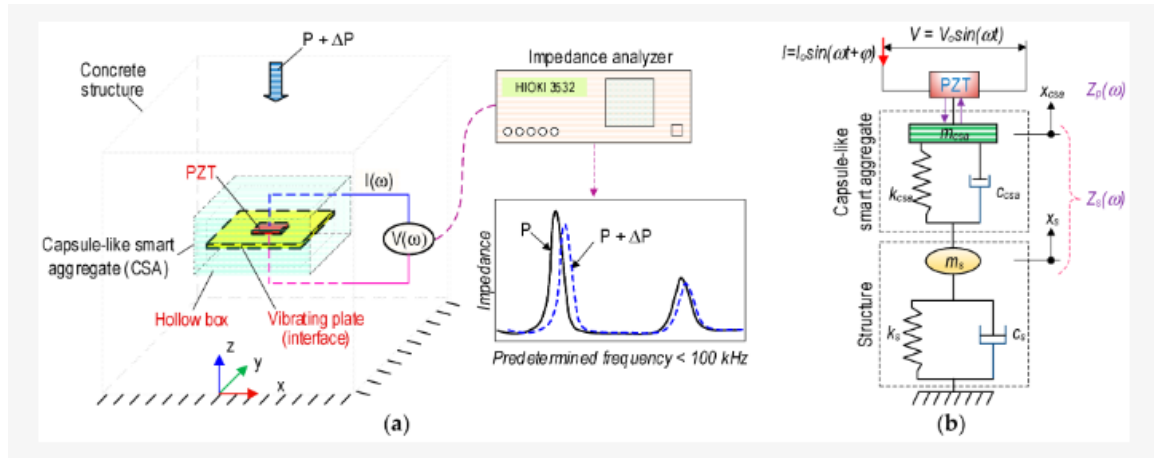
6.8 Μοντέλο αντιστάθμισης του CSA

Ένα από τα πιο δημοφιλή μοντέλα συστημάτων τύπου CSA που μοιάζει με κάψουλα αναπτύχθηκε πρόσφατα με βάση την έννοια της τεχνικής διεπαφής PZT (Piezoelectric - PZT interface technique) που προτάθηκε από τον Huynh et al. [118]. Με τη διασύνδεση PZT, τα σήματα αντίστασης θα μπορούσαν να μετρηθούν σε ζώνες συχνότητας μικρότερες από 100 kHz. Επιπλέον, το επιθυμητό εύρος συχνότητας θα μπορούσε να καθοριστεί εκ των προτέρων προσδιορίζοντας τις υλικές και γεωμετρικές παραμέτρους της διεπαφής PZT. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 27 (α), ένα CSA ενσωματωμένο σε μια δομή σκυροδέματος μετρά τις μεταβολές της αντίστασης που προκαλούνται από εξωτερικές δυνάμεις, ενώ στο σχήμα 27 (β) απεικονίζεται ένα μοντέλο αντοχής CSA 2 βαθμών ελευθερίας.

Συνολικά, το σύστημα CSA αποτελείται από ένα πακέτο PZT, μια πλάκα η οποία έχει ρόλο διασύνδεσης των δύο κύριων μερών του CSA και μια κάψουλα. Η διασύνδεση είναι μια ευέλικτη μεταλλική πλάκα με σταθερά άκρα, και ένα έμπλαστρο PZT είναι επιφανειακά τοποθετημένο στη μέση της πλάκας. Να σημειωθεί εδώ, ότι η διασύνδεση PZT έχει σχεδιαστεί σκόπιμα για να επιτρέπει τις ελαστικές αντιδράσεις δονήσεων σύμφωνα με την πιεζοηλεκτρική παραμόρφωση του αισθητήρα PZT.

Επιπλέον, οι ευαίσθητες συχνότητες των σημάτων αντιστάθμισης μπορούν να προσδιοριστούν εκ των προτέρων προσδιορίζοντας τις υλικές, γεωμετρικές και οριακές συνθήκες της διεπαφής PZT [118] [119]. Η κάψουλα διαδραματίζει το ρόλο ενός ενσωματωμένου αισθητήρα PZT για την τοπική παρακολούθηση της αντοχής. Το κενό

κουτί μέσα στο οποίο βρίσκεται το πακέτο PZT προστατεύει τη διεπαφή PZT κατά τη διάρκεια της σκυροδέματος. Η συσκευή κάψουλας επιτρέπει στη διασύνδεση PZT να παράγει όπως σχεδιάστηκε σήματα αντίστασης της δομής σκυροδέματος υπό συμπίεση.



Σχήμα 27: Εννοιολογικό μοντέλο της CSA σε δομή σκυροδέματος υπό συμπίεση. α) Δομή σκυροδέματος ενσωματωμένη σε CSA. β) Μοντέλο αντοχής 2-DOF [103].

Κεφάλαιο 7 Σύνοψη και Συμπεράσματα

7.1 Σύνοψη

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, είναι πλέον αντιληπτό ότι οι τεχνικές για τον εντοπισμό ρωγμών συνεχώς εξελίσσονται, ενώ ταυτόχρονα δημιουργούνται και αναπτύσσονται νέες. Οι ρωγμές και τα ελαττώματα σε οτιδήποτε κατασκεύαζε ο άνθρωπος αποτελούσαν πάντα ένα τροχοπέδη και ένα πρόβλημα το οποίο έχρηζε άμεσης αντιμετώπισης. Υπάρχουν πολλές αιτίες οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία ρωγμών, με κατά κύριο λόγο τη γήρανση του υλικού, τον κακό σχεδιασμό αλλά και διάφορα φυσικά φαινόμενα. Γενικά, τα χαρακτηριστικά και τα είδη των ρωγμών ποικίλουν τόσο σε μέγεθος, για παράδειγμα μεγάλες σε κτήρια και γέφυρες, μέχρι και πολύ μικρές σε κλίμακα μικρομέτρου σε ηλεκτρικές συσκευές, όσο και σε σημαντικότητα. Για αυτόν τον λόγο συνεχώς αναπτύσσονται πολλές και διαφορετικές τεχνικές, με σκοπό την ανίχνευση και την αντιμετώπιση κάθε είδους ρωγμής.

Οι περισσότερες μέθοδοι για τον εντοπισμό ρωγμών βασίζονται κατά κύριο λόγο στην χρήση αισθητήρων, και ιδιαίτερα στην χρήση των ακουστικών και των πιεζοηλεκτρικών. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ουσιαστικά στηρίζεται στην ιδιότητα ορισμένων υλικών να μετατρέπουν την μηχανική τάση που δέχονται σε διαφορά δυναμικού και αντίστροφα. Θεμελιώδης ιδέα των τεχνικών αυτών, είναι η δημιουργία ενός κυκλώματος διέγερσης και ενός κυκλώματος λήψης. Το πρώτο κύκλωμα στέλνει ένα σήμα δια μέσου του υπό εξέταση προς ρωγμή υλικού και εν συνεχεία το σύστημα λήψης ανιχνεύει και λαμβάνει το σήμα αυτό. Η οποιαδήποτε διαφοροποίηση στα χαρακτηριστικά του σήματος, ιδίως στο πλάτος και την συχνότητα, καθώς και το μέγεθος της μεταβολής αυτής υποδεικνύει κάποια ασυνέχεια μέσα στο υλικό με αποτέλεσμα τον εντοπισμό της ρωγμής.

Με την ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια, νέα σύγχρονα εργαλεία έχουν ενταχθεί στον τομέα της ανίχνευσης ρωγμών. Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν τεχνικές της τεχνητής νοημοσύνης, της μηχανικής μάθησης και των νευρωνικών δικτύων. Αρχικά, γίνεται εκπαίδευση ενός ταξινομητή με φωτογραφίες για δεδομένα, οι οποίες μπορεί να έχουν υποστεί κάποια επεξεργασία βάση μεθόδων της όρασης υπολογιστών, προκειμένου η φωτεινότητα στα pixels στα οποία βρίσκονται οι ρωγμές να είναι πιο έντονα από τα υπόλοιπα. Επίσης, στο βήμα της εκπαίδευσης του ταξινομητή, είναι γνωστό αν έχουν τα αντικείμενα που απεικονίζονται στις εικόνες ρωγμές καθώς και σε ποια εικονοστοιχεία αυτές βρίσκονται. Με αυτόν τον τρόπο ο ταξινομητής καθίσταται ικανός να αναγνωρίζει σε άλλα υπό εξέταση δεδομένα αν υπάρχει ρωγμή με πολύ καλή ακρίβεια στα αποτελέσματά του.

Προφανώς, εκτός από την χρήση αισθητήρων και τις τεχνικές με μηχανική μάθηση και αναγνώριση προτύπων υπάρχουν και έχουν αναπτυχθεί και πολλοί χειρονακτικοί τρόποι για την ανίχνευση ρωγμών. Από αυτούς, επιβάλλεται να δοθεί έμφαση στη θερμογραφία, η οποία είναι μια τεχνική απεικόνισης που βασίζεται στην ανίχνευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα αντικείμενα, με σκοπό τη δημιουργία μιας εικόνας που παρουσιάζει τις θερμοκρασιακές διαφορές στην επιφάνεια του αντικειμένου. Επειδή οι ρωγμές και τα κενά σε υλικά μπορούν να επηρεάσουν την ροή της θερμότητας, υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας, η οποία φαίνεται στην εικόνα θερμογραφίας και συνεπώς η ρωγμή εντοπίζεται. Επιπρόσθετα, το μοντέλο αντιστάθμισης του CSA (Compensated Strain Analysis) είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται στην ανίχνευση ρωγμών. Η ιδέα πίσω από αυτό το μοντέλο είναι να εντοπίσει τις ανωμαλίες στην κατανομή των καταπονήσεων, οι οποίες μπορεί να υποδηλώνουν την παρουσία ρωγμών ή άλλων ζημιών.

7.2 Επίλογος

Τελειώνοντας, τα ελαττώματα και οι ρωγμές συνιστούν ένα βασικό πρόβλημα σε οποιαδήποτε ανθρώπινη κατασκευή. Η άμεση ανίχνευση και αντιμετώπισή τους διασφαλίζουν όχι μόνο την καλύτερη δυνατή λειτουργία των κατασκευών αυτών αλλά και μεγαλύτερη ασφάλεια και διάρκεια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] R. F. Fellows και A. M. M. Liu, *Research Methods for Construction*. John Wiley & Sons, 2021.
- [2] Z. Wu, X. Zhang, και M. Wu, 'Mitigating construction dust pollution: state of the art and the way forward', *J. Clean. Prod.*, τ. 112, σσ. 1658–1666, Ιανουαρίου 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.015.
- [3] 'What cracked the West Seattle Bridge? Hidden design problem may have doomed it all along', *The Seattle Times*. Ημερομηνία πρόσβασης: 18 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή].
- [4] Y. Yao, S.-T. E. Tung, και B. Glisic, 'Crack detection and characterization techniques—An overview', *Struct. Control Health Monit.*, τ. 21, τχ. 12, σσ. 1387–1413, 2014, doi: 10.1002/stc.1655.
- [5] M. Naebe, M. M. Abolhasani, H. Khayyam, A. Amini, και B. Fox, 'Crack Damage in Polymers and Composites: A Review', *Polym. Rev.*, τ. 56, τχ. 1, σσ. 31–69, Ιανουαρίου 2016, doi: 10.1080/15583724.2015.1078352.
- [6] M. Mirbod και M. Shoar, 'Intelligent Concrete Surface Cracks Detection using Computer Vision, Pattern Recognition, and Artificial Neural Networks', *Procedia Comput. Sci.*, τ. 217, σσ. 52–61, Ιανουαρίου 2023, doi: 10.1016/j.procs.2022.12.201.
- [7] 'A survey on crack detection in concrete surface using image processing and machine learning | Journal of Building Pathology and Rehabilitation'. Ημερομηνία πρόσβασης: 4 Μάιος 2024.
- [8] 'Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program.pdf'.
- [9] M.-H. Zeng, Z.-M. Wu, και Y.-J. Wang, 'A stochastic model considering heterogeneity and crack propagation in concrete', *Constr. Build. Mater.*, τ. 254, σ. 119289, Σεπτεμβρίου 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119289.
- [10] 'Σχεδίαση και ανάπτυξη ακουστικού αισθητήρα για την ανίχνευση καρωτιδικού θορύβου με στόχο τη διάγνωση αθηρωματικής πλάκας..pdf'. Ημερομηνία πρόσβασης: 6 Φεβρουάριος 2024.
- [11] 'ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ.pdf'. Ημερομηνία πρόσβασης: 7 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή].
- [12] T. T. Hai, P. T. Hang, και N. T. Khiem, 'A novel criterion for crack identification in beam-like structures using distributed piezoelectric sensor and controlled moving load', *J. Sound Vib.*, τ. 572, σ. 118155, Μαρτίου 2024, doi: 10.1016/j.jsv.2023.118155.
- [13] L. Tang, F. Xie, και Q. Li, 'A Phase Shift-Based and Quadrant-Distinguishable Passive Microstrip Antenna Sensor for Metal Crack Detection', *IEEE Sens. J.*, τ. 24, τχ. 6, σσ. 7796–7806, Μαρτίου 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3357542.

- [14] D. Li, S.-C. M. Ho, G. Song, L. Ren, και H. Li, 'A review of damage detection methods for wind turbine blades', *Smart Mater. Struct.*, τ. 24, τχ. 3, σ. 033001, Οκτωβρίου 2015, doi: 10.1088/0964-1726/24/3/033001.
- [15] C. Yan, W. Xu, και J. Liu, 'Can You Trust Autonomous Vehicles: Contactless Attacks against Sensors of Self-driving Vehicle'.
- [16] Zhanat Kappassov a, Juan-Antonio Corrales b, Véronique Perdereau, 'Tactile sensing in dexterous robot hands — Review', *Robot. Auton. Syst.*, [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889015001621>
- [17] M. Ilami, H. Bagheri, R. Ahmed, E. O. Skowronek, και H. Marvi, 'Materials, Actuators, and Sensors for Soft Bioinspired Robots', *Adv. Mater.*, τ. 33, τχ. 19, σ. 2003139, 2021, doi: 10.1002/adma.202003139.
- [18] S. Li, X. Fan, Y. Zhang, W. Trappe, J. Lindqvist, και R. E. Howard, 'Auto++: Detecting Cars Using Embedded Microphones in Real-Time', *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, τ. 1, τχ. 3, σσ. 1–20, Σεπτεμβρίου 2017, doi: 10.1145/3130938.
- [19] H. Guo, J. Liu, H. Liu, M. Yang, J. Zhao, και T. Lu, 'Iontronic Dynamic Sensor with Broad Bandwidth and Flat Frequency Response Using Controlled Preloading Strategy', *ACS Nano*, Φεβρουαρίου 2024, doi: 10.1021/acsnano.3c11166.
- [20] N. Dey, A. S. Ashour, W. S. Mohamed, και N. G. Nguyen, 'Acoustic Sensors in Biomedical Applications', στο *Acoustic Sensors for Biomedical Applications*, N. Dey, A. S. Ashour, W. S. Mohamed, και N. G. Nguyen, Επιμ., στο SpringerBriefs in Speech Technology. , Cham: Springer International Publishing, 2019, σσ. 43–47. doi: 10.1007/978-3-319-92225-6_5.
- [21] B. Prabhu, M. Pradeep, και E. Gajendran, 'Military Applications of Wireless Sensor Network System'. Rochester, NY, 25 Ιανουάριος 2017. Ημερομηνία πρόσβασης: 23 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://papers.ssrn.com/abstract=2905627>
- [22] Dr. S. R. BOSELIN PRABHU, N. BALAKUMAR, και A. JOHNSON ANTONY, 'Evolving Constraints in Military Applications using Wireless Sensor Networks'. Rochester, NY, 2017. Ημερομηνία πρόσβασης: 23 Απρίλιος 2024.
- [23] A. Ltd, 'Acoustic Sensors: The Hidden Technology Shaping Our World! Applications, Benefits, and Its Working', Aimil Corporate Blog. Ημερομηνία πρόσβασης: 1 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.aimil.com/blog/acoustic-sensors-applications-benefits-and-its-working/>
- [24] P. Chiariotti, G. Battista, M. Ettorre, και P. Castellini, 'Average acoustic beamforming in car cabins: An automatic system for acoustic mapping over 3D surfaces', *Appl. Acoust.*, τ. 129, σσ. 47–63, Ιανουαρίου 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2017.07.009.
- [25] 'Crack identification through scan-tuning of vibration characteristics using piezoelectric materials - IOPscience'. Ημερομηνία πρόσβασης: 14 Ιούνιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/aa520a/meta>

- [26] 'Η αρχή και η εφαρμογή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου - Γνώση - PZT Electronic Ceramic Co., Ltd.' Ημερομηνία πρόσβασης: 7 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. [27] 'staff.ncl.ac.uk/j.p.goss/symmetry/PP_Pyro.html'. Ημερομηνία πρόσβασης: 14 Ιούνιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.staff.ncl.ac.uk/j.p.goss/symmetry/PP_Pyro.html
- [28] K. Uchino, *Advanced Piezoelectric Materials: Science and Technology*. Woodhead Publishing, 2017.
- [29] A. Λαζανάς, 'Χαρακτηρισμός και Μελέτη Ακουστικών Αισθητήρων και Σημάτων για Υποθαλάσσιες Εφαρμογές', Ιουλίου 2022,
- [30] 'PZT Κεραμικά Κατασκευαστές Δίσκων και Εταιρεία - Τιμή - PZT Electronic'. Ημερομηνία πρόσβασης: 20 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://gr.pztpiezo.com/piezo-ceramic/piezo-disc/pzt-ceramic-disc.html>
- [31] 'index.pdf'. Ημερομηνία πρόσβασης: 4 Μάιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://www.icc107.com/index.php?route=product/product/pdfdownload&product_id=MTM3
- [32] 'BachtaliasAlexandros2023.pdf'. Ημερομηνία πρόσβασης: 29 Φεβρουάριος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://apothesis.lib.hmu.gr/bitstream/handle/20.500.12688/10720/BachtaliasAlexandros2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [33] H. F. Olson, 'ACOUSTICAL ENGINEERING'.
- [34] R. J. Bobber, 'Underwater Electroacoustic Measurements'.
- [35] X. Qing, W. Li, Y. Wang, και H. Sun, 'Piezoelectric Transducer-Based Structural Health Monitoring for Aircraft Applications', *Sensors*, τ. 19, τχ. 3, Art. τχ. 3, Ιανουαρίου 2019, doi: 10.3390/s19030545.
- [36] 'HuntElectroacoustics.pdf'.
- [37] U. Marschner, G. Pfeifer, και E. Starke, 'Reciprocity of linear systems with smart materials utilized for precise measurement techniques', *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, τ. 27, τχ. 14, σσ. 1989–2000, Αυγούστου 2016, doi: 10.1177/1045389X16642531.
- [38] E. Maggiolini, R. Tovo, L. Susmel, M. N. James, και D. G. Hattingh, 'Crack path and fracture analysis in FSW of small diameter 6082-T6 aluminium tubes under tension–torsion loading', *Int. J. Fatigue*, τ. 92, σσ. 478–487, Νοεμβρίου 2016, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2016.02.043.
- [39] W. Zheng και J. Li, 'Method for detecting and locating cracks in aluminum plates based on balanced field electromagnetic technique', *Measurement*, τ. 229, σ. 114505, Απριλίου 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2024.114505.
- [40] J. Li, L. Yang, W. Zheng, και B. Liu, 'Discriminative Method for Crack Detection Signals in Balanced-Field Electromagnetic Technique Based on Amplitude-Phase Composite Figure', *Sensors*, τ. 22, τχ. 18, σ. 7000, Σεπτεμβρίου 2022, doi: 10.3390/s22187000.

- [41] L. Yang, J. Li, W. Zheng, και B. Liu, 'Simulation and Design of a Balanced-Field Electromagnetic Technique Sensor for Crack Detection in Long-Distance Oil and Gas Pipelines', *Energies*, τ. 15, τχ. 14, σ. 5274, Ιουλίου 2022, doi: 10.3390/en15145274.
- [42] W. Zheng, J. Li, και Y. Xiao, 'Processing methods of the pipeline crack detection signal by a balanced field electromagnetic technique based on phase characteristics', *Rev. Sci. Instrum.*, τ. 94, τχ. 4, σ. 044706, Απριλίου 2023, doi: 10.1063/5.0137924.
- [43] W. Zheng και J. Li, 'Multi-channel frequency difference noise analysis and cancellation method for the balanced field electromagnetic pipeline inspection gauge', *Rev. Sci. Instrum.*, τ. 94, τχ. 7, σ. 074702, Ιουλίου 2023, doi: 10.1063/5.0155796.
- [44] Q. Wu, X. Qin, K. Dong, A. Shi, και Z. Hu, 'A learning-based crack defect detection and 3D localization framework for automated fluorescent magnetic particle inspection', *Expert Syst. Appl.*, τ. 214, σ. 118966, Μαρτίου 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2022.118966.
- [45] B. Glisic, J. Chen, και D. Hubbell, 'Streicker Bridge: a comparison between Bragg-grating long-gauge strain and temperature sensors and Brillouin scattering-based distributed strain and temperature sensors', στο *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2011*, SPIE, Απριλίου 2011, σσ. 674–683. doi: 10.1117/12.881818.
- [46] B. Glisic και Y. Yao, 'Fiber optic method for health assessment of pipelines subjected to earthquake-induced ground movement', *Struct. Health Monit.*, τ. 11, τχ. 6, σσ. 696–711, Νοεμβρίου 2012, doi: 10.1177/1475921712455683.
- [47] 'What is RFID and how does it work?', IoT Agenda. Ημερομηνία πρόσβασης: 29 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/RFID-radio-frequency-identification>
- [48] A. M. Albishi και O. M. Ramahi, 'Microwaves-Based High Sensitivity Sensors for Crack Detection in Metallic Materials', *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, τ. 65, τχ. 5, σσ. 1864–1872, Μαΐου 2017, doi: 10.1109/TMTT.2017.2673823.
- [49] C. Lang, J. Fang, H. Shao, X. Ding, και T. Lin, 'High-sensitivity acoustic sensors from nanofibre webs', *Nat. Commun.*, τ. 7, τχ. 1, σ. 11108, Μαρτίου 2016, doi: 10.1038/ncomms11108.
- [50] 'Microelectronics Reliability | Journal | ScienceDirect.com by Elsevier'. Ημερομηνία πρόσβασης: 27 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.sciencedirect.com/journal/microelectronics-reliability>
- [51] G. M. Reuther, R. Pufall, και M. Goroll, 'Acoustic detection of micro-cracks in small electronic devices', *Microelectron. Reliab.*, τ. 54, τχ. 9, σσ. 2118–2122, Σεπτεμβρίου 2014, doi: 10.1016/j.microrel.2014.07.129.
- [52] Z. Wang, Y. Fei, P. Ye, F. Qiu, G. Tian, και W. L. Woo, 'Crack characterization in ferromagnetic steels by pulsed eddy current technique based on GA-BP neural network model', *J. Magn. Magn. Mater.*, τ. 500, σ. 166412, Απριλίου 2020, doi: 10.1016/j.jmmm.2020.166412.

- [53] X. Yuan κ.ά., ‘Inspection of both inner and outer cracks in aluminum tubes using double frequency circumferential current field testing method’, *Mech. Syst. Signal Process.*, τ. 127, σσ. 16–34, Ιουλίου 2019, doi: 10.1016/j.ymssp.2019.02.054.
- [54] Y. Kuts, S. Maievskiy, A. Protasov, I. Lysenko, και O. Dugin, ‘Study of Parametric Transducer Operation in Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing’, στο *2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kiev: IEEE, Απριλίου 2018, σσ. 594–597. doi: 10.1109/ELNANO.2018.8477572.
- [55] H. S. Munawar, A. W. A. Hammad, A. Haddad, C. A. P. Soares, και S. T. Waller, ‘Image-Based Crack Detection Methods: A Review’, *Infrastructures*, τ. 6, τχ. 8, σ. 115, Αυγούστου 2021, doi: 10.3390/infrastructures6080115.
- [56] R. Ali, J. H. Chuah, M. S. A. Talip, N. Mokhtar, και M. A. Shoaib, ‘Structural crack detection using deep convolutional neural networks’, *Autom. Constr.*, τ. 133, σ. 103989, Ιανουαρίου 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103989.
- [57] C. Boué και S. Holé, ‘Depth Evaluation of Curvilinear Cracks in Metal Using Multi-speed Laser Lock-in Thermography Method’, *J. Nondestruct. Eval.*, τ. 41, Ιουνίου 2022, doi: 10.1007/s10921-022-00875-0.
- [58] ‘Pauly: Deeper networks for pavement crack detection - Μελετητής Google’. Ημερομηνία πρόσβασης: 30 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. [59] H. S. Munawar, A. W. A. Hammad, A. Haddad, C. A. P. Soares, και S. T. Waller, ‘Image-Based Crack Detection Methods: A Review’, *Infrastructures*, τ. 6, τχ. 8, Art. τχ. 8, Αυγούστου 2021, doi: 10.3390/infrastructures6080115.
- [60] N. Gehri, J. Mata-Falcón, και W. Kaufmann, ‘Automated crack detection and measurement based on digital image correlation’, *Constr. Build. Mater.*, τ. 256, σ. 119383, Σεπτεμβρίου 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119383.
- [61] A. Arena, C. Delle Piane, και J. Sarout, ‘A new computational approach to cracks quantification from 2D image analysis: Application to micro-cracks description in rocks’, *Comput. Geosci.*, τ. 66, σσ. 106–120, Μαΐου 2014, doi: 10.1016/j.cageo.2014.01.007.
- [62] A. Cubero-Fernandez, Fco. J. Rodriguez-Lozano, R. Villatoro, J. Olivares, και J. M. Palomares, ‘Efficient pavement crack detection and classification’, *EURASIP J. Image Video Process.*, τ. 2017, τχ. 1, σ. 39, Δεκεμβρίου 2017, doi: 10.1186/s13640-017-0187-0.
- [63] ‘Yang: Automatic pixel-level crack detection and... - Μελετητής Google’. Ημερομηνία πρόσβασης: 30 Απρίλιος 2024.
- [64] ‘Lins: Automatic crack detection and measurement based... - Μελετητής Google’. Ημερομηνία πρόσβασης: 30 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. [65] ‘Wu: Improvement of crack-detection accuracy using... - Μελετητής Google’.
- [66] ‘Chen: NB-CNN: Deep learning-based crack detection... - Μελετητής Google’. Ημερομηνία πρόσβασης: 30 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή].
- [67] X. Wang και Y. Zhang, ‘The Detection and Recognition of Bridges’ Cracks Based on Deep Belief Network’, στο *22017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*, Guangzhou, China: IEEE, Ιουλίου 2017, σσ. 768–771. doi: 10.1109/CSE-EUC.2017.151.

- [68] H. Oliveira και P. L. Correia, 'Automatic Road Crack Detection and Characterization', *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, τ. 14, τχ. 1, σσ. 155–168, Μαρτίου 2013, doi: 10.1109/TITS.2012.2208630.
- [69] Y. Shi, L. Cui, Z. Qi, F. Meng, και Z. Chen, 'Automatic Road Crack Detection Using Random Structured Forests', *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, τ. 17, τχ. 12, σσ. 3434–3445, Δεκεμβρίου 2016, doi: 10.1109/TITS.2016.2552248.
- [70] A. Zhang κ.ά., 'Automated Pixel-Level Pavement Crack Detection on 3D Asphalt Surfaces with a Recurrent Neural Network', *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, τ. 34, τχ. 3, σσ. 213–229, Μαρτίου 2019, doi: 10.1111/mice.12409.
- [71] Dihao Ai, Guiyuan Jiang, Siew-Kei Lam, Peilan He, και Chengwu Li, 'Computer vision framework for crack detection of civil infrastructure—A review', *Eng. Appl. Artif. Intell.*, τ. Elsevier, [72] D. Ai, G. Jiang, L. Siew Kei, και C. Li, 'Automatic Pixel-Level Pavement Crack Detection Using Information of Multi-Scale Neighborhoods', *IEEE Access*, τ. 6, σσ. 24452–24463, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2829347.
- [73] F. Ni, J. Zhang, και Z. Chen, 'Pixel-level crack delineation in images with convolutional feature fusion', *Struct. Control Health Monit.*, τ. 26, τχ. 1, σ. e2286, Ιανουαρίου 2019, doi: 10.1002/stc.2286.
- [74] S.-T. Liong, Y. S. Gan, Y.-C. Huang, C.-A. Yuan, και H.-C. Chang, 'Automatic Defect Segmentation on Leather with Deep Learning'. arXiv, 28 Μάρτιος 2019. Ημερομηνία πρόσβασης: 13 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <http://arxiv.org/abs/1903.12139>
- [75] L. Zhang, F. Yang, Y. Daniel Zhang, και Y. J. Zhu, 'Road crack detection using deep convolutional neural network', στο *2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Phoenix, AZ, USA: IEEE, Σεπτεμβρίου 2016, σσ. 3708–3712. doi: 10.1109/ICIP.2016.7533052.
- [76] Q. Zou, Y. Cao, Q. Li, Q. Mao, και S. Wang, 'CrackTree: Automatic crack detection from pavement images', *Pattern Recognit. Lett.*, τ. 33, τχ. 3, σσ. 227–238, Φεβρουαρίου 2012, doi: 10.1016/j.patrec.2011.11.004.
- [77] C. V. Dung και L. D. Anh, 'Autonomous concrete crack detection using deep fully convolutional neural network', *Autom. Constr.*, τ. 99, σσ. 52–58, Μαρτίου 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2018.11.028.
- [78] M. Gavilán κ.ά., 'Adaptive Road Crack Detection System by Pavement Classification', *Sensors*, τ. 11, τχ. 10, σσ. 9628–9657, Οκτωβρίου 2011, doi: 10.3390/s111009628.
- [79] 'LCMS | Automated Network Survey System , Automated Road Condition Survey'. Ημερομηνία πρόσβασης: 5 Ιούνιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://romdas.com/romdas-lcms.html>
- [80] D. L. Baggio, S. Emami, D. M. Escrive, K. Ievgen, J. Saragih, και R. Shilkrot, *Mastering OpenCV 3*. Packt Publishing Ltd, 2017.
- [81] M. Gong, D. Wang, X. Zhao, H. Guo, D. Luo, και M. Song, 'A review of non-maximum suppression algorithms for deep learning target detection', στο *Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications*, J. Chu,

- Q. Yu, H. Jiang, και J. Su, Επιμ., Kunming, China: SPIE, Μαρτίου 2021, σ. 133. doi: 10.1117/12.2586477.
- [82] B. Oswald-Tranta, 'Induction Thermography for Surface Crack Detection and Depth Determination', *Appl. Sci.*, τ. 8, τχ. 2, σ. 257, Φεβρουαρίου 2018, doi: 10.3390/app8020257.
- [83] O. Lucia, P. Maussion, E. J. Dede, και J. M. Burdio, 'Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, τ. 61, τχ. 5, σσ. 2509–2520, Μαΐου 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2281162.
- [84] KJ Kremer, W Kaiser, P Möller - Stahl u. Eisen, 'Das Therm-O-Matic-Verfahren-ein neuartiges Verfahren für die Online-prüfung von Stahlerzeugnissen auf Oberflächenfehler', 1985.
- [85] F. W. Panella, A. Pirinu, και V. Dattoma, 'A Brief Review and Advances of Thermographic Image - Processing Methods for IRT Inspection: a Case of Study on GFRP Plate', *Exp. Tech.*, τ. 45, τχ. 4, σσ. 429–443, Αυγούστου 2021, doi: 10.1007/s40799-020-00414-4.
- [86] G. Ólafsson, R. C. Tighe, S. W. Boyd, και J. M. Dulieu-Barton, 'Lock-in thermography using miniature infra-red cameras and integrated actuators for defect identification in composite materials', *Opt. Laser Technol.*, τ. 147, σ. 107629, Μαρτίου 2022, doi: 10.1016/j.optlastec.2021.107629.
- [87] T. Dursun και C. Soutis, 'Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys', *Mater. Des. 1980-2015*, τ. 56, σσ. 862–871, Απριλίου 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.002.
- [88] S. Ranjit, K. Kang, και W. Kim, 'Investigation of lock-in infrared thermography for evaluation of subsurface defects size and depth', *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, τ. 16, τχ. 11, σσ. 2255–2264, Οκτωβρίου 2015, doi: 10.1007/s12541-015-0290-z.
- [89] 'Fluke TiX580 Infrared Camera'. Ημερομηνία πρόσβασης: 21 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.fluke.com/en-us/product/thermal-cameras/tix580>
- [90] D. Palumbo, R. Tamborrino, U. Galietti, P. Aversa, A. Tatì, και V. A. M. Luprano, 'Ultrasonic analysis and lock-in thermography for debonding evaluation of composite adhesive joints', *NDT E Int.*, τ. 78, σσ. 1–9, Μαρτίου 2016, doi: 10.1016/j.ndteint.2015.09.001.
- [91] R. D. Łukaszuk, R. M. Marques, και T. Chady, 'Lock-In Thermography with Cooling for the Inspection of Composite Materials', *Materials*, τ. 16, τχ. 21, σ. 6924, Οκτωβρίου 2023, doi: 10.3390/ma16216924.
- [92] 'SWIR Microbolometer Cameras - Polytec'. Ημερομηνία πρόσβασης: 22 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.polytec.com/eu/optical-systems/products/special-cameras/ir-cameras-arrays/swir-microbolometer-cameras>
- [93] Y. Gao κ.ά., 'Electromagnetic pulsed thermography for natural cracks inspection', *Sci. Rep.*, τ. 7, τχ. 1, σ. 42073, Φεβρουαρίου 2017, doi: 10.1038/srep42073.
- [94] 'Materials that couple sensing, actuation, computation, and communication | Science'. Ημερομηνία πρόσβασης: 21 Απρίλιος 2024.

- [95] H. A. Bale κ.ά., 'Real-time quantitative imaging of failure events in materials under load at temperatures above 1,600 °C', *Nat. Mater.*, τ. 12, τχ. 1, σσ. 40–46, Ιανουαρίου 2013, doi: 10.1038/nmat3497.
- [96] B. Gao, L. Bai, W. L. Woo, και G. Tian, 'Thermography pattern analysis and separation', *Appl. Phys. Lett.*, τ. 104, τχ. 25, σ. 251902, Ιουνίου 2014, doi: 10.1063/1.4884644.
- [97] 'Physical interpretation and separation of eddy current pulsed thermography | Journal of Applied Physics | AIP Publishing'. Ημερομηνία πρόσβασης: 21 Απρίλιος 2024. [98] 'Analysis of the defect detection capabilities of pulse stimulated thermographic NDE techniques | AIP Conference Proceedings | AIP Publishing'. Ημερομηνία πρόσβασης: 21 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/1581/1/1617/934255/Analysis-of-the-defect-detection-capabilities-of>
- [99] Y. Sun και Y. Kang, 'Magnetic mechanisms of magnetic flux leakage nondestructive testing', *Appl. Phys. Lett.*, τ. 103, τχ. 18, σ. 184104, Οκτωβρίου 2013, doi: 10.1063/1.4828556.
- [100] 'Multidimensional Tensor-Based Inductive Thermography With Multiple Physical Fields for Offshore Wind Turbine Gear Inspection | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore'.
- [101] Y. Ma, Y. Liu, M. Raza, Y. Wang, και S. He, 'Experimental Demonstration of a Multiphysics Cloak: Manipulating Heat Flux and Electric Current Simultaneously', *Phys. Rev. Lett.*, τ. 113, τχ. 20, σ. 205501, Νοεμβρίου 2014, doi: 10.1103/PhysRevLett.113.205501.
- [102] S. Ruta, R. Chantrell, και O. Hovorka, 'Unified model of hyperthermia via hysteresis heating in systems of interacting magnetic nanoparticles', *Sci. Rep.*, τ. 5, τχ. 1, σ. 9090, Μαρτίου 2015, doi: 10.1038/srep09090.
- [103] Q.-Q. Pham, Q.-B. Ta, και J.-T. Kim, 'Capsule-Like Smart Aggregate with Pre-Determined Frequency Range for Impedance-Based Stress Monitoring', *Sensors*, τ. 23, τχ. 1, Art. τχ. 1, Ιανουαρίου 2023, doi: 10.3390/s23010434.
- [104] S. Taheri, 'A review on five key sensors for monitoring of concrete structures', *Constr. Build. Mater.*, τ. 204, σσ. 492–509, Απριλίου 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.172.
- [105] G. I. Zarate Garnica, E. O. L. Lantsoght, και Y. Yang, 'Monitoring structural responses during load testing of reinforced concrete bridges: a review', *Struct. Infrastruct. Eng.*, τ. 18, τχ. 10–11, σσ. 1558–1580, Νοεμβρίου 2022, doi: 10.1080/15732479.2022.2063906.
- [106] 'Sensors | Free Full-Text | A Review of the Piezoelectric Electromechanical Impedance Based Structural Health Monitoring Technique for Engineering Structures'. Ημερομηνία πρόσβασης: 25 Απρίλιος 2024. [107] D. Ai, H. Luo, και H. Zhu, 'Numerical and experimental investigation of flexural performance on pre-stressed concrete structures using electromechanical admittance', *Mech. Syst. Signal Process.*, τ. 128, σσ. 244–265, Αυγούστου 2019, doi: 10.1016/j.ymssp.2019.03.046.

- [108] 'Temperature effect on wireless impedance monitoring in tendon anchorage of prestressed concrete girder - Smart Structures and Systems, An International Journal - 국제구조공학회 : 논문 - DBpia'. Ημερομηνία πρόσβασης: 26 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή].
- [109] D. Wang, H. Song, και H. Zhu, 'Embedded 3D electromechanical impedance model for strength monitoring of concrete using a PZT transducer', *Smart Mater. Struct.*, τ. 23, τχ. 11, σ. 115019, Ιουλίου 2014, doi: 10.1088/0964-1726/23/11/115019.
- [110] D. Ai, L. Du, H. Li, και H. Zhu, 'Corrosion damage identification for reinforced concrete beam using embedded piezoelectric transducer: Numerical simulation', *Measurement*, τ. 192, σ. 110925, Μαρτίου 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2022.110925.
- [111] Y. Li, Y. Ma, και X. Hu, 'Early-age strength monitoring of the recycled aggregate concrete using the EMI method', *Smart Mater. Struct.*, τ. 30, τχ. 5, σ. 055017, Δεκεμβρίου 2021, doi: 10.1088/1361-665X/abf421.
- [112] G. Li, M. Luo, J. Huang, και W. Li, 'Early-age concrete strength monitoring using smart aggregate based on electromechanical impedance and machine learning', *Mech. Syst. Signal Process.*, τ. 186, σ. 109865, Μαρτίου 2023, doi: 10.1016/j.ymssp.2022.109865.
- [113] A. Kocherla και K. V. L. Subramaniam, 'Embedded smart PZT-based sensor for internal damage detection in concrete under applied compression', *Measurement*, τ. 163, σ. 108018, Οκτωβρίου 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108018.
- [114] 'Sensors | Free Full-Text | Optimal Localization of Smart Aggregate Sensor for Concrete Damage Monitoring in PSC Anchorage Zone'. Ημερομηνία πρόσβασης: 26 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/19/6337>
- [115] S. Zhao, S. Fan, J. Yang, και S. Kitipornchai, 'Numerical and experimental investigation of electro-mechanical impedance based concrete quantitative damage assessment', *Smart Mater. Struct.*, τ. 29, τχ. 5, σ. 055025, Δεκεμβρίου 2020, doi: 10.1088/1361-665X/ab58e9.
- [116] D. Xu, S. Banerjee, Y. Wang, S. Huang, και X. Cheng, 'Temperature and loading effects of embedded smart piezoelectric sensor for health monitoring of concrete structures', *Constr. Build. Mater.*, τ. 76, σσ. 187–193, Φεβρουαρίου 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.067.
- [117] 'Sensors | Free Full-Text | Influence of Axial Load on Electromechanical Impedance (EMI) of Embedded Piezoceramic Transducers in Steel Fiber Concrete'. Ημερομηνία πρόσβασης: 26 Απρίλιος 2024. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/6/1782>
- [118] T.-C. Huynh και J.-T. Kim, 'Quantitative damage identification in tendon anchorage via PZT interface-based impedance monitoring technique', *Smart Struct. Syst.*, τ. 20, τχ. 2, σσ. 181–195, 2017, doi: 10.12989/sss.2017.20.2.181.
- [119] 'Piezoelectric-based hoop-type interface for impedance monitoring of local strand breakage in prestressed multi-strand anchorage - Dang - 2021 - Structural

Control and Health Monitoring - Wiley Online Library'. Ημερομηνία πρόσβασης: 25
Απρίλιος 2024.