



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
Σχεδίαση και Επεξεργασία Συστημάτων
(Systems Engineering)

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Τεχνολογίες Μη Καταστροφικών Ελέγχων –
Εφαρμογές της Μεθόδου της Ακουστικής Εκπομπής
σε Δίκτυα Αγωγών Υγρών Καυσίμων**



Μαριάννα Χαμαλίδου
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός ΤΕ

Επιβλέπων Καθηγητής
Διονύσιος Ε. Μουζάκης Dr. Ing.
Αναπληρωτής Καθηγητής, Δντης Εργαστηρίου Μηχανικής ΣΣΕ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2018



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ

Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

**ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
Σχεδίαση και Επεξεργασία Συστημάτων
(Systems Engineering)**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Τεχνολογίες Μη Καταστροφικών Ελέγχων –
Εφαρμογές της Μεθόδου της Ακουστικής Εκπομπής
σε Δίκτυα Αγωγών Υγρών Καυσίμων**



Μαριάννα Χαμαλίδου

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός ΤΕ

Επιβλέπων Καθηγητής

Διονύσιος Ε. Μουζάκης Dr. Ing.

Αναπληρωτής Καθηγητής, Δντης Εργαστηρίου Μηχανικής ΣΣΕ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2018

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή της **Μαριάννας Χαμαλίδου** εγκρίνεται
από την παρακάτω τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Διονύσιος Ε. Μουζάκης

| *Αναπληρωτής Καθηγητής*

Νικόλαος Ιω. Δάρας

| *Καθηγητής*

Νικόλαος Χρ. Τσουρβελούδης

| *Καθηγητής*

“Κάνε άλμα πιο γρήγορο από τη φθορά”
Οδυσσέας Ελύτης

*Αφιερωμένη
σε όσους συναισθάνονται την ανάγκη για γνώση
και ξέρουν να απολαμβάνουν το ταξίδι της*

Ευχαριστίες

Αν και η παρούσα σελίδα διαβάζεται πάντα πρώτη, είναι αλήθεια ότι γράφεται τελευταία, ως απόρροια του συνολικού έργου μιας διατριβής.

Πρωτίστως λοιπόν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ.Διονύσιο Ε. Μουζάκη Dr. Ing., καθηγητή της Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων και επιβλέπων της παρούσας διατριβής, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την ανάληψη της, για την ενθάρρυνση και την πίστη για την ευόδωση της, για την αποτελεσματική συνεργασία μας, για τις πολύτιμες κατευθύνσεις και το πλούσιο υλικό, για τον κόπο του και τη διαθεσιμότητά του και για τις εύστοχες παρατηρήσεις και διορθώσεις του.

Ένα ακόμα ευχαριστώ στη Διεύθυνση Καυσίμων του Ναυστάθμου Κρήτης, στην οποία και εργάζομαι, και συγκεκριμένα στον Διευθυντή ΔΚ Πλοίαρχο (Μ) Κωνσταντίνο Μουσώνη ΠΝ και τον Τμηματάρχη ΔΚ Αντιπλοίαρχο (Μ) Θωμά Τσίλη ΠΝ, για την αναγνώριση και την στήριξη όσες φορές προέκυψε ανάγκη για επιμόρφωση, συμπεριλαμβανομένης και της παρούσας διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Τμηματάρχη του Τμήματος Ποιοτικού Ελέγχου της Τεχνικής Διεύθυνσης του Ναυστάθμου Κρήτης, Αντιπλοίαρχο (Μ) Ιωάννη Λεγάκη ΠΝ και ιδιαιτέρως τον πολιτικό υπάλληλο κ.Ιωάννη Παπαδομιχελάκη, ειδικότητας Εφαρμοστή, για την πολύτιμη αρωγή του τόσο με την τεχνογνωσία και εμπειρία του σε θέματα μη καταστροφικών ελέγχων, όσο και για την διάθεση και το φιλότιμο του να γίνει μία σωστή και αξιόπιστη περιγραφή των μεθόδων που εφαρμόζονται στο Τμήμα Ποιοτικού Ελέγχου.

Εγκάρδιες ευχαριστίες στην οικογένεια και τους φίλους μου, για το γεγονός ότι πάντοτε στέκονται δίπλα μου, για την κατανόηση, την στήριξη και την πίστη τους σε ότι επιλέγω και φυσικά για την αγάπη τους.

Τέλος, ευελπιστώ να εκπληρωθεί ο αρχικός μου στόχος επιλογής θέματος στο πεδίο ελέγχου ακουστικής εκπομπής σε δεξαμενές και δίκτυα καυσίμων και το παρόν πόνημα να αποτελέσει αφορμή και εργαλείο για περαιτέρω αναβάθμιση και εκσυγχρονισμό των εγκαταστάσεων της Υπηρεσίας μου.

Με εκτίμηση,



Μαριάννα Χαμαλίδου

Περιεχόμενα

1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
1 ABSTRACT	3
2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
2.1 ΑΝΑΓΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ	5
2.2 ΕΙΔΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ	7
2.3 ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ	8
2.4 ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΩΝ	9
2.5 ΟΦΕΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΜΚΕ	10
3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ (ΜΚΕ)	12
3.1 ΜΚΕ – ΟΡΙΣΜΟΣ	12
3.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΜΚΕ	12
3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ & ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	14
3.4 ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΚΕ	16
3.4.1 Οπτική επιθεώρηση – Visual inspection (VI)	20
3.4.2 Έλεγχος με δινορρεύματα – Eddy – Current Testing (ECT)	30
3.4.3 Υπέρυθρες και θερμικές δοκιμές – Infrared and thermal testing (IR)	39
3.4.4 Ραδιογραφικός έλεγχος ή αλλιώς Βιομηχανική ακτινογραφία ή Ακτινογραφία– Radiographic testing (RT) or Industrial radiography or Radiography	50
3.4.5 Έλεγχος υπερήχων – Ultrasonic testing (UT)	62
3.4.6 Έλεγχος διείσδυσης χρωστικών ουσιών ή έλεγχος διείσδυσης – Dyepenetrant inspection or Liquid penetrant Testing (PT or LPI)	84
3.4.7 Έλεγχος ακουστικής εκπομπής – Acoustic emission testing (AE or AT)	94
4 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ	97
4.1 Εισαγωγή	97
4.2 Ακουστικά κύματα σε στερεά	109
4.2.1 Χαρακτηριστικά ακουστικών κυμάτων	110
4.2.2 Παράμετροι σήματος ΑΕ	111
4.2.3 Κίνηση κύματος	113
4.2.4 Ακουστικά μέσα	114
4.2.5 Τύποι ακουστικών κυμάτων	115
4.2.6 Διασπορά και ταχύτητα ομάδας	117
4.2.7 Απόσβεση	119
4.2.8 Διεπαφές, Ανταπόκριση, Μετάδοση και Μετατροπή Λειτουργίας	121
4.2.9 Απήχηση	123
4.3 Ανίχνευση ακουστικής εκπομπής	124
4.3.1 Αισθητήρες	124
4.3.2 Πιεζοηλεκτρικότητα	125
4.3.3 Εφέ μεγέθους	126
4.3.4 Συζευκτές	129
4.3.5 Επιδράσεις θερμοκρασίας	131
4.3.6 Ευαισθησία αισθητήρα – Επιδράσεις των καλωδίων	132
4.3.7 Ευαισθησία αισθητήρα – Επίδραση του θορύβου προενισχυτή	133
4.3.8 Βαθμονόμηση αισθητήρα	135
4.4 Ενοργάνιση (Instrumentation) / Συλλογικά όργανα μέτρησης	137

4.4.1 Ακουστικά συστήματα εκπομπής	137
4.4.2 Λειτουργία συστήματος	138
4.4.3 Καταστολή θορύβου	146
4.5 Εγκατάσταση του συστήματος δοκιμών και εκπομπών	148
4.5.1 Αξιολόγηση δοκιμών	148
4.5.2 Ακουστικές ιδιότητες υλικών	149
4.5.3 Ακουστικές συχνότητες εκπομπών	150
4.5.4 Απλές μετρήσεις εξασθένησης και ταχύτητας	150
4.5.5 Διάταξη αισθητήρα	151
4.5.6 ΑΕ – Ρύθμιση συστήματος	152
4.5.7 ΑΕ – Ρύθμιση συστήματος για την τοποθεσία	156
4.5.8 Παράδειγμα εγκατάστασης	159
4.6 Τοποθεσία πηγής	161
4.7 Ανάλυση	165
4.7.1 Δοκιμή γραφικών	168
5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΑΓΩΓΟΥΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	184
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	184
5.2 ΤΜΗΜΑ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΝΑΥΣΤΑΘΜΟΥ ΚΡΗΤΗΣ – ΤΠΕ/ΝΚ	185
5.2.1 Ο εξοπλισμός του ΤΠΕ και οι ΜΚΕ που εκτελούνται	185
5.2.2 Πιστοποιήσεις χειριστή	208
5.2.3 Πρότυπα ΜΚΕ	209
6 ΜΕΛΕΤΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΕ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	213
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	213
6.1.1 Περίληψη	213
6.1.2 Μελέτη	213
6.1.3 Τρόποι προσδιορισμού του τύπου διαρροής	215
6.1.4 Πλεονεκτήματα ΑΕ έναντι άλλων ΜΚΕ	216
6.1.5 Συχνές αστοχίες	216
6.2 ΜΕΛΕΤΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΑΕ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ	217
6.2.1 Σύντομη περιγραφή της τεχνικής ΑΕ που εφαρμόστηκε	217
6.2.2 Περιγραφή/ταξινόμηση των δεξαμενών και παρακολούθηση της επιθεώρησης τους	219
6.2.3 Πρόσθετες πληροφορίες	221
6.2.4 Η υποκείμενη βάση δεδομένων	223
6.2.5 Παραδείγματα και παρατηρήσεις	223
6.2.6 Συμπεράσματα	225
6.3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΥΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΔΑΠΕΔΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ: ΜΙΑ ΝΕΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΗΝ ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ	225
6.3.1 Εισαγωγή	226
6.3.2 Μεθοδολογία	227
6.3.3 Ανάλυση και συναφή εργασία	230
6.3.4 Συμπεράσματα	235
6.4 ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΕ ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΕ ΔΑΠΕΔΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΜΕ ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ (ΤΝΔ)	235
6.4.1 Εισαγωγή	236
6.4.2 Μεθοδολογία	237
6.4.3 Ανάλυση δεδομένων	241
6.4.4 Συμπεράσματα	243
6.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΓΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΔΙΑΡΡΟΩΝ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΕΣ ΣΕ ΑΜΜΩΔΕΣ ΕΔΑΦΟΣ	244
6.5.1 Περίληψη	244
6.5.2 Εισαγωγή	245

6.5.3 Μέθοδος ακουστικής εκπομπής για διαρροές	245
6.5.4 Προηγούμενες Μελέτες ΑΕ για ανίχνευση διαρροών σε μεταλλικές σωληνώσεις τοποθετημένες σε αμμώδες έδαφος	246
6.5.5 Στόχοι και Μεθοδολογία	247
6.5.6 Πρωτόκολλα δοκιμής και ορολογία	248
6.5.7 ΑΕ Δοκιμές διαρροής	249
6.5.8 Μέτρηση ταχύτητας διαρροής	251
6.5.9 Μέτρηση των συνθηκών ύδατος	251
6.5.10 Εξοπλισμός ΑΕ	251
6.5.11 Αποτελέσματα δοκιμών	252
6.5.12 Μεταγενέστερη επεξεργασία δεδομένων μικρής διαρροής	256
6.5.13 Συμπεράσματα	257
6.6 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΜΕ ΑΕ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΥΓΡΩΝ ΣΕ ΑΓΩΓΟ ΕΔΑΦΟΥΣ	258
6.6.1 Περίληψη	258
6.6.2 Εισαγωγή	258
6.6.3 Απαιτήσεις, πλεονεκτήματα και περιορισμοί	260
6.6.4 Περιπτώσεις ελέγχου	261
6.6.5 Συζήτηση και συμπεράσματα	272
6.7 ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΡΕΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΠΗΓΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΕ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	273
6.7.1 Εισαγωγή	274
6.7.2 Θεωρία	275
6.7.3 Υλικά και μέθοδοι	277
6.7.4 Δημιουργία διάβρωσης	278
6.7.5 Συστήματα ΑΕ	281
6.7.6 Αποτελέσματα και συζήτηση	282
6.7.7 Συμπεράσματα	288
6.8 Έλεγχος διάβρωσης σε πετρελαιοφόρα πλοία με χρήση ΑΕ	289
6.8.1 Εισαγωγή	289
6.8.2 Στόχοι του έργου	292
6.8.3 Βασική έρευνα	294
6.8.4 Δοκιμές σε δεξαμενόπλοια, διαπίστευση εξοπλισμού	298
6.8.5 Αποτελέσματα	300
6.8.6 Συμπεράσματα – Συζήτηση	302
6.9 Έλεγχος πεδίου δεξαμενών αποθήκευσης επίπεδου πυθμένα με ΑΕ	302
6.9.1 Εισαγωγή	303
6.9.2 Τεχνική ελέγχου	304
6.9.3 Στατιστικές των πραγματοποιούμενων δοκιμών	308
6.9.4 Συμπεράσματα	311
6.10 Δοκιμή दाπέδου δεξαμενής με ΑΕ: Μελέτη στην βάση δεδομένων των δοκιμών και των επακόλουθων επιθεωρήσεων	312
6.10.1 Εισαγωγή	313
6.10.2 Εργαλεία ανάλυσης	315
6.10.3 Προηγούμενες μελέτες και ταξινόμηση δεξαμενών	320
6.10.4 Στατιστικά στοιχεία της βάσης δεδομένων Mistras Group Hellas	321
6.10.5 Ποιοτική Επικύρωση των αποτελεσμάτων του TANKPACTM	328
6.10.6 Συμπεράσματα	332
7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	333
8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	335
9 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	337
9.1 ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΗΜΗΣΕΩΝ	337
9.2 ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ	338

Λίστα Διαγραμμάτων

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΣΕ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ	6
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2. ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ KAISER ΚΑΙ FELICITY RATIO	107
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3. ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΑΕ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ	218
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΒΑΘΜΩΝ ΑΕ ΚΑΙ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΩΝ ΒΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ FU ΤΗΣ PAL	220
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΔΕΙΓΜΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ 4	220
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ	222
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7. ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΕ, ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΓΙΑ ΤΑ ΕΤΗ 1995,1996 ΚΑΙ 1997	223
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΤΗΣ ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΗΣ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ 6	224
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9. ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΕ	227
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10. ΡΥΘΜΙΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	229
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΡΙΘΜΟΥ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΤΩΝ ΠΡΩΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ 1	231
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ	232
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13. ΜΕΣΟ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΤΝΔ	242
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	254
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	255
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	255
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 17. ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΕΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΕΡΑFLW38	256
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 18. ΜΕΣΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΗΜΑΤΟΣ (ASL) ΣΕ ΟΛΟΚΛΗΡΟ ΤΟΝ ΑΓΩΓΟ	262
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 19. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ASL/ΚΑΝΑΛΙΩΝ. ΠΡΩΤΗ ΕΝΔΕΙΞΗ ΤΗΣ ΥΠΟΤΙΘΕΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ 7)	267
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 20. ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΘΟΡΥΒΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (ΚΟΚΚΙΝΟ) ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ (ΠΡΑΣΙΝΟ)	298
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 21. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΕ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ	307
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 22. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΔΟΚΙΜΑΣΜΕΝΩΝ AST (ΣΥΝΟΛΟ 218 ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ)	308
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 23. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΑΣΜΕΝΩΝ AST (ΣΥΝΟΛΟ 218 ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ)	309

Λίστα Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1. ΌΡΑΣΗ ΚΑΙ ΕΓΚΕΦΑΛΟΣ	23
ΕΙΚΟΝΑ 2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΚΑΛΗ ΟΡΑΣΗ	24
ΕΙΚΟΝΑ 3. ΈΝΑ ΤΥΠΙΚΟ ΕΝΔΟΣΚΟΠΙΟ 0° ΑΜΕΣΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΓΩΝΙΑΣ	26
ΕΙΚΟΝΑ 4. ΈΝΑ ΤΥΠΙΚΟ ΕΝΔΟΣΚΟΠΙΟ	27
ΕΙΚΟΝΑ 5. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΟΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	28
ΕΙΚΟΝΑ 6. ΈΝΑ ΠΡΩΤΕΥΟΝ ΠΗΝΙΟ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΕΙ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΑ ΣΕ ΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΟ	31
ΕΙΚΟΝΑ 7. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΓΩΓΙΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	31
ΕΙΚΟΝΑ 8. ΓΡΑΦΗΜΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΒΑΘΟΥΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΣΕ ΓΡΑΜΜΕΣ ΑΠΟ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΙ ΧΑΛΚΟ	33
ΕΙΚΟΝΑ 9. ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΠΗΝΙΟ	35
ΕΙΚΟΝΑ 10. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΜΗΣ	35
ΕΙΚΟΝΑ 11. ΕΝΕΡΓΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ – ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΝΤΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ	42
ΕΙΚΟΝΑ 12. ΕΝΕΡΓΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ – ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ	42
ΕΙΚΟΝΑ 13. ΕΝΕΡΓΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ	43
ΕΙΚΟΝΑ 14. ΒΑΣΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΝΟΣ ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟΥ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	45
ΕΙΚΟΝΑ 15. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	51
ΕΙΚΟΝΑ 16. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΑΣ	51
ΕΙΚΟΝΑ 17. Η ΘΕΣΗ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ ΚΑΙ ΓΑΜΜΑ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ	53
ΕΙΚΟΝΑ 18. ΤΥΠΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ	53
ΕΙΚΟΝΑ 19. ΜΙΑ ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ ΕΝΟΣ ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΦΙΛΜ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ – Η ΙΔΙΑ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΔΥΟ ΠΛΕΥΡΕΣ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ	59
ΕΙΚΟΝΑ 20. ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΟΚΙΜΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ	64

ΕΙΚΟΝΑ 21. ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΔΙΔΕΙ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ (ΠΟΜΠΟΣ)	65
ΕΙΚΟΝΑ 22. ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ	66
ΕΙΚΟΝΑ 23. ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΘΕΙ ΤΟ ΜΙΚΡΟ ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΕΝΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ	67
ΕΙΚΟΝΑ 24. ΚΥΜΑΤΑ ΠΛΑΚΑΣ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΤΗΝ ΚΑΜΨΗ ΤΗΣ ΛΕΠΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ	67
ΕΙΚΟΝΑ 25. ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΑ	68
ΕΙΚΟΝΑ 26. ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ	68
ΕΙΚΟΝΑ 27. ΤΥΠΙΚΗ ΟΘΟΝΗ ΣΑΡΩΣΗΣ A – SCAN	69
ΕΙΚΟΝΑ 28. ΜΙΑ ΤΥΠΙΚΗ ΟΘΟΝΗ B – SCAN ΜΕ ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΒΑΘΗ	70
ΕΙΚΟΝΑ 29. ΈΝΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ C – SCAN ΕΙΝΑΙ Η ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΣΑΡΩΣΗΣ	71
ΕΙΚΟΝΑ 30. ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΜΕΣΩ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΜΟΝΟΥ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥ	73
ΕΙΚΟΝΑ 31. ΤΟΜΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΔΙΔΥΜΟΥ Η ΔΙΠΛΟΥ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥ	74
ΕΙΚΟΝΑ 32. ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΡΩΓΜΗΣ ΑΠΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ 0° ΚΑΙ 45°	74
ΕΙΚΟΝΑ 33. ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	76
ΕΙΚΟΝΑ 34. ΒΑΣΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΕΣΩ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΑΙ Η ΟΘΟΝΗ	78
ΕΙΚΟΝΑ 35. ΈΝΑ ΤΥΠΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ	78
ΕΙΚΟΝΑ 36. ΤΡΙΧΟΕΙΔΕΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	87
ΕΙΚΟΝΑ 37. ΦΘΟΡΙΖΟΝΤΑ ΥΓΡΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΡΩΓΜΩΝ	91
ΕΙΚΟΝΑ 38. ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΟ ΤΕΣΤ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑΚΩΝ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ	93
ΕΙΚΟΝΑ 39. ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ	98
ΕΙΚΟΝΑ 40. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΕΚΡΗΞΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΠΟ ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	104
ΕΙΚΟΝΑ 41. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΕ	112
ΕΙΚΟΝΑ 42. ΑΜΕΡΙΚΑΝΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ MILITARY STANDARD 2035(A)	210
ΕΙΚΟΝΑ 43. ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ EN ISO5817	211
ΕΙΚΟΝΑ 44. ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΑΕ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟ ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΗ ΚΑΙ Η ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	227
ΕΙΚΟΝΑ 45. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	295
ΕΙΚΟΝΑ 46. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΟΡΥΒΟΥ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ ΣΤΟ M/T ICARUS II	296
ΕΙΚΟΝΑ 47. ΣΚΙΤΣΟ ΤΟΥ ΜΕΣΑΙΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΤΟΥ ΔΕΞΑΜΕΝΟΠΛΟΙΟΥ ICARUS II (ΔΕΞΙΑ)	297
ΕΙΚΟΝΑ 48. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΒΟΛΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΕΝΗΣ ΓΙΑ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ	316
ΕΙΚΟΝΑ 49. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΘΕΣΗ ΤΩΝ ΜΗ ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΕΝΩΝ ΣΥΜΒΑΝΤΩΝ ΑΕ	317
ΕΙΚΟΝΑ 50. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΠΡΟΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑΤΟΣ	317
ΕΙΚΟΝΑ 51. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΠΟΜΟΝΑΔΩΝ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΜΟΤΙΒΩΝ ΧΩΡΙΣ ΕΠΙΒΛΕΨΗ	318
ΕΙΚΟΝΑ 52. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΠΟΜΟΝΑΔΩΝ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΓΙΑ ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΙ ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	318
ΕΙΚΟΝΑ 53. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΣΕ ΔΑΠΕΔΟ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ	319

Λίστα Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ & ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΚΕ	7
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ	16
ΠΙΝΑΚΑΣ 3. ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΙΑ ΔΙΑΜΗΚΗ, ΚΥΜΑΤΑ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΑΙ RALEIGH ΚΥΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΛΙΚΑ	116
ΠΙΝΑΚΑΣ 5. ΟΡΙΣΜΕΝΟΙ ΣΥΝΗΘΙΣΜΕΝΟΙ ΣΥΖΕΥΚΤΕΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΚΑΙ ΤΑ ΚΑΤΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΑ ΤΟΥΣ ΠΕΔΙΑ	131
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ	218
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΒΑΣΕΙ PAL	219
ΠΙΝΑΚΑΣ 8. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ	234
ΠΙΝΑΚΑΣ 9. ΒΑΘΜΙΔΕΣ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΑΕ	235
ΠΙΝΑΚΑΣ 10. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	240
ΠΙΝΑΚΑΣ 11. ΠΟΣΟΣΤΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΝΔ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ	243
ΠΙΝΑΚΑΣ 12. ΣΥΝΟΨΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	253
ΠΙΝΑΚΑΣ 13. ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΚΟΙΝΟΠΡΑΞΙΑΣ	293
ΠΙΝΑΚΑΣ 14. ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΕ ΣΕ AST	305

ΠΙΝΑΚΑΣ 15. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ TANKPAC™	321
ΠΙΝΑΚΑΣ 16. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ TANKPAC™ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΔΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ	328

Λίστα Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1. ΜΙΑ ΤΥΠΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ	92
ΣΧΗΜΑ 2. ΚΥΜΑΤΑ (Α) ΑΠΛΟ ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΕΣ, (Β) ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΔΥΟ ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΩΝ, (C) ΠΑΡΟΔΙΚΟ, (D) ΦΑΣΜΑ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΟΥ	114
ΣΧΗΜΑ 3. ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΜΑΖΙΚΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ, (Α) ΚΥΜΑ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ, (Β) ΚΥΜΑ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ	117
ΣΧΗΜΑ 4. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΗ ΚΑΙ ΚΥΜΑ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (Α) ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ, (Β) ΣΕ ΚΑΠΟΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ	118
ΣΧΗΜΑ 5. ΟΙ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΓΙΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ	119
ΣΧΗΜΑ 6. ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΤΡΟΠΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ ΠΛΑΚΑΣ	120
ΣΧΗΜΑ 7. ΑΝΤΙΚΑΤΟΠΤΡΙΖΟΝΤΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΙΔΟΜΕΝΑ ΚΥΜΑΤΑ ΣΕ ΜΙΑ ΔΙΕΠΑΦΗ	122
ΣΧΗΜΑ 8. ΑΝΤΙΚΑΤΟΠΤΡΙΖΟΝΤΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΙΔΟΝΤΑ ΚΥΜΑΤΑ ΜΕΣΑ ΣΕ ΕΝΑ ΠΙΑΤΟ ΒΥΘΙΣΜΕΝΟ ΣΤΟ ΝΕΡΟ	123
ΣΧΗΜΑ 9. ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΑΕ	127
ΣΧΗΜΑ 10. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ, ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΚΡΙΣΗ	129
ΣΧΗΜΑ 11. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ – ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΗ	134
ΣΧΗΜΑ 12. ΣΗΜΑ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ – ΠΙΟ ΟΜΟΡΦΟ ΣΧΗΜΑ ?	142
ΣΧΗΜΑ 13. ΦΑΣΜΑΤΑ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΕ	145
ΣΧΗΜΑ 14. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΖΩΝΗΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ ΩΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ.	154
ΣΧΗΜΑ 15. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ 24 ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΣΤΟ ΠΤΕΡΥΓΙΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ BSDS	160
ΣΧΗΜΑ 16. ΣΤΑΘΕΡΗ ΣΕ ΑΣΤΑΘΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΛΑΤΤΩΣΗΣ ΣΕ ΦΙΑΛΗ HALON	170
ΣΧΗΜΑ 17. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ BSDS	171
ΣΧΗΜΑ 18. ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΕΥΡΟΥΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΝΤΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΙΔΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ BSDS (ΑΡΙΣΤΕΡΑ (Α) ΚΑΙ ΔΕΞΙΑ (Β))	173
ΣΧΗΜΑ 19. ΣΥΝΟΛΟ ΑΠΟΛΥΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΩΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ	173
ΣΧΗΜΑ 20. ΧΤΥΠΗΜΑΤΑ ΑΝΑ ΚΑΝΑΛΙ (Α) ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ (ΕΠΑΝΩ) ΚΑΙ (Β) ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ (ΚΑΤΩ)	175
ΣΧΗΜΑ 21. ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ/ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΗΜΕΙΩΝ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ	177
ΣΧΗΜΑ 22. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΧΤΥΠΗΜΑΤΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΤΗΣ ΑΠΟΛΥΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΛΟΓΩ ΠΗΞΗΣ ΠΑΓΟΥ	178
ΣΧΗΜΑ 23. ΧΤΥΠΗΜΑΤΑ ΕΝΑΝΤΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΠΕΝΤΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΚΟΝΤΑ ΣΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΣΤΟ ΠΤΕΡΥΓΙΟ	179
ΣΧΗΜΑ 24. ΕΜΦΑΝΕΙΣ ΤΟΠΟΘΕΣΙΕΣ ΡΩΓΜΩΝ ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΚΙΝΗΣΗΣ	179
ΣΧΗΜΑ 25. ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΕΝΑΝΤΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΕΞΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΣΤΗΝ ΒΑΣΗ ΤΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ - ΙΔΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΕ ΤΟ ΣΧΗΜΑ 23	180
ΣΧΗΜΑ 26. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΟΥ ΣΥΝΟΛΟΥ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΗΜΑΤΟΣ 17 ΜΕ ΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΑΡΧΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΔΩΝ	181
ΣΧΗΜΑ 27. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΤΗΣ ΠΛΕΥΡΑΣ ΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ	181
ΣΧΗΜΑ 28. ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΚΥΚΛΟΥ	182
ΣΧΗΜΑ 29. ΘΕΣΗ ΠΗΓΗΣ ΜΕ ΔΥΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ	232
ΣΧΗΜΑ 30. ΘΕΣΗ ΠΗΓΗΣ ΜΕ ΔΥΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ (ΣΤΟΝ ΤΟΙΧΟ ΜΙΑΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ)	233
ΣΧΗΜΑ 31. ΘΕΣΗ ΠΗΓΗΣ ΜΕ ΔΥΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΣΤΟΝ ΤΟΙΧΟ ΜΙΑΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ (ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΠΟΥ ΙΣΧΥΕΙ ΓΙΑ Ν ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ)	233
ΣΧΗΜΑ 32. ΔΙΑΤΟΜΗ ΔΥΟ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΥΠΕΡΒΟΛΩΝ ΚΑΝΑΛΙΩΝ 1 – 2 ΚΑΙ 1 – 8 ΠΡΟΚΕΙΜΕΝΟΥ ΝΑ ΕΝΤΟΠΙΣΤΕΙ Η ΘΕΣΗ	233
ΣΧΗΜΑ 33. ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΕΝΑ ΚΑΤΩ ΜΕΡΟΣ ΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ	233
ΣΧΗΜΑ 34. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΤΜΗΜΑΤΑ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΑΕ ΚΑΙ ΟΙ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΤΟΥΣ	236
ΣΧΗΜΑ 35. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΚΡΟΦΥΣΙΩΝ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΗ ΑΕ	238
ΣΧΗΜΑ 36. ΔΕΙΓΜΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	238
ΣΧΗΜΑ 37. ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΓΩΓΟΥ	250
ΣΧΗΜΑ 38. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΡΟΗΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ	259
ΣΧΗΜΑ 39. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΕΣ (ΠΑΝΩ) ΚΑΙ ΠΛΑΤΗ/ΧΡΟΝΟ ΑΦΙΕΞΗΣ ΕΝΟΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΕ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΣΕ 4 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΚΑΝΑΛΙΑ	263
ΣΧΗΜΑ 40. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ASL ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΦΟΡΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΕ	264
ΣΧΗΜΑ 41. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ASL ΓΙΑ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΥΠΟΠΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΚΑΝΑΛΙΩΝ 2 ΚΑΙ 3	265
ΣΧΗΜΑ 42. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ASL ΠΟΥ ΥΠΟΔΕΙΚΝΟΥΝ ΤΗΝ ΥΠΟΠΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ	266
ΣΧΗΜΑ 43. ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΘΕΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ	269
ΣΧΗΜΑ 44. ΣΧΕΔΙΟ ΑΓΩΓΟΥ ΜΕ ΘΕΣΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	270
ΣΧΗΜΑ 45. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ASL ΣΤΑ 8.3 BAR	270

ΣΧΗΜΑ 46. ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΟΠΩΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΠΟΛΥΚΑΝΑΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΑ 8,3 BAR	271
ΣΧΗΜΑ 47. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	276
ΣΧΗΜΑ 48. ΤΡΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΠΗΓΗΣ	276
ΣΧΗΜΑ 49. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (Α) ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ, ΣΚΟΥΡΙΑΣ & ΡΩΓΜΩΝ (Β) ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΛΟΓΩ ΤΑΣΗΣ	278
ΣΧΗΜΑ 50. ΟΙ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΑΕ ΚΑΙ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΠΗΓΗΣ	281
ΣΧΗΜΑ 51. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ ΓΙΑ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ, ΣΚΟΥΡΙΑΣ, ΡΩΓΜΩΝ ΚΑΙ SCC ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ	283
ΣΧΗΜΑ 52. ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΠΛΑΤΟΥΣ	284
ΣΧΗΜΑ 53. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ – ΧΤΥΠΗΜΑΤΩΝ	285
ΣΧΗΜΑ 54. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΧΤΥΠΗΜΑΤΟΣ – ΧΡΟΝΟΥ	286
ΣΧΗΜΑ 55. ΠΟΣΟΣΤΑ ΑΡΙΘΜΗΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	287
ΣΧΗΜΑ 56. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΠΗΓΗΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΜΙΑ ΠΗΓΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	301
ΣΧΗΜΑ 57. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΑΕ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΟΙ ΣΤΟ ΚΕΛΥΦΟΣ ΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (ΔΕΞΙΑ)	306
ΣΧΗΜΑ 58. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΟΣ ΘΕΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΑΙ ΜΕ ΔΥΟ ΣΕΙΡΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	311
ΣΧΗΜΑ 59. ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΔΟΚΙΜΑΣΜΕΝΕΣ ΜΕ ΤΟ TANKPAC	322
ΣΧΗΜΑ 60. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ AST ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΥΝ ΒΑΡΕΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ	322
ΣΧΗΜΑ 61. PLD ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ AST ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΥΝ ΒΑΡΕΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ	323
ΣΧΗΜΑ 62. ΣΥΝΘΕΤΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ AST ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΥΝ ΒΑΡΕΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ	323
ΣΧΗΜΑ 63. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ AST ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΥΝ ΕΛΑΦΡΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ	324
ΣΧΗΜΑ 64. PLD ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ AST ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΥΝ ΕΛΑΦΡΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ	325
ΣΧΗΜΑ 65. ΣΥΝΘΕΤΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ AST ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΥΝ ΕΛΑΦΡΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ	325
ΣΧΗΜΑ 66. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ AST ΠΟΥ ΕΛΕΓΧΘΗΚΑΝ	326
ΣΧΗΜΑ 67. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ PLD ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ AST ΠΟΥ ΕΛΕΓΧΘΗΚΑΝ	326
ΣΧΗΜΑ 68. ΣΥΝΘΕΤΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ AST ΠΟΥ ΕΛΕΓΧΘΗΚΑΝ	327
ΣΧΗΜΑ 69. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ MFL ΕΝΑΝΤΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ TANKPAC™	329
ΣΧΗΜΑ 70. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ MFL ΕΝΑΝΤΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ TANKPAC™	330
ΣΧΗΜΑ 71. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ TANKPAC™	331

Λίστα Φωτογραφιών

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 1. ΔΙΑΦΟΡΟΙ ΤΥΠΟΙ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΔΟΣΙΜΕΤΡΩΝ	56
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 2. ΨΗΦΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΑ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ	60
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 3. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ A – SCAN	70
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 4. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ B – SCAN	71
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 5. ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ C – SCAN	72
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 6. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΗΣ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ	79
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 7. ΌΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	186
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 8. ΣΤΥΛΟΔΟΣΙΜΕΤΡΟ ΜΕ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΠΟΦΟΡΤΙΣΗΣ	186
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 9. ΦΟΡΗΤΗ ΠΗΓΗ ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΑΣ	187
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 10. ΧΕΙΡΙΣΤΗΡΙΟ ΦΟΡΗΤΗΣ ΠΗΓΗΣ ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΑΣ	187
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 11. ΦΟΡΗΤΗ ΠΗΓΗ ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΑΣ	188
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 12. ΧΕΙΡΙΣΤΗΡΙΟ ΦΟΡΗΤΗΣ ΠΗΓΗΣ ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΑΣ	188
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 13. ΤΕΜΑΧΙΟ ΠΡΟΣ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ	189
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 14. ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΝΑΓΝΩΣΗΣ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΦΙΛΜ	189
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 15. ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΦΙΛΜ	190
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 16. ΑΝΑΓΝΩΣΗ ΡΑΔΙΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΦΙΛΜ ΜΕ ΕΜΦΑΝΗ ΤΗΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑ	190
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 17. ΌΡΓΑΝΑ ΟΠΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	190
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 18. ΨΗΦΙΑΚΟ ΟΡΓΑΝΟ ΥΠΕΡΗΧΩΝ, ΚΕΦΑΛΗ ΔΕΣΜΗΣ, ΤΕΜΑΧΙΟ ΥΠΟ ΔΟΚΙΜΗ.	191
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 19. ΚΕΦΑΛΕΣ (PROBES) ΥΠΕΡΗΧΩΝ	191
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 20. PHASED-ARRAY. ΨΗΦΙΑΚΟ ΟΡΓΑΝΟ ΥΠΕΡΗΧΩΝ, ΚΕΦΑΛΗ ΔΕΣΜΗΣ, ΤΕΜΑΧΙΟ ΥΠΟ ΔΟΚΙΜΗ ΜΕ ΑΤΕΛΕΙΑ	192
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 21. PHASED – ARRAY. ΨΗΦΙΑΚΟ ΟΡΓΑΝΟ ΥΠΕΡΗΧΩΝ – Ένδειξη ΑΣΤΟΧΙΑΣ	192

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 22. ΦΩΤΟΜΕΤΡΟ - ΜΕΤΡΑΕΙ ΤΟΝ ΦΩΤΙΣΜΟ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΞΕΤΑΣΗΣ	193
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 23. ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	193
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 24. ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΑΝΩ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΔΟΚΙΜΙΟ 4KGR	194
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 25. ΦΘΟΡΙΖΟΝΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΓΡΑ ΜΕ ΨΗΓΜΑΤΑ ΣΙΔΗΡΟΥ	194
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 26. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΦΘΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΟ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ	195
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 27. ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕ ΦΘΟΡΙΖΟΝΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΓΡΑ	195
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 28. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΚΟΝΗΣ ΜΕ ΨΗΓΜΑΤΑ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΟΚΚΙΝΟΥ ΧΡΩΜΑΤΟΣ	196
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 29. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΚΟΝΗ	196
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 30. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΑ ΥΓΡΑ	197
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 31. ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ	197
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 32. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΕΜΦΑΝΙΣΤΗ (DEVELOPER)	198
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 33. ΜΚΕ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΑ ΥΓΡΑ	199
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 34. ΜΚΕ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΑ ΥΓΡΑ	199
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 35. ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ	200
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 36. ΑΝΑΠΤΥΓΜΑ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ	201
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 37. ΑΝΑΠΤΥΓΜΑ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ	201
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 38. ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ	202
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 39. ΔΙΑΦΟΡΑ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΑ ΥΓΡΑ	202
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 40. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΟ	203
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 41. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ	204
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 42. ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕ ΤΕΧΝΗΤΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ. ΤΡΙΣ ΖΩΝΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ Α,Β ΚΑΙ Γ.	205
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 43. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΟΥ ΥΓΡΟΥ	206
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 44. ΤΜΗΜΑΤΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΠΡΟΣ ΕΛΕΓΧΟ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΠΛΟΙΟΥ	207
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 45. Η ΔΙΑΡΡΟΗ ΠΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΤΗΚΕ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΕ	266
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 46. ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΩΛΗΝΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	268
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 47. ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ Τ ΜΕ ΜΕΓΕΘΥΜΕΝΗ ΕΙΚΟΝΑ ΤΗΣ ΜΙΚΡΗΣ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΠΟΥ ΒΡΕΘΗΚΕ	268
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 48. ΕΙΚΟΝΑ ΤΟΥ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΥ ΣΩΛΗΝΑ ΠΟΥ ΥΠΕΡΧΕΙΛΙΖΕΙ ΤΟ ΝΕΡΟ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ	272
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 49. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΤΟ ΔΕΙΓΜΑ SS304 (Α) ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ, (Β) ΣΚΟΥΡΙΑΣ, (Γ) ΡΩΓΜΩΝ ΚΑΙ (Δ) SCC	280
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 50. ΜΙΚΡΟΓΡΑΦΙΚΟ: (Α) ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟ, (Β) ΣΚΟΥΡΙΑΣ, (Γ) ΡΩΓΜΩΝ ΚΑΙ (Δ) SCC	280
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 51. ΒΥΘΙΣΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΦΟΡΩΝ «ΕΡΙΚΑ» (ΠΡΩΤΗ) ΚΑΙ «PRESTIGE» (ΔΕΥΤΕΡΗ)	291
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ 52. ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΕΡΙΚΑ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) & PRESTIGE (ΔΕΞΙΑ)	292

1 | Περίληψη

Στην εποχή μας έχει διαπιστωθεί ότι οι Τεχνολογίες Μη Καταστροφικών Ελέγχων (ΜΚΕ) που εφαρμόζονται για την ποιοτική αξιολόγηση διάφορων υλικών και κατασκευών, αποτελούν αδιαμφισβήτητο κομμάτι της διαδικασίας παραγωγής καθώς ελέγχεται το υπό εξέταση αντικείμενο χωρίς να επιβαρύνεται στο ελάχιστο η κατάσταση του. Παράλληλα εξοικονομείται χρόνος και χρήμα εξαιτίας της έγκαιρης επίλυσης ενδεχόμενων προβλημάτων καθώς και λόγω των αυτοματοποιημένων διαδικασιών που εφαρμόζονται.

Ο ποιοτικός έλεγχος με την χρήση των τεχνολογιών ΜΚΕ έχει μεγάλο πεδίο εφαρμογής και συμπεριλαμβάνει πληθώρα τεχνικών όπως οι Υπέρηχοι, ο Οπτικός Έλεγχος, η Ραδιογραφία, ο Μακροσκοπικός Έλεγχος κ.α. ενώ επεκτείνεται και σε πιο πολύπλοκες και εξειδικευμένες σύγχρονες τεχνικές όπως Phased Array (PA), Time of Flight Diffraction (TOFD) και η Ακουστική Εκπομπή (ΑΕ).

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής αποτελούν οι εφαρμογές ΜΚΕ σε δίκτυα και αγωγούς καυσίμων. Το παρόν πεδίο εφαρμογής έχει αυξημένο δείκτη επικινδυνότητας λόγω της εύφλεκτης φύσης του υλικού που εμπεριέχεται, καθώς και εξαιτίας της σημαντικής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης στην περίπτωση διαρροής. Η επιλογή τεχνολογιών ΜΚΕ στην συγκεκριμένη περίπτωση κρίνεται ιδανική λόγω του ότι το υπό εξέταση σύστημα χρήζει συνεχούς και ασφαλούς ποιοτικού ελέγχου.

Θα γίνει εκτεταμένη ανάλυση της μεθόδου Ακουστικής Εκπομπής ΑΕ σε θεωρητικό επίπεδο καθώς και μελέτη για εφαρμογή σε δίκτυο μεταφοράς και αποθήκευσης υγρών καυσίμων. Θα γίνει πλήρη ανάλυση και επεξεργασία των παραμέτρων – δεικτών και αισθητήρων – που θα καθορίσουν τον ποιοτικό έλεγχο, καθορισμός απαιτήσεων σχεδιασμού και υλοποίησης, χρήση απαραίτητου λογισμικού, προσδιορισμός και υπολογισμός βασικών χαρακτηριστικών μέτρησης κλπ.

Τέλος θα παρατεθούν τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις μετά το πέρας της μελέτης εφαρμογής.

Λέξεις – κλειδιά: Τεχνολογίες Μη Καταστροφικών Ελέγχων (ΜΚΕ), δίκτυα – δεξαμενές – αγωγοί καυσίμων, μέθοδος Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕ), ποιοτικός έλεγχος, εύφλεκτα υγρά καύσιμα.

1 | Abstract

Nowadays, it has been found that Non-Destructive Testing Technologies (NTD) applied for the qualitative assessment of various materials and structures are an indisputable part of the production process as it controls the object under consideration without minimizing its condition. Besides, time and money are saved due to the timely resolution of potential problems as well as the automated procedures applied.

Quality control with the use of NTD technologies has a wide field of application and includes a variety of techniques, starting with techniques such as Ultrasound, Optical Control, Radiography, Macroscopic Testing and more and extends to more complex and specialized modern techniques such as Phased Array (PA), Time of Flight Diffraction (TOFD) and Acoustic Emission (AE).

The subject of this dissertation is the applications of NTD technologies to networks and pipelines. This field of application has an increased risk factor due to the flammable nature of the material contained, as well as due to the significant environmental burden in the event of leakage. The choice of the NTD technologies in this case is ideal because the system in question requires continuous and safe quality control.

An extensive analysis of the Acoustic Emissions Method AE will be carried out at a theoretical level as well as a study for application in a liquid fuel transportation and storage network. Complete analysis and processing of parameters – indicators and sensors – will determine the quality control, design and implementation requirements, use of necessary software, determination and calculation of basic measurement characteristics etc.

Finally, after the end of the implementation study, conclusions and observations will be given.

Keywords: Non – Destructive Testing (NDT) technologies, Tank – Liquid Fuel Pipelines, Acoustic Emissions (AE), Quality Control, Flammable Liquid Fuels, Fuel Transfer Conduits, Fuel Storage Tanks.

2 | Εισαγωγή

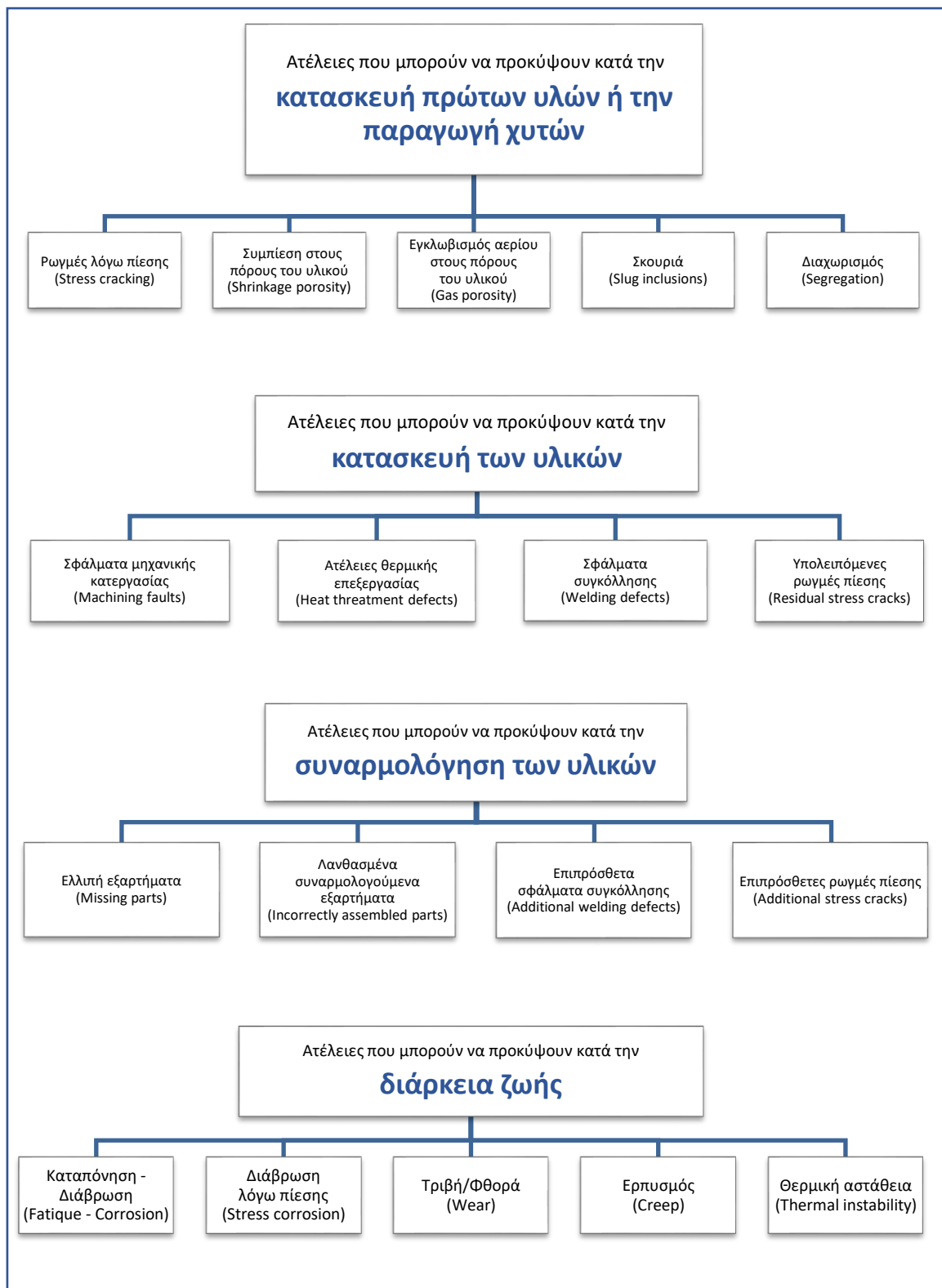
2.1 | Ανάγκη Ελέγχου

Ο έλεγχος των ιδιοτήτων ενός υλικού εκτιμάται από τους μηχανικούς μέσα από τυποποιημένες διαδικασίες πάνω σε προετοιμασμένα δοκίμια. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών μας δίνουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τις εφελκυστικές, συμπιεστικές, διατμητικές και κρουστικές ιδιότητες του υλικού. Η διαδικασία αυτών των δοκιμών προϋποθέτει την ουσιαστική παρέμβαση στην κατάσταση του υλικού, για αυτόν τον λόγο χαρακτηρίζονται και ως καταστρεπτικής φύσεως έλεγχοι. Επιπροσθέτως, οι ιδιότητες των υλικών, όπως προσδιορίζονται σε μια τυπική καταστρεπτική δοκιμή, δεν εξασφαλίζουν σαφή οδηγό για τα χαρακτηριστικά απόδοσης ενός πολύπλοκου – σχήματος συστατικού, το οποίο αποτελεί μέρος μιας μεγαλύτερης μηχανικής συναρμολόγησης.

Ατέλειες διάφορων τύπων και μεγεθών μπορούν να προκύψουν σε υλικό ή εξάρτημα κατά τη διάρκεια κατασκευής του. Η ακριβής φύση και το μέγεθος τυχόν ελαττωμάτων θα επηρεάσουν σε κάποιο βαθμό την απόδοση του εξαρτήματος. Άλλα ελαττώματα, όπως ρωγμές κόπωσης ή ρωγμές διάβρωσης, μπορεί να δημιουργηθούν μέσα σε ένα υλικό κατά τη διάρκεια ζωής του. Επομένως, είναι απαραίτητο να υπάρχουν αξιόπιστα μέσα για την ανίχνευση των ατελειών ενός εξαρτήματος στο στάδιο της κατασκευής του και επίσης για την ανίχνευση και την παρακολούθηση του ρυθμού αύξησης των σφαλμάτων κατά τη διάρκεια ζωής του εξαρτήματος ή του συνόλου συναρμολόγησης εξαρτημάτων. Η προέλευση των ατελειών σε υλικά και εξαρτήματα φαίνεται στο παρακάτω Διάγραμμα 1.

Συχνά, το πρώτο στάδιο της εξέτασης ενός εξαρτήματος, είναι η οπτική επιθεώρηση. Η εξέταση με γυμνό μάτι δεν θα αποκαλύψει πολλά παρά μόνο τα σχετικά μεγάλα ελαττώματα που υπάρχουν στην επιφάνεια. Για να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα της οπτικής επιθεώρησης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μικροσκόπιο. Ο οπτικός έλεγχος δεν περιορίζεται μόνο σε εξωτερικές επιφάνειες. Οι οπτικοί ανιχνευτές ελέγχου, τόσο οι άκαμπτοι όσο και οι εύκαμπτοι, έχουν αναπτυχθεί για την επιθεώρηση εσωτερικών επιφανειών ώστε να έχουν την δυνατότητα να εισαχθούν σε κοιλότητες, σωλήνες και αγωγούς.

Χρησιμοποιώντας καθιερωμένες φυσικές αρχές, έχουν αναπτυχθεί ορισμένα συστήματα μη οπτικής επιθεώρησης τα οποία θα παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα ενός υλικού ή συστατικού και ταυτόχρονα δεν αλλοιώνουν ή δεν βλάπτουν τα εξαρτήματα ή τα συστήματα που ελέγχουν.



Διάγραμμα 1. Προέλευση ατελειών σε υλικά και εξαρτήματα

Οι βασικές αρχές και κύρια χαρακτηριστικά των κύριων συστημάτων Μη Καταστρεπτικών Ελέγχων (ΜΚΕ) δίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 1.

Σύστημα	Χαρακτηριστικά	Εφαρμοσιμότητα
Διεισδυτικά Υγρά (Liquid Penetrant ή Dye Penetrants)	Ανίχνευση ελαττωμάτων ανοικτά στην επιφάνεια	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε μέταλλο, πολλά πλαστικά, γυαλί και γυάλινα κεραμικά
Μαγνητικά σωματίδια (Magnetic particle)	Ανίχνευση ελαττωμάτων ανοικτά στην επιφανείας υποεπιφανειακά βάθους περίπου 2mm	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για σιδηρομαγνητικά υλικά (κυρίως χάλυβες και σίδερα)
Ηλεκτρικές μέθοδοι – δινορρεύματα (Electrical methods – Eddy currents)	Ανίχνευση επιφανειακών ελαττωμάτων και μερικών υποεπιφανειακών ελαττωμάτων. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της πυκνότητας μιας μη αγώγιμης επίστρωσης, όπως για παράδειγμα της βαφής σε μέταλλο	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε μέταλλο
Τεστ υπερήχων (Ultrasonic testing)	Ανίχνευση εσωτερικών ελαττωμάτων, αλλά μπορεί επίσης να ανιχνεύσει επιφανειακές ατέλειες	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τα περισσότερα υλικά
Ακτινογραφία (Radiography)	Ανίχνευση εσωτερικών ελαττωμάτων, επιφανειακών ελαττωμάτων και ορθότητας των συναρμολογούμενων μερών	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλά υλικά αλλά υπάρχουν περιορισμοί στο μέγιστο πάχος του υλικού

Πίνακας 1. Βασικές Αρχές & Κύρια Χαρακτηριστικά ΜΚΕ

Όλα αυτά τα συστήματα τεχνολογιών ΜΚΕ συνυπάρχουν και ανάλογα με την εφαρμογή, μπορούν είτε να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό μεταξύ τους. Υπάρχουν ορισμένες αλληλεπικαλύψεις μεταξύ των διαφόρων μεθόδων δοκιμών, αλλά είναι συμπληρωματικές μεταξύ τους. Το γεγονός ότι, για παράδειγμα, οι δοκιμές υπερήχων μπορούν να αποκαλύψουν τόσο εσωτερικές όσο και επιφανειακές ατέλειες, δεν σημαίνει απαραίτητα ότι αποτελούν την καλύτερη μέθοδο για όλες τις εφαρμογές επιθεώρησης. Πολλά θα εξαρτηθούν από το είδος της υπάρχουσας ατέλειας καθώς επίσης και το σχήμα και το μέγεθος των προς εξέταση εξαρτημάτων.

2.2|Είδη Συστημάτων Επιθεώρησης

Τα διάφορα είδη συστημάτων επιθεώρησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά σε ξεχωριστά τμήματα του προς έλεγχο εξοπλισμού. Ένας εξειδικευμένος χειριστής, για παράδειγμα,

θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει μια ευπροσάρμοστη, φορητή, χαμηλού κόστους μονάδα ανίχνευσης ελαττωμάτων σε ένα ευρύ φάσμα εξαρτημάτων και υλικών. Σε αντιπαράβολή, οι ανάγκες μιας εταιρείας μπορεί να την οδηγήσουν σε μια σημαντική κεφαλαιακή επένδυση, στην αγορά ενός πλήρως αυτοματοποιημένου συστήματος, σχεδιασμένου βάσει εξειδικευμένων προδιαγραφών, το οποίο μπορεί να ενσωματωθεί στην γραμμή παραγωγής για την τακτική επιθεώρηση μεγάλων ποσοτήτων εξαρτημάτων. Και στις δύο περιπτώσεις, οι δυο μηχανισμοί ελέγχου διαφέρουν στον σχεδιασμό, το κόστος και την πολυπλοκότητα ενώ παράλληλα και οι δυο χρησιμοποιούν τις ίδιες φυσικές αρχές για την ανίχνευση ατελειών. Συνεπώς, ένας συμπαγής και φορητός εξοπλισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο μέσα σε έναν χώρο ελέγχου όσο και έξω από αυτόν, καθώς επίσης η αρχή της βασικής δοκιμής μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα μεγάλο σύστημα ελέγχου που είναι σχεδιασμένο για έλεγχο μεγάλων ποσοτήτων ενός μόνο εξαρτήματος ή για τον έλεγχο μικρού εύρους εξαρτημάτων.

2.3 | Ποιότητα Επιθεώρησης

Όταν χρησιμοποιούνται συστήματα ΜΚΕ, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και ο έλεγχος των διαδικασιών έτσι ώστε να εξάγονται όχι μόνο ποιοτικά αλλά και ποσοτικά συμπεράσματα που θα είναι ακριβή και χρήσιμα. Εάν οι ΜΚΕ είναι εσφαλμένοι, τότε μπορεί να οδηγηθούμε σε σοβαρά σφάλματα κατά την αξιολόγηση της ποιότητας των εξαρτημάτων.

Είναι απαραίτητο αρχικά, να προβλέπονται οι πιο πιθανές και επικίνδυνες αστοχίες ενός εξαρτήματος και από αυτή την πρόβλεψη να εξάγονται οι τύποι και τα περιοριστικά μέτρα των δυνητικά επικίνδυνων αστοχιών. Σε αυτή την πρώτη ένδειξη, η ευθύνη βαρύνει τον σχεδιαστή του προϊόντος. Κατά συνέπεια, είναι αυτός που πρέπει να καθορίσει αρχικά ποιες αστοχίες είναι απορριπτέες και να δώσει οδηγίες σχετικά με τις κατάλληλες μεθόδους ελέγχου.

Δεν είναι πάντοτε απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος ελέγχου που θα είναι ικανή να διακρίνει πολύ μικρές ασυνέχειες. Για παράδειγμα, σε ένα γκρι χυτοσίδηρο κάθε κρυσταλλική στρώση από γραφίτη είναι μία ασυνέχεια. Μία ασυνέχεια αυτού του μεγέθους σαν αυτής του γραφίτη μπορεί να θεωρείται υψίστης σημασίας σε ένα άλλο υλικό όπως για παράδειγμα σε ένα σφυρηλατημένο αλουμίνιο. Στην περίπτωση του αλουμινίου θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος ελέγχου υψηλής ευαισθησίας. Εάν, ωστόσο, χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος της ίδιας ευαισθησίας σε συνδυασμό με μια χύτευση σιδήρου, θα εντοπίζονταν ατέλειες στα περισσότερα δείγματα γραφίτη θα και αυτό το σύνολο πληροφορίας θα κάλυπτε την ανίχνευση των μεγαλύτερων αλλά απορριπτέων ατελειών. Από το παραπάνω παράδειγμα προκύπτει ότι για την επιτυχή εφαρμογή ΜΚΕ, τόσο το σύστημα δοκιμών όσο και οι διαδικασίες πρέπει να είναι κατάλληλα για

τους στόχους επιθεώρησης και τους τύπους ατελειών που πρέπει να εντοπιστούν. Επιπλέον ο εκτελών τον έλεγχο θα πρέπει να έχει επαρκή κατάρτιση και εμπειρία και τα πρότυπα αποδοχής ανοχών πρέπει να είναι καθορισμένα για τον προσδιορισμό τυχόν ανεπιθύμητων χαρακτηριστικών ενός μη συμμορφούμενου μέρους.

Εάν κάποια από αυτές τις προϋποθέσεις δεν τηρηθεί, υπάρχει πιθανότητα σφάλματος στον εντοπισμό και χαρακτηρισμό ελαττωμάτων. Αυτό προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία αν δηλώνει την ελλιπή ανίχνευση ατελειών που θα βλάψουν σοβαρά τις επιδόσεις της λειτουργίας. Με ανεπαρκή πρότυπα, ελαττώματα που έχουν μικρή ή καμία σχέση με την απόδοση του προϊόντος μπορεί να θεωρηθούν σοβαρά, ή αντιθέτως ουσιαστικές ατέλειες μπορεί να παραβλεφθούν ως ασήμαντες.[1]

2.4 | Αξιοπιστία Ανίχνευσης Αστοχιών

Στον συμβατικό σχεδιασμό, δημιουργείται μια τάση σχεδιασμού διαιρώντας μια συγκεκριμένη τιμή απόδοσης ή δοκιμαστικής τάσης με έναν κατάλληλο παράγοντα ασφαλείας. Αυτή η δύναμη θεωρείται αντιπροσωπευτική του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή ενός συστατικού. Η σχεδιαστική προσέγγιση της μηχανικής θραύσης ωστόσο, αναγνωρίζει ότι οι αστοχίες μπορούν να υπάρχουν σε μια συνιστώσα, πριν και κατά τη διάρκεια της ζωής ενός υλικού σε λειτουργία και επιχειρεί να περιγράψει ποσοτικά τις επιδράσεις αυτών των αστοχιών στην ακεραιότητα των συστατικών. Η μηχανική της θραύσης περιγράφει την ικανότητα των κρίσιμων δομικών στοιχείων να αντισταθούν στην εμφάνιση ταχείας ανάπτυξης ρωγμών. Τα εξαρτήματα χαρακτηρίζονται από: α) μία ιδιότητα υλικού που ονομάζεται συντελεστής κρίσιμης έντασης τάσης ή αλλιώς αντοχή θραύσης ή στερρότητα και β) τη μεγαλύτερη αστοχία που μπορεί να είναι ανεκτή σε οποιοδήποτε συγκεκριμένο τμήμα ενός εξαρτήματος. Επιπλέον, σε αυτή την ποσοτική αξιολόγηση, λαμβάνεται υπόψη το περιβάλλον λειτουργίας.

Η αξιοπιστία οποιασδήποτε τεχνολογίας ΜΚΕ, αποτελεί μέτρο της αποτελεσματικότητάς της για την ανίχνευση αστοχιών συγκεκριμένου τύπου, σχήματος και μεγέθους. Μετά την ολοκλήρωση του ελέγχου, μπορεί να αναφερθεί η πιθανότητα ένα συστατικό να είναι απαλλαγμένο από αστοχίες συγκεκριμένου τύπου, σχήματος ή μεγέθους. Όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο αυτής της πιθανότητας, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η αξιοπιστία της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας. Ωστόσο, πρέπει πάντοτε να λαμβάνεται υπόψη ο ανθρώπινος παράγοντας καθώς οι ΜΚΕ πραγματοποιούνται κατά το πλείστον από χειριστές. Εγγενώς, κανένας από π.χ. δύο χειριστές δεν θα εκτελέσει την ίδια επαναλαμβανόμενη εργασία με τον ίδιο τρόπο και καθ' όλη τη διάρκεια του ελέγχου. Ως εκ τούτου, πρέπει να ληφθεί υπόψη αυτή η πρόσθετη αβεβαιότητα, κατά την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των

τεχνολογιών ΜΚΕ. Επιπλέον, η βαρύτητα των αποτελεσμάτων όπου καθιστούν αποδεκτές ή απορριπτέες κάποιες αστοχίες, πρέπει να εκτιμηθεί από στατιστικά δεδομένα.

Ο ρόλος των ΜΚΕ είναι να εξασφαλιστεί σε επίπεδο εμπιστοσύνης π.χ. ότι οι ρωγμές που αντιστοιχούν σε ένα κρίσιμο μέγεθος για θραύση, στο σχεδιαστικό φορτίο, απουσιάζουν από ένα εξάρτημα όταν αυτό βρίσκεται σε λειτουργία. Ίσως χρειαστεί να πιστοποιηθεί επιπλέον ότι και μικρότερες ρωγμές από το κρίσιμο μέγεθος απουσιάζουν επίσης. Είναι σημαντικό να επιτρέπεται η ανάπτυξη ρωγμών κάτω του κρίσιμου σημείου, ειδικά σε εξαρτήματα ή στοιχεία που υπόκεινται σε φορτία κόπωσης ή σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, έτσι ώστε τα εξαρτήματα αυτά να μπορούν να επιτυγχάνουν μία ελάχιστη και καθορισμένη διάρκεια ζωής πριν παρουσιάσουν καταστροφική αστοχία. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ενδέχεται να είναι απαραίτητη η περιοδική επιθεώρηση λειτουργίας ή η συνεχής παρακολούθηση για να διασφαλιστεί ότι οι ρωγμές δεν θα φτάσουν σε ένα κρίσιμο μέγεθος. Η χρήση εννοιών μηχανικής θραύσης στο σχεδιασμό, δίνει ένα πλεονέκτημα στην ικανότητα των διαφόρων ΜΚΕ να ανιχνεύουν μικρές ρωγμές. Η διαφορά μεταξύ του κρίσιμου μεγέθους και του μικρότερου ανιχνεύσιμου μεγέθους γίνεται το επίπεδο ασφάλειας.

Σε κάθε ξεχωριστό πλάνο επιθεώρησης, ένας σημαντικός αριθμός ενδείξεων αστοχιών συνήθως δεν συσχετίζεται με πραγματικές αστοχίες. Συνεπώς, μειώνεται η πιθανότητα ταυτοποίησης ενός εξαρτήματος χωρίς την ύπαρξη ελαττωμάτων αισθητού μεγέθους. Ωστόσο, όταν εμπλέκονται ζωτικά εξαρτήματα, είναι απαραίτητο να προσπαθήσουμε να εντοπίσουμε όσο το δυνατόν περισσότερες αστοχίες και είναι υψηλή η τάση να δεχτούμε όλες τις ενδεχόμενες ενδείξεις αστοχιών. Αυτό είναι αποδεκτό για λόγους ασφαλείας, επειδή θεωρείται καλύτερα να δεχτούμε ψευδής αστοχίες παρά να ρισκάρουμε την καταστροφική αποτυχία ενός εξαρτήματος σε λειτουργία.

Προφανώς, ένας μηχανικός που χρησιμοποιεί έννοιες μηχανικής θραύσης ενδιαφέρεται να εντοπίσει τη μεγαλύτερη σε μέγεθος αστοχία που ενδέχεται να παραβλεφθεί κατά την επιθεώρηση. Η επιλογή της μεθόδου επιθεώρησης υπαγορεύεται αποκλειστικά με αυτό ως πρωταρχικό μέλημα. Όλες οι άλλες παράμετροι είναι δευτερεύουσες. Για παράδειγμα, ο έλεγχος με υπερήχους των χαλύβδινων εξαρτημάτων για ρωγμές κόπωσης, ο οποίος είναι σχετικά εύκολος να πραγματοποιηθεί, θα απορριπτόταν για χάρη του ελέγχου με δινορρεύματα, εάν το κριτήριο ήταν η ανίχνευση ρωγμών μήκους 1,5mm, διότι οι πιθανότητες ανίχνευσης είναι 50% έναντι 80% εκατό αντίστοιχα.

2.5|Οφέλη Τεχνολογιών ΜΚΕ

Ένα προφανές και σαφές όφελος που μπορεί να προκύψει από τη συνετή χρήση των ΜΚΕ είναι ο εντοπισμός των ελαττωμάτων τα οποία, αν παραμείνουν ανεξιχνίαστα θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μια καταστροφική αστοχία του συστήματος, που θα ήταν οικονομικά πολυδάπανη ή

και ενδεχομένως θα στοίχιζε και σε ανθρώπινες ζωές. Αντιθέτως, η χρήση αυτών των ΜΚΕ μπορεί να αποφέρει οφέλη με πολλούς τρόπους. Φαινομενικά, η εγκατάσταση οποιουδήποτε συστήματος ελέγχου συνεπάγεται κόστος, αλλά πολύ συχνά η αποτελεσματική χρήση κατάλληλων τεχνικών ελέγχου οδηγεί σε πολύ σημαντικές οικονομικές αποταμιεύσεις.

Είναι σημαντική η σωστή επιλογή τόσο του είδους ελέγχου όσο και τα στάδια στα οποία πρόκειται να εφαρμοστεί. Θα μπορούσε να θεωρηθεί άσκοπο να σταματάει η χρήση ΜΚΕ τεχνικών δοκιμών για την επιθεώρηση μικρών χυτών ή σφυρήλατων μέχρις ότου ολοκληρωθούν όλες οι εργασίες μηχανουργικής κατεργασίας σε όλα τα στοιχεία. Στην περίπτωση αυτή, θα ήταν προτιμότερο να εξεταστεί το προϊόν προτού αρχίσει η δαπανηρή κατεργασία ώστε να απορρίπτονται εκείνα τα στοιχεία με απαράδεκτες αστοχίες. Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι δεν είναι δυνατόν να απορριφθούν όλες οι αστοχίες που ενδέχεται να εντοπιστούν σε αυτό το στάδιο, καθώς ορισμένες ασυνέχειες επιφάνειας μπορεί να είναι τέτοιου μεγέθους, ώστε να αφαιρούνται κατά τη φάση κατεργασίας.

Μολονότι η αποτελεσματική επιθεώρηση ελέγχου ποιότητας μπορεί να οδηγήσει σε οικονομικές αποταμιεύσεις και να βοηθήσει στην πρόληψη καταστροφικών λειτουργικών βλαβών, είναι επίσης αλήθεια ότι η επιβολή υπερβολικά πολλών ή πολύ ευαίσθητων συστημάτων επιθεώρησης μπορεί να είναι πολύ κοστοβόρα από άποψη χρόνου και χρήματος. Η υπερβολική επιθεώρηση δεν μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της απόδοσης ή αξιοπιστίας του προϊόντος. Η απόλυτη τελειότητα ενός προϊόντος είναι απίθανο να επιτευχθεί και η προσπάθεια να προσεγγίσει πολύ το ιδανικό μπορεί να αποδειχθεί πολύ ακριβή. [1]

3 | Τεχνολογίες Μη Καταστροφικών Ελέγχων (ΜΚΕ)

3.1 | ΜΚΕ – Ορισμός

Σύμφωνα με τον Cartz Louis, οι Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι Non – Destructive Testing (NDT) είναι μια ευρεία ομάδα τεχνικών ανάλυσης που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία της επιστήμης και της τεχνολογίας για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων ενός υλικού, συστατικού ή συστήματος χωρίς να προκαλείται ζημιά. [2] Οι παρακάτω αγγλικοί όροι Non – Destructive Examination (NDE), Non – Destructive Inspection (NDI) και Non – Destructive Evaluation (NDE) χρησιμοποιούνται επίσης για την περιγραφή αυτής της τεχνολογίας. [3]

3.2 | Ιστορική Αναδρομή ΜΚΕ

Παρακάτω αναφέρουμε κάποια αξιοσημείωτα γεγονότα στους πρώιμους ακαδημαϊκούς και βιομηχανικούς Μη Καταστροφικούς Ελέγχους.

- 1854 Χάρτφορντ, Κονέκτικατ – Καταστρέφεται ένας λέβητας στα εργοστάσια Fales και Grey Car, σκοτώνοντας 21 άτομα και τραυματίζοντας σοβαρά 50. Μέσα σε μια δεκαετία, το Κονέκτικατ περνάει νόμο που απαιτεί ετήσιο έλεγχο στους λέβητες (σε αυτή την περίπτωση αναφερόμαστε σε οπτικό έλεγχο).
- 1880 – 1920 – Η μέθοδος ανίχνευσης ρωγμών Oil and Whiting [4] χρησιμοποιείται στη βιομηχανία σιδηροδρόμων για την εύρεση ρωγμών στα βαριά τμήματα χάλυβα. Ένα κομμάτι χάλυβα είναι εμποτισμένο σε αραιωμένο λάδι και στη συνέχεια περασμένο με μια λευκή επικάλυψη (σκόνη κιμωλίας). Το λάδι που ξεχειλίζει από τις ρωγμές μετατρέπει την άσπρη σκόνη σε καφέ, εξωλκύνοντας το λάδι επιτρέποντας την ανίχνευση των ρωγμών. Αυτός ήταν ο πρόδρομος για τις σύγχρονες δοκιμές διείσδυσης υγρού.
- 1895 – Ο Wilhelm Conrad Röntgen ανακαλύπτει αυτό που είναι τώρα γνωστό ως ακτινογραφίες. Στην πρώτη του εργασία συζητά τη δυνατότητα ανίχνευσης εσωτερικής δομής και ατελειών των υλικών.
- 1920 – Ο Δρ H. H. Lester ξεκινά την ανάπτυξη της βιομηχανικής ακτινογραφίας για τα μέταλλα.
- 1924 – Ο Lester χρησιμοποιεί ακτινογραφία για να εξετάσει τα χυτά που πρόκειται να εγκατασταθούν στην μια μονάδα παραγωγής ατμού Boston Edison Company.

- 1926 – Το πρώτο ηλεκτρομαγνητικό όργανο δινορρευμάτων είναι διαθέσιμο για τη μέτρηση του πάχους υλικού.
- 1927 – 1928 – Σύστημα μαγνητικής επαγωγής για την ανίχνευση ατελειών στην σιδηροδρομική γραμμή που αναπτύχθηκε από τους Dr. Elmer Sperry και H.C. Drake.
- 1929 – Πρωτοστατούν οι μέθοδοι και ο εξοπλισμός μαγνητικών σωματιδίων (A.V. DeForest και F.B. Doane.)
- Δεκαετία του 1930 – Ο Robert F. Mehl επιδεικνύει ακτινογραφική απεικόνιση χρησιμοποιώντας ακτινοβολία Γάμμα από το ραδιενεργό στοιχείο Ράδιο, το οποίο μπορεί να εξετάζει παχύτερα εξαρτήματα από τα μηχανήματα ακτίνων Χ χαμηλής ενέργειας που ήταν διαθέσιμα εκείνη τη στιγμή.
- 1935 – 1940 – Αναπτύχθηκαν οι δοκιμές διείσδυσης υγρού (Betz, Doane και DeForest)
- 1935 – 1940 – Αναπτύχθηκαν όργανα δινορρευμάτων (H.C. Knerr, C. Farrow, Theo Zuschlag και Fr. F. Foerster).
- 1940 – 1944 – Αναπτύχθηκε η μέθοδος δοκιμής υπερήχων στις Η.Π.Α. από τον Dr. Floyd Firestone, ο οποίος υπέβαλλε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στις Η.Π.Α. στις 27 Μαΐου του 1940 και κατοχυρώθηκε με αριθμό 2.280.226 στις 21 Απριλίου του 1942.
- Ακολουθούν αποσπάσματα από τις δύο πρώτες παραγράφους αυτού του τεκμηριωμένου διπλώματος ευρεσιτεχνίας για μια μέθοδο ΜΚΕ, τα οποία περιγράφουν συνοπτικά τα βασικά στοιχεία της δοκιμής με υπερήχους. *“Η εφεύρεσή μου αφορά σε μια συσκευή για την ανίχνευση της παρουσίας ανομοιογένειας πυκνότητας ή ελαστικότητας στα υλικά. Για παράδειγμα, αν μια χύτευση έχει μια οπή ή μια ρωγμή μέσα σε αυτήν, η συσκευή μου επιτρέπει την ανίχνευση της ανωμαλίας και τη θέση της, αν και το ελάττωμα βρίσκεται εξ ολοκλήρου εντός του χυτού και κανένα τμήμα του δεν εκτείνεται προς την επιφάνεια”*. Επιπλέον, *“Η γενική αρχή της συσκευής μου συνίσταται στην αποστολή δονήσεων υψηλής συχνότητας στο τμήμα που πρόκειται να ελεγχθεί και στον προσδιορισμό των χρονικών διαστημάτων άφιξης των άμεσων και ανακλώμενων κραδασμών σε έναν ή περισσότερους σταθμούς στην επιφάνεια του τμήματος”*. Η ιατρική ηχοκαρδιογραφία αποτελεί παρακλάδι αυτής της τεχνολογίας. [5]
- 1946 – Οι πρώτες ακτινογραφίες νετρονίων που παράγονται από τον Peters.
- 1950 – Εφευρέθηκε το Schmidt Hammer επίσης γνωστό και ως “Swiss Hammer”. Είναι μια συσκευή για τη μέτρηση των ελαστικών ιδιοτήτων ή της αντοχής του σκυροδέματος ή της πέτρας, κυρίως ως προς την σκληρότητα της επιφάνειας και την αντοχή στη διείσδυση. Χρησιμοποιεί την πρώτη κατοχυρωμένη μέθοδο παγκοσμίως με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας μη καταστρεπτικών δοκιμών για σκυρόδεμα.
- 1950 – Ο J. Kaiser εισάγει την ακουστική εκπομπή ως μέθοδο ΜΚΕ.

- 1963 – Η συνεφεύρεση της ψηφιακής ακτινογραφίας των Frederick G. Weighart και James F. McNulty είναι μια παραλλαγή της ανάπτυξης ζευγών μη καταστρεπτικού εξοπλισμού δοκιμής στην Automation Industries, Inc., στο El Segundo της Καλιφόρνια.
- 1996 – Ο Rolf Diederichs ίδρυσε το πρώτο περιοδικό ΜΚΕ ανοικτής πρόσβασης στο Διαδίκτυο. Σήμερα η ανοικτής πρόσβασης βάση δεδομένων ΜΚΕ είναι η NDT.net
- 2008 – Ιδρύθηκε επίσημα η Διεθνής Ακαδημία ΜΚΕ – Academia NDT International και έχει την έδρα της στη Brescia (Ιταλία) www.academia-ndt.org [6]

3.3|Σύγκριση Τεχνολογιών Καταστροφικού & Μη Καταστροφικού Ελέγχου

Οι Καταστρεπτικές δοκιμές συνήθως εκτελούνται είτε σε δοκίμια που έχουν κατασκευαστεί γι' αυτόν το σκοπό ή μπορεί να εφαρμοστούν σε ένα δείγμα που θεωρείται αντιπροσωπευτικό για πλήθος παρόμοιων εξαρτημάτων/υλικών. Οι καταστροφικοί έλεγχοι λαμβάνουν χώρα σε εργαστήρια ή κέντρα εκπαίδευσης και μπορεί να είναι χημικής ή μηχανικής φύσεως .

Καταστροφικοί Έλεγχοι		Μη – Καταστροφικοί Έλεγχοι	
1.	Οι δοκιμές συνήθως προσομοιώνουν μία ή περισσότερες συνθήκες λειτουργίας. Κατά συνέπεια, τείνουν να μετρήσουν τη χρηστικότητα άμεσα και αξιόπιστα.	Οι δοκιμές συνήθως περιλαμβάνουν έμμεσες μετρήσεις των ιδιοτήτων που δεν έχουν άμεση σχέση με τη λειτουργία. Η συσχέτιση μεταξύ αυτών των μετρήσεων και η χρηστικότητα πρέπει να αποδεικνύεται από άλλα μέσα.	
2.	Οι δοκιμές είναι συνήθως ποσοτικές μετρήσεις φόρτωσης για αστοχία, σημαντική παραμόρφωση ή ζημιά ή ο χρόνος ζωής ως την αποτυχία υπό δεδομένη φόρτωση και περιβαλλοντικές συνθήκες. Συνεπώς, μπορούν να δώσουν αριθμητικά δεδομένα χρήσιμα για σχεδιαστικούς σκοπούς ή για την δημιουργία προτύπων ή προδιαγραφών.	Οι δοκιμές είναι συνήθως ποιοτικές και σπάνια ποσοτικές. Συνήθως δεν μετρούν φόρτωση για την αστοχία ή τον χρόνο ζωής ως την αστοχία, ούτε με έμμεσο τρόπο. Μπορούν, ωστόσο, να αποκαλύψουν ζημιά από έκθεση των μηχανισμών αστοχίας.	
3.	Η συσχέτιση μεταξύ των περισσότερων μετρήσεων καταστρεπτικών δοκιμών και των μετρήσεων των ιδιοτήτων του υλικού (ιδιαίτερα σε περιπτώσεις προσομοίωσης λειτουργίας φόρτωσης) είναι συνήθως άμεση. Ως εκ τούτου, οι περισσότεροι παρατηρητές, μπορεί να συμφωνήσουν στα αποτελέσματα της δοκιμής και την σημασία τους, λαμβάνοντας υπόψη τη χρηστικότητα του υλικού ή του εξαρτήματος.	Για την εξήγηση των ευρημάτων των δοκιμών, απαιτείται συνήθως εξειδικευμένη κρίση και εμπειρία στον έλεγχο ή την λειτουργία. Όπου δεν έχει αποδειχθεί η ύπαρξη βασικού συσχετισμού ή όπου η εμπειρία είναι περιορισμένη, οι παρατηρητές ενδέχεται να διαφωνούν κατά την αξιολόγηση της σημασίας των ενδείξεων των δοκιμών.	
4.	Οι καταστρεπτικές δοκιμές συνήθως δεν είναι βολικές για τα εξαρτήματα που βρίσκονται σε λειτουργία. Γενικά, η λειτουργία πρέπει να διακοπεί και το εξάρτημα να βγει οριστικά εκτός λειτουργίας.	Μπορούν συχνά να εφαρμοστούν μη καταστρεπτικές δοκιμές σε εξαρτήματα σε λειτουργία χωρίς να χρειαστεί να διακοπεί ή σε λειτουργία πέραν της κανονικής συντήρησης ή σε περιόδους αδράνειας. Έτσι συνεπάγεται η μη απώλεια των εξαρτημάτων που μπορούν να επισκευαστούν.	

5.	Αθροιστική αλλαγή για μια χρονική περίοδο δεν μπορεί εύκολα να μετρηθεί σε μία μόνο μονάδα. Εάν πολλές μονάδες από την ίδια παρτίδα ή λειτουργία, ελέγχονται διαδοχικά σε μια χρονική περίοδο, πρέπει να αποδειχθεί ότι οι μονάδες ήταν αρχικά παρόμοιες. Εάν οι μονάδες χρησιμοποιούνται σε λειτουργία και αφαιρούνται μετά από διάφορες χρονικές περιόδους, πρέπει να αποδεικνύεται ότι στην καθεμία υποβλήθηκαν παρόμοιες συνθήκες λειτουργίας, πριν να ληφθούν αξιόπιστα δεδομένα.	Οι μη καταστρεπτικές δοκιμές επιτρέπουν επαναλαμβανόμενους ελέγχους μιας δεδομένης μονάδα για μια χρονική περίοδο. Με αυτόν τον τρόπο, το ποσοστό λειτουργικής βλάβης, εάν αυτό είναι ανιχνεύσιμο, καθώς και η συσχέτιση του με την λειτουργική αστοχία μπορούν να καθοριστούν με σαφήνεια.
6.	Με εξαρτήματα πολύ υψηλού υλικού ή κόστους κατασκευής, το κόστος αντικατάστασης όσων καταστράφηκαν μπορεί να είναι απαγορευτικό. Μπορεί να είναι ανέφικτο να δημιουργηθεί ένας επαρκής αριθμός και εύρος καταστροφικών δοκιμών.	Αποδεκτά εξαρτήματα πολύ υψηλού υλικού ή κόστους κατασκευής, δεν χάνονται σε μη καταστρεπτικές δοκιμές. Επίσης είναι εφικτές οι επαναλαμβανόμενες δοκιμές κατά τη διάρκεια της παραγωγής ή της λειτουργίας όταν αυτό δικαιολογείται οικονομικά και πρακτικά.
7.	Δεν πραγματοποιούνται δοκιμές στα αντικείμενα που θα χρησιμοποιηθούν σε λειτουργία. Συνεπώς, η συσχέτιση ή η ομοιότητα μεταξύ των αντικειμένων που δοκιμάστηκαν και αυτών που θα χρησιμοποιηθούν σε λειτουργία πρέπει να αποδεικνύεται με άλλο τρόπο.	Οι δοκιμές γίνονται απευθείας στα αντικείμενα που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε λειτουργία. Κατά συνέπεια, δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι οι δοκιμές έγιναν με αντιπροσωπευτικά αντικείμενα ελέγχου.
8.	Οι δοκιμές μπορούν να γίνουν μόνο σε ένα μέρος της παρτίδας παραγωγής το οποίο θα χρησιμοποιηθεί σε λειτουργία. Αυτό μπορεί να έχει μικρή αξία όταν οι ιδιότητες ποικίλουν ακαθόριστα από μονάδα στη μονάδα.	Μπορούν να γίνουν δοκιμές σε κάθε μονάδα που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί εάν αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί οικονομικά. Συνεπώς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και όταν εμφανίζονται μεγάλες διαφορές από μονάδα σε μονάδα σε παρτίδες παραγωγής.
9.	Οι δοκιμές συχνά δεν μπορούν να γίνουν σε ολοκληρωμένα τμήματα παραγωγής. Είναι συχνά περιορισμένες να ελέγξουν κομμάτια εκτός των τμημάτων παραγωγής ή ειδικά δείγματα υλικού που έχουν υποστεί επεξεργασία ώστε να ενεργοποιούν τις ιδιότητες των προς εξαγωγή μερών που χρησιμοποιούνται σε λειτουργία.	Μπορεί να γίνει δοκιμή σε ολόκληρο το τμήμα παραγωγής ή σε όλες τις κρίσιμες περιοχές του. Κατά συνέπεια, η αξιολόγηση ισχύει για το εξάρτημα στο σύνολο του. Πολλά κρίσιμα τμήματα του εξαρτήματος μπορούν να εξεταστούν ταυτόχρονα ή διαδοχικά ως κατάλληλα και ωφέλιμα.
10.	Μια ενιαία καταστροφική δοκιμή μπορεί να μετρήσει μόνο μία ή μερικές από τις ιδιότητες που μπορεί να θεωρηθούν κρίσιμες σε συνθήκες λειτουργίας.	Πολλές μη καταστρεπτικές δοκιμές, καθεμία από τις οποίες είναι ευαίσθητη σε διαφορετικές ιδιότητες ή περιοχές του υλικού ή του εξαρτήματος, μπορεί να εφαρμοστεί ταυτόχρονα ή σε αλληλουχία. Με αυτόν τον τρόπο, είναι εφικτό να μετρηθούν όσες πολλές διαφορετικές ιδιότητες συσχετίζονται με την επιθυμητή κατάσταση λειτουργίας.

11.	Πολλές καταστροφικές δοκιμές απαιτούν εκτεταμένη μηχανική κατεργασία ή άλλη προετοιμασία των δειγμάτων δοκιμής. Συχνά απαιτούνται μηχανές μαζικής ακριβείας- δοκιμής. Κατά συνέπεια το κόστος των καταστρεπτικών δοκιμών μπορεί να είναι πολύ υψηλό και ο αριθμός των δειγμάτων που θα πρέπει να προετοιμαστούν και να δοκιμαστούν να απαιτούν εργαζόμενους υψηλής εξειδίκευσης.	Σε πολλές μορφές μη καταστροφικών δοκιμών, απαιτείται ελάχιστη ή καμία προετοιμασία δείγματος. Σε διάφορες μορφές μη καταστρεπτικών δοκιμών, ο εξοπλισμός είναι φορητός. Ορισμένοι εξοπλισμοί είναι ικανοί να επιταχύνουν τη δοκιμή ή τη διαλογή και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως. Το κόστος των μη καταστροφικών δοκιμών είναι χαμηλότερο στις περισσότερες περιπτώσεις, τόσο για κάθε εξάρτημα/υλικό που δοκιμάστηκε όσο και για τις συνολικές δοκιμές, συγκριτικά με το κόστος αντιστοίχως επαρκών καταστροφικών δοκιμών.
12.	Οι απαιτήσεις σε χρόνο και ανθρωποώρα πολλών καταστρεπτικών δοκιμών είναι πολύ υψηλές. Μπορεί να προκύψουν υπερβολικά κόστη παραγωγής εάν επαρκείς και εκτεταμένες καταστροφικές δοκιμές χρησιμοποιούνται ως κύρια μέθοδος ελέγχου ποιότητας παραγωγής.	Οι περισσότερες μη καταστρεπτικές μέθοδοι δοκιμών είναι γρήγορες και απαιτούν πολύ λιγότερες ανθρωποώρες ή πραγματικές ώρες από ότι τυπικά χρειάζονται οι καταστροφικές δοκιμές. Συνεπώς, ο έλεγχος όλων των μονάδων παραγωγής κοστίζει κανονικά λιγότερο ή ίσο με το κόστος του καταστροφικού ελέγχου μόνο μικρού ποσοστού του πλήθους των μονάδων παραγωγής. [7]

Πίνακας 2. Σύγκριση Καταστροφικών και Μη Καταστροφικών Ελέγχων

3.4|Είδη και Μεθοδολογία ΜΚΕ

Οι ΜΚΕ χωρίζονται ανάλογα με τις μεθόδους ελέγχου, ο καθένας με βάση μια συγκεκριμένη επιστημονική αρχή. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν περαιτέρω να υποδιαιρεθούν σε διάφορες τεχνικές. Οι διάφορες μέθοδοι και τεχνικές, λόγω της ιδιαίτερης φύσης τους, μπορεί να προσφέρονται σε ιδιαίτερος ικανοποιητικό βαθμό για ορισμένες εφαρμογές και να έχουν μικρή ή καθόλου αξία σε κάποιες άλλες. Ως εκ τούτου, η επιλογή της σωστής μεθόδου και τεχνικής είναι ένα σημαντικό μέρος της απόδοσης του ΜΚΕ.

Παρακάτω παραθέτουμε μία λίστα όλων των διαδεδομένων μεθόδων ΜΚΕ που χρησιμοποιούνται σήμερα:

- Έλεγχος ακουστικής εκπομπής – Acoustic emission testing (AE or AT)
- Ανοδική οξείδωση κραμάτων τιτανίου – Blue Etch Anodize (BEA)
- Έλεγχος διείσδυσης χρωστικών ουσιών ή έλεγχος διείσδυσης – Dye penetrant inspection or Liquid penetrant Testing (PT or LPI)
- Ηλεκτρομαγνητική δοκιμή ή Ηλεκτρομαγνητική επιθεώρηση – Electromagnetic testing (ET) or Electromagnetic Inspection (γνωστή ως “EMI”). Στην ηλεκτρονική δοκιμή συμπεριλαμβάνονται οι υποκατηγορίες:

- Μέτρηση πεδίου εναλλασσόμενου ρεύματος – Alternating current field measurement (ACFM)
- Μέτρηση ενδεχόμενης πτώσης δυναμικού εναλλασσόμενου ρεύματος – Alternating current potential drop measurement (ACPD)
- Δοκιμές Barkhausen – Barkhausen testing. Το κριτήριο σταθερότητας Barkhausen είναι μια μαθηματική προϋπόθεση για να προσδιοριστεί πότε ένα γραμμικό ηλεκτρονικό κύκλωμα θα ταλαντεύεται.
- Μέτρηση ενδεχόμενης πτώσης δυναμικού συνεχούς ρεύματος – Direct current potential drop measurement (DCPD)
- Έλεγχος με δινορρεύματα – Eddy – current testing (ECT)
- Δοκιμές διαρροής μαγνητικής ροής για αγωγούς, δάπεδα δεξαμενών και συρματόσχοινα ή Επιθεώρηση μαγνητικών σωματιδίων – Magnetic flux leakage testing (MFL) Magnetic – particle inspection (MT or MPI)
- Magnetovision – είναι η τεχνική μέτρησης που επιτρέπει την απεικόνιση της κατανομής του μαγνητικού πεδίου σε ένα δεδομένο χώρο.
- Απομακρυσμένη δοκιμή πεδίου – Remote field testing (RFT)
- Ελλειψομετρία – Ellipsometry
- Ενδοσκοπικός έλεγχος – Endoscope inspection
- Δοκιμή κατευθυνόμενων κυμάτων – Guided wave testing (GWT)
- Έλεγχος σκληρότητας – Hardness testing
- Τεχνική διέγερσης παλμών – Impulse excitation technique (IET)
- Μικροκυματικές απεικονίσεις – Microwave imaging
- Μη καταστροφική αξιολόγηση σε συχνότητες Terahertz – Terahertz non destructive evaluation (THz)
- Υπέρυθρες και θερμικές δοκιμές – Infrared and thermal testing (IR) όπου συμπεριλαμβάνονται οι υποκατηγορίες:
 - Θερμογραφική επιθεώρηση – Thermographic inspection
 - Μικροσκοπική θερμική σάρωση – Scanning thermal microscopy
- Δοκιμή με λέιζερ – Laser testing η οποία αποτελείται από:
 - Ηλεκτρονική διάταξη συμβολισμού στίγματος – Electronic speckle pattern interferometry
 - Ολογραφική συμβολομετρία – Holographic interferometry
 - Συμβολομετρία Χαμηλής συνοχής – Low coherence interferometry
 - Οπτική ομόκεντρη συνοχή – Optical coherence tomography (OCT)

- Προφίλομετρία – Profilometry όπου μετράται το μικροανάγλυφο προφίλ μιας επιφάνειας, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η τραχύτητα της.
- Διατμητική Τομογραφία– Shearography. Χρησιμοποιεί συνεκτικό φως ή συνεκτικά ηχητικά κύματα για την παροχή πληροφοριών σχετικά με την ποιότητα των διαφόρων υλικών σε μη καταστρεπτικές δοκιμές, τη μέτρηση των στελεχών και την ανάλυση των κραδασμών
- Έλεγχος διαρροών ή Ανίχνευση διαρροών – Leak testing (LT) or Leak detection
 - Δοκιμή διαρροής με απόλυτη πίεση (αλλαγή πίεσης) – Absolute pressure leak testing (pressure change)
 - Δοκιμές φυσαλίδων– Bubble testing
 - Δοκιμή διαρροής αλογόνου – Halogen diode leak testing
 - Δοκιμή διαρροής υδρογόνου – Hydrogen leak testing
 - Δοκιμή διαρροής φασματομέτρου μάζας – Mass spectrometer leak testing
 - Μέθοδος δοκιμής διαρροής αερίου ιχνηθέτη Ηλίου, υδρογόνου και ψυκτικού αερίου – Tracer – gas leak testing method Helium, Hydrogen and refrigerant gases
- Απεικόνιση μαγνητικής συντονισμού και Φασματοσκοπία – Magnetic resonance imaging (MRI) and NMR spectroscopy
- Μεταλλογραφικά αντίγραφα – Metallographic replicas
- Φασματοσκοπία – Spectroscopy, η οποία υποδιαιρείται σε:
 - Φασματοσκοπία εγγύς υπέρυθρου– Near – infrared spectroscopy (NIRS)
 - Φασματοσκοπία στο μέσο υπέρυθρο – Mid – infrared spectroscopy (MIR)
 - Φασματοσκοπία Terahertz – Far – infrared or Terahertz spectroscopy
 - Φασματοσκοπία Ραμάν – Raman Spectroscopy, μια φασματοσκοπική τεχνική που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση λειτουργιών χαμηλής συχνότητας σε ένα σύστημα συνήθως σε επίπεδο μοριακή δομής
- Οπτική μικροσκοπία – Optical microscopy
- Ταυτοποίηση υλικού – Positive Material Identification (PMI) είναι η ανάλυση ενός μεταλλικού κράματος για τη δημιουργία της σύνθεσης με ανάγνωση των ποσοτήτων κατά ποσοστό των συστατικών στοιχείων
- Ραδιογραφικός έλεγχος ή αλλιώς Βιομηχανική ακτινογραφία ή Ακτινογραφία– Radiographic testing (RT) or Industrial radiography or Radiography, η οποία περιλαμβάνει:
 - Απεικονιστική ακτινογραφία – Computed radiography
 - Ψηφιακή ακτινογραφία (σε πραγματικό χρόνο) – Digital radiography (real – time)
 - Απεικόνιση νετρονίων – Neutron Imaging

- Ακτινογραφία μικρής ελεγχόμενης περιοχής – SCAR (Small Controlled Area Radiography)
- Απεικονιστική τομογραφία ακτίνων X – X – ray computed tomography (CT)
- Επιθεώρηση συντονισμού – Resonant Inspection που περιλαμβάνει την:
 - Ακουστική μέθοδο συντονισμού – Resonant Acoustic Method (RAM)
- Μικροσκοπία ηλεκτρονικής σάρωσης – Scanning electron microscopy
- Έλεγχος επιφανειακής θερμοκρασίας Etch – Surface Temper Etch (Nital Etch)
- Έλεγχος υπερήχων – Ultrasonic testing (UT) που υποδιαιρούνται σε:
 - Τεχνολογία ακουστικού συντονισμού – ART (Acoustic Resonance Technology)
 - Έλεγχος γωνίας δέσμης – Angle beam testing
 - Ηλεκτρομαγνητικός ακουστικός μορφοτροπέας (χωρίς επαφή) – Electro Magnetic Acoustic Transducer (EMAT)
 - Λέιζερ υπερήχων – Laser ultrasonics (LUT)
 - Εσωτερικά συστήματα περιστροφικών επιθεωρήσεων – Internal rotary inspection system (IRIS) ultrasonics for tubes
 - Υπέρηχοι συστοιχίας απεικόνισης φάσης – Phased array ultrasonics (PAUT)
- Μέτρηση πάχους – Thickness measurement , που αποτελείται από:
 - Χρόνος πτήσης υπερήχων διάθλασης – Time of flight diffraction ultrasonics (TOFD)
 - Χρόνος πτήσης υπερήχων/Προσδιορισμός τρισδιάστατων ελαστικών σταθερών – Time of Flight Ultrasonic/Determination of 3D Elastic Constants (TOF)
- Ανάλυση κραδασμών – Vibration Analysis
- Οπτική επιθεώρηση – Visual inspection (VT) η οποία περιλαμβάνει:
 - Έλεγχο αγωγού με χρήση βίντεο – Pipeline video inspection
- Δοκιμή βάρους και φορτίου δομών – Weight and load testing of structures
- Σάρωση Corroscan/C — Corroscan/C – scan για τη μέτρηση και την παρακολούθηση του πάχους τοιχώματος με περισσότερα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τη χρήση χειροκίνητου παλμού – ηχούς
- Τρισδιάστατη υπολογιστική τομογραφία – 3D Computed Tomography που περιλαμβάνει:
 - Βιομηχανική σάρωση CT – Industrial CT Scanning
- Σύστημα αξιολόγησης της ζωής του εναλλάκτη θερμότητας – Heat Exchanger Life Assessment System
- Ειδική δοκιμή υπερήχων RTJ – RTJ Flange Special Ultrasonic Testing [6]

Διαπιστώνουμε ότι υπάρχει πληθώρα ελέγχων για κάθε τομέα που χρήζει επιθεώρηση π.χ. Βιομηχανία, Ιατρική, Ασφάλεια, Περιβάλλον και Οικολογία κλπ. Στην συνέχεια θα αναλύσουμε με περισσότερες λεπτομέρειες, τις βασικότερες εκ των παραπάνω, μεθόδους ΜΚΕ.

3.4.1|Οπτική επιθεώρηση – Visual inspection (VI)

Η οπτική επιθεώρηση ή οπτικός έλεγχος είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος μη καταστρεπτικών δοκιμών. Ακόμη και οι πιο εξελιγμένες μέθοδοι ΜΚΕ απαιτούν την πραγματοποίηση οπτικού ελέγχου. Σε άλλες μεθόδους, όπως έλεγχος μαγνητικών σωματιδίων, μετά από μαγνητισμό ενός συστατικού, ο χειριστής πραγματοποιεί μια οπτική επιθεώρηση για να αναζητήσει ενδείξεις. Μεγάλα τμήματα της βιομηχανίας τείνουν να θεωρούν τον οπτικό έλεγχο ως δεδομένο και δεν δίνουν ιδιαίτερη προσοχή στην εκπαίδευση.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΥ

3.4.1.1|Βασικές αρχές

Ο οπτικός έλεγχος είναι μια μέθοδος ΜΚΕ κατά την οποία εξετάζεται η κατάσταση της επιφάνειας ενός εξαρτήματος. Χρησιμοποιείται ευρέως από τη βιομηχανία για σχεδόν κάθε αντιληπτή κατάσταση επιφάνειας και εκτείνεται από τον έλεγχο κατά την διάρκεια της παραγωγής έως τις τυχόν λειτουργικές ασυνέχειες, για να διαπιστωθεί εάν τα προϊόντα/εξαρτήματα είναι άρτια για να δοθούν προς χρήση. Χωρίς να το συνειδητοποιήσουμε, κάνουμε όλοι κάποιο είδος οπτικής επιθεώρησης κάθε μέρα. Από τη φύση τους, οι οπτικές δοκιμές είναι απλοποιημένες, π.χ. ένα καθαρό εξάρτημα μπορεί να επιθεωρηθεί από έναν χειριστή σε επαρκή φωτισμό χωρίς εξοπλισμό. Συχνά, ο χειριστής θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσει οπτικό εξοπλισμό για να βοηθήσει την επιθεώρηση, ο οποίος μπορεί να κυμαίνεται από ένα χειροκίνητο μεγεθυντικό φακό έως ένα ευέλικτο ενδοσκόπιο ή ακόμα περισσότερο από τηλεχειριζόμενα απομακρυσμένα συστήματα καταγραφής.

Μια οπτική εξέταση χωρίς την βοήθεια κατάλληλου εξοπλισμού δεν θα μπορούσε να βρει μικρές ασυνέχειες, αλλά αυτό δεν είναι απαραίτητως αλήθεια. Ένας έμπειρος χειριστής, υπό βέλτιστες συνθήκες, μπορεί να εντοπίσει ακόμη και μικρές ανεπαίσθητες ρωγμές. Η επαναληψιμότητα είναι, ωστόσο, ένα πρόβλημα. Εάν οι συνθήκες δεν βελτιστοποιηθούν, ο ίδιος χειριστής μπορεί να χάσει την ίδια ρωγμή στο ίδιο εξάρτημα σε επανειλημμένη επιθεώρηση. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα οπτικά βοηθήματα χρησιμοποιούνται συχνά για να δώσουν στον

χειριστή την βέλτιστη πιθανότητα να βρει την κατάσταση σφάλματος όσο το δυνατόν συχνότερα. Παρακάτω αναφέρουμε τις βέλτιστες συνθήκες για οπτικό έλεγχο.

3.4.1.2|Περιβάλλον

Η επιθεώρηση πρέπει να πραγματοποιείται σε ένα καθαρό, άνετο περιβάλλον με επαρκή φωτισμό. Πρέπει να δοθεί προσοχή στην ασφάλεια, τη θέση εργασίας και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η επιθεώρηση απαιτεί σημαντική συγκέντρωση από τον χειριστή, ώστε, για παράδειγμα, εάν το περιβάλλον εργασίας είναι πολύ ζεστό και θορυβώδες, αυτό θα επηρεάσει την ικανότητα του χειριστή να επικεντρωθεί στη δουλειά και οι ασυνέχειες μπορούν εύκολα να χαθούν με αυτό τον τρόπο.

Ο φωτισμός είναι πολύ σημαντικός και μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα. Το φυσικό φως της ημέρας είναι ο καλύτερος τύπος φωτός για να πραγματοποιήσετε οπτική επιθεώρηση επειδή, ως βιολογικό σύστημα, έχουμε εξελιχθεί με τον ήλιο ως κύρια πηγή φωτός. Μια συννεφιασμένη μέρα είναι η βέλτιστη, καθώς αυτή παρέχει διάχυτο φωτισμό. Το φωτεινό φως του ήλιου μπορεί να οδηγήσει σε λάμψη από ανακλαστικές επιφάνειες και αυτό, με τη σειρά του, θα μπορούσε να οδηγήσει σε απώλειες παρατήρησης ασυνεχειών.

Τεχνητό φως μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για οπτική επιθεώρηση. ο χειριστής πρέπει να βεβαιωθεί ότι χρησιμοποιείται η σωστή στάθμη φωτός που αναφέρεται στην προδιαγραφή ή τη διαδικασία. Αυτή η στάθμη φωτός ονομάζεται φωτεινότητα, η οποία ορίζεται ως η φωτεινή ροή ανά μονάδα επιφάνειας που πέφτει πάνω σε μια επιφάνεια. Μετράται σε lux, ένα lux είναι η φωτεινότητα μιας επιφάνειας ενός μέτρου από μια πηγή φωτός ενός candela. Η φωτεινή ροή είναι η ενέργεια που εκπέμπεται ανά δευτερόλεπτο από μια πηγή φωτός. Η μονάδα φωτεινής ροής είναι ο αυλός και η φωτεινή ροή που εκπέμπεται ανά μονάδα στερεάς γωνίας είναι φωτεινή ένταση. Μια πρακτική μονάδα φωτεινής έντασης είναι το candela. Οι περισσότερες προδιαγραφές θα παραθέτουν ένα ελάχιστο επίπεδο φωτεινότητας που πρέπει να χρησιμοποιείται, με αριθμούς μεταξύ 500 – 1000 lux να είναι κοινοί σε πολλές προδιαγραφές. Ως οδηγός, για να επιτευχθούν 500 lux σε μια επιφάνεια δοκιμής, θα επαρκούσε ένας λαμπτήρας 100 W σε απόσταση 460 mm ή ένας λαμπτήρας 75 W σε απόσταση 380 mm.

3.4.1.3|Προετοιμασία εξαρτημάτων

Το εξάρτημα πρέπει να είναι καθαρό και απαλλαγμένο από προστατευτικές επικαλύψεις, όπως π.χ. βρωμιά ή βαφή, που μπορεί να αποκρύψουν στις επιφάνειες που εξετάζονται.

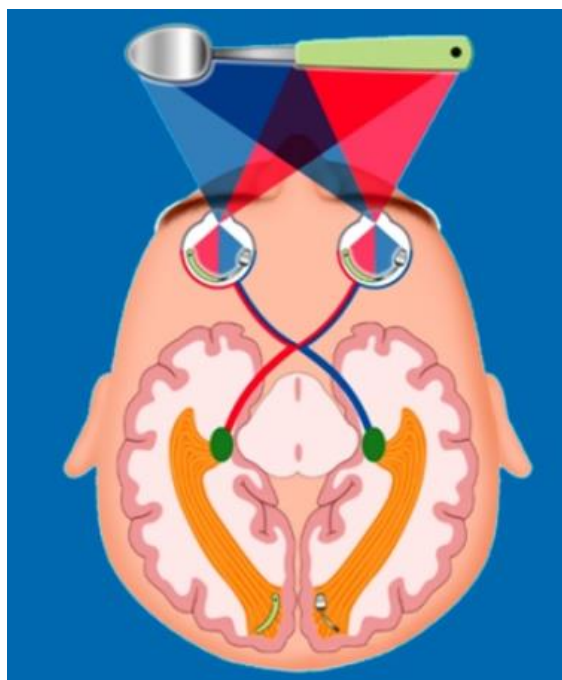
3.4.1.4|Χειριστής

Είναι πολύ σημαντικό ο χειριστής να έχει επαρκή εκπαίδευση και πείρα πριν προβεί σε οπτική επιθεώρηση. Ο εγκέφαλος δημιουργεί και αποθηκεύει εικόνες συγκεκριμένων συνθηκών που συναντά και με την εμπειρία συναρμολογείται μια τεράστια νοητική βιβλιοθήκη. Κατά τη διάρκεια μιας οπτικής επιθεώρησης, εάν ο χειριστής παρατηρήσει μια κατάσταση ενδιαφέροντος, ο εγκέφαλος συγκρίνει ό, τι φαίνεται με τις εικόνες στη νοητική βιβλιοθήκη και αναγνωρίζει και προσδιορίζει την κατάσταση. Αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο ένας ασκούμενος χειριστής μπορεί να χάσει ασυνέχειες που ένας έμπειρος χειριστής θα βρει εύκολα. Ο έμπειρος χειριστής έχει μια μεγάλη νοητική βιβλιοθήκη για να καλέσει. Μόλις ένας εκπαιδευόμενος εντοπίσει μια κατάσταση και μάθει τι να αναζητήσει, τότε γίνεται ευκολότερο να βρεθεί αυτός ο τύπος της κατάστασης.

Ο χειριστής πρέπει επίσης να έχει καλή όραση. Ανεξάρτητα από το πόσο καλός είναι ο φωτισμός ή πόσες εμπειρίες έχει ο χειριστής. Εάν η όραση του χειριστή είναι κακή, θα γίνει μια ανεπαρκής επιθεώρηση. Είναι σύνηθες σε πολλές βιομηχανίες οι οπτικοί επιθεωρητές να υποβάλλονται σε ετήσια εξέταση όρασης για οπτική οξύτητα. Καθώς οι περισσότερες οπτικές επιθεωρήσεις πραγματοποιούνται σε κοντινή απόσταση με το εξεταζόμενο εξάρτημα, πραγματοποιείται μια εξέταση κοντά στην όραση. Αυτό γίνεται συνήθως σε απόσταση 300 – 400 mm χρησιμοποιώντας κατάλληλα διαγράμματα ανάγνωσης, τα οποία έχουν λέξεις τυπωμένες με διαφορετικά μεγέθη γραμμάτων. Η οπτική οξύτητα απόστασης μπορεί επίσης να ελεγχθεί αν ο χειριστής έχει αναλάβει να επιθεωρήσει οπτικά τα εξαρτήματα σε απόσταση και μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας διάφορους τύπους μηχανημάτων.

Μια άλλη κοινή εξέταση όρασης είναι για αχρωματοψία – το 10% του αρσενικού πληθυσμού έχει κάποιας μορφής αχρωματοψία. Καθώς ορισμένα καθήκοντα οπτικής επιθεώρησης απαιτούν από τον χειριστή να ψάξει για χρώματα συγκεκριμένων συνθηκών, ένας χειριστής με χρωματική ανεπάρκεια θα μπορούσε να μην επαρκεί για τέτοιου είδους έλεγχο. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να ρίξουμε μια ματιά στο πώς λειτουργεί το μάτι. Η Εικόνα 1 παρακάτω δείχνει την συσχέτιση όρασης και την μεταφορά της πληροφορίας μέσω των οπτικών νεύρων στον εγκέφαλο.

Η οπτική εντύπωση μεταδίδεται από το μάτι στον εγκέφαλο μέσω του συστήματος οπτικών νεύρων. Τα οπτικά νεύρα από το αριστερό και το δεξί μάτι τέμνονται για να αναμειγνύουν τις οπτικές εντυπώσεις σε μία εικόνα. Η ανθρώπινη οπτική αίσθηση είναι εξαιρετικά προηγμένη – είναι σε θέση να ανιχνεύσει το χρώμα, την ένταση του φωτός, την αντίθεση, τις λεπτομέρειες και τις κινήσεις σε 3D. Στην πραγματικότητα είναι ο εγκέφαλος που κάνει το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας.



Εικόνα 1. Όραση και εγκέφαλος

Το μάτι είναι ένα εξαιρετικά εξελιγμένο όργανο, αλλά δεν βλέπει τίποτα το ίδιο. Σχεδιάστηκε για να εστιάζει το φως στον αμφιβληστροειδή, να μετατρέπει το φως σε νευρικές παλμούς και να τους στέλνει στον εγκέφαλο. Ο εγκέφαλος στη συνέχεια επεξεργάζεται αυτές τις πληροφορίες και σχηματίζει τις εικόνες που βλέπουμε. Αυτό μας οδηγεί στην αντίληψη, για το ποια είναι η διαφορά μεταξύ της φυσικής πραγματικότητας και της εικόνας που πιστεύουμε ότι βλέπουμε.

Διαφορετικοί άνθρωποι ερμηνεύουν τις εισερχόμενες από το μάτι πληροφορίες με διαφορετικό τρόπο, οπότε όλοι βλέπουμε την ίδια φυσική σκηνή λίγο διαφορετικά. Η διαφορά της αντίληψης μεταξύ δύο ανθρώπων εξαρτάται από την εκπαίδευση, την εμπειρία και την ψυχική και φυσική κατάσταση των παρατηρητών κατά τη στιγμή της παρατήρησης.

Παράγοντες που επηρεάζουν την καλή όραση και δύναται να μειώσουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα και την οπτική ικανότητα του παρατηρητή είναι η κόπωση, η υγεία, οι οφθαλμικές παθήσεις όπως η αχρωματοψία, η μυωπία κλπ καθώς και η έλλειψη ύπνου, ξεκούρασης, η παρουσία έντονου στρες υπό πίεση χρόνου κλπ (Εικόνα 2). Αυτά τα προβλήματα θα οδηγήσουν σε ανακριβή ερμηνεία των φυσικών δεδομένων. Μια ιδανική επιθεώρηση θα είναι αυτή στην οποία όλοι οι παραπάνω παράγοντες: η κατάρτιση, η εμπειρία, ο φωτισμός και οι περιβαλλοντικές συνθήκες, βελτιστοποιούνται.



Εικόνα 2. Παράγοντες που επηρεάζουν την καλή όραση

3.4.1.5 |Τεχνικές

Σε γενικές γραμμές, ο οπτικός έλεγχος χωρίζεται σε διάφορες τεχνικές προβολής:

- **Απευθείας προβολή** – προβολή ενός αντικειμένου στην άμεση παρουσία του χειριστή. Αυτό μπορεί να γίνει χωρίς τη βοήθεια ή τη χρήση εξοπλισμού, τον οποίο θα εξετάσουμε λεπτομερέστερα αργότερα.
- **Απομακρυσμένη προβολή** – προβολή ενός αντικειμένου που δεν βρίσκεται στην άμεση παρουσία του χειριστή. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο με τη χρήση ειδικού εξοπλισμού και για άλλη μια φορά, θα εξετάσουμε λεπτομερώς τον εξοπλισμό αυτό αργότερα.

3.4.1.6|Εξαρτήματα

Ο οπτικός έλεγχος μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία σε σχεδόν οποιοδήποτε από τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται από τον άνθρωπο μέχρι και στις δομές οργανικής ύλης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εντοπίσει πολλούς διαφορετικούς τύπους επιφανειακών συνθηκών, από ασυνέχειες, όπως διάβρωση ή ρωγμές, μέχρι το αποτέλεσμα κηλίδωσης βαμμένων επιφανειών. Ένας έμπειρος χειριστής θερμικής επεξεργασίας μπορεί ακόμη και να εκτιμήσει τη θερμοκρασία ενός συστατικού από την οπτική εμφάνισή του μόλις θερμανθεί σε πυράκτωση, δηλαδή βαθυκόκκινο κόκκινο χάλυβα στους 550°C.

3.4.1.7|Εξοπλισμός

Ο χειριστής συχνά θα πρέπει να εντοπίσει μικρές ασυνέχειες. Αυτό μπορεί να είναι πολύ δύσκολο με γυμνό μάτι, επομένως μπορεί να απαιτούνται οπτικά βοηθήματα. Εδώ είναι μερικά από τα πιο κοινά οπτικά βοηθήματα:

- **Οι φακοί χειρός** διατίθενται από $1,5\times$ έως $10\times$ μεγέθυνση. Είναι πολύ χρήσιμοι για την μεγέθυνση μικρών λεπτομερειών ώστε να είναι δυνατή η καλύτερη αξιολόγηση. Οι υψηλότερης ισχύος και ποιότητας φακοί είναι πολύπλοκοι: τύποι διπλών ή τριπλών φακών είναι κατασκευασμένοι από διαφορετικούς τύπους οπτικού γυαλιού συνδυασμένους μαζί. Αυτή η σχεδίαση αφαιρεί τα χρωματικά παρεκκλίνοντα φαινόμενα (χρωματική φραγή στα άκρα της εικόνας).
- **Οι μεγεθυντές μέτρησης** ενσωματώνουν μία κλίμακα μέτρησης για να μετρήσουν την κατάσταση της επιφάνειας. Ορισμένοι τύποι μεγεθυντικών φακών ενσωματώνουν έναν μικρό λαμπτήρα με μπαταρία που παρέχει φωτισμό της επιφάνειας δοκιμής. Οι μεγεθυντές Anglepoise έχουν μεγέθυνση έως και 10 φορές και έχουν συχνά ενσωματωμένο κυκλικό σωλήνα φθορισμού για να παρέχουν ομοιόμορφο φωτισμό.
- **Τα μικροσκόπια** έρχονται σε μια μεγάλη ποικιλία μεγεθών μεγέθυνσης. Τα μικροσκόπια χαμηλής ισχύος έχουν συχνά έναν ή δύο στόχους, επιτρέποντας τη μεγέθυνση έως και $40\times$. Τα μεσαίας ισχύος μικροσκόπια μπορούν να έχουν δύο ή περισσότερους στόχους, δίνοντας μεγέθυνση μεταξύ $20\times$ και $100\times$ σε μια ποικιλία σχεδίων. Τα μικροσκόπια υψηλής ισχύος έχουν πολλούς στόχους, συχνά μέχρι έξι, οι οποίοι θα παρέχουν κλίμακα μεγέθυνσης $50\times$ έως $2000\times$. Με μικροσκόπια αυτού του τύπου, απαιτούνται ειδικά προετοιμασμένες επιφάνειες, τμήματα ή αντίγραφα. Αυτά τα υψηλής ισχύος μικροσκόπια έχουν συχνά τη δυνατότητα πόλωσης φωτός, αντίθεσης φάσης και εξετάσεων παρεμβολής. Η πόλωση είναι χρήσιμη για τη μελέτη των περισσότερων υλικών με κατευθυντικές οπτικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένων ινών, κρυστάλλων, φύλλων πλαστικού και υλικών υπό πίεση.
Η αντίθεση φάσης χρησιμοποιείται για την επιθεώρηση διαφανών υλικών με ασυνέχειες του δείκτη διάθλασης, οι οποίες μπορούν να παρατηρηθούν μόνο σε φυσιολογικό μικροσκόπιο. Έχει εκτελεστεί εκτεταμένη εργασία με ζωντανούς ιστούς και κύτταρα με μικροσκόπια αντίθεσης φάσης. Τα μικροσκόπια παρεμβολής χρησιμοποιούν το μήκος κύματος του φωτός για να μετρήσουν το περίγραμμα της επιφάνειας και άλλα χαρακτηριστικά και μπορούν να γίνουν εξαιρετικά ακριβείς μετρήσεις με τον εν λόγω εξοπλισμό.

- Τα **ενδοσκόπια** ακριβείας (όργανα οπτικού ελέγχου οπών) είναι ένα εξαιρετικό κομμάτι του εξοπλισμού για τον έλεγχο του εσωτερικού των δικτύων ή σωλήνων. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για να επιθεωρήσουν τις κάνες τουφεκιών και κανονιών. Ένα παράδειγμα ενδοσκοπίου φαίνεται στην Εικόνα 3.

Η εικόνα μεταφέρεται στο προσοφθάλμιο φακό μέσω του αντικειμενικού φακού και ενεργοποιεί το ρελέ φακών. Ο φωτισμός παρέχεται από ένα ξεχωριστό κιβώτιο φωτισμού και χρησιμοποιεί ένα σύστημα καθοδήγησης φωτός οπτικών ινών.

Τα ενδοσκόπια μπορούν να έχουν διάφορες οπτικές γωνίες: 0° άμεση, 45° πρόσοψη, 90° πλευρική και 110° ρετρό. Πολλά έχουν μεγέθυνση έως $20\times$ και έλεγχο εστίασης. Για να επιτραπεί η πρόσβαση σε πολύ μικρά ανοίγματα, τα ενδοσκόπια είναι φτιαγμένα με διάμετρο 1,75mm. Έχουν μια ενιαία στερεά ίνα για να αντικαταστήσουν το φακό, δίνοντας ένα άπειρο βάθος πεδίου.



Εικόνα 3. Ένα τυπικό ενδοσκόπιο 0° άμεσης οπτικής γωνίας

Μια παρόμοια συσκευή με το άκαμπτο ενδοσκόπιο είναι το εύκαμπτο ενδοσκόπιο. Η διαφορά μεταξύ των δύο τύπων οργάνων είναι ότι το ενδοσκόπιο είναι εύκαμπτο λόγω της χρήσης οπτικών ινών τόσο για τον οδηγό φωτός όσο και για τον οδηγό εικόνας. Ένα τυπικό παράδειγμα παρουσιάζεται παρακάτω στην Εικόνα 4.

Οι δύο οδηγοί (φως και εικόνα) χρησιμοποιούν χιλιάδες πολύ λεπτές ίνες υψηλής ποιότητας οπτικό γυαλί κάθε ίνα έχει επικάλυψη από γυαλί με διαφορετικό δείκτη διάθλασης. Αυτή η επίστρωση λειτουργεί σαν καθρέφτης, επιτρέποντας τη μετάδοση του φωτός κάτω από την ίνα με τη συνολική εσωτερική διαδικασία ανάκλασης. Όσο περισσότερες ίνες υπάρχουν σε μια δέσμη, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα της εικόνας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι ίνες οδηγού εικόνας είναι λεπτότερες από τις ίνες οδηγήσεως φωτός ($9 - 17\mu\text{m}$ για τις ίνες οδηγού εικόνας και $30\mu\text{m}$ για τις ίνες οδηγήσεως φωτός).

Οι ίνες οδηγού εικόνας πρέπει επίσης να βρίσκονται σε συνεκτική δέσμη. κάθε ίνα πρέπει να ευθυγραμμιστεί σε όμοια θέση σε κάθε άκρο της δέσμης. Η εσωτερική ανάκλαση του φωτός κάτω από κάθε ίνα λειτουργεί ακόμη και αν η ίνα λυγίσει, δίδοντας στο ενδοσκόπιο την ευελιξία της και επιτρέποντας την εσωτερική επιθεώρηση σύνθετων σωλήνων ή μηχανημάτων.



Εικόνα 4. Ένα τυπικό ενδοσκόπιο

Για να βελτιωθεί η ποιότητα της εικόνας, τα οπτικά συστήματα των ενδοσκοπίων είναι δυνατό να αντικατασταθούν από μια μικροσκοπική βιντεοκάμερα, η οποία μπορεί να περιέχει ένα σωλήνα εικόνας όπως ένα σωλήνα vidicon. Ένας σωλήνας vidicon χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων για τη σάρωση ενός φωτο – αγωγίμου στόχου, γνωστού ως αισθητήρα φωτός. εναλλακτικά, η κάμερα μπορεί να περιέχει μια συσκευή απεικόνισης σε στερεή κατάσταση, όπως μια διάταξη συζευγμένη με φορτίο (charge – coupled) ή μια συσκευή με εμβόλιμη φόρτιση (charge – injected).

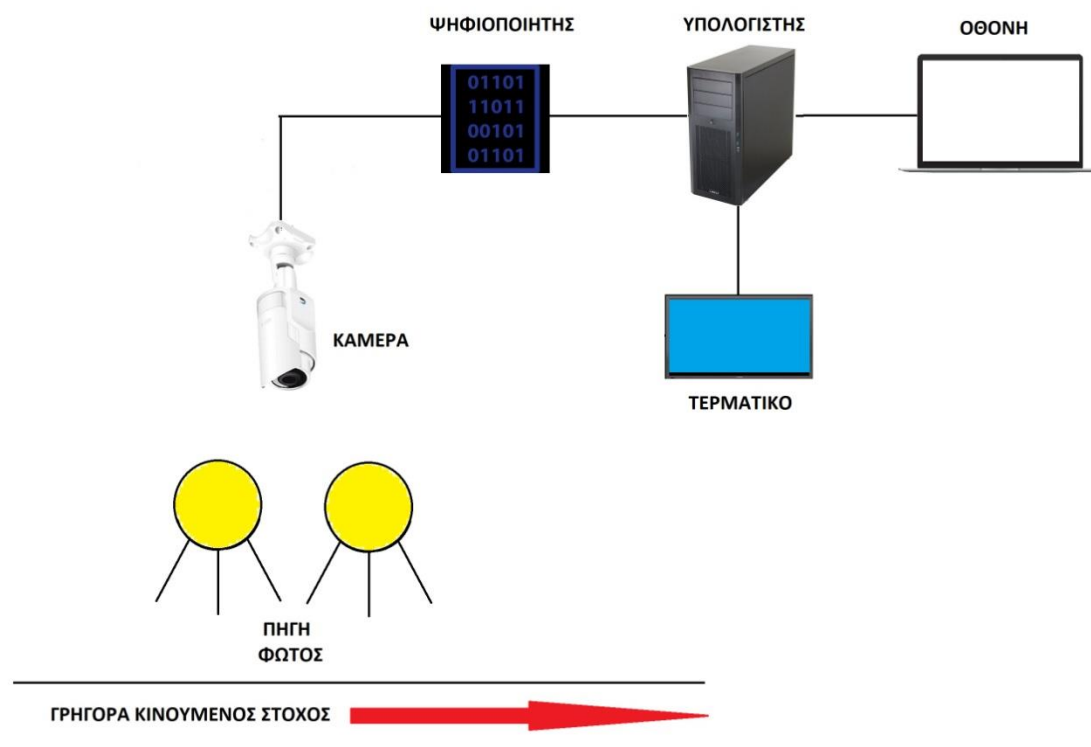
Η συσκευή συζευγμένου φορτίου λειτουργεί χρησιμοποιώντας το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, στο οποίο παράγονται ηλεκτρόνια σε μια περιοχή πυριτίου από προσπίπτοντα φωτόνια. όσο περισσότερα φωτόνια επέρχονται στο πυρίτιο, τόσο περισσότερα ηλεκτρόνια παράγονται. Κάθε συσκευή συζευγμένη με φορτίο έχει πολλές περιοχές πυριτίου, όπου κάθε ηλεκτρόνιο παράγεται υπό πρόσκρουση φωτονίων. Κάθε περιοχή είναι ένα μεμονωμένο στοιχείο εικόνας ή εικονοστοιχείο. Αυτά τα εικονοστοιχεία είναι διατεταγμένα σε ένα σχηματισμό πίνακα, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των εικονοστοιχείων στον πίνακα, τόσο καλύτερη είναι η ποιότητα της εικόνας.

Η εικόνα βίντεο δημιουργείται με την ανάγνωση του ποσού της φόρτισης που προκαλείται από τα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται μέσα σε κάθε εικονοστοιχείο. Η εικόνα βίντεο μπορεί να καταγραφεί και να αξιολογηθεί αργότερα.

Μια βιντεοκάμερα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως μέρος ενός συστήματος οπτικού ελέγχου μιας μηχανής, το οποίο μπορεί να αποκτήσει δεδομένα εικόνας, να επεξεργαστεί και να αναλύσει αυτά τα δεδομένα και να κάνει μια αξιολόγηση αυτόματα και πολύ γρήγορα. Συστήματα

αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται συχνά για την επιθεώρηση στόχων υψηλών ταχυτήτων, όπως είναι το μέταλλο σε ένα ελασματοουργείο.

Το σύστημα τυπικά αποτελείται από μια πηγή φωτός, μια κάμερα, έναν ψηφιοποιητή, έναν υπολογιστή και μια οθόνη, όπως φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5. Εγκατάσταση συστήματος οπτικού ελέγχου

Τα συστήματα οπτικού ελέγχου επεξεργάζονται τυπικά μια εικόνα με έναν υπολογιστή χρησιμοποιώντας τέσσερα βήματα: Βελτίωση εικόνας, τμηματοποίηση εικόνας, εξαγωγή χαρακτηριστικών και ταξινόμηση. Οι βιντεοκάμερες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε οχήματα με τηλεχειρισμό. Αυτός ο τύπος εξοπλισμού μπορεί να επιθεωρήσει σωλήνες διαμέτρου 10 έως 30cm. Π.χ. ένα απομακρυσμένο κρεμαστό μπρελόκ χειρός χρησιμοποιείται από τον χειριστή για να κατευθύνει έναν ερπυστριοφόρο γερανό γύρω από στροφές ή εμπόδια και μπορεί να ελέγξει την εστίαση, τον φωτισμό και την ταχύτητα του.

3.4.1.8|Ειδικές εφαρμογές

Τα ενδοσκόπια – καταγραφείς βίντεο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολλές εφαρμογές που απαιτούν απομακρυσμένους οπτικούς ελέγχους, συμπεριλαμβανομένων βιομηχανιών αεροδιαστημικής και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κατασκευής κινητήρων και θαλάσσιων επιθεωρήσεων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστήματα με ενδοσκόπια – βίντεο για την

επιβεβαίωση αμφισβητήσιμων αποτελεσμάτων άλλων τεχνικών ΜΚΕ, για παράδειγμα μια ένδειξη μπορεί να εντοπιστεί με επιθεώρηση υπερήχων και στη συνέχεια να απεικονιστεί με το ενδοσκόπιο – βίντεο.

Μια σημαντική χρήση του ενδοσκόπιου – βίντεο είναι να επιτρέψει σε αρκετούς χειριστές ή μηχανικούς να δουν ταυτόχρονα μια οθόνη. Είναι επίσης πολύ χρήσιμα για εφαρμογές που απαιτούν κριτική αξιολόγηση λεπτομερειών ή μετρήσεων, όπως κατά τον έλεγχο επιχρισμάτων και σφραγίδων, τον εντοπισμό της διάβρωσης και τη διάβρωση των σημείων συγκόλλησης σωλήνων. Στους σωλήνες λέβητα, οι χημικές αποθέσεις και οι κοιλότητες οξυγόνου μπορούν να τοποθετηθούν σε πρώιμο στάδιο και έτσι να αποτρέψουν την διάβρωση του σωλήνα.

Ο απομακρυσμένος έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί σε χώρους που θα μπορούσαν να είναι επικίνδυνοι για τους χειριστές, όπως εσωτερικοί φούρνοι ή περιοχές υψηλής ακτινοβολίας πυρηνικών σταθμών, όπου πραγματοποιείται εμπεριστατωμένη οπτική δοκιμή κατά τη διάρκεια της παύσης λειτουργίας της εγκατάστασης, προκειμένου να δοκιμαστούν πολλά κρίσιμα εξαρτήματα υπό συνθήκες υψηλής πίεσης, όπως οι συνδέσεις ακροφυσίων με το δοχείο και οι επενδύσεις στα ακροφύσια.

Ένας άλλος σημαντικός τομέας οπτικής επιθεώρησης είναι στον κλάδο της αεροδιαστημικής, όπου η απομακρυσμένη οπτική επιθεώρηση εκτελείται σε διαφορετικές απρόσιτες περιοχές της ατράκτου, όπου μπορεί να προκύψουν προβλήματα στην διάρκεια λειτουργίας όπως ρωγμές κόπωσης ή διάβρωση σε συστατικά ζωτικής σημασίας για την ακεραιότητα του αεροσκάφους, της ατράκτου στα φτερά.

Ο κρίσιμος οπτικός έλεγχος των κοίλων πτερυγίων ελικοπτέρου πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας βίντεο – βροχογράφους, καθώς και το εσωτερικό επιφανειών των κινητήρων και των πτερυγίων.

Η χημική βιομηχανία κάνει ευρεία χρήση του οπτικού ελέγχου για τους κλιβάνους δοκιμής, τους θαλάμους καύσης, τους εναλλάκτες θερμότητας, τα δοχεία πίεσης και πολλές άλλες περιοχές εντός του εργοστασίου.

Στην αυτοκινητοβιομηχανία, μπορεί να αξιολογηθεί η εσωτερική κατάσταση των κινητήρων, όπως οι εναποθέσεις άνθρακα στις βαλβίδες, τα σπασμένα δόντια των γραναζιών μετάδοσης και η φθορά των εργαλείων.

3.4.1.9|Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα του οπτικού ελέγχου

- Μπορεί να είναι ένας πολύ απλός αλλά αποτελεσματικός ως προς την εκτέλεση έλεγχος και συχνά δεν χρειάζεται ακριβό εξοπλισμό.

- Οι έμπειροι χειριστές και ο προηγμένος εξοπλισμός καθιστούν δυνατό τον πολύ ευαίσθητο οπτικό έλεγχο.
- Μπορούν να εντοπιστούν πολλές και διαφορετικές ασυνέχειες.
- Οι χρόνοι εκπαίδευσης και εμπειρίας του χειριστή μπορεί να είναι σύντομοι.
- Πρακτικά οποιοδήποτε στοιχείο μπορεί να εξεταστεί σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνεια του.
- Δίνει την δυνατότητα εύρεσης ασυνεχειών πριν την εφαρμογή άλλων μεθόδων επειδή είναι εύκολος, γρήγορος και απλός.

Μειονεκτήματα του οπτικού ελέγχου

- Πολλές μεταβλητές μπορούν να οδηγήσουν σε απώλειες ασυνεχειών.
- Στην χειρότερη περίπτωση, στηρίζεται εξολοκλήρου στον ανθρώπινο παράγοντα.
- Πολλοί οργανισμοί δίνουν ελάχιστη προσοχή στην κατάλληλη κατάρτιση των επιθεωρητών,
- Δεν μπορούν να παρατηρηθούν ασυνέχειες κάτω από την επιφάνεια.

Συνοπτικά

Ο οπτικός έλεγχος μπορεί συχνά να είναι μια φθηνή, εύκολη και αξιόπιστη επιλογή συγκριτικά με άλλες πιο ακριβές μεθόδους ΜΚΕ, παρέχοντας παράλληλα ένα καλό επίπεδο ευαισθησίας. Μπορεί να είναι η μόνη μέθοδος, όταν χρησιμοποιούνται τεχνικές απομακρυσμένης παρακολούθησης. Είναι σε θέση να επιθεωρήσει την κατάσταση των εσωτερικών συνιστωσών και είναι πιθανώς η πιο διαδεδομένη μορφή ΜΚΕ, με άλλες τεχνικές να απαιτούν ακόμη επιθεωρητή να διενεργήσει οπτική επιθεώρηση.

3.4.2|Έλεγχος με δινορρέυματα – Eddy – Current Testing (ECT)

Τα δινορρέυματα είναι μια εξελιγμένη μέθοδος ΜΚΕ, στην οποία εισάγονται ηλεκτρικά δινορρέυματα σε ένα στοιχείο, επιτρέποντας την ανίχνευση επιφανειακών και ελαφρώς υποεπιφανειακών ασυνεχειών.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

3.4.2.1|Βασικές αρχές

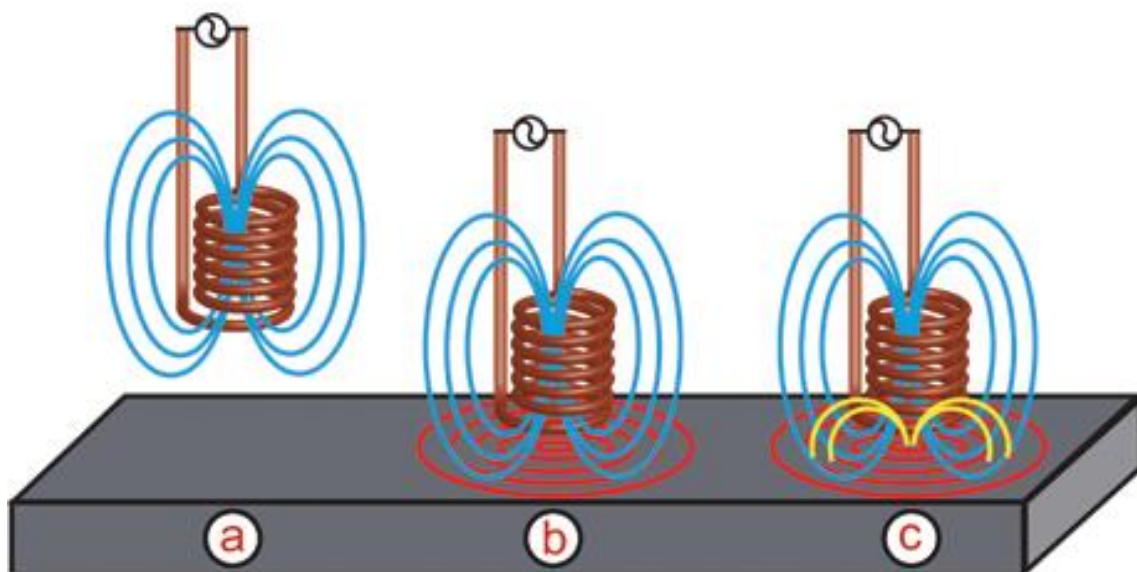
Ο Michael Faraday, ένας Άγγλος επιστήμονας, ανακάλυψε για πρώτη φορά τα δινορρέυματα το 1832, ενώ πειραματίστηκε με μερικά συρμάτινα πηνία και μια μπαταρία. Παρατήρησε ότι όταν συνδέει ένα από τα πηνία στη μπαταρία, ένα ηλεκτρικό ρεύμα κυκλοφορεί επίσης μέσω ενός δεύτερου πηνίου, το οποίο ήταν τοποθετημένο κοντά στο πρώτο, εν τούτοις μόνο για μια στιγμή. Όταν αποσύνδεσε την μπαταρία, παρατήρησε ότι υπήρχε ρεύμα στο δεύτερο πηνίο, και πάλι μόνο

για μια στιγμή. Ωστόσο, το παράξενο ήταν ότι το ρεύμα διέτρεχε προς την αντίθετη κατεύθυνση από την πρώτη. Το ρεύμα στο δεύτερο πηνίο ήταν στην πραγματικότητα ένα ρεύμα που προκλήθηκε από το πρώτο πηνίο.

Ο Faraday κατάφερε να παράγει ένα ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα δευτερεύον πηνίο μεταβάλλοντας το μαγνητικό πεδίο που περιβάλλει ένα πρωτεύον πηνίο. Η μαγνητική θεωρία αποτελεί ένα μεγάλο μέρος της θεωρίας των δινορρευμάτων – η βάση της οποίας είναι η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Τα δινορρεύματα μπορούν να σχηματιστούν μόνο όταν χρησιμοποιείται εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), καθώς το ρεύμα στο κύριο πηνίο πρέπει να μεταβάλλεται διαρκώς, δηλαδή από μηδέν μέχρι το μέγιστο θετικό και πίσω στο μηδέν και πάλι από το μηδέν μέχρι το μέγιστο αρνητικό και πίσω στο μηδέν, το οποίο είναι γνωστό ως ημιτονοειδές κύμα.



Εικόνα 6. Ένα πρωτεύον πηνίο που προκαλεί δινορρεύματα σε ένα στοιχείο



Εικόνα 7. Δημιουργία δινορρευματων στην επιφάνεια αγώγιμου υλικού

Ο έλεγχος με δινορρεύματα χρησιμοποιεί αυτή τη βάση χρησιμοποιώντας ένα πρωτεύον πηνίο για την επαγωγή δινορρευμάτων στο υπό δοκιμή συστατικό στοιχείο. Για να συμβεί αυτό, το υπό δοκιμή στοιχείο πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγωγίμο. Τα μέταλλα είναι καλοί ηλεκτρικοί αγωγοί αλλά η αγωγιμότητα διαφορετικών μετάλλων ποικίλλει σημαντικά. Όσο υψηλότερη είναι η αγωγιμότητα, τόσο περισσότερο ρεύμα προκαλείται στο μέταλλο (Εικόνες 6 και 7).

Όταν χρησιμοποιούμε δινορρεύματα, μετράται η μεταβολή της αντίστασης. Η σύνθετη αντίσταση είναι ένας συνδυασμός δύο ιδιοτήτων: αντίσταση στο σύρμα του πηνίου και η επαγωγική αντίδραση του πηνίου (αυτό είναι το αποτέλεσμα που προκαλείται από το εναλλασσόμενο ρεύμα που υστερεί της εναλλασσόμενης τάσης). Η αντίσταση δεν θα ποικίλει πολύ, αλλά υπάρχουν μεταβλητές που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την επαγωγική αντίδραση:

- Ο αριθμός των τυλιγμάτων ενός πηνίου
- Το μέγεθος του πηνίου
- Η ποσότητα ρεύματος στο πηνίο
- Η συχνότητα του ρεύματος στο πηνίο (συχνότητα είναι ο αριθμός των κύκλων ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή τα ημιτονοειδή κύματα ανά δευτερόλεπτο)

Συνοψίζοντας, εάν τοποθετηθεί ένα πρωτεύον πηνίο κοντά σε ένα ηλεκτρικά αγωγίμο δείγμα μετάλλου, τα δινορρεύματα επάγονται άμεσα στο δείγμα. Τα δινορρεύματα θα παράξουν ένα δευτερεύον μαγνητικό πεδίο στο δείγμα και σε περίπτωση που μεταβληθεί αυτό το δευτερεύον μαγνητικό πεδίο (μπορεί να υπάρξει μια παρεμβολή όπως μια επιφανειακή ρωγμή), τότε θα αλλάξει και η αντίσταση του πηνίου. Αυτές οι αλλαγές στη σύνθετη αντίσταση μπορούν να ανιχνευθούν και να μετρηθούν.

Το μαγνητικό πεδίο που περιβάλλει το πηνίο ελέγχου είναι το ισχυρότερο δυνατό όταν βρίσκεται δίπλα στο πηνίο και ασθενεί σταδιακά όσο απομακρύνεται. Συνεπώς, το βάθος διείσδυσης των δινορρευμάτων είναι περιορισμένο.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τη χρήση των δινορρευμάτων είναι η διαπερατότητα. Ορισμένα αγωγίμα υλικά είναι διαπερατά, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να μαγνητιστούν. Αν τα υλικά είναι σιδηρομαγνητικά, δηλαδή εξαιρετικά διαπερατά, αυτό θα οδηγήσει σε ασυμφωνίες στα αποτελέσματα των δοκιμών. Αυτό όμως μπορεί να ξεπεραστεί με τον μαγνητικό κορεσμό του εξαρτήματος.

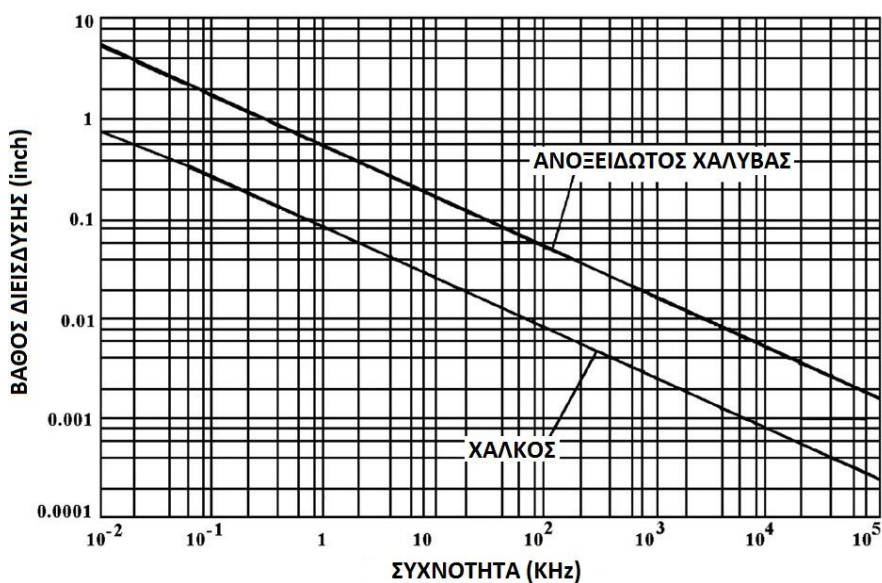
Προηγουμένως, έχουμε δηλώσει ότι η αγωγιμότητα ενός υλικού είναι ένας σημαντικός παράγοντας στον έλεγχο με δινορρεύματα και όσο υψηλότερη είναι η αγωγιμότητα, τόσο περισσότερο το επαγόμενο ρεύμα.

Η αγωγιμότητα ενός υλικού μετριέται με τη χρήση του Διεθνούς Προδιαγραφής Ανόπτησης Χαλκού (International Annealed Copper Standard – IACS), το οποίο δίνει στον μη κεκραμένο ανοπτημένο χαλκό αριθμό 100. Όλα τα άλλα υλικά μετρώνται συγκριτικά με αυτό (Πίνακας 3).

Μέταλλο	% IACS
Ασήμι	105
Χαλκός	100
Χρυσός	70
Αλουμίνιο	61
Νάτριο	41
Μαγνήσιο	37
Βολφράμιο	30.5
Ψευδάργυρος	29
Σίδηρο	18
Μόλυβδος	8.4
Ζηρκόνιο	3.4
Τιτάνιο	3.1
Ανοξείδωτο ατσάλι	2.5

Πίνακας 3. Αγωγιμότητα των μετάλλων

Ωστόσο, εξαιτίας αυτού, παράγει ισχυρότερο δευτερεύον μαγνητικό πεδίο το οποίο αντιτίθεται περισσότερο στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου. Αυτή η ισχυρή αντίθεση περιορίζει το βάθος διείσδυσης και επομένως όσο υψηλότερη είναι η αγωγιμότητα ή η διαπερατότητα, τόσο μικρότερη είναι η διείσδυση.



Εικόνα 8. Γράφημα συχνότητας έναντι βάθους διείσδυσης σε γραμμές από ανοξείδωτο χάλυβα και χαλκό

Εάν οποιοδήποτε από τα παραπάνω μέταλλα είναι κράμα, η αγωγιμότητα μπορεί να αλλάξει δραματικά. (Η μόνη εξαίρεση είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας, ο οποίος είναι ήδη κράμα.)

Το βάθος της διείσδυσης μπορεί να αυξηθεί μειώνοντας τη συχνότητα του πηνίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πιο αργή αλλαγή του μαγνητικού πεδίου και έτσι έχει λιγότερη αντίθεση από το δευτερεύον μαγνητικό πεδίο (Εικόνα 8).

Οι συνήθεις συχνότητες που χρησιμοποιούνται στις δοκιμές με δινορρεύματα είναι γύρω στην περιοχή των 200Hz έως 6MHz. Υπάρχουν τρεις άλλοι όροι που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο δινορρευμάτων που πρέπει να αναλυθούν: Ανύψωσης (Lift – off), Παράγοντας Πληρώσεως (Fill factor) και Επίδρασης Ακμής (Edge effect).

Ανύψωση

Καθώς το πηνίο δινορρευμάτων είναι ανυψωμένο μακριά από το υπό δοκιμή τεμάχιο, όλο και λιγότερη μαγνητική ροή φθάνει στο τεμάχιο, μέχρις ότου σε κάποια απόσταση η μαγνητική ροή που δημιουργείται από το πηνίο δεν θα φτάσει καθόλου στο τεμάχιο – αυτό ονομάζεται απόσταση ανύψωσης.

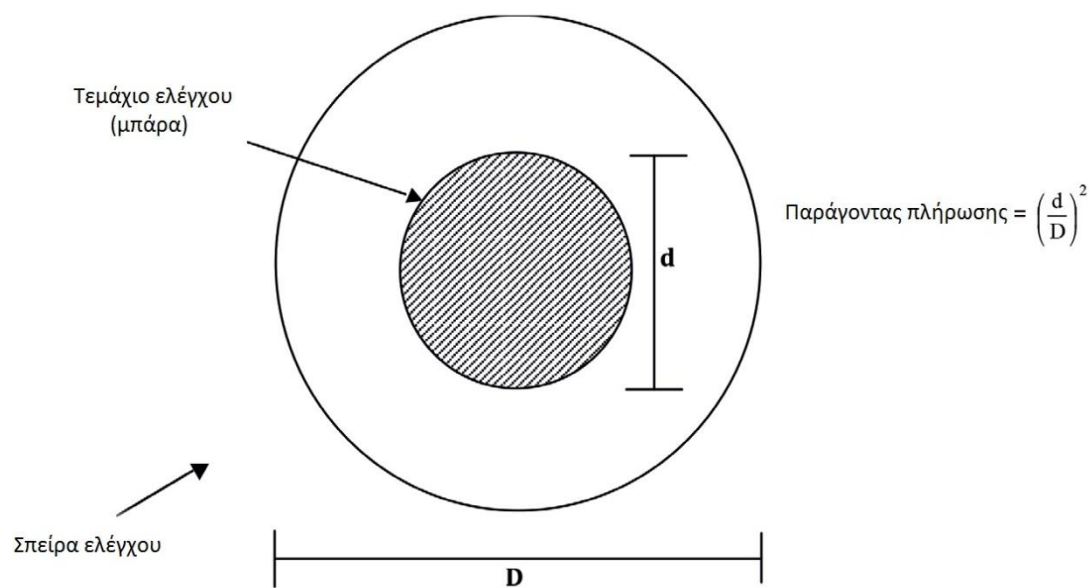
Η απαίτηση να είναι σταθερός ο χώρος μεταξύ του δοκιμαστικού πηνίου και του υπό δοκιμή στοιχείου είναι ένα από τα προβλήματα του ελέγχου πολύπλοκων δειγμάτων. Παρόλο που η ανύψωση είναι ενοχλητική σε πολλές εφαρμογές αιχμής, μπορεί επίσης να είναι πολύ χρήσιμη σε άλλες. Για παράδειγμα, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν παραλλαγές στην ανύψωση για να μετρηθεί το πάχος των μη αγωγικών επικαλύψεων.

Παράγοντας πλήρωσης

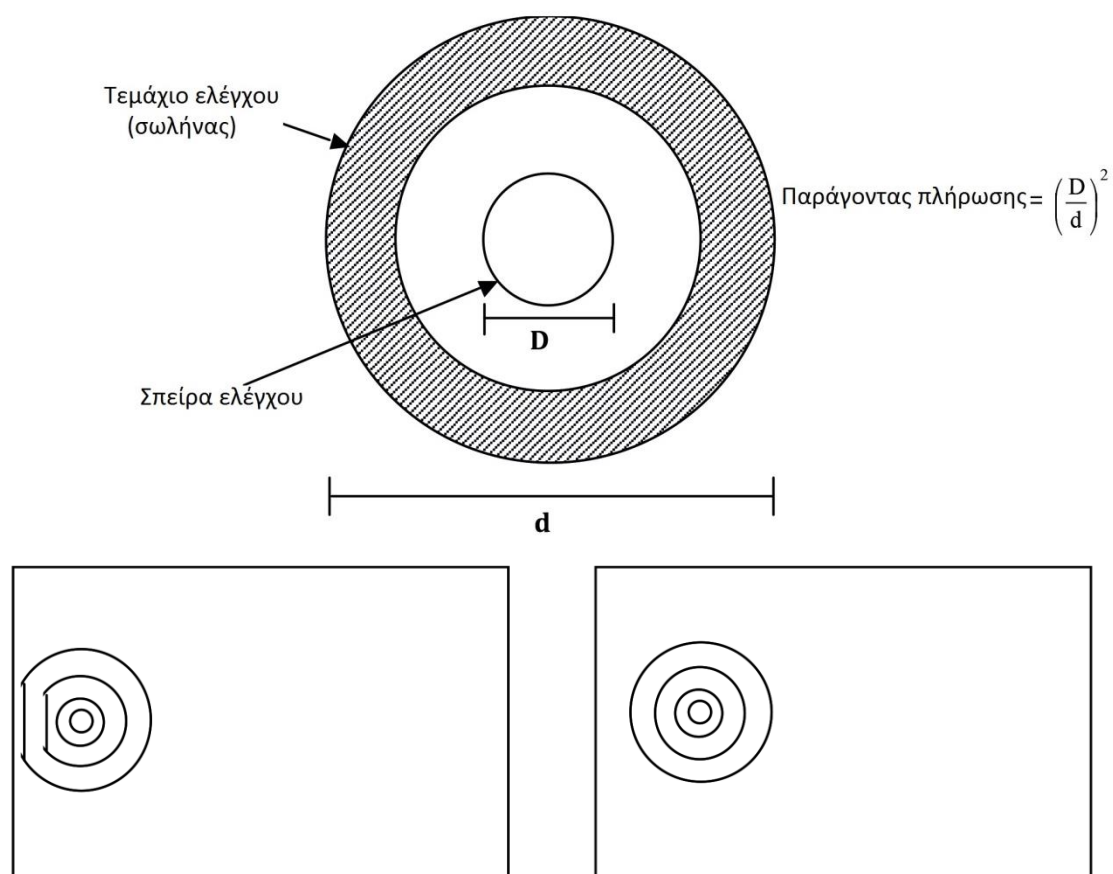
Αυτός είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται με περιμετρικά και εσωτερικά πηνία και βασίζεται στο πόσο καλά το εξεταζόμενο εξάρτημα γεμίζει το περιστρεφόμενο πηνίο ή πόσο καλά το εσωτερικό πηνίο γεμίζει το κοίλο εξάρτημα που ελέγχει. Και πάλι, αυτό μπορεί να προκαλέσει τόσο προβλήματα όσο και πλεονεκτήματα (Εικόνες 9 και 10).

Επίδραση ακμής

Καθώς ένα πηνίο ελέγχου προσεγγίζει την άκρη ενός υπό επιθεώρηση εξαρτήματος, τα δινορρεύματα παραμορφώνονται επειδή δεν μπορούν να ρέυσουν πέρα από τις άκρες του εξαρτήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια μη σχετική ένδειξη που είναι γνωστή ως η επίδραση ακμής – (βλ. Εικόνα 10). Αυτό το φαινόμενο πρέπει να αποφευχθεί και για να επιθεωρηθεί πιο κοντά η ακμή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πηνίο μικρότερης διαμέτρου.



Εικόνα 9. Περιστρεφόμενο πηνίο



Εικόνα 10. Επίδραση ακμής

Άλλες αλλαγές στο υλικό μπορεί να οδηγήσουν σε αλλαγές αγωγιμότητας και συνεπώς θα επηρεάσουν τις δοκιμές με δινορρεύματα. Έχουμε ήδη αναφέρει το κράμα ενός μετάλλου (δηλαδή

προσθέτοντας ένα ή περισσότερα διαφορετικά μέταλλα για την παραγωγή κράματος του βασικού μετάλλου), αλλά υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που μπορούν να αλλάξουν την αγωγιμότητα:

- Αλλαγές στην σκληρότητα του μετάλλου λόγω θερμικής επεξεργασίας.
- Αλλαγές στη θερμοκρασία του μετάλλου.
- Υπολειπόμενες καταπονήσεις στο υλικό.
- Το υλικό να είναι επενδυμένο με διαφορετικό αγώγιμο υλικό.

Όλοι αυτοί οι παράγοντες θα αλλάξουν την αγωγιμότητα του μετάλλου και συνεπώς τα αποτελέσματα της δοκιμής με δινορρεύματα.

3.4.2.2|Εξοπλισμός

Τα πηνία δινορρεύματος βασικά αποτελούνται από περιστρεφόμενα πηνία, εσωτερικά (ή μπομπίνα) πηνία, πηνία ανιχνευτών (επιφανειακά πηνία) και ανιχνευτές συστοιχίας. Το υπό δοκιμή εξάρτημα διέρχεται από ένα περιστρεφόμενο πηνίο, το οποίο έχει προφανώς μεγαλύτερη εξωτερική διάμετρο από το τμήμα. Συνήθως, οι ράβδοι, τα σύρματα, οι σωλήνες κ.λπ. δοκιμάζονται με περιστρεφόμενα πηνία. Τροφοδοτούνται μέσω του πηνίου σε υψηλή ταχύτητα καθώς επιθεωρείται ταυτόχρονα η διατομή.

Δυσκολίες στον εντοπισμό των περιφερικών ασυνεπειών. Ωστόσο, μπορούν να ανιχνευθούν διαμήκεις ασυνέχειες και μεταβολές εξωτερικής διαμέτρου (λόγω του μεταβαλλόμενου παράγοντα πλήρωσης). Όπως μπορείτε να φανταστείτε, είναι απαραίτητο το ακριβές κεντράρισμα.

Τα εσωτερικά πηνία χρησιμοποιούνται για την επιθεώρηση της εσωτερικής διάμετρος των σωληνοειδών αντικειμένων. Αυτά θα πρέπει να εξακολουθούν να κεντράρονται με ακρίβεια και να λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο με τα περιστρεφόμενα πηνία.

Τα πηνία ανιχνευτών, που μερικές φορές ονομάζονται επιφανειακά πηνία, προσαρμόζονται σε έναν ανιχνευτή, ο οποίος σαρώνει την επιφάνεια του δοκιμίου με παρόμοιο τρόπο με έναν ανιχνευτή υπερήχων. Οι σπείρες ανίχνευσης είναι πολύ ευαίσθητες για μικρές ασυνέχειες και μπορούν να διαμορφωθούν για να ταιριάζουν σε ακανόνιστα σχήματα. Ωστόσο, ένα μειονέκτημα είναι η αργή ταχύτητα σάρωσης και το γεγονός ότι μόνο μια μικρή περιοχή μπορεί να δοκιμαστεί, σε αντίθεση με τα περιμετρικά και τα εσωτερικά πηνία.

Οι πηνία συστοιχιών χρησιμοποιούν πολλά πηνία του ίδιου τύπου για να ανιχνεύουν μεγαλύτερες περιοχές πιο γρήγορα. Οι πληροφορίες από κάθε ανιχνευτή συλλέγονται από έναν υπολογιστή, ο οποίος αναμεταδίδει τις πληροφορίες μαζί δίνοντας δισδιάστατα δεδομένα επιθεώρησης. Τα πηνία συστοιχιών χρησιμοποιούνται συχνά σε αυτοματοποιημένες επιθεωρήσεις για τη μεγιστοποίηση της ταχύτητας και της ακρίβειας της απόκτησης δεδομένων.

Ο τύπος πηνίου που χρησιμοποιείται εξαρτάται από το σχήμα και το μέγεθος του εξαρτήματος και από τα ελαττώματα για τα οποία ελέγχεται. **Υπάρχουν τρεις κύριες παραλλαγές με κάθε έναν από τους τέσσερις τύπους πηνίων: απόλυτη, διαφορική και αντανάκλαση (μετάδοση – λήψη).**

Τα απόλυτα πηνία αποτελούνται από ένα μόνο πηνίο που δεν κάνει αναφορά σε άλλο κανένα άλλο.

Ένα διαφορικό πηνίο αποτελείται από δύο ή περισσότερα πηνία συνδεδεμένα και είτε συγκρίνει μία περιοχή του αντικειμένου δοκιμής με ένα άλλο, είτε συγκρίνει μια περιοχή ενός αντικειμένου δοκιμής με μια εξωτερική αναφορά.

Τα πηνία αντανάκλασης χρησιμοποιούν ένα πηνίο για να διεγείρουν το υπό δοκιμή εξάρτημα με δινορρεύματα και ένα ξεχωριστό πηνίο για να ανιχνεύσουν τις αλλαγές που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Το πηνίο δινορρευσμάτων είναι συνδεδεμένο μία μονάδα ή ένα σύνολο το οποίο αποτελείται από ταλαντωτή, γέφυρα, ενισχυτή και οθόνη. Υπάρχουν διάφορες ποικιλίες απεικόνισης, οι οποίες θα μπορούσαν να είναι:

- Ένας άμεσος μετρητής με δείκτη.
- Ένας μετρητής με έναν ελεγχόμενη – φάσης ανορθωτή
- Ένας σωλήνας καθοδικών ακτίνων (CRT) είτε με αναπαράσταση σάρωσης A είτε με B, flyin dot ή έλλειψη
- Μία μέθοδος slit time
- Χάρτες διαγράμμισης
- Ο πλέον σύγχρονος εξοπλισμός είναι ένα πλήρες επίπεδο σύνθετης αντίστασης με οθόνη LCD ή ηλεκτροφωταύγεια.

3.4.2.3|Ειδικά παραδείγματα

Ο έλεγχος με δινορρεύματα χρησιμοποιείται σε τέσσερις βασικούς τομείς:

1. Έλεγχος πάχους
2. Ταξινόμηση κράματος και έλεγχος αγωγιμότητας
3. Ανίχνευση ρωγμών
4. Διαστασιολογική μέτρηση

1. Έλεγχος πάχους

Στον έλεγχο πάχους, τα δινορρεύματα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του πάχους ενός γνωστού υλικού χρησιμοποιώντας δείγματα αναφοράς και γνωρίζοντας το βάθος διείσδυσης των δινορρευσμάτων. Προφανώς, μόνο τα λεπτά τμήματα μπορούν να μετρηθούν με αυτό τον τρόπο (γνωστά ως φύλλα). Το πάχος των μη αγωγικών επικαλύψεων μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας

το φαινόμενο ανύψωσης των δινορρευμάτων. Τέλος, το πάχος μιας αγωγίμης επικάλυψης σε μια αγωγίμη βάση μπορεί επίσης να μετρηθεί, εφόσον τα δύο υλικά έχουν διαφορετικές αγωγιμότητες.

2. Ταξινόμηση κράματος και έλεγχος αγωγιμότητας

Η ταξινόμηση κράματος ή η μέτρηση της αγωγιμότητας μπορούν να πραγματοποιηθούν με τα δινορρεύματα χρησιμοποιώντας γνωστά σημεία αναφοράς ως πρότυπα βαθμονόμησης. Καθώς διαφορετικά μέταλλα ή κράματα του ίδιου υλικού έχουν διαφορετικές αγωγιμότητες όταν αναμιγνύονται, μπορούν να διαχωριστούν με τη χρήση δινορρευμάτων για να εντοπιστούν οι διαφορετικές αγωγιμότητες.

Μπορούμε να μετρήσουμε τις αγωγιμότητες ορισμένων υλικών και επίσης να εντοπίσουμε αλλαγές στη σκληρότητα, τη θερμική επεξεργασία και τη μικροδομή, επειδή όλα αυτά επηρεάζουν την αγωγιμότητα του μετάλλου. Ένα παράδειγμα αυτού είναι το βάθος της σκλήρυνσης και η παρουσία μαλακών κηλίδων στον σκληρυνμένο με κατακρήμνιση χάλυβα λόγω κακοτεχνιών κατά την επεξεργασία.

3. Ανίχνευση ρωγμών

Οι ρωγμές, οι κοιλότητες και η διάβρωση μπορούν να ανιχνευθούν με τη χρήση δινορρευμάτων, καθώς όλα αυτά θα διακόψουν τα δινορρεύματα και θα αλλάξουν τη σύνθετη αντίσταση. Αυτό θα εμφανιστεί στην οθόνη ως ένδειξη. Τα τεμάχια αναφοράς τα οποία περιέχουν τεχνητές ασυνέχειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αναφορές βαθμονόμησης. Τέλος, η ικανότητα του χειριστή είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την σωστή αξιολόγηση αυτών των ενδείξεων.

4. Διαστασιολογική μέτρηση

Η διαστασιολογική μέτρηση των κανονικών σχημάτων είναι δυνατή με τη χρήση δινορρευμάτων – ειδικά μπαρών, ράβδων, συρμάτων και σωλήνων. Αυτά μπορούν να ελέγξουν τις εξωτερικές διαστάσεις για παραμορφώσεις χρησιμοποιώντας τον συντελεστή πληρώσεως των δινορρευμάτων, δηλαδή αν η εξωτερική διάμετρος κατά μήκος μιας ράβδου αυξάνεται ή μειώνεται σταδιακά ή ξαφνικά, τότε ο παράγοντας πλήρωσης θα αλλάξει και θα ανιχνευθεί.

3.4.2.4|Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα χρήσης δινορρευμάτων

- Τα δινορρεύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό και τη μέτρηση εύρους φυσικών ιδιοτήτων.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως διαδικασία αυτοματοποιημένου ελέγχου υψηλής ταχύτητας σε ορισμένες περιπτώσεις, δηλαδή σε περιστρεφόμενα πηνία.

- Τα αποτελέσματα μπορούν να διατηρηθούν ως μόνιμες εγγραφές σε συστήματα αποθήκευσης.
- Τα αποτελέσματα μπορούν να εμφανιστούν με πολλούς τρόπους.
- Οι με δινορρεύματα παρέχουν εξαιρετική αναπαραγωγικότητα των αποτελεσμάτων.
- Η καταστολή ανεπιθύμητων σημάτων είναι δυνατή με τον εξοπλισμό ελέγχου δινορρευμάτων.
- Τα δινορρεύματα είναι πολύ ευαίσθητα στις μικρές επιφανειακές ρωγμές, όταν χρησιμοποιείται ο σωστός εξοπλισμός.
- Οι τρέχουσες δοκιμές δεν απαιτούν συσχέτιση

Μειονεκτήματα χρήσης δινορρευμάτων

- Τα δινορρεύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε ηλεκτρικά αγωγά υλικά.
- Η διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δίνει ασυνεπείς και ψευδείς ενδείξεις.
- Το βάθος της διείσδυσης είναι πολύ περιορισμένο λόγω του επιφανειακού αποτελέσματος των πεδίων εναλλασσόμενου ρεύματος AC.
- Μόνο τα πεδία εναλλασσόμενου ρεύματος μπορούν να δημιουργήσουν δινορρεύματα.
- Εξαρτώνται από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται, με συνέπεια ορισμένα χαρακτηριστικά να μην μπορούν να ανιχνευθούν, συνήθως όταν η ένδειξη είναι σταδιακή ή μια απότομη αλλαγή και εάν ο εξοπλισμός έχει ρυθμιστεί για να μετρήσει μια τέτοια αλλαγή.
- Όταν χρησιμοποιούνται περιστρεφόμενα ή εσωτερικά πηνία, το τμήμα ή το πηνίο πρέπει να είναι κεντραρισμένο με ακρίβεια.
- Οι ενδείξεις που εντοπίζονται είναι ευαίσθητες στον προσανατολισμό, με την πιο ευαίσθητη κατά την οποία η ένδειξη είναι 90° σε σχέση με τη ροή των δινορρευμάτων.

3.4.3|Υπέρυθρες και θερμικές δοκιμές – Infrared and thermal testing (IR)

Ο θερμικός και υπέρυθρος έλεγχος είναι σχετικά νέες μέθοδοι στον κόσμο των ΜΚΕ. Περιλαμβάνει την παρακολούθηση των μεταβολών της θερμοκρασίας των αντικειμένων στο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

3.4.3.1|Βασικές αρχές

Η θερμότητα μπορεί να μεταδοθεί μέσω αγωγιμότητας, μεταφοράς και ακτινοβολίας. Με τη θερμική και υπέρυθρη δοκιμή, μόνο η ενέργεια που μεταδίδεται μέσω ακτινοβολίας είναι ενδιαφέρουσα και αυτή η ενέργεια ονομάζεται υπέρυθρη.

Το υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος βρίσκεται μεταξύ του ορατού και του μικροκυματικού τμήματος του φάσματος, μεταξύ $0,75\mu\text{m}$ και $100\mu\text{m}$. Οι δύο κοινές υπέρυθρες ζώνες που χρησιμοποιούνται στην υπέρυθρη θερμογραφία είναι ένα βραχύ κύμα στα $2 - 5\mu\text{m}$ και ένα μακρύ κύμα στα $8 - 14\mu\text{m}$. Αυτές οι ζώνες είναι τα μέρη του υπέρυθρου φάσματος στα οποία η μετάδοση μέσω της ατμόσφαιρας είναι υψηλή (το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα προκαλούν υψηλή απορρόφηση σε άλλα μέρη του υπέρυθρου φάσματος).

Γενικά, όταν τα αντικείμενα βρίσκονται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, επιλέγονται μεγάλης κλίμακας υπέρυθρες ακτίνες και όταν τα αντικείμενα βρίσκονται σε υψηλές θερμοκρασίες, επιλέγονται μικρής κλίμακας υπέρυθρες ακτίνες.

Ένας θερμογράφος, μέσω θερμικού συστήματος απεικόνισης, βλέπει ένα αντικείμενο για τη μέτρηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνειά του. Ωστόσο, για να μπερδέσουμε τα πράγματα, πηγές θερμότητας πίσω από το σύστημα απεικόνισης πιθανώς να αντανakλώνται από την επιφάνεια κάνοντας το αντικείμενο να εμφανίζεται πιο ζεστό από ό,τι είναι πραγματικά. Ακόμη και η θερμότητα από το σώμα του θερμογράφου μπορεί να επιδράσει στα αντικείμενα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Ορισμένα αντικείμενα είναι διαπερατά σε υπέρυθρες και θερμές πηγές με αποτέλεσμα πίσω από τέτοια αντικείμενα να προκληθούν ψευδείς θερμές κηλίδες. Ένας έμπειρος θερμογράφος μπορεί να αναγνωρίσει αυτά τα ψευδή ζεστά σημεία και να λάβει μέτρα για να τα αποφύγει. Για παράδειγμα, οι αντανakλάσεις μπορούν να αναγνωριστούν αλλάζοντας τη γωνία προβολής, γεγονός που θα είχε ως αποτέλεσμα την αλλαγή του ψευδούς θερμού σημείου ή την σταθερότητα ενός πραγματικά θερμού σημείου.

Επίσης τα θερμά σημεία θα μεταφέρουν θερμότητα διαμέσου του αντικειμένου, οδηγώντας το σε θερμική κλίση. Σε αντίθεση, τα ψευδή θερμά σημεία δεν θα έδειχναν αυτό το αποτέλεσμα.

Ένας παράγοντας που πρέπει να γνωρίζει ο θερμογράφος για την ακριβή μέτρηση θερμοκρασίας είναι η τιμή εκπομπής του αντικειμένου. Ένας θεωρητικά ιδανικός πομπός ενέργειας ονομάζεται μαύρο σώμα και έχει τιμή εκπομπής 1,0. Όλα τα αντικείμενα έχουν μια τιμή μικρότερη αυτής, με τις σκουρόχρωμες διάχυτες επιφάνειες που γενικά έχουν υψηλή τιμή εκπομπής και τις πολύ γυαλιστερές μεταλλικές επιφάνειες με χαμηλή τιμή εκπομπής.

Συνήθως, αν ένα αντικείμενο έχει τιμή εκπομπής μικρότερη από 0.5, είναι δύσκολη η ακριβής μέτρηση θερμοκρασίας. Το αντικείμενο μπορεί να επικαλυφθεί με χρώμα ή ταινία με γνωστή τιμή εκπομπής και τότε μπορεί να γίνει ακριβής μέτρηση θερμοκρασίας. Εάν δημιουργείται μια διασπορά θερμοκρασίας διαφορετικών τιμών, αυτό ονομάζεται θερμογραφία.

3.4.3.2|Τεχνικές

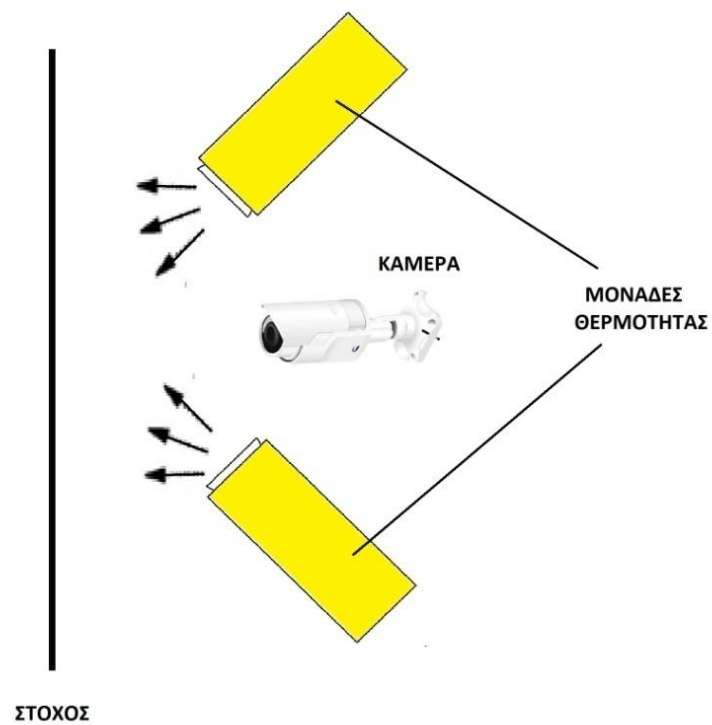
Υπάρχουν δύο διαφορετικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στη θερμογραφία: **παθητική και ενεργή θερμογραφία**.

- Στην **παθητική θερμογραφία**, η θερμοκρασία ενός αντικειμένου μετράται χωρίς ειδική εξωτερική θέρμανση και χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό θερμών σημείων όπως η υπερθέρμανση ηλεκτρικών και μηχανικών εξαρτημάτων.
- Στην **ενεργή θερμογραφία**, μια εξωτερική πηγή θερμότητας εφαρμόζεται σε ένα εξάρτημα και ο θερμογράφος αναζητά μεταβολές της θερμοκρασίας που προκαλούνται από την ύπαρξη ασυνεχειών μέσα σε ένα αντικείμενο.

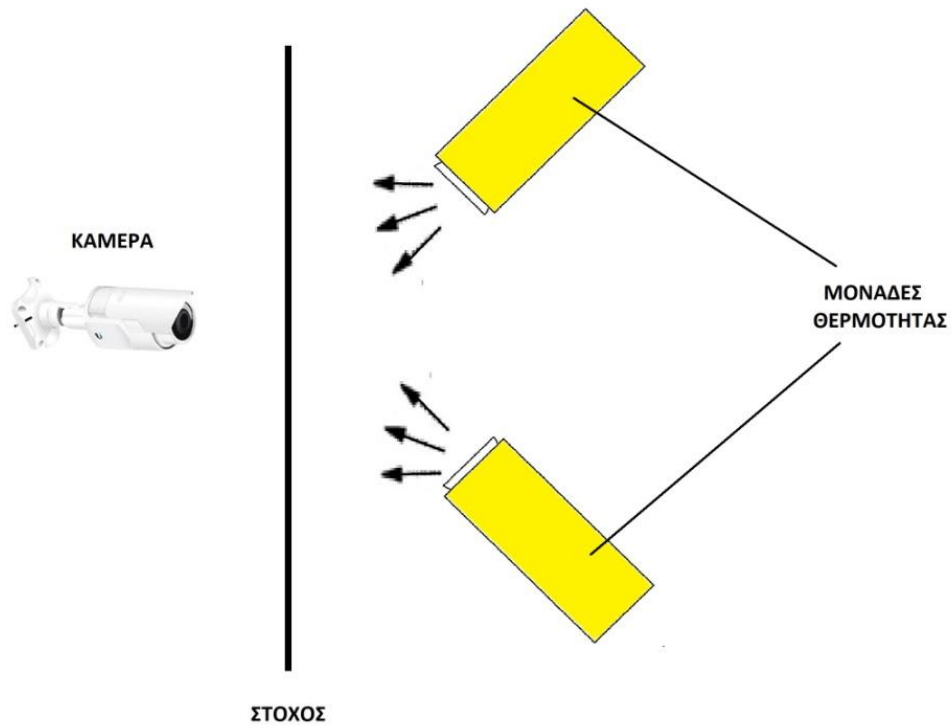
Θα δούμε τώρα λεπτομερώς την ενεργή θερμογραφία. Οι Εικόνες 11 και 12 δείχνουν μια τυπική διάταξη ελέγχου. Με την ενεργή θερμογραφία, η κάμερα μπορεί να τοποθετηθεί στην ίδια πλευρά του στόχου όπως και οι μονάδες θέρμανσης, αυτό **ονομάζεται λειτουργία αντανάκλασης απεικόνισης**. Εάν η κάμερα τοποθετηθεί στην αντίθετη πλευρά από τη μονάδα θέρμανσης, αυτό ονομάζεται **λειτουργία μετάδοσης απεικόνισης**.

Οι μονάδες θέρμανσης (οι λαμπτήρες xenon είναι κοινοί) θερμαίνουν την επιφάνεια για μικρό χρονικό διάστημα. Αυτή η θερμότητα αρχίζει τότε να διέρχεται στο αντικείμενο δοκιμής μέσω αγωγιμότητας και ουσιαστικά αποτελεί ένα θερμικό κύμα. Το θερμικό κύμα θα συμπεριφέρεται σαν ένα κύμα υπερήχων και θα αντικατοπτρίζει οποιαδήποτε επιφάνεια συναντά, όπως π.χ. το πίσω τοίχωμα του εξαρτήματος ή μια ασυνέχεια. Ο θερμικός ανιχνευτής θα ανιχνεύσει τα αντανάκλασμένα θερμικά κύματα τα οποία θερμαίνουν την επιφάνεια του εξαρτήματος, με το ανακλώμενο θερμικό κύμα από μια ασυνέχεια, να φτάνει στην επιφάνεια πριν το ανακλώμενο θερμικό κύμα που προέρχεται από το πίσω τοίχωμα του εξαρτήματος, καθώς δεν έχει να ταξιδέψει.

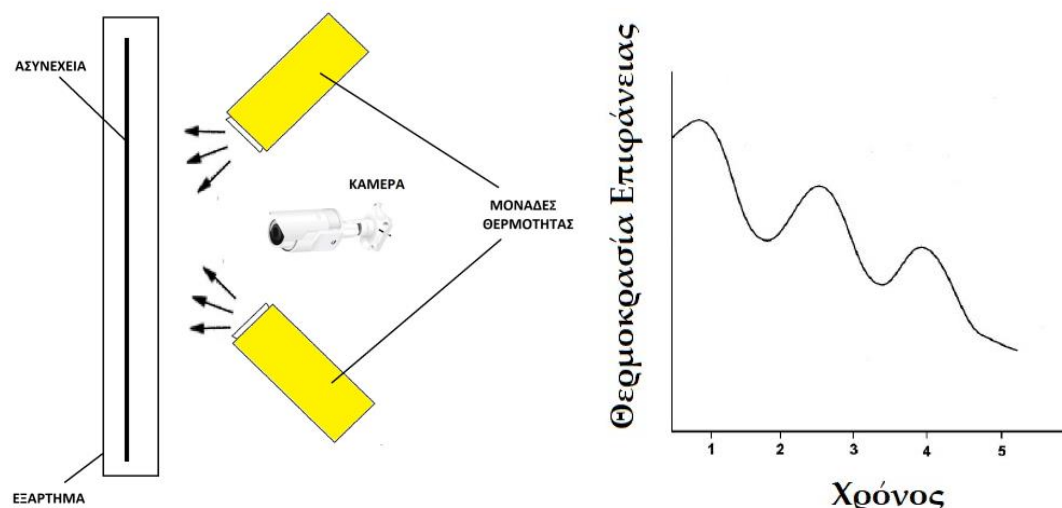
Η Εικόνα 13 δείχνει μια γραφική παράσταση της θερμοκρασίας της επιφάνειας ως προς το χρόνο από τον έλεγχο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 11. Μια εκτίμηση του βάθους ασυνέχειας μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας το χρόνο των θερμικών κυμάτων που επιστρέφουν.



Εικόνα 11. Ενεργή θερμογραφία – Λειτουργία αντανάκλασης απεικόνισης



Εικόνα 12. Ενεργή θερμογραφία – Λειτουργία μετάδοσης απεικόνισης



Εικόνα 13. Ενεργή θερμογραφία

Στην Εικόνα 13 έχουμε ενεργή θερμογραφία – Λειτουργία αντανάκλασης απεικόνισης. Διάγραμμα θερμοκρασίας επιφάνειας/χρόνου σε ένα εξάρτημα με ασυνέχεια.

Παρατηρούμε ότι στην Εικόνα 13, η πρώτη κορυφή δείχνει την επιφάνεια που θερμαίνεται με λάμψη, η δεύτερη κορυφή δείχνει το ανακλώμενο θερμικό κύμα από την ασυνέχεια και η τρίτη κορυφή δείχνει το ανακλώμενο θερμικό κύμα από το οπίσθιο τμήμα. Κατά κανόνα, μια ασυνέχεια πρέπει να είναι τουλάχιστον τόσο μεγάλη όσο το βάθος που πρόκειται να ανιχνευθεί. Ως εκ τούτου, τα παχιά εξαρτήματα δεν είναι ιδανικά εξαρτήματα για δοκιμές θερμικής και υπέρυθρης ακτινοβολίας. Οι ασυνέχειες κοντά στο οπίσθιο τοίχωμα μπορεί να είναι δύσκολο να εντοπιστούν επειδή τα ανακλώμενα θερμικά κύματα από την ασυνέχεια και το οπίσθιο τοίχωμα μπορεί να φτάσουν στην επιφάνεια την ίδια στιγμή. Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η λειτουργία μετάδοσης απεικόνισης, στην οποία ο ανιχνευτής τοποθετείται στην αντίθετη πλευρά της πηγής θερμότητας.

3.4.3.3|Εξοπλισμός

Η φυσική μας λέει ότι οποιοδήποτε αντικείμενο με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν, εκπέμπει ενέργεια υπέρυθρης ακτινοβολίας, επομένως είναι απαραίτητο ένα όργανο που μπορεί να ανιχνεύσει αυτήν την ενέργεια. Ένα βασικό όργανο θα χρειαστεί ένα οπτικό σύστημα για τη συλλογή και εστίαση του υπέρυθρου, το οποίο δεν είναι τόσο απλό όσο ακούγεται. Για παράδειγμα, το γυαλί δεν μεταδίδει υπέρυθρες σε ολόκληρο το φάσμα ενδιαφέροντος, συνήθως χρησιμοποιείται γερμάνιο, θειούχο ψευδάργυρο ή σεληνίδιο ψευδαργύρου για την κατασκευή φακών για όργανα που λειτουργούν στην υπέρυθρη ζώνη μεγάλου μήκους και το πυρίτιο, το ζαφείρι

ή ο χαλαζίας τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φακών σε όργανα που λειτουργούν στη ζώνη υπέρυθρων. Για τον περιορισμό της φασματικής περιοχής υπέρυθρων που φθάνει στον ανιχνευτή μπορούν να ενσωματωθούν φίλτρα σε ένα όργανο.

Ο ίδιος ο ανιχνευτής μπορεί να είναι είτε **φωτονικός** είτε **θερμικός** τύπος. Ένας φωτονικός ανιχνευτής περιορίζεται στο φασματικό εύρος του και έτσι θα επιλεγεί ανάλογα με το ποια υπέρυθρη ζώνη θα χρησιμοποιήσει το όργανο για την ανίχνευση, για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας ανιχνευτής από τελλουρίδιο υδραργύρου – καδμίου στην υπέρυθρη ζώνη μεγάλου κύματος ενώ ένας ανιχνευτής κατασκευασμένος από κράμα αντιμόνιο ινδίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην υπέρυθρη ζώνη βραχέων κυμάτων.

Οι φωτοανιχνευτές έχουν υψηλή ευαισθησία και αντιδρούν πολύ γρήγορα στις αλλαγές θερμοκρασίας, αλλά πρέπει να ψύχονται σε θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν (τυπικά στους – 196°C) για να λειτουργούν αποτελεσματικά. Λειτουργούν με βάση την αρχή ότι τα προσπίπτοντα φωτόνια θα διεγείρουν τον ανιχνευτή και μπορεί να παράγουν είτε μια ηλεκτρική έξοδο είτε να αλλάξουν την αγωγιμότητα του ανιχνευτή.

Οι θερμικοί ανιχνευτές αντιδρούν στις μεταβολές της θερμοκρασίας πολύ πιο αργά από τους φωτονικούς ανιχνευτές επειδή ένας θερμικός ανιχνευτής πρέπει να θερμανθεί από την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον στόχο. Δύο τύποι θερμικού ανιχνευτή είναι κοινά: α) το βολόμετρο οποίο απορροφά τη θερμότητα που εκπέμπεται από το στόχο και η αντίσταση του ανιχνευτή αλλάζει, παράγοντας ένα σήμα εξόδου και β) ένας πυροηλεκτρικός ανιχνευτής κατασκευασμένος από έναν ορισμένο τύπο κρυστάλλου ο οποίος παράγει μια κατάσταση ηλεκτρικής πολικότητας σε απόκριση μιας αλλαγής θερμοκρασίας, συνεπώς δεν θα παράγει κάποια έξοδο σε περιπτώσεις στατικού θερμικού στόχου. Χρησιμοποιείται ένας κόφτης με πυροηλεκτρικούς ανιχνευτές για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα. Ο ελικόπτης περιοδικά περιορίζει την ενέργεια που φτάνει στον ανιχνευτή, οπότε η εικόνα δεν είναι πλέον ένας στατικός θερμικός στόχος.

Οι θερμικοί ανιχνευτές δεν είναι φαινομενικά επιλεκτικοί, δηλαδή ανταποκρίνονται σε υπέρυθρες ακτίνες ανεξάρτητα από το μήκος κύματος της υπέρυθρης ενέργειας που προσπίπτει στον ανιχνευτή. Οι θερμικοί ανιχνευτές είναι βραδύτεροι και έχουν λιγότερη ευαισθησία από τους φωτονικούς ανιχνευτές αλλά έχουν το πλεονέκτημα ότι λειτουργούν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, δηλαδή δεν απαιτούν ψύξη κάτω από το μηδέν.

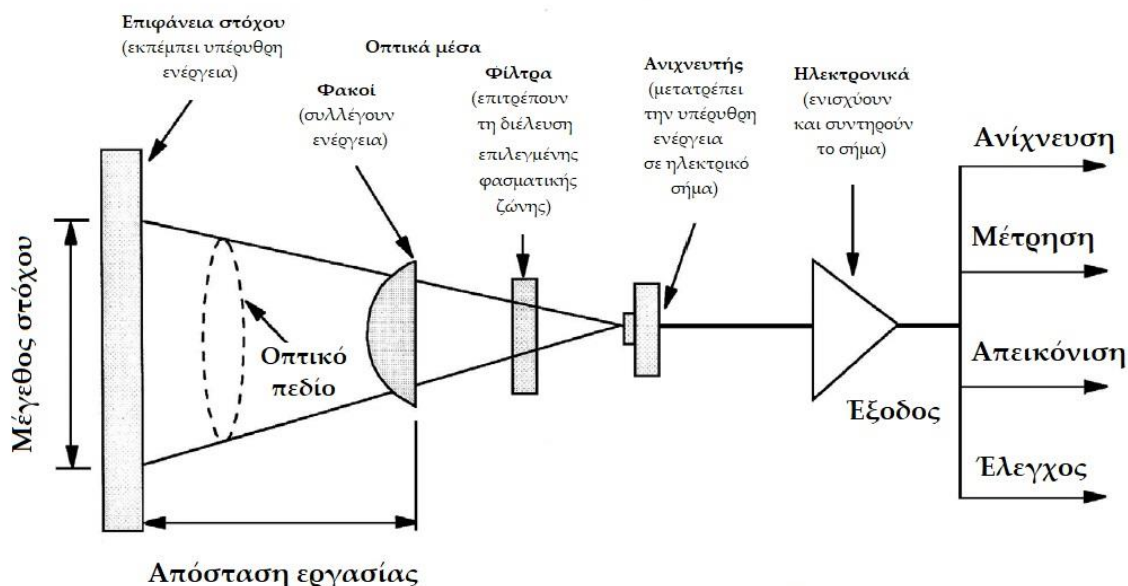
Μόλις ο ανιχνευτής μετατρέψει την προσπίπτουσα υπέρυθρη ακτινοβολία σε ένα ηλεκτρικό σήμα, τα ηλεκτρονικά συστήματα του οργάνου ενισχύουν και διαμορφώνουν το σήμα και παρέχουν μια έξοδο, η οποία μπορεί να είναι μια ένδειξη θερμοκρασίας ή ένα θερμογράφημα (θερμικός χάρτης ή θερμική εικόνα ενός στόχου), ανάλογα με το όργανο διαμόρφωση.

Ορισμένα όργανα έχουν σχεδιαστεί ώστε να μην παράγουν θερμική εικόνα, αλλά μόνο για να μετρήσουν τη θερμοκρασία σημείου μιας περιοχής στόχου. Τα όργανα αυτού του τύπου ονομάζονται θερμόμετρα υπέρυθρης ακτινοβολίας, η βασική διαμόρφωση των οποίων φαίνεται στην Εικόνα 14.

Εάν προσθέσουμε ένα σύστημα σάρωσης, το οποίο συχνά περιλαμβάνει καθρέφτες και πρίσματα, στη βασική διαμόρφωση της Εικόνα 14, μπορούμε να δημιουργήσουμε έναν θερμικό χάρτη ή ένα θερμογράφημα στόχου. Τα όργανα σάρωσης αυτού του τύπου ονομάζονται θερμικές απεικονίσεις.

Ένας ανιχνευτής γραμμής μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινούμενους στόχους, για παράδειγμα χαλύβδινη ταινία σε ελασματοουργείο. Ο σαρωτής γραμμής μπορεί να στερεωθεί πάνω από τη χαλύβδινη ταινία, η οποία θα κινείται με σταθερό ρυθμό προς τη μία κατεύθυνση. Ο σαρωτής σαρώνει τη λωρίδα κατά 90° προς την κατεύθυνση της κίνησης της ταινίας και, κατ'αυτόν τον τρόπο, γίνεται ένα θερμογράφημα της χαλύβδινης ταινίας.

Ένας άλλος τύπος σχεδιασμού οργάνου που ονομάζεται συστοιχία εστιακού επιπέδου χρησιμοποιεί πολλούς ανιχνευτές σε σχηματισμό συστοιχιών στο εστιακό επίπεδο. Κάθε ανιχνευτής σχηματίζει ένα στοιχείο εικόνας ή εικονοστοιχείο, οπότε η μηχανική σάρωση δεν χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα αυτού του τύπου. Κάθε ανιχνευτής παρακολουθεί το στόχο 100% του χρόνου και έτσι μπορεί να ανταποκριθεί πολύ γρήγορα στις μεταβαλλόμενες θερμικές συνθήκες. Οι εικόνες συστοιχίας εστιακού επιπέδου έχουν επίσης πολύ καλή χωρική ανάλυση.



Εικόνα 14. Βασική διαμόρφωση ενός θερμόμετρου υπέρυθρης ακτινοβολίας

Εάν ένα σύστημα δεν διορθωθεί για την υπέρυθη ακτινοβολία στόχου, ονομάζεται θερμικός απεικονιστής και θα χρησιμοποιηθεί για ποιοτικές επιθεωρήσεις, δηλαδή για τον εντοπισμό θερμικών ανωμαλιών σε έναν στόχο (π.χ. hot spots). Ο θερμικός απεικονιστής δεν θα δώσει ακριβείς θερμοκρασίες προορισμού.

Εάν διορθωθεί ένα σύστημα για την υπέρυθη ακτινοβολία στόχου τότε ονομάζεται ραδιομετρικής απεικόνισης και θα χρησιμοποιηθεί για ποσοτικές επιθεωρήσεις, όπως η παρακολούθηση της κατάστασης και θα είναι σε θέση να καθορίσει ακριβείς θερμοκρασίες θερμικών ανωμαλιών.

Επεξεργασία δεδομένων

Ένα σημαντικό μέρος του εξοπλισμού επιθεώρησης που χρησιμοποιείται από τους θερμογράφους είναι ένας προσωπικός υπολογιστής, ο οποίος μπορεί να έχει εγκατεστημένο ένα εξελιγμένο λογισμικό επεξεργασίας εικόνας, επιτρέποντας τη διεξαγωγή της επεξεργασίας της επί τόπου. Αυτό μπορεί να είναι μη εκτιμήσιμο, ιδίως με την ενεργή θερμογραφία, στην περίπτωση που οι θερμικές ανωμαλίες είναι παροδικές. Ο υπολογιστής μπορεί να κάνει λήψη, καταγραφή και αναφορά της κατάστασης.

Ένα επιπλέον πολύτιμο εργαλείο που χρησιμοποιείται από τον θερμογράφο είναι η ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, η οποία θα επιτρέψει την δημιουργία μιας κανονικής εικόνας λευκού φωτός από έναν στόχο που περιέχει μια θερμική ανωμαλία.

Πηγή θερμότητας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ενεργή θερμογραφία απαιτεί να θερμανθεί η επιφάνεια ενός εξαρτήματος. Αυτή η έγχυση θερμότητας μπορεί να είναι ένας στιγμιαίος παλμός, ένας μεγάλος ή μια σειρά περιοδικών παλμών. Η ποσότητα θερμότητας που εφαρμόζεται σε ένα εξάρτημα πρέπει να είναι επαρκής ώστε να παράγει ένα λόγο σήματος ως προς τον θόρυβο από ασυνέχεια που μπορεί να ανιχνευθεί από το σύστημα θερμικής επιθεώρησης, αλλά δεν πρέπει να είναι τόσο υψηλή ώστε η έγχυση θερμότητας να προκαλέσει βλάβη στην επιφάνεια του εξαρτήματος.

Η θερμότητα μπορεί να εφαρμοστεί με λαμπτήρες πυράκτωσης υψηλής ακρίβειας xenon, λέιζερ, λαμπτήρες πυρακτώσεως ή θερμαντικά όπλα. Είναι επίσης δυνατή η αύξηση της θερμικής κλίσης μέσω ενός εξαρτήματος με θέρμανση της μιας πλευράς και με παράλληλη ψύξη της αντίθετης πλευράς.

Ψυκτικό μέσο ανιχνευτή

Ορισμένοι τύποι ανιχνευτών απαιτούν ψύξη σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και αυτή η ψύξη συχνά παρέχεται με τη χρήση υγρού αερίου, όπως υγρού αζώτου, στους -196°C . Το όργανο απαιτεί

τακτικές προσθήκες υγρού αερίου, οπότε θα πρέπει να υπάρχει διαθέσιμη παροχή για μεγάλες περιόδους επιθεώρησης. Στα νεώτερα συστήματα θερμικής απεικόνισης η ψύξη με ευγενή αέρια τείνει να καταργηθεί καθώς οι ημιαγωγοί-ανιχνευτές ψύχονται με διατάξεις Peltier.

Διαδικασία

Θα πρέπει να είναι διαθέσιμη στον θερμογράφο, μια λεπτομερής γραπτή οδηγία ώστε η επιθεώρηση να πραγματοποιηθεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις του πελάτη. Η γραπτή οδηγία θα πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις σχετικές πληροφορίες που θα χρειαστεί ο θερμογράφος, για παράδειγμα σχετικά δεδομένα για την υγεία και την ασφάλεια. Ο θερμογράφος μπορεί να χρειάζεται για να ελέγξει τα λειτουργικά ηλεκτρικά συστήματα, τα οποία τυπικά θα έχουν αυστηρές απαιτήσεις υγιεινής και ασφάλειας.

Εξαρτήματα

Οι θερμικές μέθοδοι ΜΚΕ έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπου παραδοσιακές μέθοδοι, όπως οι έλεγχοι με ακτινογραφία, οι ηλεκτρομαγνητικές δοκιμές και οι δοκιμές υπερήχων, έχουν αντιμετωπίσει προβλήματα.

Αυτές οι εφαρμογές αφορούν εξαρτήματα υψηλής ακεραιότητας κατασκευασμένα από νέα ή προηγμένα υλικά, όπως κεραμικά, σύνθετα υλικά, πλαστικά και ημιαγωγούς κλπ. Τα κενά, οι διασυνδέσεις, οι ελασματοποιήσεις, οι ξένες ύλες (εγκλείσματα) μπορούν να ανιχνευθούν.

Ειδικές εφαρμογές

Οι θερμικές υπέρυθρες δοκιμές έχουν πολλές χρήσεις, εδώ παρατίθενται μερικές μόνο εφαρμογές.

Ο στρατός για αρκετά χρόνια έχει αναπτύξει συστήματα υπέρυθρων για την αναγνώριση και την ανάκτηση στόχων, τους πυραύλους που αναζητούν θερμά σημεία, τον έλεγχο της πυρκαγιάς και την πλοήγηση.

Οι αστικές χρήσεις περιλαμβάνουν την επιβολή του νόμου, την πυρόσβεση και την ακεραιότητα του κτιρίου. Οι ιατρικές χρήσεις βασίζονται στο γεγονός ότι οι κατεστραμμένοι βιολογικοί ιστοί είναι θερμότεροι από τους φυσιολογικούς ιστούς, οπότε η υπέρυθρη ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μαστογραφία, τραυματισμό μαλακών ιστών και αρτηριακή συστολή.

Οι περιβαλλοντικές εφαρμογές περιλαμβάνουν τους πόρους της γης, τον έλεγχο της ρύπανσης και τη διατήρηση της ενέργειας. Ένα κτίριο μπορεί να επιθεωρηθεί για να ελεγχθεί η διαρροή θερμότητας μέσα από το κτίριο ή το περίβλημα οροφής και είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τον εντοπισμό εισροής νερού, η οποία θα προκαλέσει σοβαρές απώλειες θερμότητας μέσω υγρής μόνωσης.

Οι βιομηχανικές χρήσεις περιλαμβάνουν πρόβλεψη συντήρησης, κατασκευή και ΜΚΕ. Θα εξετάσουμε τώρα ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές με περισσότερες λεπτομέρειες.

Προγνωστική συντήρηση

Τα μηχανικά συστήματα περιέχουν πολλά κινούμενα μέρη, η τριβή των οποίων προκαλεί θερμότητα. Τα έδρανα είναι ένα κινούμενο στοιχείο με χαμηλή τριβή, έτσι κανονικά δεν θα υπερθερμανθεί.

Η υπερφόρτωση, η έλλειψη λίπανσης και η μόλυνση της λίπανσης θα οδηγήσουν σε υπερθέρμανση και ζημιά στο ρουλεμάν. Οι τακτικοί θερμικοί έλεγχοι θα ανιχνεύσουν πρώιμα σημάδια υπερθέρμανσης, επιτρέποντας τη συντήρηση για να παρατείνει τη διάρκεια ζωής του εδράνου. Αυτή η ίδια αρχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε μηχανή.

Τα ηλεκτρικά συστήματα μπορούν επίσης να παρακολουθούνται για τυχόν ανώμαλη αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία μπορεί να προκληθεί από χαλαρούς ή διαβρωμένους συνδετήρες και μερικώς σπασμένα σύρματα, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης. Είναι ασφαλές να επιθεωρήσετε ένα εν λειτουργία ηλεκτρικό σύστημα, καθώς η θερμογραφία είναι χωρίς επαφή και θα ήταν συνήθης πρακτική για έναν ηλεκτρολόγο μηχανικό να συμβουλευέται τον θερμογράφημα κατά τη διάρκεια μιας επιτόπιας έρευνας.

Επειδή οι θερμικές δοκιμές δεν είναι με επαφή και μπορούν να επιθεωρήσουν γρήγορα μεγάλες περιοχές ενός συστατικού, η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως για τη δοκιμή υποσυστημάτων παραγωγής ενέργειας, όπως λέβητες και θερμαντήρες διεργασίας ή σωλήνες λέβητα, καθώς και αντικείμενα όπως σωλήνες ατμού. Με τη μόνωση του λέβητα, η πυρίμαχη επένδυση θα επιδεινωθεί με το χρόνο και καθώς αρχίζει να αποτυγχάνει, θα σχηματιστούν πολύ θερμά σημεία στο εξωτερικό περίβλημα του λέβητα. Οι θερμικοί έλεγχοι μπορούν να εντοπίσουν περιοχές όπου η πυρίμαχη επένδυση αρχίζει να αποτυγχάνει σε πρώιμο στάδιο, επιτρέποντας την έγκαιρη επιδιόρθωση πριν από τη μόνιμη βλάβη του κελύφους ή την εμφάνιση καψίματος.

Οι θερμικοί έλεγχοι των σωλήνων του λέβητα μπορούν να ανιχνεύσουν την υπερθέρμανση που προκαλείται από τις εμπλοκές σε πρώιμο στάδιο και έτσι να αποτρέψουν το σπάσιμο των σωλήνων.

Μεταποίηση

Ο ποσοτικός έλεγχος ποιότητας των διαδικασιών παρασκευής πραγματοποιείται συχνά με θερμικό εξοπλισμό. Ένα καλό παράδειγμα θα ήταν η κατασκευή χαρτιού. Ένα σύστημα σάρωσης γραμμής μπορεί να εγκατασταθεί στο σταθμό στεγνώματος για την παρακολούθηση της κατανομής της θερμοκρασίας κατά μήκος της κινούμενης γραμμής χαρτιού. Εάν η θερμοκρασία είναι εσφαλμένη, θα επηρεάσει την τελική ποιότητα του προϊόντος. Ο σαρωτής γραμμής θα ανιχνεύσει

τυχόν θερμικά προβλήματα και θα ειδοποιήσει τους χειριστές, οι οποίοι μπορούν να λάβουν μέτρα για να διορθώσουν το πρόβλημα.

Μη καταστροφικές δοκιμές

Οι ενεργές θερμικές τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση ασυνεχειών εσωτερικών συνιστωσών όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Οι ενεργές θερμικές τεχνικές είναι επίσης κατάλληλες για την ανίχνευση της αραίωσης των τοιχωμάτων των σωλήνων που προκαλείται από εσωτερική διάβρωση χωρίς να απαιτείται εσωτερική πρόσβαση.

Οι παθητικές θερμικές τεχνικές χρησιμοποιούνται συχνά για τον εντοπισμό της εισόδου νερού στα πλαίσια του αέρα. Εάν ένα αεροπλάνο προσγειώνεται μετά από μια πτήση σε υψόμετρο, το νερό είναι πιθανό να είναι πάγος, ή τουλάχιστον πολύ χαμηλότερο από το περιβάλλον. Το μεταλλικό περίβλημα του αεροσκάφους θα θερμανθεί γρήγορα, επιτρέποντας την τοποθέτηση κρύων σημείων από την είσοδο νερού.

3.4.3.4 | Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της θερμικής και υπέρυθρης απεικόνισης

Πλεονεκτήματα

- Και οι ενεργές και οι παθητικές τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν σε μια ευρεία ποικιλία εξαρτημάτων ή συγκροτημάτων για να καταστεί δυνατή η ανίχνευση πολλών συνθηκών.
- Η επιθεώρηση πραγματοποιείται απομακρυσμένα από ένα εξάρτημα και είναι δυνατή η επιθεώρηση σε περιβάλλοντα υψηλής θερμοκρασίας.
- Η επιθεώρηση είναι πολύ γρήγορη, μπορούν να απεικονιστούν μεγάλα εξαρτήματα.
- Μπορεί να γίνει ακριβής κατανομή θερμοκρασίας ενός εξαρτήματος, τα αποτελέσματα μπορούν να αποθηκευτούν ηλεκτρονικά και αυτό μπορεί να επιτρέψει την πραγματοποίηση τακτικών επιθεωρήσεων και να συγκριθεί με τα προηγούμενα αποτελέσματα, επιτρέποντας την έγκαιρη ανίχνευση οποιασδήποτε αύξησης της θερμοκρασίας.
- Τα θερμικά τεστ μπορούν να διεξαχθούν σε υλικά όπως σύνθετα υλικά, τα οποία μπορεί να είναι δύσκολο να δοκιμαστούν με άλλες μορφές ΜΚΕ.
- Η προβολή των εσωτερικών ασυνεχειών επιτρέπει την ακριβή ερμηνεία, ιδιαίτερα με κατάλληλο λογισμικό επεξεργασίας εικόνων.

Μειονεκτήματα

- Ο εξοπλισμός μπορεί να είναι πολύ δαπανηρός.
- Οι αντανакλαστικές επιφάνειες μπορούν να οδηγήσουν σε ψεύτικες θερμές κηλίδες.

- Απαιτείται κατάλληλο φασματικό φιλτράρισμα για την απεικόνιση υλικού που είναι μερικώς διαφανές στην υπέρυθρη ενέργεια.
- Για την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας ενός εξαρτήματος, πρέπει να είναι γνωστή η τιμή εκπομπής.
- Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων μπορεί να είναι δύσκολη λόγω των πολλών μεταβλητών που εμπλέκονται, η εμπειρία του επιθεωρητή είναι απαραίτητη.

Οι θερμικές και υπέρυθρες δοκιμές έχουν πολλές εφαρμογές και είναι μία από τις πιο ευέλικτες διαθέσιμες μεθόδους ΜΚΕ.

3.4.4|Ραδιογραφικός έλεγχος ή αλλιώς Βιομηχανική ακτινογραφία ή Ακτινογραφία– Radiographic testing (RT) or Industrial radiography or Radiography

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Ραδιογραφικός έλεγχος ή Βιομηχανική Ακτινογραφία ήταν μια από τις πρώτες μεθόδους ΜΚΕ, αλλά λόγω κάποιων συνεπειών στην υγεία και την ασφάλεια, κάποιες εναλλακτικές μέθοδοι τον αντικατέστησαν. Ωστόσο παραμένει μια από τις δύο κύριες ογκομετρικές μεθόδους ΜΚΕ.

3.4.4.1|Βασικές αρχές

Η ακτινογραφία είναι μια από τις δύο κύριες μεθόδους ογκομετρικής εξέτασης, μαζί με τις υπερήχους. Ορισμένα υλικά, λόγω του πάχους τους ή της δομής τους, μπορεί να είναι δύσκολο να διερευνηθούν με υπερήχους ή μπορεί να απαιτηθεί μόνιμο οπτικό αρχείο και ως εκ τούτου η ακτινογραφία μπορεί να είναι μια εναλλακτική λύση.

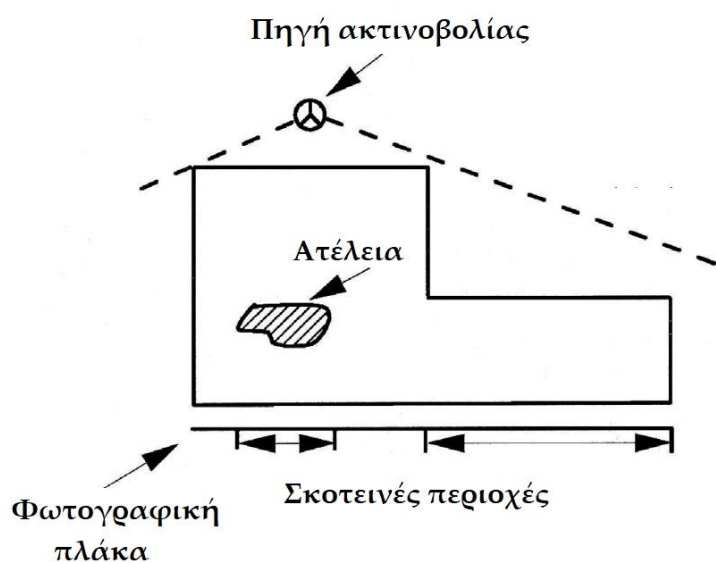
Οι ακτινογραφικές δοκιμές δουλεύουν με την παραγωγή ακτινοβολίας Χ- ή Γάμμα μικρού μήκους κύματος και την κατεύθυνσή της σε ένα αντικείμενο. Η ακτινοβολία διαπερνά την ύλη σε κάποιο βαθμό και αν αυτή η διείσδυση είναι αρκετή ώστε να περάσει μέσα από το αντικείμενο, τότε η ακτινοβολία μπορεί να καταγραφεί σε μια φωτογραφική πλάκα.

Εάν ένα αντικείμενο έχει υψηλή πυκνότητα, δηλαδή ένα παχύτερο αντικείμενο παράγει μια ελαφρύτερη εικόνα καθώς απορροφά περισσότερη ακτινοβολία προκαλώντας λιγότερη ακτινοβολία για να αποτυπωθεί στην φωτογραφική πλάκα. Εάν ένα αντικείμενο έχει χαμηλή πυκνότητα, δηλαδή όταν μειώνεται η διατομή ή υπάρχει υλικό χαμηλότερης πυκνότητας όπως σκουριά (σε σύγκριση με το περιβάλλοντα υλικό), θα απορροφήσει λιγότερη ακτινοβολία προκαλώντας περισσότερη ακτινοβολία για να χτυπήσει την φωτογραφική πλάκα, παράγοντας πιο σκοτεινή εικόνα.

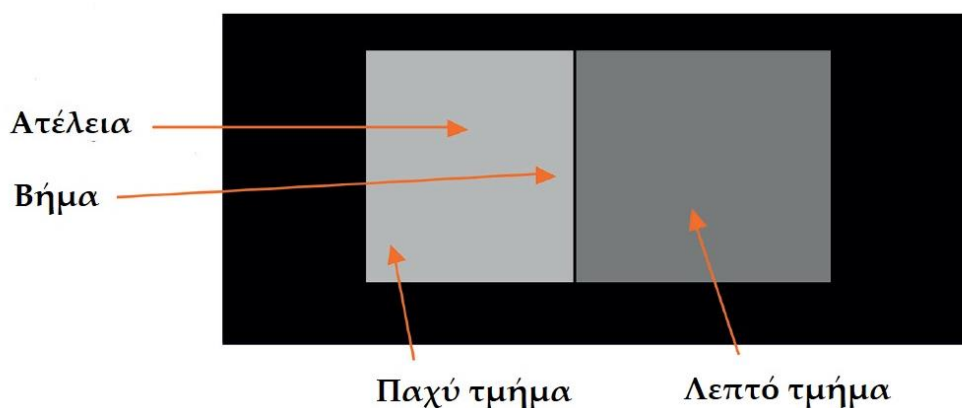
Αυτό φαίνεται παρακάτω στις Εικόνες 15 και 16. Το λεπτότερο τμήμα του εξαρτήματος και η ελαττωματική περιοχή επιτρέπει μεγαλύτερη έκθεση της φωτογραφικής πλάκας στην προσπίπτουσα ακτινοβολία, η οποία προέρχεται από την πηγή ακτινοβολίας. Μόλις γίνει η επεξεργασία της, η ακτινογραφία είναι πιο σκούρα στις περιοχές αυτές.

Την εικόνα στην φωτογραφική πλάκα δεν μπορούμε να τη δούμε αρχικά. Αυτό ονομάζεται λανθάνουσα εικόνα. Μπορούμε να την δούμε μόνο όταν αναπτυχθεί η φωτογραφική πλάκα. Η ποιότητα αυτής της εικόνας εξαρτάται κυρίως από τρεις ιδιότητες:

- την πυκνότητα
- την αντίθεση και
- την ανάλυση.



Εικόνα 15. Διακύμανση διαφορετικών επιπέδων ακτινοβολίας



Εικόνα 16. Αποτελέσματα ακτινογραφίας

Πυκνότητα

Η πυκνότητα είναι ο βαθμός μαυρίσματος στην ακτινογραφία. Θα υπάρξουν ελάχιστες και μέγιστες ποσότητες πυκνότητας για να γίνει η ακτινογραφία ευανάγνωστη και να δώσει την απαιτούμενη ευαισθησία.

$$\text{Πυκνότητα} = \text{Log}_{10} \frac{\text{Προσπίπτον φως}}{\text{Μεταδιδόμενο φως}}$$

Οι τυπικές πυκνότητες κυμαίνονται από 1,5 έως 3,5¹.

Αντίθεση

Η ακτινογραφική αντίθεση είναι ο βαθμός διαφοράς μεταξύ των πεδίων πυκνότητας σε μια ακτινογραφία. Εάν υπάρχουν μόνο μαύρα και λευκά σε μία ακτινογραφία, αυτό μεταφράζεται σε πολύ μεγάλη αντίθεση. Εάν στο γράφημα υπάρχουν μόνο τόνοι παρόμοιας πυκνότητας, τότε έχουμε χαμηλή αντίθεση. Η ακτινογραφική αντίθεση είναι προϊόν αντίθεσης φιλμ και αντικειμενικής αντίθεσης.

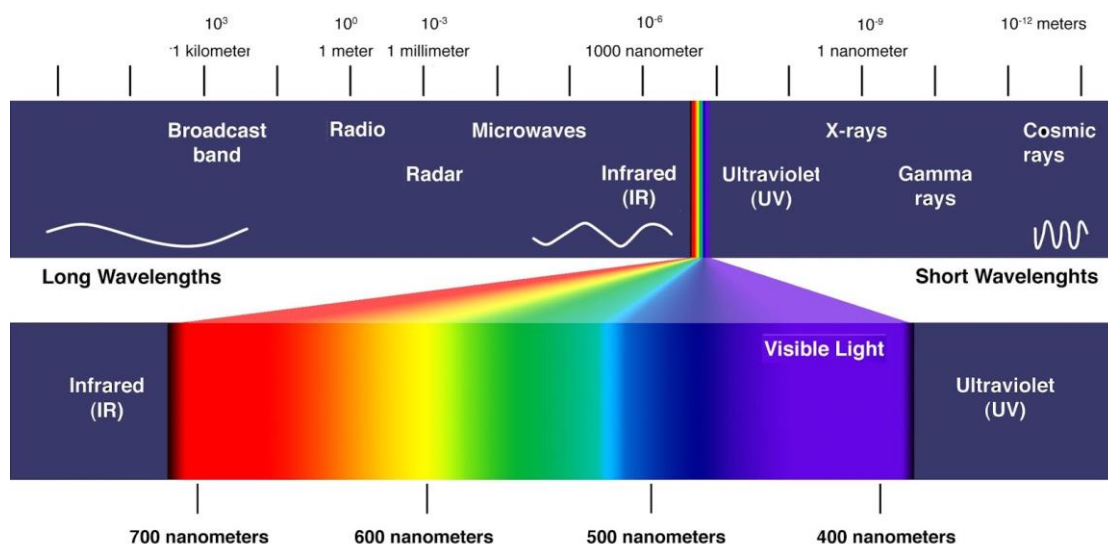
Η αντίθεση φιλμ εξαρτάται από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου φιλμ και την αναπτυσσόμενη διαδικασία που χρησιμοποιείται: οι ταινίες με μεγάλους κόκκους είναι ταχείες μεμβράνες, δηλαδή με μικρές χρονικές στιγμές έκθεσης. Οι ταινίες με μικρούς (λεπτούς) κόκκους είναι αργές μεμβράνες, δηλαδή με χρόνους μεγάλης έκθεσης, αλλά καλύτερες ποιοτικά. Η αντικειμενική αντίθεση εξαρτάται από το ίδιο το θέμα, από ποιες οθόνες και ποια φίλτρα χρησιμοποιούνται και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται. (Ένα υψηλότερο kV και συνεπώς μικρότερο μήκος κύματος θα μειώνει την αντίθεση του αντικειμένου.) Οι οθόνες και τα φίλτρα χρησιμοποιούνται για να κόψουν την ανεπιθύμητη ακτινοβολία και να βελτιώσουν την εικόνα. Στην περίπτωση οθονών αλάτων, για να μειώσουν τους χρόνους έκθεσης.

Ανάλυση

Ο ακτινογραφικός ορισμός της ανάλυσης είναι ο βαθμός ευκρίνειας στα όρια των πεδίων πυκνότητας, δηλαδή η καθαρότητα άκρων. Υπάρχει μια ποσότητα εγγενούς αστάθειας σε ένα συγκεκριμένο φιλμ η οποία αυξάνεται με τη μείωση του μήκους κύματος της ακτινοβολίας, αλλά υπάρχει πάντα σε κάποιο βαθμό.

Η γεωμετρική αστάθεια μπορεί να ελεγχθεί από το μέγεθος της πηγής Γάμμα ή το εστιακό σημείο ακτίνων X να είναι όσο το δυνατόν μικρότερα, η απόσταση μεταξύ του αντικειμένου και του φιλμ να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη και η απόσταση μεταξύ της πηγής ακτινοβολίας και του αντικειμένου να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη .

¹ Δεν υπάρχουν μονάδες δεδομένου ότι πρόκειται για αναλογία.

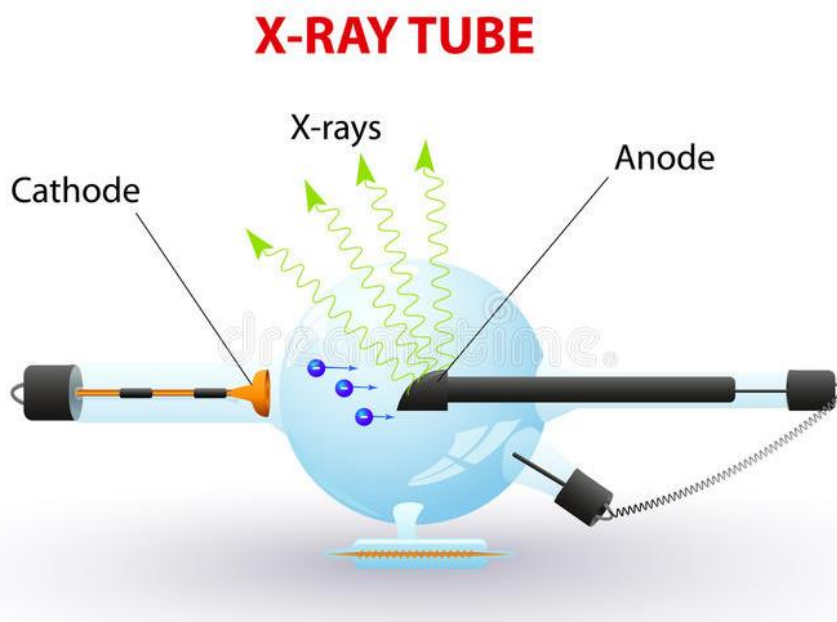


Εικόνα 17. Η θέση των ακτίνων X και Γάμμα στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

3.4.4.2 | Πηγές ακτινοβολίας

Ακτίνες X

Στη βιομηχανική ακτινογραφία χρησιμοποιούνται δύο πηγές ακτινοβολίας: Οι ακτίνες X και οι ακτίνες Γάμμα. Ουσιαστικά είναι τα ίδιες, δηλαδή ως προς την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η διαφορά είναι στον τρόπο παραγωγής τους.



Εικόνα 18. Τυπικός σωλήνας ακτίνων X

Οι ακτίνες X παράγονται από ένα σετ ακτίνων X, το οποίο αποτελείται από μια γεννήτρια μεταβλητής τάσης, έναν σωλήνα ακτίνων X και έναν πίνακα ελέγχου. Η Εικόνα 18 δείχνει έναν

τυπικό σωλήνα ακτίνων X. Όταν ένα νήμα θερμαίνεται, ένα ρεύμα ηλεκτρονίων υψηλής ταχύτητας εκτοξεύεται από την κάθοδο στην άνοδο (αυτό είναι συνήθως στόχος βολφραμίου, λόγω του υψηλού σημείου τήξης του, τοποθετημένου σε χαλκό λόγω της καλής του θερμικής αγωγιμότητας). Αυτή η αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτρονίων και της ύλης ανόδου παράγει ακτίνες X, οι οποίες στη συνέχεια κατευθύνονται προς το αντικείμενο.

Ένα σετ ακτίνων X έχει τρία επίπεδα ελέγχου:

1. KiloVoltage (kV), συνήθως μεταξύ 50 και 400 kV
2. Milliampereage (mA), συνήθως μεταξύ 0 και 10 mA
3. Ο χρόνος.

Το kV ρυθμίζει το μήκος κύματος. Όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η διείσδυση των ακτίνων X. Μια αύξηση σε kV συντομεύει το μήκος κύματος και ως εκ τούτου αυξάνει τη διείσδυση.

Το mA ρυθμίζει την ποσότητα της ακτινοβολίας (η οποία δεν επηρεάζει τη διείσδυση). Μια αύξηση στο mA δίνει μια αύξηση στην ποσότητα της ακτινοβολίας. Το αποτέλεσμα αυτού είναι να μειωθεί ο χρόνος έκθεσης.

Ο έλεγχος mA και ο έλεγχος χρόνου έκθεσης χρησιμοποιούνται μαζί για τον έλεγχο της έκθεσης, η οποία μετράται σε mA λεπτά, δηλαδή 8mA λεπτά μπορεί να είναι 2 mA για 4 λεπτά ή 1mA για 8 λεπτά. Ως εκ τούτου, με τη χρήση kV, mA και χρόνου, ο χειριστής έχει ελεγχόμενη έκθεση και διείσδυση.

Με ακτίνες X, η δέσμη ακτίνων X είναι ένα μείγμα μήκους κύματος (μία ζώνη μήκους κύματος).

Ακτίνες Γάμμα

Οι ακτίνες Γάμμα παράγονται όταν ασταθή ραδιενεργά ισότοπα εκπέμπουν ενέργεια (αποσυντίθενται) για να γίνουν σταθερά.

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε το Ράδιο 226 στην ακτινογραφία, αλλά λόγω των κινδύνων (ο κύριος κίνδυνος είναι το υποπροϊόν αερίου ραδονίου, που μπορεί να ήταν υπεύθυνο για το θάνατο της Marie Curie), χρησιμοποιούνται τώρα τεχνητά ισότοπα. Το Κοβάλτιο 60, το Ιρίδιο 192, το Υττέρβο (Yb)169 και το Σελήνιο (Se)75 είναι τέσσερα από τα πιο κοινά.

Οι ακτίνες Γάμμα παράγουν διακριτά μήκη κύματος ακτινοβολίας (είτε ένα ή μερικά γνωστά μήκη κύματος), επομένως το μήκος κύματος μιας πηγής δεν μπορεί να αλλάξει ώστε να ταιριάζει. Μια άλλη πηγή ισότοπου θα πρέπει να επιλεγεί για να παράγει είτε μικρότερο είτε μεγαλύτερο μήκος κύματος.

Η ποσότητα της ακτινοβολίας που δίνεται εξαρτάται από το μέγεθος της πηγής (της δραστηριότητας). Η δραστηριότητα μετριέται σε curies ή σε becquerel – 1 becquerel είναι 1

αποσύνθεση ανά δευτερόλεπτο ($1 \text{ curie} = 37\text{GBq}$). Το becquerel είναι μια μικρή μονάδα και στη βιομηχανική ακτινογραφία χρησιμοποιούνται gigabecquerels (10^9 becquerel). Ως εκ τούτου, η έκθεση ελέγχεται από το μέγεθος της πηγής και πάλι, από το χρόνο έκθεσης.

Οι πηγές Γάμμα μειώνουν τη δραστηριότητα καθώς αποσυντίθενται με το χρόνο – αυτό ονομάζεται χρόνος ημιζωής. Ο χρόνος ημιζωής είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη μείωση της δραστηριότητας στο ήμισυ του σημερινού επιπέδου. Όλα τα ισότοπα έχουν διαφορετικούς χρόνους ημιζωής, δηλαδή για το Κοβάλτιο 60 είναι 5,3 έτη, ενώ το Ιρίδιο 192 είναι 74 ημέρες.

Ένα από τα προβλήματα με τις πηγές Γάμμα είναι ότι εκπέμπουν ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις ανά πάσα στιγμή. Με τις μηχανές ακτίνων Χ, μόλις απενεργοποιηθούν, οι ακτίνες Χ δεν παράγονται πλέον. Αυτό μας δίνει διαφορετικές απαιτήσεις ασφάλειας με τις πηγές Γάμμα.

Μετά τη χρήση, οι πηγές Γάμμα πρέπει να φυλάσσονται σε θωρακισμένο δοχείο για την προστασία των ανθρώπων από την παραγόμενη ακτινοβολία.

Αν και οι ακτίνες Χ μπορούν να είναι φορητές, είναι συνηθέστερο ότι είναι στατικές μηχανές σε μια περιοχή επιθεώρησης και απαιτούν εξωτερική πηγή ενέργειας. Οι πηγές Γάμμα είναι πολύ πιο φορητές.

3.4.4.3|Ασφάλεια

Ένας από τους κύριους προβληματισμούς κατά την επιλογή της ακτινογραφίας ως μεθόδου ΜΚΕ είναι η ασφάλεια. Η ακτινοβολία καταστρέφει τα ανθρώπινα κύτταρα, επομένως πρέπει πάντα να χρησιμοποιείται με ελεγχόμενο και ασφαλή τρόπο. Δεν μπορεί να ανιχνευθεί από καμία από τις πέντε ανθρώπινες αισθήσεις: όραση, ακοή, μυρωδιά, γεύση ή αφή. Ωστόσο, υπάρχουν διαθέσιμα εργαλεία που μπορούν να ανιχνεύσουν και να μετρήσουν την ακτινοβολία. Τα πιο βασικά αναφέρονται παρακάτω.

Προσωπικά δοσίμετρα

Τα δοσίμετρα (film badges)/TLD (δοσιμετρητές θερμοφωταύγειας) είναι ανιχνευτές που φοριούνται από όλους τους βιομηχανικούς ακτινογράφους που μετρούν τη δόση που λαμβάνει ένας ακτινογράφος σε μια χρονική περίοδο, συνήθως ένα μήνα. Είναι ιδανικά στην καταγραφή δόσεων για να δώσουν μια αναφορά με την πάροδο του χρόνου, αλλά δεν λένε στον χειριστή πόση ακτινοβολία λαμβάνει σε οποιαδήποτε συγκεκριμένη στιγμή.

Οι μετρητές ακτινοβολίας geiger (survey meters/μετρητές δόσης) είναι όργανα που μπορούν να μετρήσουν τις δόσεις ανά μονάδα χρόνου. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται από ακτινολόγους για να δείξουν την ακτινοβολία που λαμβάνεται κατά τη στιγμή της έκθεσης. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να ελέγξουν εάν υπάρχει οποιαδήποτε ακτινοβολία πριν και μετά την έκθεση,

ειδικά με πηγές Γάμμα, οι οποίες εκπέμπουν συνεχώς ακτινοβολία και μπορεί να μην είναι ασφαλώς τοποθετημένες πίσω στα δοχεία τους. Στην παρακάτω Φωτογραφία 1 βλέπουμε διάφορους τύπους ατομικών δοσιμέτρων.



Φωτογραφία 1. Διάφοροι τύποι ατομικών δοσιμέτρων

Ηχητικοί συναγερμοί

Πρόκειται για συσκευές συναγερμού/προειδοποίησης που πρέπει πάντα να φορούν οι ακτινολόγοι που εργάζονται με ακτινοβολία Γάμμα. Ο συναγερμός ενεργοποιείται όταν η δόση ακτινοβολίας υπερβεί ένα προκαθορισμένο όριο και αυξάνει τη συχνότητα καθώς αυξάνεται το επίπεδο ακτινοβολίας. Αυτό θα προειδοποιήσει τον ραδιογράφο σχετικά με την ακτινοβολία τριγύρω. Μερικές από τις σύγχρονες συσκευές μετρούν και καταγράφουν της ποσότητας της ληφθείσας ακτινοβολίας.

Δοσιμετρητές τσέπης (μετρητές έκθεσης)

Αυτοί οι μετρητές καταγράφουν μια συσσωρευμένη ποσότητα ακτινοβολίας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της ληφθείσας δόσης, για παράδειγμα για μια ημέρα, αντί να περιμένουν τα μηνιαία αποτελέσματα των badges.

Μετρητές Geiger

Αυτοί είναι ίσως οι πιο γνωστοί ανιχνευτές ακτινοβολίας και συχνά φαίνονται στην τηλεόραση κάνοντας κλικ μακριά σε μια ραδιενεργή κατάσταση. Ωστόσο, σπάνια χρησιμοποιούνται στην ακτινογραφία, καθώς μπορούν να ανιχνεύσουν μόνο πολύ χαμηλές εντάσεις – μεγαλύτερες εντάσεις θα προκαλούσαν εμπλοκή στο όργανο. Συχνά χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της διαρροής ακτινοβολίας στις κυτταρικές πόρτες ακτινογραφίας ή στα γραφεία ακτινογραφίας. Είναι πολύ ευαίσθητοι.

Ηχητικός/οπτικός συναγερμός

Αυτοί είναι συναγερμοί, όπως το Gamma Alert, που τοποθετούνται μέσα στην περιοχή ακτινοβολίας και συνήθως έχουν ένα πορτοκαλί φως που αναβοσβήνει, το οποίο αλλάζει σε κόκκινο χρώμα όταν η πηγή είναι εκτεθειμένη και υπάρχει ακτινοβολία. Αυτό συνοδεύεται επίσης από μια ακουστική προειδοποίηση.

Όπως μπορείτε να δείτε, κανένα από αυτά τα όργανα δεν είναι τέλεια από μόνα τους αλλά αν χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό, ο ραδιογράφος θα μπορεί να μετρήσει και να καταγράψει τις δόσεις ακτινοβολίας και να εργαστεί με ασφάλεια.

Η ακτινογραφία πρέπει να πραγματοποιείται όπου είναι δυνατόν σε ένα κατάλληλο περίβλημα, που ονομάζεται κέλυφος ακτινογραφίας. Πρόκειται για δωμάτια κατασκευασμένα με πολύ πυκνούς τοίχους ή επενδυμένα με υλικά υψηλής πυκνότητας όπως ο μόλυβδος, τα οποία μειώνουν το επίπεδο ακτινοβολίας στο εξωτερικό του τοίχου σε αποδεκτό επίπεδο. Όταν δεν είναι δυνατή η εκτέλεση ακτινογραφίας σε κέλυφος, τότε θα πρέπει να δημιουργηθεί ελεγχόμενη περιοχή και να δημιουργηθούν φραγμοί σε θέσεις όπου τα επίπεδα ακτινοβολίας θεωρούνται ασφαλή για μη προβλεπόμενο προσωπικό.

Η παρούσα νομική απαίτηση (όρια ασφαλούς εκθέσεως) είναι $7,5\mu\text{Sv/hr}-1$ για τον γενικό πληθυσμό ενώ για τους χειριστές ακτινολογικών μηχανημάτων το όριο που ορίζει η νομοθεσία είναι $20\mu\text{Sv/hr}-1$. Το μέγεθος της ελεγχόμενης περιοχής μπορεί να μειωθεί, με τη χρήση θωράκισης (collimators) στην πηγή. Η ένταση της ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή, δηλαδή εάν διπλασιάσετε την απόσταση από την πηγή, το επίπεδο ακτινοβολίας μειώνεται κατά ένα συντελεστή τεσσάρων.

Δημιουργώντας μία ακτινογραφία

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όταν μια φωτογραφική πλάκα εκτεθεί από ακτινοβολία που έχει περάσει από το υπό δοκιμή αντικείμενο, δεν υπάρχει ορατή εικόνα, μόνο μια λανθάνουσα εικόνα. Προκειμένου να δημιουργηθεί μια ακτινογραφία που να μπορεί να προβάλλεται και στην οποία μπορούν να παρατηρηθούν οποιαδήποτε ελαττώματα, πρέπει να αναπτυχθεί η λανθάνουσα εικόνα, ακριβώς όπως το φιλμ σε μια φωτογραφική μηχανή.

Αν και η αυτόματη επεξεργασία είναι πλέον η πιο κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη ακτινογραφικού φιλμ, στη βιομηχανική ακτινογραφία χρησιμοποιείται ακόμα η χειρωνακτική επεξεργασία. Στην αυτόματη επεξεργασία, το φιλμ τροφοδοτείται μέσω μιας σειράς κυλίνδρων, μέσω ενός συνόλου δεξαμενών παρόμοιων με εκείνες που χρησιμοποιούνται στη χειροκίνητη επεξεργασία και είναι ξηρό και έτοιμο προς θέαση στον δίσκο εξόδου. Η τροφοδοσία

του φιλμ στον αυτόματο επεξεργαστή και η χειρωνακτική επεξεργασία πραγματοποιούνται σε σκοτεινό θάλαμο, καθώς το λευκό φως θα εκθέσει περαιτέρω την φωτογραφική πλάκα.

Η μεμβράνη υποβάλλεται σε επεξεργασία σε μια σειρά δεξαμενών προτού ξηρανθεί και είναι έτοιμη για ανάγνωση. Αυτή η ακολουθία συμβάντων έχει ως εξής:

1. Δεξαμενή ανάπτυξης.
2. Διακοπή ανάπτυξης – πλύση.
3. Δεξαμενή σταθεροποίησης.
4. Τελική δεξαμενή πλύσης.
5. Δοχείο διαβροχής (Wetting agent tank)
6. Καμπίνα στέγνωσης.

Παράγοντας ανάπτυξης

Ο παράγοντας ανάπτυξης (αλκαλικό διάλυμα) μειώνει τους κόκκους αλογονιδίου του αργύρου που έχουν εκτεθεί σε ακτινοβολία σε μεταλλικό ασημί.

Διακοπή ανάπτυξης

Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με ένα ήπιο όξινο διάλυμα (συνήθως 2%), αλλά μπορεί να γίνει και με μια δεξαμενή γλυκού νερού ή ακόμα και με ένα ξέπλυμα μέσω ψεκασμού με νερό.

Σκοπός αυτού είναι να σταματήσουμε οποιαδήποτε περαιτέρω ανάπτυξη και να απομακρύνουμε τις αναπτυσσόμενες χημικές ουσίες από την φωτογραφική πλάκα.

Δεξαμενή σταθεροποίησης

Το κύριο αντικείμενο του σταθεροποιητή είναι να αφαιρέσει τους κρυστάλλους αλάτων αλογονιδίου αργύρου και να στερεώσει τους υπόλοιπους κρυστάλλους. Ο σταθεροποιητής σκληραίνει επίσης την μεμβράνη για να διευκολύνει τη χρήση.

Τελική δεξαμενή πλύσης

Μετά τη στερέωση, το φιλμ πλένεται για να απομακρυνθούν τα χημικά στερέωσης. Η στερέωση χημικών ουσιών που παραμένουν στην μεμβράνη οδηγεί σε αλλοίωση (η φωτογραφική πλάκα επηρεάζεται από την κίτρινη ομίχλη ή μετατρέπει το φιλμ σε καφέ χρώμα).

Δοχείο διαβροχής (Wetting agent tank)

Η φωτογραφική πλάκα τοποθετείται σε ένα δοχείο διαβροχής, το οποίο βοηθάει ακόμη και την ξήρανση.

Στέγνωμα

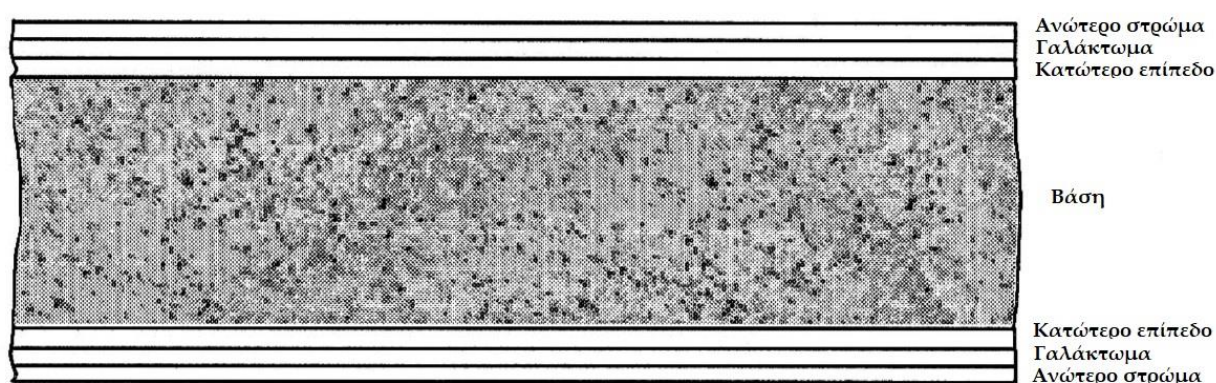
Τελικά, η ταινία στεγνώνει και είναι τώρα έτοιμη να την δούμε.

Προβολή ακτινογραφίας

Για την προβολή ακτινογραφιών χρησιμοποιείται μία ειδική συσκευή που χρησιμοποιεί ισχυρό λευκό φως. Οι ακτινογραφίες εξετάζονται κανονικά σε ένα δωμάτιο χαμηλού φωτισμού, καθιστώντας πιο εύκολη την αλλαγή της πυκνότητας που προκαλείται από ελαττώματα ή γεωμετρία.

Ακτινογραφική ταινία

Η ακτινογραφική ταινία, σε αντίθεση με το φωτογραφικό φιλμ, έχει επικάλυψη γαλακτώματος και στις δύο πλευρές. Αυτό επιτρέπει τη διαθεσιμότητα περισσότερων κρυστάλλων αλογονιδίων ασημιού, τα οποία παράγουν τις σκοτεινές εικόνες, χωρίς να δημιουργείται πάρα πολύ παχύ στρώμα, το οποίο μπορεί να γίνει ασταθές και να γλιστρήσει, προκαλώντας θόλωση των εικόνων. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο χρόνος έκθεσης.



Εικόνα 19. Μια πλάγια όψη ενός ακτινογραφικού φιλμ και της κατασκευής του – η ίδια και στις δύο πλευρές της βάσης

Όπως προαναφέρθηκε, μετά την έκθεση, η εικόνα στην ταινία δεν μπορεί αρχικά να εμφανιστεί. Αυτό ονομάζεται λανθάνουσα εικόνα και μπορεί να φανεί μόνο μετά την επεξεργασία της ταινίας.

3.4.4.4|Σύγχρονες μέθοδοι

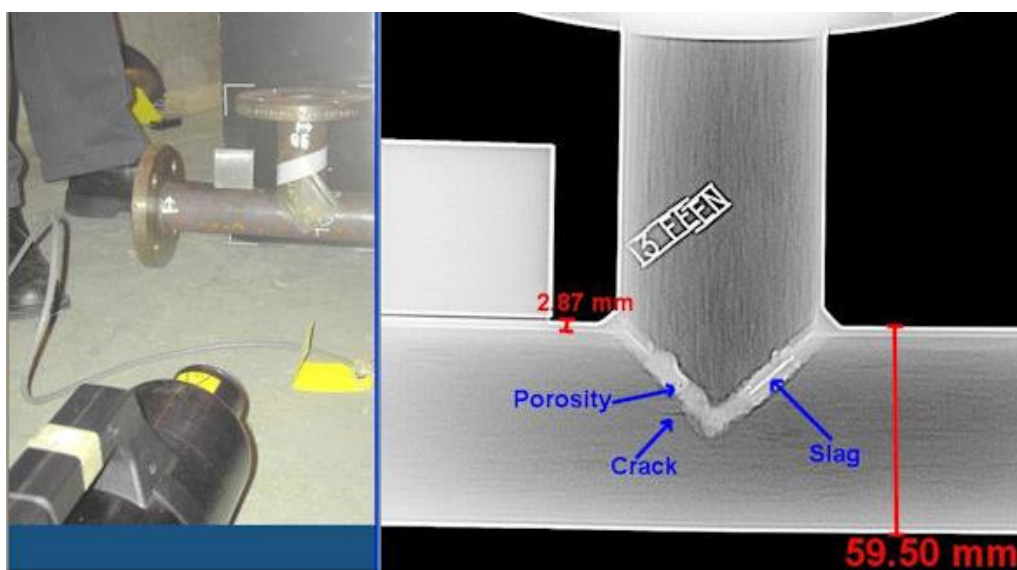
Αν και η ακτινογραφία ήταν μία από τις πρώτες μεθόδους ΜΚΕ και όπως προείπαμε έχει αντικατασταθεί σε ορισμένες εφαρμογές, οι σύγχρονες βελτιώσεις στην ακτινογραφία έχουν επεκταθεί και διευρύνουν τη χρήση της. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα παραδείγματα.

Ψηφιακή ακτινογραφία

Η ψηφιακή ακτινογραφία προχώρησε αφού η ταχύτητα και η ανάπτυξη της μνήμης των υπολογιστών επέτρεψαν την παραγωγή ψηφιακών εικόνων και τη δυνατότητα να μετασχηματιστούν, να αποθηκευτούν και να εμφανιστούν με τη χρήση σχετικά φθηνού εξοπλισμού.

Με την εμφάνιση μεγάλων συστοιχιών τρανζίστορ λεπτής μεμβράνης, επέτρεψε τη χρήση μεγάλων ψηφιακών εικόνων ακτίνων Χ. Μπορούμε να τα εντοπίσουμε σε νοσοκομεία και στα μηχανήματα σάρωσης αποσκευών στα αεροδρόμια καθώς και στη βιομηχανική ακτινογραφία.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι αντικατάστασης του φιλμ με ψηφιακά μέσα, αλλά οι πιο συνηθισμένοι ανιχνευτές επίπεδης επιφάνειας με άμορφο πυρίτιο ή σελήνιο χρησιμοποιούν μια κάμερα που βασίζεται σε μια συσκευή φορτισμένης συστοιχίας (charged – coupled device CCD). Η ακτινογραφική εικόνα συλλαμβάνεται από τα επίπεδη πλαίσια και στη συνέχεια καταγράφεται ψηφιακά. Αυτό δίνει στους ακτινολόγους τα προφανή πλεονεκτήματα της ενίσχυσης, μεγέθυνσης και αποθήκευσης των ακτινογραφικών εικόνων, όπως ακριβώς γίνεται και με κάθε άλλη ψηφιακή/μηχανογραφική εικόνα.



Φωτογραφία 2. Ψηφιακή ακτινογραφία τμήματος δικτύου

Στην παραπάνω Φωτογραφία 2, βλέπουμε μία ψηφιακή ακτινογραφία τμήματος δικτύου όπου διακρίνουμε το πορώδες (porosity), το σπάσιμο (crack) και τη σκουριά (slag).

Ακτινογραφία σε πραγματικό χρόνο

Η ακτινογραφία σε πραγματικό χρόνο μεταφέρει την ακτινογραφική εικόνα σε μια οθόνη και την βλέπει όπως συμβαίνει, δηλαδή σε πραγματικό χρόνο. Η ακτινογραφία σε πραγματικό χρόνο δεν είναι καινούργια, η φθοριοσκόπηση (το αρχικό όνομα για άμεση προβολή των ακτινογραφικών εικόνων) χρησιμοποιήθηκε το 1897 στο σταθμό των Βρυξελλών για τον έλεγχο αποσκευών, αλλά η

εμφάνιση των υπολογιστών και της ψηφιακής ακτινογραφίας έχει εκσυγχρονίσει τις εγκαταστάσεις προβολής και αποθήκευσης αυτής της μεθόδου.

Η μέθοδος λειτουργεί με τη μετατροπή της ακτινοβολίας στο φως με φθορίζουσες οθόνες (συνεπώς με ακτινοσκόπηση). Συστήματα σε πραγματικό χρόνο είναι τα συστήματα αερολιμένων που αναφέρονται παραπάνω στην ψηφιακή ακτινογραφία

Ηλεκτρονική τομογραφία

Αυτός είναι ένας τρόπος εμφάνισης μιας τομής (slice) μέσω μιας εικόνας αντί για μια επίπεδη δισδιάστατη εικόνα. Είναι ένας τρόπος προβολής των εσωτερικών περιοχών ενδιαφέροντος χωρίς παρεμβολή. Και πάλι, αυτή η μέθοδος ήταν γύρω από τη δεκαετία του 1940, αλλά η μηχανοργάνωση και η ψηφιακή απεικόνιση την έχουν βελτιώσει δραματικά. Χρησιμοποιείται ευρέως σε ιατρικές εφαρμογές και επίσης στη βιομηχανία ηλεκτρονικών για δοκιμή κυκλωμάτων.

Ακτινογραφία νετρονίων

Η ακτινογραφία νετρονίων χρησιμοποιεί νετρόνια αντί για ακτίνες X ή Γάμμα για να περάσει μέσα από το αντικείμενο και να εκθέσει το φιλμ. Το φιλμ που χρησιμοποιείται είναι το ίδιο με την συμβατική ακτινογραφία, αλλά λειτουργεί με τον αντίθετο τρόπο. Με τις ακτίνες X και Γάμμα, η ακτινοβολία απορροφάται με πιο πυκνά υλικά και περνά μέσα από ελαφρύτερα υλικά. Η ακτινοβολία των νετρονίων απορροφάται από ελαφρά υλικά αλλά περνά μέσα από πυκνά υλικά με ευκολία.

Ο εξοπλισμός είναι ακριβός, ογκώδης και υπάρχουν επιπλέον κίνδυνοι, δηλαδή βομβαρδισμός με νετρόνια μπορεί να κάνει ορισμένα υλικά ραδιενεργά. (Η μόνη φορητή πηγή είναι το Καλιφόρνιο 252, το οποίο είναι ακριβό.)

Οι χρήσεις του είναι γενικά για τον εντοπισμό ελαφρών υλικών μέσα σε πυκνά υλικά, δηλαδή πλαστικών εκρηκτικών μέσα σε μεταλλικό κέλυφος, ρωγμών σε νάιλον επενδύσεις μέσα σε μεταλλική σφαίρα και παγίδευσης νερού και διάβρωσης σε φτερά αεροσκάφους.

3.4.4.5|Τυπικές χρήσεις της βιομηχανικής ακτινογραφίας

Παρόλο που η ακτινογραφία μπορεί να ανιχνεύσει επιφανειακές ατέλειες και ρωγμές σε ορισμένους προσανατολισμούς, χρησιμοποιείται κυρίως για την εύρεση ογκομετρικών ελαττωμάτων, όπως κενά, παγιδευμένο αέριο, συρρίκνωση κλπ. Η ακτινογραφία χρησιμοποιείται κυρίως για την ανίχνευση ελαττωμάτων σε συγκολλήσεις και χύτευση. Θεωρείται ότι είναι η πλέον αποτελεσματική μέθοδος για την επιθεώρηση σωληνωτών συγκολλήσεων λεπτού τοιχώματος μικρής οπής, καθώς η πλειονότητα των ελαττωμάτων που διαπιστώθηκαν είναι στο πορώδες και στις σωληνώσεις.

3.4.4.6|Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της βιομηχανικής ακτινογραφίας

Πλεονεκτήματα

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα περισσότερα στερεά υλικά.
- Έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύει εσωτερικές ατέλειες.
- Παρέχει μόνιμη καταγραφή του ελέγχου.
- Ανακαλύπτει σφάλματα κατασκευής και συχνά υποδεικνύει τις απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες.
- Ανακαλύπτει σφάλματα συναρμολόγησης.
- Το γεγονός ότι πραγματοποιείται ακτινολογική εξέταση βελτιώνει την ποιότητα της συγκόλλησης.
- Μας δίνει ογκομετρική εικόνα των ευρημάτων, μπορώ να μετρήσω διαστάσεις μήκους και πλάτους συγκόλλησης.

Μειονεκτήματα

- Μπορεί να ανιχνεύσει μόνο τα ελαττώματα που είναι σε κάποιο προσανατολισμό. Έχει δυσκολία στην ανίχνευση πολύ μικρών ελαττωμάτων.
- Δεν είναι πρακτικό να εξεταστούν τμήματα σύνθετης γεωμετρίας.
- Είναι απαραίτητη η πρόσβαση σε δύο όψεις.
- Απαιτεί πολλές προϋποθέσεις ασφάλειας και προφανώς, αν χρησιμοποιείται εσφαλμένα, μπορεί να είναι εξαιρετικά επικίνδυνη.
- Γενικά, είναι μια μέθοδος ΜΚΕ υψηλού κόστους, τόσο σε κεφάλαια, αναλώσιμα όσο και σε ανθρώπινο δυναμικό.

3.4.5|Έλεγχος υπερήχων – Ultrasonic testing (UT)

Ο έλεγχος με υπέρηχους είναι μια ευέλικτη μέθοδος μη καταστρεπτικών δοκιμών. Έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές που επιτρέπουν πλήρη ογκομετρική επιθεώρηση μιας μεγάλης γκάμας εξαρτημάτων κατασκευασμένων από μεγάλη ποικιλία υλικών. Είναι πιθανώς η πιο σημαντική μέθοδος που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

3.4.5.1|Βασικές αρχές

Οι ηχητικές συχνότητες που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση δοκιμών με υπερήχους είναι υψηλότερες από το ακουστικό εύρος του ανθρώπου, το οποίο κανονικά κυμαίνεται μεταξύ 16Hz και

20.000Hz. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται συνήθως για δοκιμές με υπερήχους κυμαίνονται μεταξύ 500kHz και 25MHz.

Η συχνότητα του ήχου που επιλέγεται για την επιθεώρηση ενός στοιχείου είναι πολύ σημαντική. Ο ήχος υψηλής συχνότητας, για παράδειγμα τα 5MHz για εφαρμογές ελέγχου επαφών, θα παρέχει καλή ευαισθησία, που είναι ένας όρος που αναφέρεται στην ικανότητα ανίχνευσης μικρών ατελειών στο υπό εξέταση υλικό, γνωστές και ως ασυνέχειες. Η παραπάνω συχνότητα ήχου θα έχει επίσης καλή ανάλυση, ο οποίος είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ικανότητα ενός συστήματος δοκιμών να εμφανίζει, ξεχωριστά στην οθόνη του οργάνου, ασυνέχειες που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση.

Ορισμένα εξαρτήματα, όπως τα χυτά, μπορούν να έχουν πολύ μεγάλη δομή κόκκων και ως εκ τούτου είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να δοκιμάζονται με ήχο υψηλής συχνότητας. Ο ήχος στα 5MHz δεν μπορεί να διεισδύσει μέσα από το χονδρόκοκκο υλικό λόγω ενός φαινομένου σκέδασης το οποίο ονομάζεται εξασθένηση ή απώλεια ενέργειας υπερήχων.

Για να δοκιμαστεί αυτό το χονδρόκοκκο υλικό, θα επιλεγεί ήχος χαμηλής συχνότητας, όπως το 1MHz. Ο ήχος στο 1 MHz θα έχει καλή διείσδυση αλλά χαμηλή ευαισθησία και ανάλυση.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο στόχος πολλών εφαρμογών ΜΚΕ είναι να αναζητήσουν την ύπαρξη ασυνεπειών. Μια ασυνέχεια μπορεί να είναι πολλές διαφορετικές συνθήκες: ρωγμές, σκουριά, πορώδες κλπ είναι τα ονόματα μερικών μόνο.

Θα ήταν λάθος να χρησιμοποιηθεί η επιθεώρηση με υπερήχους για να εντοπιστεί, για παράδειγμα, μια ρωγμή και στη συνέχεια να αναφερθεί η ρωγμή ως ελάττωμα. Μια ασυνέχεια μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελάττωμα μόνο αν υπερβαίνει συγκεκριμένα πρότυπα αποδοχής. Εάν έχουμε δύο ρωγμές του ίδιου μήκους αλλά σε διαφορετικά συστατικά, μπορεί η μία να είναι σε αποδεκτά όρια και η άλλη όχι, επομένως μόνο τη δεύτερη θα την χαρακτηρίζαμε ως ελάττωμα.

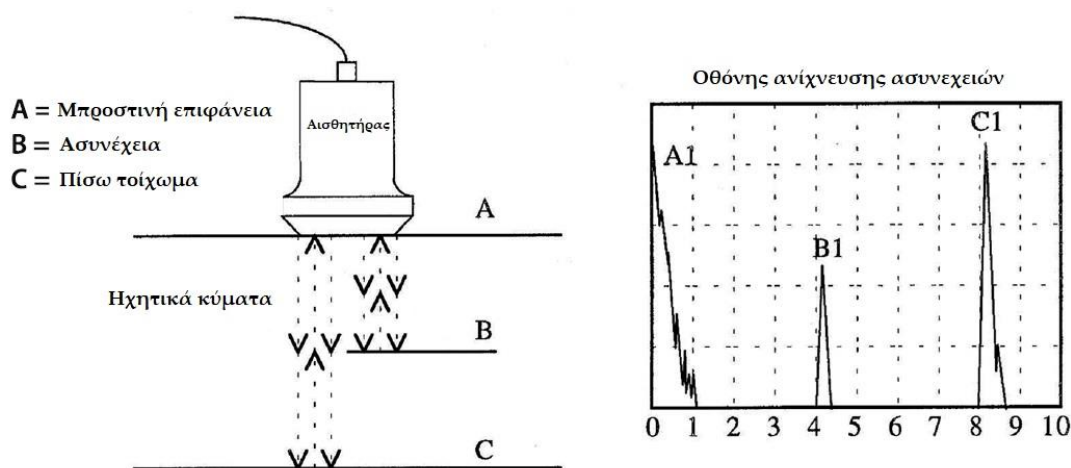
Συνεπώς, πώς μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε υπερήχους για να εντοπίσουμε ασυνέχειες; Θα εξετάσουμε τον συγκεκριμένο εξοπλισμό λεπτομερέστερα παρακάτω. Ωστόσο, στην ουσία, χρειαζόμαστε έναν ανιχνευτή υπερήχων ελαττωμάτων, ένα καλώδιο σύνδεσης, έναν ανιχνευτή υπερήχων και έναν συζεύκτη. Ορισμένα εξαρτήματα, όπως τα χυτά, μπορούν να έχουν πολύ μεγάλη δομή κόκκων και ως εκ τούτου είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να δοκιμάζονται με ήχο υψηλής συχνότητας. Ο ήχος στα 5MHz δεν μπορεί να διεισδύσει μέσα από το χονδρόκοκκο υλικό λόγω ενός αποτελέσματος σκέδασης που ονομάζεται εξασθένηση ή απώλεια ενέργειας υπερήχων.

Ο ανιχνευτής ασυνέχειας – αισθητήρας βρίσκεται στην καρδιά του συστήματος. Διαθέτει διάφορα στοιχεία ελέγχου και μια οθόνη για την εμφάνιση των πληροφοριών δοκιμής. Ο ανιχνευτής ασυνέχειας ενεργοποιεί έναν παλμό τάσης μικρής διάρκειας, που ονομάζεται μερικές φορές και αρχικός παλμός, κάτω από το καλώδιο στον ανιχνευτή. Ο αισθητήρας περιέχει έναν ή

περισσότερους ειδικούς κρυστάλλους που δονούν σε υψηλή συχνότητα όταν χτυπιούνται με τους παλμούς τάσης. Πρέπει να τοποθετηθεί πάνω σε ένα εξάρτημα και ο σύνδεσμος να εξασφαλίζει την αποτελεσματική μεταφορά του υπερήχου μέσα στο εξάρτημα – ένα κενό αέρος δεν θα επέτρεπε την επαρκή μεταφορά υπερήχων.

Ο ήχος περνά μέσα από το στοιχείο ως μια σειρά βραχέων κυμάτων. Μια τυπική συχνότητα επανάληψης παλμών θα ήταν μερικές εκατοντάδες παλμοί κάθε δευτερόλεπτο. Καθώς ο ήχος είναι κύμα, συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο όπως τα φωτεινά κύματα, δηλαδή αντανακλώνται όταν συναντούν οποιαδήποτε επιφάνεια στην πορεία τους. Οι επιφάνειες που πιθανόν να συναντήσει ένα ηχητικό κύμα είναι ασυνέχειες στο στοιχείο ή στο πίσω τοίχωμα του εξαρτήματος. Τα ανακλώμενα ηχητικά κύματα επιστρέφουν στον αισθητήρα, ο οποίος τα μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα. Αυτό περνάει πίσω από το καλώδιο στον αισθητήρα, ο οποίος το εμφανίζει στην οθόνη.

Τα παραπάνω αποτελούν τη βάση της δοκιμής παλμικής απόκρισης και μια τυπική διάταξη ελέγχου, συμπεριλαμβανομένης της οθόνης ανίχνευσης ασυνεχειών απεικονίζεται στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20. Τυπική διάταξη ελέγχου δοκιμής υπερήχων

Η ηχώ στο A1 είναι το αποτέλεσμα της ηχητικής ενέργειας που αντανακλά πίσω αφού χτυπήσει την μπροστινή επιφάνεια του δείγματος υπό εξέταση, μαζί με τον ήχο του κρυστάλλου και τον αρχικό παλμό, όλα έχουν συγχωνευθεί σε ένα σήμα. Το B1 είναι η ηχώ ασυνέχειας και το C1 είναι η ηχώ του οπίσθιου τοιχώματος.

Εάν ο ανιχνευτής ασυνεχειών βαθμονομείται, τότε το βάθος της ασυνέχειας και το πάχος του εξαρτήματος μπορούν να καθοριστούν με ακρίβεια από τη στιγμή που χρειάζεται ο ήχος να ταξιδέψει από τον αισθητήρα στην ασυνέχεια ή το πίσω τοίχωμα και πάλι πίσω.

Μπορεί να γίνει μια εκτίμηση που αφορά στο σχετικό μέγεθος μιας ασυνέχειας με το χειρισμό του ανιχνευτή στην επιφάνεια πάνω από την ασυνέχεια και με την ποσότητα του ήχου που επιστρέφει στον ανιχνευτή από την ασυνέχεια σε σχέση με την ποσότητα ήχου που επιστρέφει από έναν στόχο αναφοράς.

Για να ελεγχθεί ολόκληρη η συνιστώσα, ο αισθητήρας πρέπει να σαρώσει πλήρως την επιφάνεια του εξαρτήματος, εξασφαλίζοντας ότι ένα πέρασμα του αισθητήρα επικαλύπτει το προηγούμενο πέρασμα κατά μία προκαθορισμένη ποσότητα. Η σάρωση μπορεί να γίνει χειροκίνητα ή μηχανικά με αυτοματοποιημένα συστήματα.

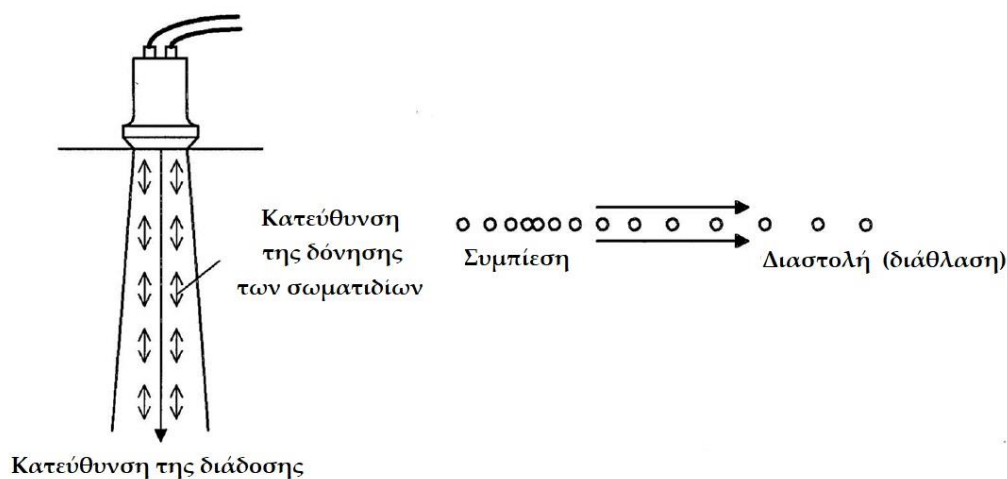
3.4.5.2|Φύση του ήχου

Εξετάσαμε τις βασικές αρχές της μεθόδου υπερήχων: Πρέπει τώρα να εξετάσουμε σε βάθος τη φύση του υπερήχου, που βρίσκεται στο επίκεντρο της μεθόδου.

Ένα κύμα υπερήχων σε δοκιμασία παλμού – ηχώ είναι μια μηχανική δόνηση υψηλής συχνότητας βραχείας διάρκειας των ατόμων ή των μορίων που αποτελούν ένα υλικό. Αυτά τα κύματα υπερήχων συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο όπως τα ηχητικά κύματα και ως εκ τούτου θα κινούνται μέσα από ένα μέσο που θα υποστηρίζει μηχανικούς κραδασμούς – στερεά, υγρά και αέρια. Τα κύματα υπερήχων δεν θα κινηθούν μέσα στο κενό.

Τα κύματα υπερήχων περνούν μέσω στερεών υλικών με μεγάλη ταχύτητα. Η ειδική ταχύτητα του υπερήχου θα διαφέρει από υλικό σε υλικό ανάλογα με την πυκνότητα και τις ελαστικές του ιδιότητες. Η ταχύτητα του υπερήχου μέσα σε ένα συγκεκριμένο υλικό θα διαφέρει επίσης ανάλογα με το είδος του υπερήχου που παράγεται, όπως για παράδειγμα η συμπίεση, η διάτμηση, τα κύματα επιφανείας κλπ.

Εάν ένας ανιχνευτής μεταδίδει υπερήχους σε υλικό φυσιολογικό στην επιφάνεια του (Εικόνα 21), δηλαδή με γωνία προσπίπτουσας ή κοντά στις 0° , ο τρόπος διάδοσης θα παράγει συμπιεσμένα ή διαμήκη κύματα, τα οποία προκαλούν μηχανική δόνηση των ατόμων ή μορίων στην ίδια κατεύθυνση με τη συνολική κατεύθυνση της διάδοσης των κυμάτων. Αυτό θα οδηγήσει σε εναλλασσόμενες περιοχές πίεσης συμπίεσης και διαστολής. Τα κύματα συμπίεσης μπορούν να κινηθούν μέσω στερεών, υγρών και αερίων και θα έχουν ταχύτητα σε ήπιο χάλυβα περίπου 5960 m/s.



Εικόνα 21. Ανιχνευτής που μεταδίδει υπερήχους (πομπός)

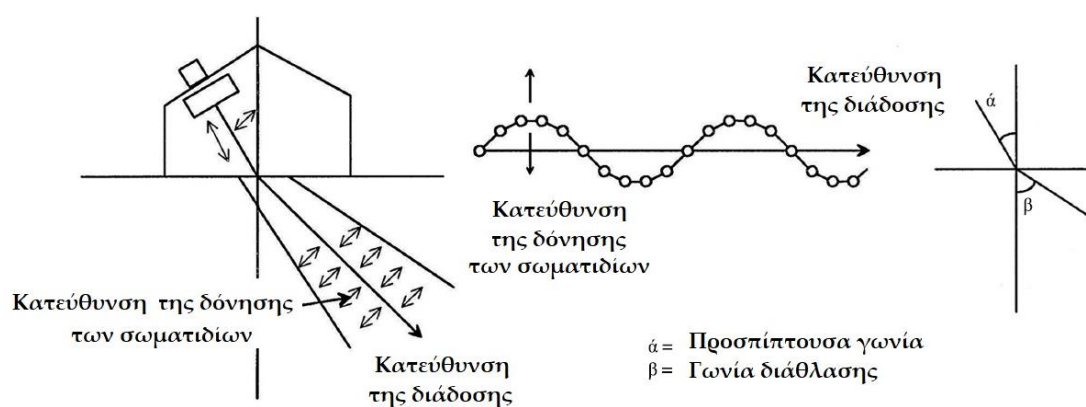
Στην Εικόνα 21 βλέπουμε ότι με έναν αισθητήρα συμπίεσης, η δόνηση των σωματιδίων και η διάδοση της δέσμης είναι στην ίδια κατεύθυνση.

Όταν ένα προσπίπτων κύμα συμπίεσης συναντά ένα όριο μεταξύ δύο υλικών με διαφορετικές ταχύτητες ήχου, για παράδειγμα υπό διαφορετική γωνία από την κανονική (για τον χάλυβα η γωνία προσπίπτοντος κύματος συμπίεσης είναι μεταξύ 28° και 56°), τότε ένα κύμα συμπίεσης στο πρώτο υλικό γίνεται ένα κύμα διάτμησης στο δεύτερο υλικό. Η κατεύθυνση του κύματος θα αλλάξει επίσης όταν το κύμα φτάσει στο όριο του υλικού – αυτό ονομάζεται διάθλαση (βλέπε Εικόνα 22). Οι ανιχνευτές διατμητικής κυματομορφής είναι πολύ χρήσιμοι, ιδιαίτερα όταν εμφανίζονται ασυνέχειες σε διάφορους προσανατολισμούς.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένας ανιχνευτής για χρήση σε χάλυβα θα έχει γωνία προσπίπτουσα μεταξύ 28° και 5° , παράγοντας ένα επίμηκες κύμα διάθλασης μεταξύ 34° και 80° στον χάλυβα. Ένα κύμα διάθλασης αποτελείται από μηχανικούς κραδασμούς των ατόμων ή των μορίων σε 90° προς την κατεύθυνση της διάδοσης κύματος. Το ίδιο φαινόμενο μπορεί να διαπιστωθεί εάν ένας φελλός βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας. Τα κύματα θα κινούνται οριζόντια, ενώ ο φελλός κινείται πάνω και κάτω.

Τα κύματα διάτμησης μπορούν να κινούνται μόνο μέσω στερεών, ενώ η άκαμπτη σύνδεση των σωματιδίων αποτελεί προϋπόθεση και θα κινηθούν μέσω μαλακού χάλυβα με περίπου 3240m/s.

Μπορούν επίσης να δημιουργηθούν κύματα υπερήχων που περνούν κατά μήκος της επιφάνειας ενός εξαρτήματος και να ακολουθούν τα περιγράμματα της επιφάνειας. Αυτά ονομάζονται επιφανειακά ή κύματα Rayleigh. Είναι αρκετά ρηχά, βαθιά περίπου μόνο ένα μήκος κύματος και έχουν ταχύτητα περίπου το 90% της ταχύτητας ενός διατμητικού κύματος στο ίδιο υλικό. Είναι αρκετά ευαίσθητα στις επιφανειακές ρωγμές που βρίσκονται κατά μήκος της διαδρομής τους, αν και είναι απαραίτητη μία καλή και καθαρή επιφάνεια ώστε να παραχθούν αξιοποιήσιμα αποτελέσματα.

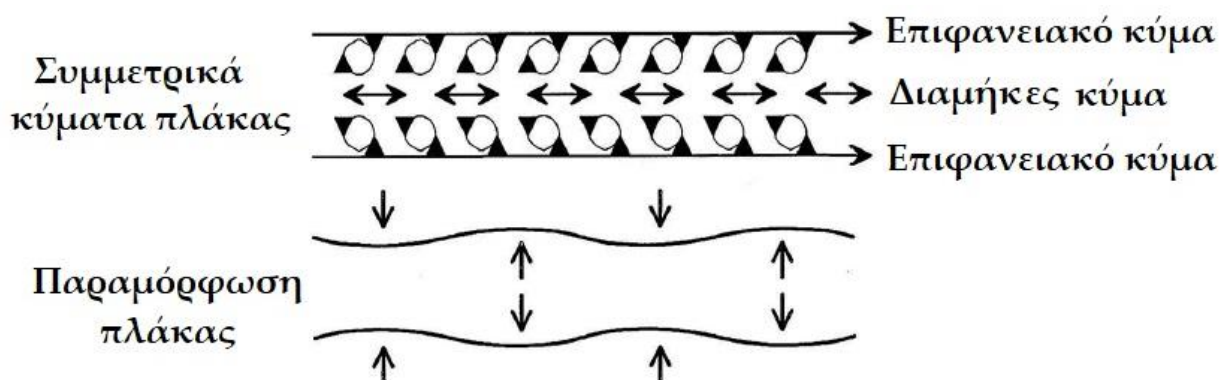


Εικόνα 22. Ανιχνευτής κύματος διάτμησης

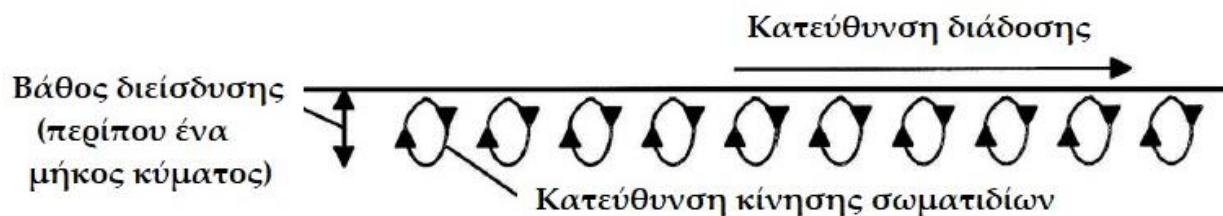
Στην Εικόνα 22 βλέπουμε ότι ένας ανιχνευτής κύματος διάτμησης θα έχει μια καθορισμένη προσπίπτουσα γωνία, η οποία θα παράγει μια διαθλασμένη γωνία στο στοιχείο. Εμφανίζονται οι κραδασμοί των σωματιδίων και η διεύθυνση της διάδοσης.

Η μηχανική δόνηση των ατόμων ή των μορίων βρίσκεται σε ελλειπτική κατεύθυνση, με την κατεύθυνση της διάδοσης κύματος παράλληλη προς την επιφάνεια (Εικόνα 23).

Εάν τα κύματα επιφανείας εισάγονται σε λεπτό υλικό, ονομάζονται κύματα επιφανείας ή κύματα Lamb και μπορεί να είναι είτε συμμετρικά είτε ασύμμετρα. Η Εικόνα 23 δείχνει συμμετρικά κύματα πλακών.



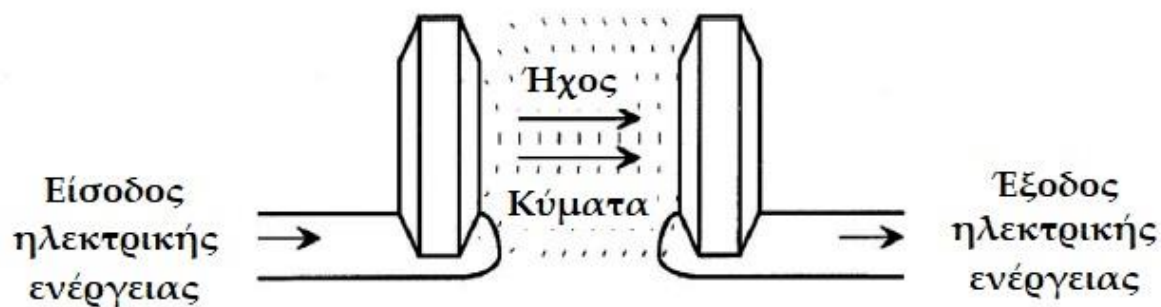
Εικόνα 23. Μπορεί να παρατηρηθεί το μικρό βάθος διεξόδου ενός επιφανειακού κύματος



Εικόνα 24. Κύματα πλάκας προκαλούν την κάμψη της λεπτής πλάκας

3.4.5.3| Παραγωγή ήχου – το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

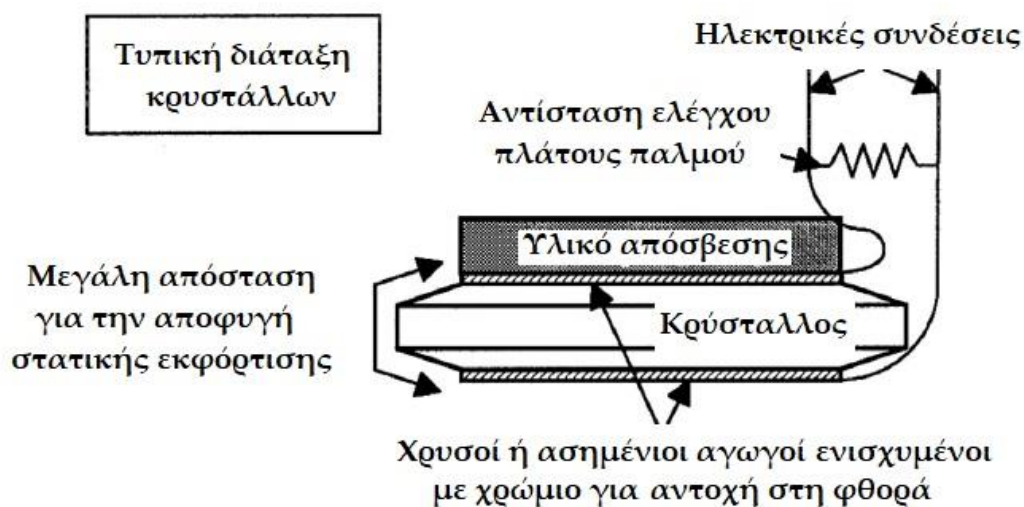
Εξετάσαμε τη φύση του ήχου, τώρα θα εξετάσουμε πώς παράγεται ο ήχος από τους κρυστάλλους που περιέχονται στους αισθητήρες. Χρησιμοποιείται το πιεζοηλεκτρικό αποτέλεσμα, το οποίο είναι μια ιδιότητα ορισμένων κρυστάλλων για μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια και αντίστροφα – αυτό φαίνεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25. Μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια και αντίστροφα

Οι ανιχνευτές ονομάζονται συχνά μορφομετατροπείς επειδή μετατρέπουν την ενέργεια από τη μια μορφή στην άλλη, δηλαδή την ηλεκτρική ενέργεια σε ηχητική ενέργεια και το αντίστροφο.

Αυτοί οι κρύσταλλοι μπορεί να είναι φυσικοί, τεχνητά παρασκευασμένοι ή να έχουν αναπτυχθεί σε διάλυμα. Φυσικοί κρύσταλλοι, όπως ο χαλαζίας, χρησιμοποιούνται σπάνια αυτές τις μέρες επειδή τα κατασκευασμένα κεραμικά υλικά τείνουν να δίνουν πολύ καλύτερες ιδιότητες όσον αφορά την παραγωγή ήχου, την ανάλυση, κλπ.



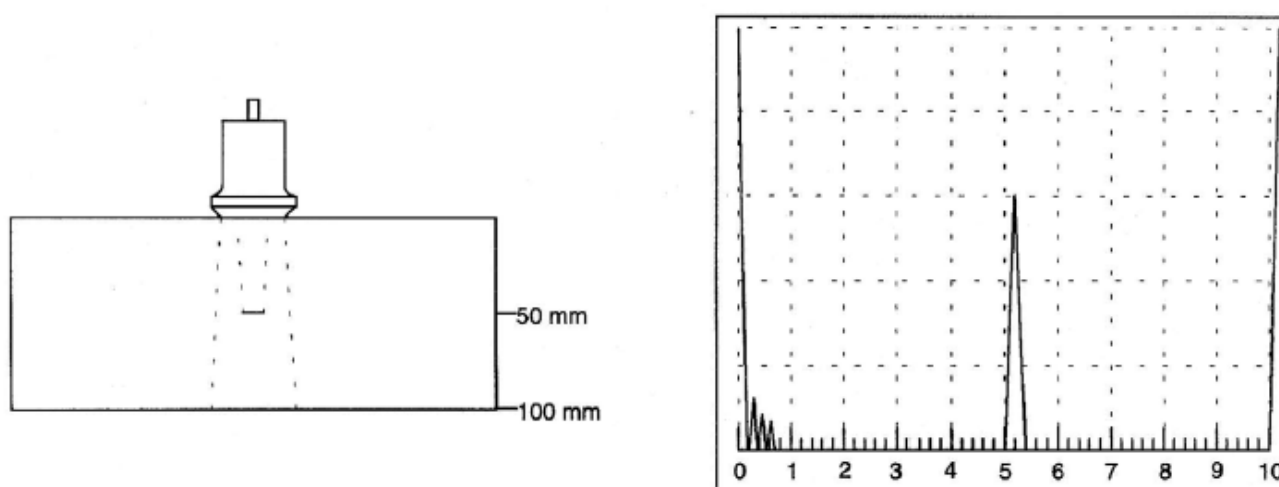
Εικόνα 26. Τυπική διάταξη κρυστάλλων

Ένα τυπικό κεραμικό υλικό είναι το τιτάνιο του βαρίου, όπου δεν χρησιμοποιείται ολόκληρος ο κρύσταλλος για την κατασκευή ενός ανιχνευτή. Κόβεται μια λεπτή φέτα και όσο πιο λεπτή είναι η φέτα τόσο υψηλότερη είναι η συχνότητα του υπερήχου που παράγεται. Ολόκληρος ο αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 26.

Ένας κρύσταλλος έχει έναν άξονα και αφού κοπεί, συναρμολογείται με ηλεκτρικές συνδέσεις και υλικό απόσβεσης για τον έλεγχο του μήκους παλμού.

3.4.5.4| Παρουσίαση δεδομένων ανίχνευσης ατελειών

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι απεικόνισης για ανιχνευτές ατελειών: η σάρωση A – scan, η σάρωση B – scan και η σάρωση C – scan. Η σάρωση A – scan είναι η πιο κοινή που χρησιμοποιείται σε δοκιμές με υπέρηχο. Δείχνει τα πλάτη του επιστρεφόμενου σήματος κάθετα και τον χρόνο που έχει παρέλθει ή την οριζόντια απόσταση. Ένας έμπειρος χειριστής μπορεί να είναι σε θέση να προσδιορίσει τη φύση μιας ασυνέχειας από το σχήμα του σήματος στην οθόνη, καθώς επίσης να καθορίσει το πάχος του εξαρτήματος και να προσεγγίσει το μέγεθος μιας ασυνέχειας. Η Εικόνα 27 δείχνει μια τυπική οθόνη σάρωσης A – scan.



Εικόνα 27. Τυπική οθόνη σάρωσης A – scan

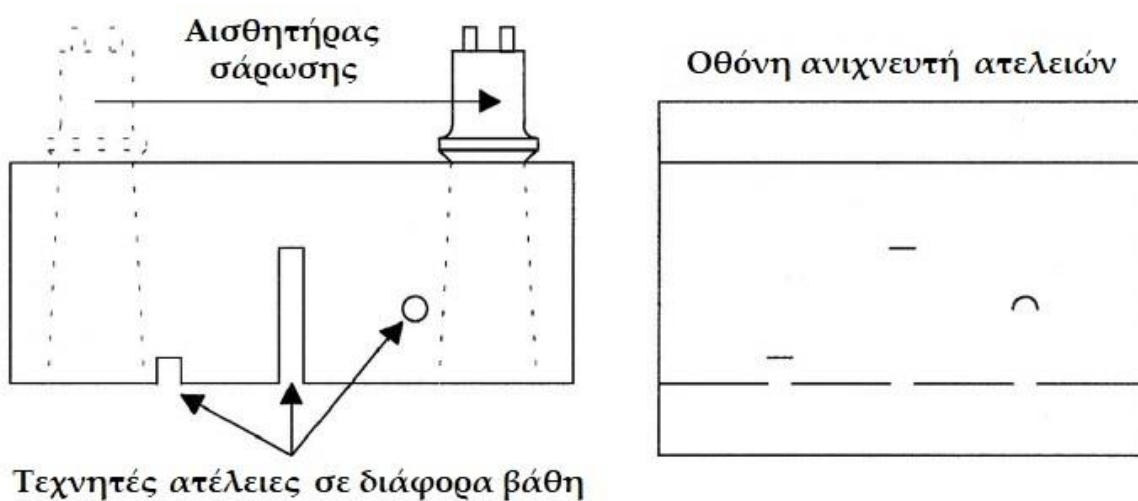
Στην Εικόνα 27 όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα ενέργειας που επιστρέφει στον αισθητήρα, τόσο μεγαλύτερο είναι το σήμα στην οθόνη. Το βάθος ενός ανακλαστήρα μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια: η ασυνέχεια σε βάθος 50mm φαίνεται ως ηχώ στην οθόνη στο 5 και το οπίσθιο τοίχωμα σε βάθος 100mm εμφανίζεται ως ηχώ στο 10.

Στην παρακάτω Φωτογραφία 3 βλέπουμε δύο είδη συσκευών A – scan.



Φωτογραφία 3. Διάφορες συσκευές A – scan

Με τις οθόνες σάρωσης B – scan, εξετάζεται μια εγκάρσια τομή του εξεταζόμενου στοιχείου. Η οθόνη δείχνει το βάθος των ανακλαστήρων και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του μεγέθους της εγκάρσιας τομής, της θέσης (τόσο της θέσης όσο και του βάθους) και σε περιπτώσεις μεγάλων ασυνεχειών, μπορεί να δείξει το σχήμα και τον προσανατολισμό σε κάποιο βαθμό.



Εικόνα 28. Μια τυπική οθόνη B – scan με τεχνητές ατέλειες διαφορετικού μεγέθους σε διαφορετικά βάθη

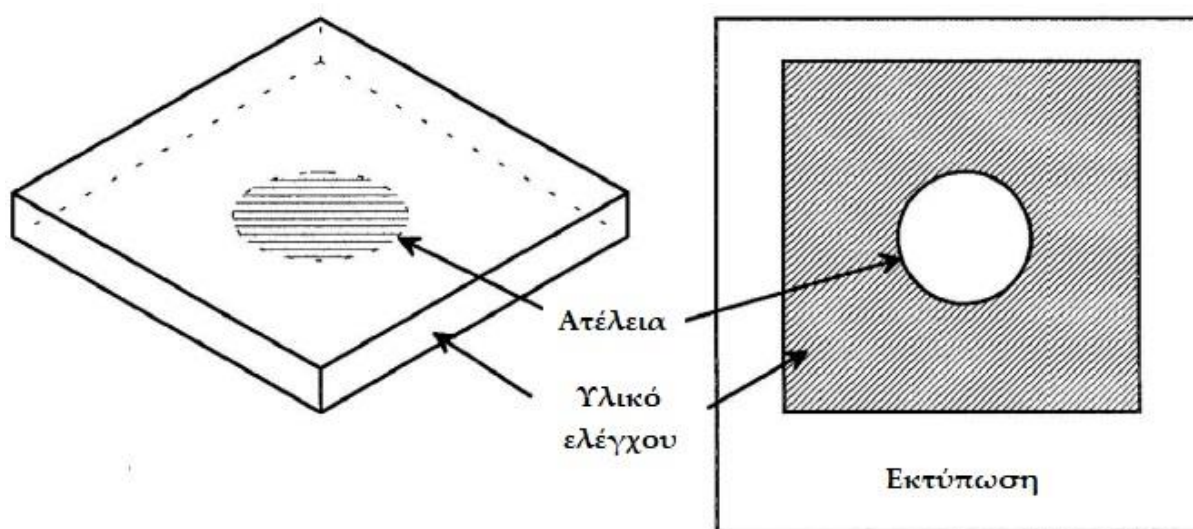
Με ένα σύστημα σάρωσης B – scan, είναι ο χρόνος άφιξης ενός παλμού (κατακόρυφη κατεύθυνση) σχεδιασμένος ως συνάρτηση της θέσης του αισθητήρα (οριζόντια κατεύθυνση) που εμφανίζεται (αυτό φαίνεται στην Εικόνα 28). Στην παρακάτω Φωτογραφία 4 βλέπουμε δύο είδη συσκευών B – scan.



Φωτογραφία 4. Διάφορες συσκευές B – scan

Εάν απαιτείται μια κάτοψη ενός εξαρτήματος, χρησιμοποιείται σύστημα απεικόνισης C– scan που είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό για πολύστρωτα σύνθετα υλικά, συμπεριλαμβανομένων των κυψελωτών φύλλων, των κυλινδρικών προϊόντων και των σύνθετων υλικών συγκόλλησης ή ελασματοποίησης. Μια οθόνη C – scan δημιουργείται χρησιμοποιώντας τη σκίαση raster (X έναντι Y) πάνω στην επιφάνεια του εξαρτήματος. Χρησιμοποιείται κυρίως με αυτοματοποιημένο εξοπλισμό εμβάπτισης και είναι κατάλληλη για χρήση συνδυαστικά με συστήματα διαπερατότητας.

Το μέγεθος της ατέλειας από την άποψη της περιοχής και της θέσης εντός της κάτοψης καταγράφεται είτε ως αρχείο στον υπολογιστή είτε ως έντυπη μορφή (Εικόνα 29). Παρακάτω στην Φωτογραφία 5 βλέπουμε συσκευές C – scan.



Εικόνα 29. Ένα πλεονέκτημα του συστήματος C – scan είναι η μόνιμη καταγραφή των αποτελεσμάτων της σάρωσης



Φωτογραφία 5. Διάφορες συσκευές C – scan

3.4.5.5|Βασικός εξοπλισμός

Θα εξετάσουμε τώρα σε βάθος τον εξοπλισμό που μπορεί να χρησιμοποιήσει ένας χειριστής για μια τυπική επιθεώρηση με υπερήχους.

Ανιχνευτής υπερήχων

Οι ανιχνευτές ατελειών έχουν αλλάξει πολύ και οι σύγχρονοι ψηφιακοί ανιχνευτές είναι πολύ πιο εξελιγμένοι από τα προηγούμενα αναλογικά σετ. Χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό με υπολογιστές για την ερμηνεία και την αποθήκευση δεδομένων.

Ένας βασικός ανιχνευτής ατελειών θα παράγει μια υψηλή επανάληψη των αιχμών τάσης για να παραγάγει τη δόνηση του κρυστάλλου μέσα στον ανιχνευτή. Αυτές οι αιχμές τάσης μπορούν να φτάσουν τα 1000V. Τα σήματα επιστροφής φιλτράρονται, ενισχύονται και εμφανίζονται στην οθόνη.

Οι έλεγχοι ανίχνευσης ελαττωμάτων επιτρέπουν την ακριβή βαθμονόμηση της χρονικής βάσης της οθόνης, η οποία είναι πολύ χρήσιμη για τον προσδιορισμό του βάθους ασυνέχειας ή του πάχους του υλικού.

Οι ηλεκτρονικές πύλες είναι κοινές, οι οποίες ενεργοποιούν συναγερμούς αν τα σήματα σε μια προκαθορισμένη θέση στην οθόνη ανεβαίνουν ή πέφτουν σε επιλεγμένα επίπεδα. Αυτή η λειτουργία επιτρέπει την αυτοματοποίηση των συστημάτων υπερήχων, τα οποία μπορούν να σαρώσουν πολύ πιο γρήγορα από έναν ανθρώπινο χειριστή.

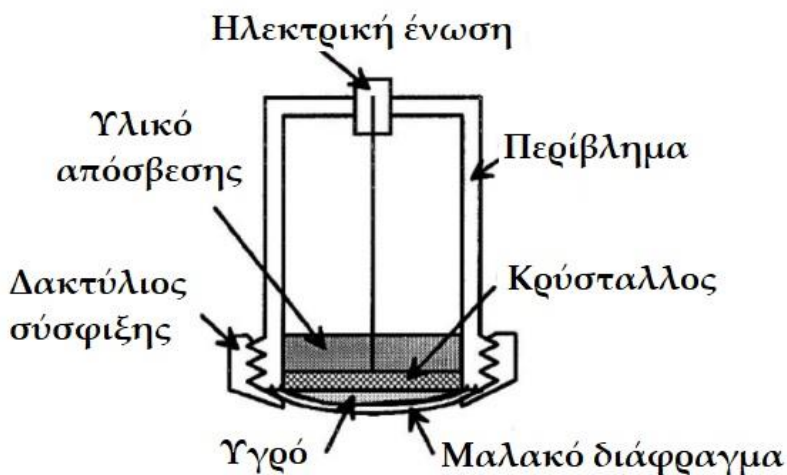
Αισθητήρες

Οι αισθητήρες έρχονται σε μια μεγάλη ποικιλία μεγεθών, συχνοτήτων και γωνιών. Η επιλογή του ανιχνευτή εξαρτάται από το υλικό που εξετάζεται και από τον τύπο του ατέλειας που αναζητείται.

Οι μονοκρυσταλλικοί αισθητήρες συμπίεσης 0° , όπως το παράδειγμα που φαίνεται στην Εικόνα 30, έχουν το πλεονέκτημα της καλής διεισδυτικής ισχύος. Μπορούν να δοκιμαστούν λεπτόκοκκα σφυρήλατα μέχρι 6m. Μπορούν να ανιχνευθούν ογκομετρικές ασυνέχειες και επίπεδες ασυνέχειες παράλληλες προς την επιφάνεια του εξαρτήματος. Ωστόσο, τα ελαττώματα που δεν είναι κάθετα στην ακτίνα υπερήχων ενδέχεται να μην ανιχνευθούν στην οθόνη, αλλά μπορεί να παρατηρηθεί απώλεια σήματος οπίσθιου τοιχώματος.

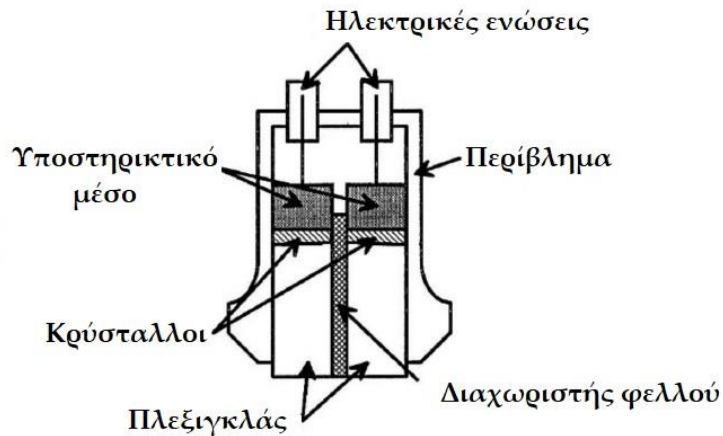
Με χονδρόκοκκο υλικού, επιλέγεται ένας αισθητήρας χαμηλής συχνότητας. Το μειονέκτημα των μονοκρυσταλλικών αισθητήρων είναι η παρουσία της νεκρής ζώνης που υπάρχει στην επιφάνεια και προκαλείται λόγω του ότι ο αισθητήρας εξακολουθεί να εκπέμπει υπερήχους, καθώς ο παλμός επιστροφής προσπαθεί να επιστρέψει πίσω σε αυτόν, αποτρέποντας έτσι την ανίχνευση ασυνεχειών κοντά στην επιφάνεια. Αυτό μπορεί να φανεί με ηχώ Α1 στην Εικόνα 20.

Για να εξουδετερωθεί η νεκρή ζώνη και να ανιχνευθούν ατέλειες κοντά στην επιφάνεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός διπλού κρυστάλλου 0° (Εικόνα 31). Δύο κρύσταλλοι ενσωματώνονται στον ανιχνευτή, διαχωρισμένοι από έναν διαχωριστή φελλού. Ο ένας είναι ο πομπός, ο άλλος ο δέκτης. Οι αισθητήρες αυτής της διαμόρφωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δοκιμή λεπτών τμημάτων για ασυνέχειες ή/και μετρήσεις πάχους.



Εικόνα 30. Εντοπισμός μέσω αισθητήρα συμπίεσης μονού κρυστάλλου

Για άλλη μια φορά, ο υπέρηχος εισάγεται κάθετα στην επιφάνεια του συστατικού, επιτρέποντας την ανίχνευση ογκομετρικών ασυνεχειών και επίπεδων ασυνεχειών παράλληλων προς την επιφάνεια του εξαρτήματος.

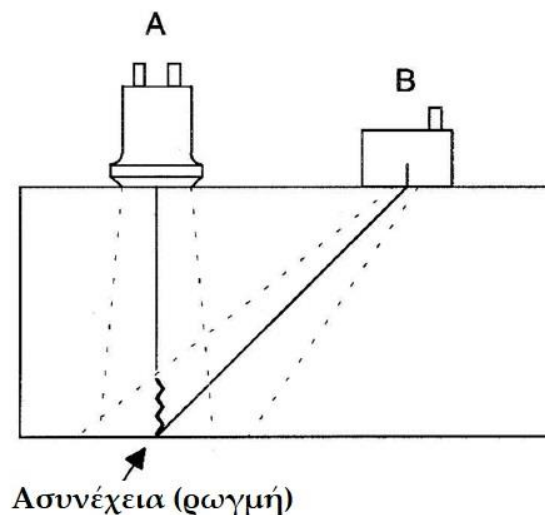


Εικόνα 31. Τομή αισθητήρα συμπίεσης δίδυμου ή διπλού κρυστάλλου

Οι ατέλειες μπορεί να προσανατολίζονται σε μια κατεύθυνση που δεν είναι ευνοϊκή για ανίχνευση από έναν αισθητήρα συμπίεσης 0° . Για το λόγο αυτό οι αισθητήρες κατασκευάζονται επίσης για να εισάγουν υπερήχους μέσα στο υλικό σε διάφορες γωνίες, με πιο κοινές τις 38° , 45° , 60° και 70° .

Στην Εικόνα 32, ο αισθητήρας A είναι συμπίεσης 0° και είναι απίθανο να ανιχνεύσει τη ρωγμή επειδή πολύ μικρή, δηλαδή, αν υπάρχει ενέργεια, θα ανακλάται πίσω στον ανιχνευτή από τη ρωγμή. Ο ανιχνευτής B είναι ένας ανιχνευτής διατμητικής ακτίνας γωνίας 45° και θα ανιχνεύσει εύκολα τη ρωγμή.

Οι αισθητήρες γωνιακής δέσμης μπορούν να περιέχουν μονούς ή διπλούς κρυστάλλους και σε διάφορες συχνότητες.



Εικόνα 32. Ανίχνευση ρωγμής από αισθητήρες 0° και 45°

Ο ανιχνευτής A είναι απίθανο να ανιχνεύσει τη ρωγμή καθώς ελάχιστη ενέργεια ή καθόλου δεν θα ανακλάται. Ο ανιχνευτής B θα ανιχνεύσει τη ρωγμή.

Απαιτείται ένας αγωγός κυμάτων για τη σύνδεση του ανιχνευτή ατελειών στον αισθητήρα. Είναι ένα μήκος ομοαξονικού καλωδίου με συγκεκριμένο σύνδεσμο σε κάθε άκρο.

Υγρό ή ειδικό λάδι ως μέσον σύζευξης

Το υγρό χρησιμοποιείται για να επιτρέψει την αποτελεσματική μεταφορά ενέργειας υπερήχων μεταξύ του αισθητήρα και του εξαρτήματος. Εάν ο ανιχνευτής τοποθετηθεί σε ξηρό εξάρτημα, τότε θα υπάρξει ένα διάκενο αέρα, το οποίο θα σταματούσε τη μεταφορά ενέργειας υπερήχων. Το υγρό μπορεί να είναι ειδικό λάδι, πολτός κυτταρίνης ή πιο εξειδικευμένο και χωρίς θείο αλογόνο και εξαρτάται από την συγκεκριμένη εφαρμογή.

3.4.5.6|Πρότυπα αναφοράς

Τα πρότυπα αναφοράς χρησιμοποιούνται για να επιτρέπουν την τυποποίηση της επιθεώρησης με υπερήχους, έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται τα ίδια επίπεδα ευαισθησίας κάθε φορά που δοκιμάζεται το στοιχείο και από οποιονδήποτε το δοκιμάζει. Ο στόχος είναι για να εξασφαλιστεί η ακρίβεια και συνέπεια των αποτελεσμάτων.

Η τυποποίηση θα επιτρέψει επίσης στους χειριστές υπερήχων να υπολογίσουν το ισοδύναμο μέγεθος τυχόν ασυνεχειών που βρέθηκαν.

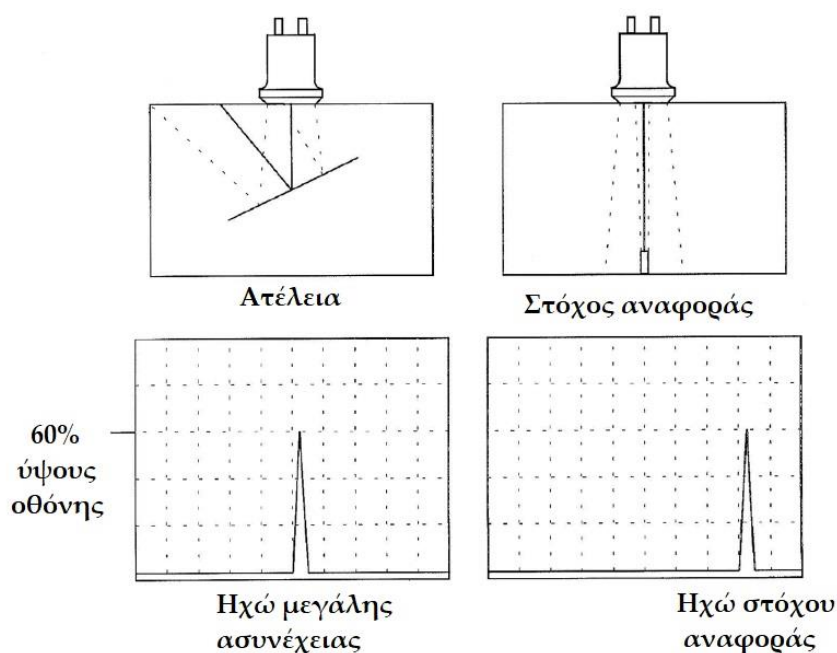
Τα πρότυπα αναφοράς είναι μπλοκ δοκιμών από μέταλλα που περιέχουν φυσικές ή τεχνητές ατέλειες ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια τεχνική για τον προσδιορισμό του ποσοστού της οπίσθιας αντανάκλασης.

Τα μπλοκ δοκιμών που περιέχουν φυσικά ελαττώματα θα είναι παρόμοια σε διαμόρφωση με το μέρος που πρόκειται να ελεγχθεί και θα περιέχουν ελαττώματα του ίδιου τύπου που ενδέχεται να εμφανιστούν.

Μπλοκ που περιέχουν τεχνητά ελαττώματα θα αποτελούνται από μεταλλικές τομές που περιέχουν στόχους αναφοράς, οι οποίες μπορεί να είναι εγκοπές, τρύπες ή οπές. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι εάν μια ηχώ ασυνέχειας φθάνει στο ίδιο ύψος στην οθόνη και στο ίδιο βάθος με την ηχώ στόχου αναφοράς, η ασυνέχεια δεν έχει το ίδιο μέγεθος με τον στόχο αναφοράς. Τα χαρακτηριστικά αντανάκλασης, ο προσανατολισμός κλπ της ασυνέπειας μπορεί να είναι αρκετά διαφορετικά από εκείνα του στόχου αναφοράς, οπότε το μόνο που μπορούμε να πούμε είναι ότι η ασυνέχεια είναι ισοδύναμη σε μέγεθος με τον στόχο αναφοράς. Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 33.

Μία εναλλακτική λύση στη χρήση μπλοκ αναφοράς είναι η τεχνική της χρήσης του ποσοστού οπίσθιας αντανάκλασης, κατά την οποία ο ανιχνευτής τοποθετείται σε μια περιοχή χωρίς ατέλειες, οι παράμετροι του ανιχνευτή ελαττωμάτων ρυθμίζονται για να επιτευχθεί ένα προκαθορισμένο ύψος ηχούς από το οπίσθιο τοίχωμα το στοιχείο και οι οποιεσδήποτε ανωμαλίες των ελαττωμάτων ή η

απώλεια της ηχούς του οπίσθιου τοιχώματος μπορούν να αξιολογηθούν σε σχέση με αυτό το προκαθορισμένο επίπεδο οπίσθιου τοιχώματος. Ωστόσο, αυτή η τεχνική εφαρμόζεται μόνο σε ανιχνευτές 0°.



Εικόνα 33. Ασυνέχεια και στόχος αναφοράς

Οι ηχώ στις οθόνες παραπάνω έχουν το ίδιο ύψος αλλά, όπως μπορείτε να δείτε, ο ήχος αντανακλάται από ανακλαστήρες πολύ διαφορετικού μεγέθους.

3.4.5.7|Διαδικασία εξέτασης

Μια διαδικασία επιθεώρησης και τεχνικά φύλλα θα πρέπει να είναι διαθέσιμα στο χειριστή για κάθε στοιχείο που πρόκειται να δοκιμαστεί. Μια διαδικασία περιέχει πληροφορίες σχετικά με μια συγκεκριμένη μέθοδο ΜΚΕ που καλύπτει τις γενικές απαιτήσεις των επιθεωρήσεων, όπως ο τύπος εξοπλισμού, η βαθμονόμηση του, τα πρότυπα αναφοράς και τα προσόντα χειριστή, ενώ ένα τεχνικό φύλλο περιέχει συγκεκριμένες πληροφορίες σχετικά με το στοιχείο που πρόκειται να ελεγχθεί, όπως σχέδια σάρωσης, ελαττώματα, κριτήρια ταξινόμησης και αναφοράς.

3.4.5.8|Συστατικά

Οι τεχνικές με υπερήχους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο μεγάλου φάσματος εξαρτημάτων. Οι ακόλουθοι τύποι προϊόντων είναι οι πιο συνηθισμένοι:

Τα χυτά έρχονται σε πολλά σχήματα και μεγέθη. Μπορούν να είναι χονδρόκοκκοι και συνεπώς μπορεί να απαιτούν έλεγχο με ανιχνευτές χαμηλής συχνότητας. Ο έλεγχος με υπερήχους είναι σε θέση να ανιχνεύσει ελαττώματα επιφανειών και υποεπιφανειών και είναι κατάλληλος για τον

εντοπισμό τυπικών ελαττωμάτων χύτευσης, όπως πορώδες, σχισμές και ρωγμές, συρρίκνωση, κενά και εγκλείσματα.

Τα προϊόντα από σφυρήλατο υλικό καλύπτουν σφυρήλατα, εξαρτήματα έλασης και εξώθησης, ανθών, πρισμάτων, πλακών και ράβδων. Τα επεξεργασμένα προϊόντα θα έχουν συνήθως μια λεπτή δομή και έτσι οι δοκιμές μπορούν να πραγματοποιηθούν σε υψηλότερες συχνότητες για καλύτερη ευαισθησία και ανάλυση.

Η διαδικασία εργασίας συνήθως ισοπεδώνει και επιμηκώνει τα ελαττώματα προς την κατεύθυνση της εργασίας, έτσι συνήθως οι αισθητήρες κύματος 0° θα εντοπίσουν τα αναμενόμενα ελαττώματα, όπως πόρους, εσωτερικές ρωγμές, ελάσματα και εγκλείσματα. Τα προϊόντα ψυχρής διέλασης ενδέχεται να έχουν εσωτερικές ατέλειες που ονομάζονται πτυχές ή φυλλώματα.

Οι συγκολλήσεις ελέγχονται με γωνιακούς αισθητήρες και η ΘΕΖ (Θερμικά Επηρεαζόμενη Ζώνη) με αισθητήρες κάθετης δέσμης ώστε να καλύπτουν όλους τους πιθανούς προσανατολισμούς ελαττωμάτων. Τα ελαττώματα που μπορούν να εντοπιστούν στις συγκολλήσεις με έλεγχο υπερήχων είναι το πορώδες, η παγίδευση σκουριάς, η ελλιπής τήξη, η ελλιπής διείσδυση και διάφοροι τύποι ρωγμών και ελαττώματα που προκαλούνται από τη διαδικασία συγκόλλησης.

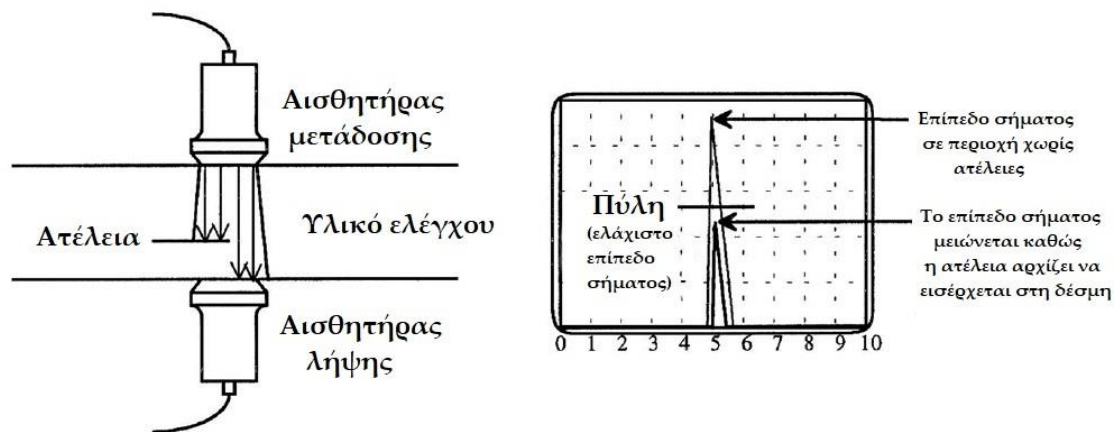
3.4.5.9|Ειδικές εφαρμογές

Μέσω δοκιμών μετάδοσης

Μέχρι στιγμής, εξετάσαμε τη δοκιμή υπερήχων παλμού – ηχώ, όπου χρησιμοποιείται ένας ανιχνευτής για τη σάρωση ενός εξαρτήματος. Μια εναλλακτική τεχνική που θα μπορούσε να εφαρμοστεί ονομάζεται μέσω δοκιμής μετάδοσης. Με αυτή την τεχνική υπάρχουν δύο ανιχνευτές, ένας σε κάθε πλευρά του υπό δοκιμή στοιχείου. Ένας ανιχνευτής χρησιμοποιείται για τη μετάδοση παλμών ενέργειας υπερήχων, ο άλλος για τη λήψη αυτής της ενέργειας. Το ληφθέν σήμα υπερήχων εμφανίζεται σε οθόνη και ρυθμίζεται σε προκαθορισμένο επίπεδο (Εικόνα 34).

Όταν οι ανιχνευτές σαρώνουν σε μια ελαττωματική περιοχή, το ελάττωμα θα παρεμποδίσει κάποια ή όλη την ενέργεια υπερήχων και ως εκ τούτου το επίπεδο σήματος που εμφανίζεται θα μειωθεί δηλαδή θα εξασθενίσει.

Επειδή απαιτείται μόνο μία διέλευση μέσω του υλικού από την ενέργεια υπερήχων, μπορούν να ελεγχθούν υλικά με υψηλότερη εξασθένηση. Ωστόσο, απαιτείται πρόσβαση και στις δύο πλευρές του υλικού και δεν εμφανίζεται το βάθος του ελαττώματος.

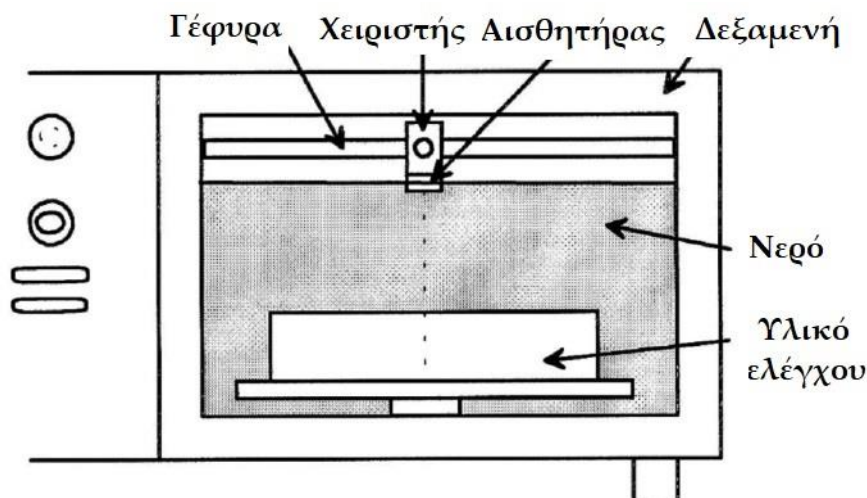


Εικόνα 34. Βασική διάταξη δοκιμών μέσω μετάδοσης και η οθόνη

Ο έλεγχος μέσω της μετάδοσης χρησιμοποιείται κυρίως σε αυτόματα συστήματα και είναι χρήσιμος για την αξιολόγηση δεσμών σε σύνθετα υλικά και συγκολλημένους αρμούς. Έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την αξιολόγηση της ποιότητας της συγκόλλησης μεταξύ των λεπτών μεταλλικών ασπίδων διάβρωσης και των περυγίων του στροβίλου που είχαν ιστορικό βλάβης κατά τη λειτουργία, οδηγώντας σε σημαντική και δαπανηρή βλάβη των στροβίλων.

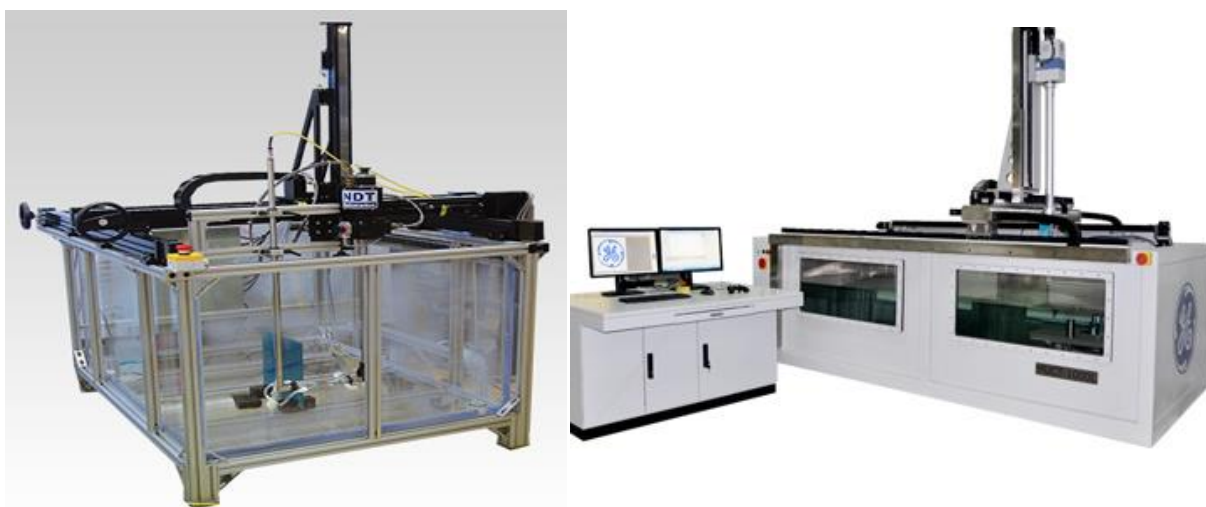
Δοκιμές υπερήχων εμβάπτισης

Δεν περιλαμβάνουν όλες οι δοκιμές με υπερήχους έναν χειριστή που χειροκίνητα έρχεται σε επαφή με τη σάρωση ενός εξαρτήματος. Έχουν κατασκευαστεί αυτοματοποιημένα συστήματα δοκιμών, τα οποία ανιχνεύουν εξαρτήματα σε δεξαμενή γεμάτη με νερό και ονομάζονται συστήματα εμβάπτισης με υπερήχους. Η Εικόνα 35 δείχνει μια τυπική δεξαμενή εμβάπτισης που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη δοκιμή νεοκατασκευασμένων εξαρτημάτων.



Εικόνα 35. Ένα τυπικό σύστημα δοκιμής εμβάπτισης

Παρακάτω στην Φωτογραφία 6 βλέπουμε δύο Βιομηχανικές διατάξεις συστημάτων δοκιμής εμβάπτισης.



Φωτογραφία 6. Βιομηχανικές διατάξεις συστημάτων δοκιμής εμβάπτισης

Πολλά συστήματα επιτρέπουν την περιστροφή του εξαρτήματος σε ένα περιστρεφόμενο δίσκο. Ο αισθητήρας μπορεί να μετακινηθεί πάνω στο στοιχείο μέσω της γέφυρας. Ο ανιχνευτής μπορεί να είναι υπό γωνία, επιτρέποντας να παράγεται οποιαδήποτε επιθυμητή γωνία δέσμης στο εξάρτημα.

Οι ανιχνευτές συχνά εστιάζονται ώστε να επιτρέπουν την συγκέντρωση ενέργειας υπερήχων σε συγκεκριμένο βάθος. Ο αισθητήρας δεν έρχεται σε επαφή με το εξάρτημα και διατηρείται ένα διαρκές κενό νερού μεταξύ του αισθητήρα και του εξαρτήματος.

Χρησιμοποιούνται άλλα συστήματα εμβάπτισης που δεν χρησιμοποιούν δεξαμενή αλλά χρησιμοποιούν στήλες νερού, εκτοξευτές ή φυσαλίδες ή έναν τροχό από καουτσούκ γεμάτο με νερό που περιέχει τον αισθητήρα.

Οι δοκιμές εμβάπτισης έχουν μικρή χρήση στις περισσότερες βιομηχανίες, εκτός από τις εργασίες των κατασκευαστών, όπου η επιθεώρηση αντικειμένων όπως τα σφυρήλατα υψηλής ποιότητας και άλλα μεμονωμένα εξαρτήματα, ελέγχονται πριν από την εγκατάσταση. Αυτά μπορεί να έχουν ορισμένα μεγέθη και γεωμετρίες δυσκολεύουν την επιθεώρηση σε αρκετά μεγάλο βαθμό αν ακολουθηθούν τεχνικές επαφής.

3.4.5.10| Μέτρησης πάχους και παρακολούθηση κατάσταση

Η μέτρηση πάχους μπορεί να γίνει με ακρίβεια με τεχνικές υπερήχων (με τη χρήση της κατάλληλης τεχνικής είναι δυνατές οι ακρίβειες $\pm 0,1\text{mm}$). Οι ειδικοί μετρητές πάχους με υπερήχους ψηφιακής ανάγνωσης χρησιμοποιούν τη μέθοδο παλμού – ηχούς και δεν απαιτούν το ίδιο επίπεδο

δεξιοτήτων σε περίπτωση χρήσης ανιχνευτή ατελειών. Εάν η ταχύτητα του ήχου σε ένα υλικό είναι γνωστή και ο χρόνος του παλμού υπερήχου μετρήσιμος, μπορεί να προσδιοριστεί το πάχος. Αυτή είναι η βάση των μετρητών υπερήχων πάχους. Θα πρέπει όμως να χρησιμοποιούνται με προσοχή, καθώς οι αριθμητικές πληροφορίες που εμφανίζονται δεν επιτρέπουν λεπτομερή ερμηνεία χαρακτηριστικών όπως ελασματοποιήσεις ή εγκλείσματα, γεγονός που μπορεί με τη σειρά του να οδηγήσει σε λανθασμένες αποφάσεις. Η χρήση ανιχνευτή υπερήχων ατελειών δεν μας παρουσιάζει αυτά τα προβλήματα.

Οι έρευνες σχετικά με το πάχος μεγάλης κλίμακας μπορούν να ενισχυθούν με τη χρήση καταγραφικών δεδομένων, όπου τα ψηφιακά δεδομένα πάχους μπορούν να μεταφορτωθούν κατευθείαν στις εφαρμογές PC και να εμφανιστούν γραφικά με διαφορετικά χρώματα που αντιπροσωπεύουν διαφορετικά πάχη κ.λπ.

Η μέτρηση του μεταλλικού πάχους με υπερήχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο παρακολούθησης κατάστασης για τον έλεγχο της αλλοίωσης ή της διάβρωσης, με το πλεονέκτημα ότι μπορεί να προσδιοριστεί η εσωτερική διάβρωση, δηλαδή η αραίωση των τοιχωμάτων των σωλήνων και των δοχείων, χωρίς να απαιτείται η εσωτερική πρόσβαση. Οι σωλήνες λέβητα σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα υφίστανται αλλοίωση από αυτούς τους μηχανισμούς λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, των ακαθαρσιών στα καύσιμα, τα αέρια, τα σωματίδια κλπ. Επανεξιλημμένες έρευνες διεξάγονται με την πάροδο του χρόνου για να εκτιμηθούν οι ρυθμοί αραίωσης των τοιχωμάτων και να αποφασιστεί πότε πρέπει να αντικατασταθούν οι σωλήνες πριν καταστραφούν.

Μια άλλη εφαρμογή για την παρακολούθηση των συνθηκών υπερήχων είναι η επιτόπια επιθεώρηση για ρωγμές και διάδοση ρωγμών, όπως ρωγμές τάσης, ρωγμές θερμικής ή μηχανικής κόπωσης, διάβρωση καταπόνησης και ρωγμές ερπυσμού. Σωληνώσεις ατμού υψηλής ενέργειας και εξαρτήματα όπως βαλβίδες ατμού είναι κρίσιμα στοιχεία στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και υπόκεινται σε τακτική επιθεώρηση κατά τη χρήση τεχνικών υπερήχων. Η αποτυχία τέτοιων εξαρτημάτων παρουσιάζει σημαντικό κίνδυνο για την ασφάλεια, παράλληλα με την οικονομική συνέπεια που οφείλεται στην απώλεια της παραγωγής. Εντούτοις, είναι κοινή η διαπίστωση ότι η εγκατάσταση επιτρέπεται να λειτουργεί με ρωγμές μετά από αξιολόγηση, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των υλικών, τις πιέσεις και τους ακριβείς μηχανισμούς ελαττωμάτων. Σε παλαιότερα εργοστάσια σε ορισμένες βιομηχανίες, όπως οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις, οι πυρηνικές εγκαταστάσεις και οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, όταν τα εξαρτήματα φτάνουν στο τέλος της σχεδιαστικής τους ζωής, συχνά είναι πιο αποτελεσματική η διεξαγωγή εκτεταμένων ΜΚΕ, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου με υπέρηχους, προκειμένου να επεκταθεί η ζωή των εργοστασίων με σημαντικά μειωμένα κόστη.

3.4.5.11|Συνθήκες και ιδιότητες υλικών

Οι τεχνικές με υπερήχους χρησιμοποιούνται επίσης για την αξιολόγηση των μικροδομικών διαφορών στα μέταλλα. Για το σκοπό αυτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετρήσεις εξασθένησης, ταχύτητας και ανάστροφης σκέδασης. Για παράδειγμα, καθώς το υπερηχογράφημα κάνει πολλαπλές διαδρομές μέσω ενός μεταλλικού τεμαχίου, κάποια ενέργεια χάνεται κάθε φορά, οπότε η εμφάνιση πολλαπλών ηχώ του οπίσθιου τοιχώματος θα παρουσιάσει ένα σχέδιο αποσύνθεσης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πρότυπο αναφοράς ώστε το πρότυπο αποσύνθεσης των τμημάτων παραγωγής να συγκριθεί με αυτό το πρότυπο αναφοράς. Αυτό σημαίνει ότι εάν το μοτίβο αποσύνθεσης των τμημάτων παραγωγής είναι χαμηλότερο στην οθόνη από το πρότυπο αποσύνθεσης του προτύπου, η μικροδομή των τμημάτων παραγωγής είναι πιο έντονη δηλαδή, με μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων από το πρότυπο.

Μικροδομικές ανωμαλίες, όπως η σπηλαιώσεις λόγω εγκλωβισμένου υδρογόνου ή λόγω ερπυσμού σε χάλυβες άνθρακα, μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας τις ίδιες τεχνικές μέτρησης. Αυτά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα όταν συνδυάζονται με συστήματα απεικόνισης H/Y με υπερήχους, τα οποία μπορούν επίσης να χρησιμοποιούν τεχνολογία επεξεργασίας ψηφιακού σήματος (DSP – Digital Signal Processing).

Η μέτρηση της καταπόνησης είναι μια άλλη εφαρμογή επιθεώρησης με υπερήχους. Η τεχνική χρησιμοποιείται για τη μέτρηση όλων των μεταβολών ταχύτητας στο μέταλλο, οι οποίες προκαλούνται από την παρουσία πιέσεων. Παραδείγματα εφαρμογών αυτής της τεχνικής είναι η εφελκυστική φόρτιση των χαλύβδινων βιδών και η μέτρηση της υπολειπόμενης πίεσης σε μεταλλικά στοιχεία.

Οι υπέρηχοι έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της σκληρότητας και η σκληρότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της αντοχής ενός υλικού. Η σκληρότητα και συνεπώς η αντοχή των κραμάτων αλουμινίου έχει προσδιοριστεί με τη μέτρηση της ταχύτητας της ηχώ – παλμού και της εξασθένησης.

Το βάθος της σκλήρυνσης χάλυβα μπορεί επίσης να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας είτε έναν οπίσθιο διαχωρισμό παλμού-ηχώ είτε μια μέθοδο διασποράς κυμάτων ή επιφανειακών κυμάτων Rayleigh.

3.4.5.12|Ιατρικές εφαρμογές

Η σάρωση με υπερήχους για ιατρική διάγνωση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα ανθρώπινων οργάνων. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν την κοιλιακή περιοχή (ήπαρ, χοληδόχο κύστη, πάγκρεας, σπλήνα, νεφρά, αορτή και λεμφαδένες), την μαιευτική και γυναικολογία (έλεγχος μήτρας

και ωοθηκών, με ή χωρίς εγκυμοσύνη), την καρδιακή χώρα (ενηλίκων και ανηλίκων). Τα όργανα όπως το στομάχι και το μεγάλο έντερο δεν μπορούν να απεικονιστούν λόγω του ότι περιέχουν αέρα.

Εκτός από τις διαγνωστικές χρήσεις του υπερήχου, ο θεραπευτικός υπέρηχος έχει χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια για τη θεραπεία μυϊκών διαταραχών, όπως τραύμα ή ατροφία, και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να καταστρέψει την ανώμαλη συγκέντρωση ορυκτών και αλατιού σε αρτηρίες, κοίλα όργανα και κύστες με τη χρήση κρουστικού κύματος.

3.4.5.13|Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα επιθεώρησης με υπερήχους

Πλεονεκτήματα

Τα κύρια πλεονεκτήματα της επιθεώρησης με υπερήχους σε σύγκριση με άλλες μεθόδους επιθεώρησης είναι τα εξής:

- Εξαιρετική διείσδυση υπερήχων σε υλικά η οποία επιτρέπει την ανίχνευση βαθιών ελαττωμάτων.
- Μπορούν να εξεταστούν εξαρτήματα από πάχος λίγων χιλιοστών έως αρκετά μέτρα.
- Η μέθοδος είναι πολύ ευαίσθητη και μπορεί να εντοπίσει πολύ μικρές ατέλειες.
- Οι ατέλειες μπορούν να ταξινομηθούν σε μέγεθος. Επίσης, μπορεί να είναι ακριβής, η θέση των εσωτερικών ατελειών μέσα σε ένα συστατικό. Μπορεί να καθοριστεί η φύση, το σχήμα και ο προσανατολισμός της ατέλειας.
- Με την τεχνική παλμών – ηχούς, απαιτείται πρόσβαση μόνο στη μία πλευρά ενός υλικού.
- Ο παλμός που αντανακλάται από τις ατέλειες εμφανίζεται σχεδόν στιγμιαία, επιτρέποντας την άμεση επιτόπια ερμηνεία, τη χρήση της μεθόδου για τα αυτόματα συστήματα, την παρακολούθηση της παραγωγής και τον έλεγχο της διαδικασίας. Η ηλεκτρονική παρακολούθηση των σημάτων ταχείας ανόδου και πτώσης, τα οποία μπορεί να χάσει ο χειριστής, επιτρέπουν συστήματα ταχείας επιθεώρησης. Μπορεί να γίνει μόνιμη καταγραφή της επιθεώρησης για αξιολόγηση σε μεταγενέστερο χρόνο.
- Σαρώνεται ολόκληρος ο όγκος του υλικού από μπροστά προς την πίσω επιφάνεια.
- Η τεχνική μπορεί να είναι πολύ φορητή, με ανιχνευτές ατελειών και αισθητήρες ελαφριού τύπου και συμπαγείς, επιτρέποντας την επιτόπια επιθεώρηση των εξαρτημάτων που είναι δύσκολο να μετακινηθούν για τον έλεγχο.
- Τα σήματα μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία από έναν υπολογιστή, επιτρέποντας να χαρακτηριστούν οι ατέλειες και να προσδιοριστούν οι ιδιότητες των υλικών. Οι μετρήσεις πάχους μετάλλων κάτω από τις βαφές μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη μέθοδο πολλαπλών ηχώ χωρίς την αφαίρεση των προστατευτικών επιστρώσεων.

Μειονεκτήματα

Κανένα σύστημα δεν είναι τέλει και οι τεχνικές υπερήχων έχουν τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- Είναι συχνά δύσκολο να ερμηνευτεί ένα σήμα ελαττώματος.
- Οι χειρωνακτικές τεχνικές απαιτούν έμπειρους χειριστές και οι περίοδοι εκπαίδευσης και εμπειρίας μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες.
- Η προετοιμασία και η ανάπτυξη διαδικασιών επιθεώρησης δεν είναι απλή και απαιτούνται καλές τεχνικές γνώσεις.
- Είναι δύσκολο να δοκιμαστούν τμήματα και μέρη με ασυνεχές σχήμα, με τραχιές επιφάνειες, όπως τα εξαρτήματα εν χρήσει π.χ. τα χυτά εξαρτήματα με δομή χονδροειδούς κόκκου.
- Οι μονοκρυσταλλικοί ανιχνευτές έχουν μια νεκρή ζώνη στην οποία δεν θα εντοπιστούν ελαττώματα.
- Οι ανιχνευτές με δύο κρυστάλλους συνήθως επικεντρώνονται και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε ένα συγκεκριμένο εύρος βάθους.
- Η συμπεριφορά των ακτινών υπερήχων είναι απρόβλεπτη στο κοντινό πεδίο λόγω καταστροφικών παρεμβολών του κύματος που οδηγεί σε δυσκολίες στην ανίχνευση ή τη μέτρηση χαρακτηριστικών κοντά στην επιφάνεια.
- Για να επιτραπεί η αποτελεσματική μεταφορά ενέργειας υπερήχων μεταξύ του ανιχνευτή και του εξαρτήματος, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας σύνδεσμος. Η απώλεια ζεύγους μπορεί να οδηγήσει σε ψευδή ερμηνεία. Έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν χωρίς τη χρήση συμπλοκών, αλλά συνήθως είναι εξειδικευμένες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο υπό ορισμένες συνθήκες.
- Για να χαρακτηριστούν οι ατέλειες και να βαθμονομηθεί ο εξοπλισμός, απαιτούνται πρότυπα αναφοράς.
- Ο σύνδεσμος μπορεί να αποτελέσει μολυσματικό παράγοντα, ο οποίος απαιτεί την απομάκρυνση του πριν από την περαιτέρω επεξεργασία, δηλαδή βαφή/επικάλυψη.
- Ο έλεγχος εξ' επαφής απαιτεί το προφίλ επιφάνειας να είναι αρκετά καλό.

Η επιθεώρηση με υπερήχους μπορεί να προσφέρει μια ολοκληρωμένη μέθοδο ελέγχου κατάλληλη για πολλές εφαρμογές, αλλά απαιτεί σημαντική κατανόηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών πριν από την εφαρμογή, λόγω του σχετικά υψηλού κόστους που συνδέεται με τη μέθοδο, όπως η εκπαίδευση και ο εξοπλισμός. Μπορεί, ωστόσο, να παρέχει πληροφορίες και αποτελέσματα που δεν είναι εύκολα διαθέσιμα με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο.

3.4.6|Έλεγχος διείσδυσης χρωστικών ουσιών ή έλεγχος διείσδυσης – Dyepenetrant inspection or Liquid penetrant Testing (PT or LPI)

Ο έλεγχος διείσδυσης είναι μια απλή μέθοδος ΜΚΕ που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό επιφανειακών ασυνεχειών σε μεταλλικά και σε πολλά μη – μεταλλικά στοιχεία με τη χρήση διεισδυτικού υγρού.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

3.4.6.1|Βασικές αρχές

Από τη φύση τους, οι δοκιμές διείσδυσης αποτελούν μια απλή μέθοδο ελέγχου. Ωστόσο, είναι επίσης πολύ εύκολο να γίνει λάθος κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και έτσι να ακυρωθεί η δοκιμή. Η δοκιμή διείσδυσης έχει τις ρίζες της στη σιδηροδρομική βιομηχανία με έναν έλεγχο που στη συνέχεια ονομάστηκε μέθοδος πετρελαίου και σκόνης. Αυτή η μέθοδος περιλάμβανε τη βύθιση ενός καθαρισμένου εξαρτήματος σε βρώμικο πετρέλαιο στροφαλοθαλάμου, αραιωμένο με κηροζίνη (το βρώμικο πετρέλαιο δούλευε καλύτερα από το φρέσκο αχρησιμοποίητο) και αφού αφεθεί να αποστραγγιστεί το εξάρτημα, καθαρίζεται με διαλύτη. Στη συνέχεια το εξάρτημα καλύπτεται με ένα υλικό σκόνης το οποίο είναι κιμωλία. Οποιοδήποτε πετρέλαιο παγιδεύεται στις ασυνέχειες του θα εμφανιζόταν πάνω στην σκόνη κιμωλίας, δίνοντας μια ένδειξη σκούρου υποστρώματος.

Οι δοκιμές διείσδυσης δεν έχουν αλλάξει πάρα πολύ με τα χρόνια, οι διεισδύσεις είναι πιο ευαίσθητες τώρα, αλλά στην ουσία η διαδικασία είναι η ίδια.

Στη συνέχεια, ακολουθούν τα έξι βασικά βήματα που ενέχονται στη δοκιμασία διείσδυσης:

3.4.6.2|Προ – καθαρισμός

Είναι απολύτως καθοριστικό το γεγονός ότι ένα συστατικό που πρόκειται να δοκιμαστεί με διείσδυση είναι απόλυτα καθαρό και στεγνό. Αυτό ισχύει επίσης για τις επιφάνειες τυχόν ασυνεχειών που μπορεί να υπάρχουν.

Οποιοσδήποτε ρύπος (που περιλαμβάνει λάδι, γράσο, βαφή, σκουριά κ.λπ.) θα περιορίσει την είσοδο της διείσδυσης στις ασυνέχειες και μπορεί πολύ εύκολα να οδηγήσει σε αστοχία εντοπισμού σοβαρών ασυνεχειών.

Ένα παράδειγμα αυτού είναι η περίπτωση αεροσκάφους, όπου ένα στοιχείο του κινητήρα απέτυχε κατά την απογείωση, σκοτώνοντας δύο επιβάτες. Μια επακόλουθη έρευνα ατυχημάτων απέδειξε ότι το πρόβλημα προκλήθηκε από εσφαλμένο προ – καθαρισμό. Η ασυνέχεια ήταν γεμάτη μολυσματικές ουσίες και επομένως δεν μπορούσε να εισέλθει η διεισδυτική ουσία, οπότε ο χειριστής δεν είχε καμία πιθανότητα να βρει την ασυνέχεια.

Ο προ – καθαρισμός μπορεί να γίνει μέσω μίας διαδικασίας ή μπορεί να απαιτηθούν αρκετά διαφορετικά στάδια ανάλογα με τον αριθμό των διαφορετικών τύπων ρυπαντών που πρέπει να αφαιρεθούν. Μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις μεθόδους προ-καθαρισμού σε φυσικές και χημικές.

Οι φυσικές μέθοδοι περιλαμβάνουν το βούρτσισμα και την λείανση επιφανειών. Αυτές οι μέθοδοι είναι καλές για την αφαίρεση της βαφής και της σκουριάς, αλλά δεν είναι σε θέση να αφαιρέσουν τους ρύπους μέσα σε ασυνέχειες. Υπάρχει επίσης μια ισχυρή πιθανότητα οι λειαντικές μέθοδοι να προκαλέσουν πλαστική παραμόρφωση, ειδικά σε μαλακά υλικά και να κλείσουν ασυνέχειες – αυτό δεν σημαίνει ότι η ασυνέχεια έχει εξαφανιστεί, σημαίνει απλώς ότι δεν θα είναι πλέον σε θέση να εντοπιστεί χρησιμοποιώντας δοκιμές διείσδυσης. Αν συμβεί κάτι τέτοιο, πρέπει να εκτελεστεί μια από τις μεθόδους χημικού καθαρισμού, με καύση οξέος, για να αφαιρεθεί το λιωμένο υλικό που κλείνει την ασυνέχεια.

Άλλοι τύποι χημικού καθαρισμού περιλαμβάνουν: απορρυπαντικά, τα οποία βασίζονται σε οξέα ή αλκαλικά, καθαρισμός με ατμό ο οποίος πραγματοποιείται συνήθως σε μεγάλα εξαρτήματα, αποστειρωτικό ατμού στο οποίο ένα συστατικό βυθίζεται σε μια δεξαμενή που περιέχει θερμαινόμενο τριχλωροαιθυλένιο, καθαρισμός με διαλύτες ο οποίος εκτελείται συχνά κατά τη διάρκεια επιτόπιων δοκιμών με πανιά διαβρεγμένα με διαλύτη και δεξαμενές καθαρισμού με υπερήχους, οι οποίες περιέχουν διαλύτες – το εξάρτημα είναι βυθισμένο στη δεξαμενή και οι δονήσεις με υπερήχους βοηθούν στον καθαρισμό του.

Αφού καθαριστεί το υλικό, συχνά απαιτείται σε ορισμένες μεθόδους καθαρισμού να ξεπλυθεί καλά με νερό για να απομακρυνθούν οποιαδήποτε χημικά υπολείμματα καθαρισμού, τα οποία μπορεί να επηρεάσουν δυσμενώς τη διαδικασία δοκιμής διείσδυσης. Τυπικά παραδείγματα είναι τα όξινα ή αλκαλικά υπολείμματα, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν σοβαρά την ευαισθησία και συνεπώς την ικανότητα ανίχνευσης ασυνέχειας των διεισδυτικών. Ακόμη και το νερό που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των χημικών υπολειμμάτων θα αποτελέσει μολυσματικό παράγοντα επειδή θα εμποδίσει την είσοδο της διείσδυσης στο υλικό.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα εξαρτήματα πρέπει να είναι απόλυτα καθαρά και στεγνά πριν την εφαρμογή διείσδυσης. Είναι συνήθης πρακτική να στεγνώνουν τα εξαρτήματα που έχουν υποβληθεί σε οποιοδήποτε τύπο καθαρισμού με βάση το νερό σε φούρνο επανακυκλοφορίας θερμού αέρα. Είναι επίσης σημαντικό τα τμήματα που στεγνώνουν σε φούρνο να αφήνονται να κρυσταλλώσουν πριν από την εφαρμογή διείσδυσης.

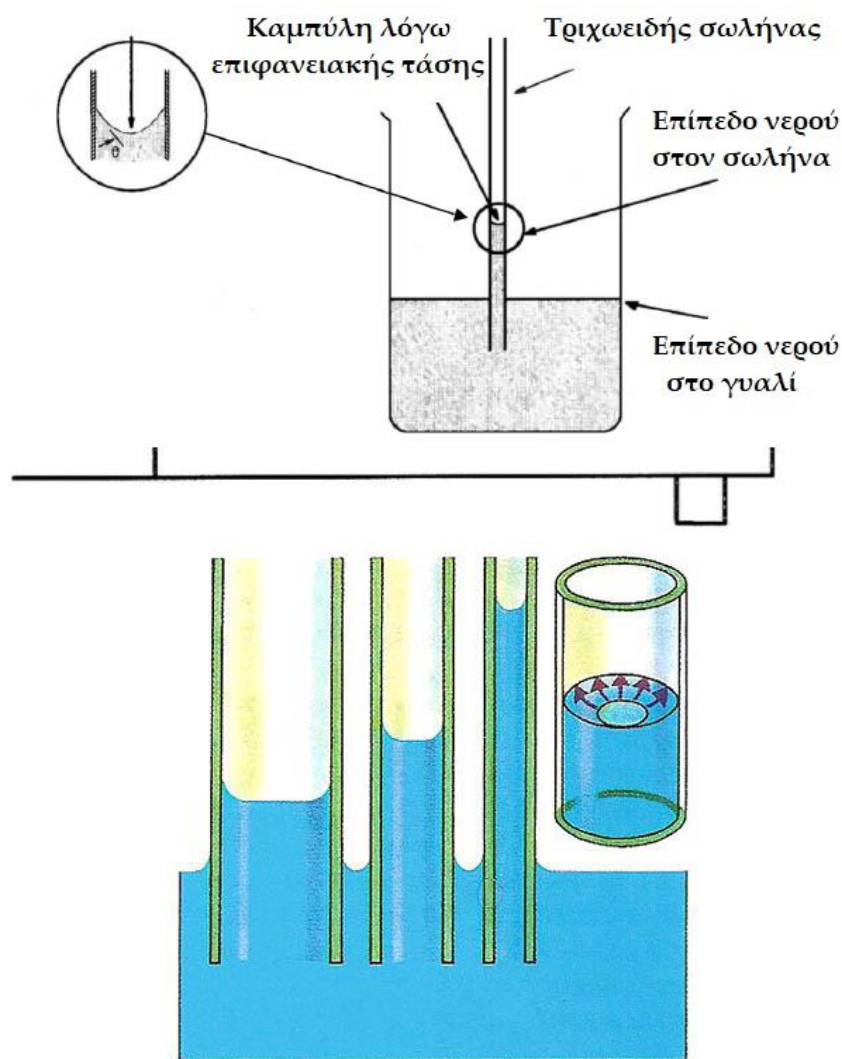
3.4.6.3 | Εφαρμογή διείσδυσης

Η διείσδυση μπορεί να εφαρμοστεί με τη χρήση οποιωνδήποτε από πολλές μεθόδους, δηλαδή ψεκασμό, βούρτσισμα, εμβάπτιση, ηλεκτροστατική εφαρμογή κλπ. Η μέθοδος εφαρμογής δεν είναι σημαντική, αλλά είναι σημαντικό ότι η περιοχή δοκιμής διαβρέχεται πλήρως με διείσδυση και η διείσδυση παραμένει σε επαφή με την επιφάνεια υπό δοκιμή για απαραίτητο χρονικό διάστημα. Η χρονική περίοδος κατά την οποία επιτρέπεται να παραμείνει η διείσδυση σε ένα υλικό ονομάζεται χρόνος επαφής, χρόνος διείσδυσης ή χρόνος παραμονής και μπορεί να κυμαίνεται από πέντε έως τέσσερις ώρες, ανάλογα με τις προδιαγραφές και τον τύπο της ασυνέχειας που επιδιώκεται. Υπάρχει κίνδυνος με τους μακρύτερους χρόνους επαφής να στεγνώνουν τα υγρά διείσδυσης στην επιφάνεια. Ο χειριστής θα πρέπει να συνεχίσει να τα εφαρμόζει τακτικά και επαναληπτικά για να αποτρέψει αυτόν τον κίνδυνο.

Πώς εισέρχεται η διείσδυση σε ασυνέχειες; Η διαδικασία ονομάζεται τριχοειδής δράση, η οποία είναι η τάση των υγρών να διεισδύσουν σε μικρά ανοίγματα όπως ρωγμές. Η θετική δύναμη που προκαλεί την κίνηση ορισμένων υγρών κατά μήκος στενών ή ισχνών διαδρόμων ονομάζεται τριχοειδής πίεση. Όσο πιο στενός είναι ο σωλήνας, τόσο υψηλότερη είναι η τριχοειδής πίεση και η στάθμη που φτάνει το υγρό επάνω στον σωλήνα θα είναι επίσης υψηλότερη. Το ίδιο ισχύει και για το πλάτος της ασυνέχειας: όσο πιο σφιχτή είναι η ρωγμή, τόσο μεγαλύτερη είναι η τριχοειδής πίεση.

Αν πέσει μια σταγόνα διείσδυσης σε μια δοκιμαστική επιφάνεια, η σταγόνα απλώνεται ή διαβρέχεται στην επιφάνεια του τμήματος. Αν μετρήσουμε τη γωνία επαφής μεταξύ της διείσδυσης και μιας επιφάνειας δοκιμής, μπορούμε να δούμε αν η διείσδυση έχει καλή ικανότητα διαβροχής. Εάν η γωνία επαφής είναι μικρότερη από 90° , η διείσδυση λέγεται ότι έχει καλή ικανότητα διαβροχής (τυπική γωνία επαφής ενός καλού διεισδυτικού θα είναι $8 - 10^\circ$).

Μπορούμε να δούμε την επίδραση της τριχοειδούς πίεσης στην Εικόνα 36. Η τριχοειδής δράση είναι η ικανότητα ενός υγρού να ρέει σε στενούς χώρους χωρίς τη βοήθεια ή και σε αντίθεση με εξωτερικές δυνάμεις όπως η βαρύτητα. Το αποτέλεσμα μπορεί να διαπιστωθεί κατά την ανάσυρση υγρού ανάμεσα στις τρίχες μιας βούρτσας, σε ένα λεπτό σωλήνα, σε πορώδη υλικά όπως το χαρτί και ο γύψος, σε ορισμένα μη πορώδη υλικά όπως η άμμος και οι υγροποιημένες ίνες άνθρακα, ή ένα κύτταρο. Εμφανίζεται λόγω των διαμοριακών δυνάμεων μεταξύ του υγρού και των γύρω στερεών επιφανειών. Εάν η διάμετρος του σωλήνα είναι επαρκώς μικρή, τότε ο συνδυασμός επιφανειακής τάσης (που προκαλείται από τη συνοχή μέσα στο υγρό) και οι δυνάμεις συγκόλλησης μεταξύ του τοιχώματος υγρού και του δοχείου ενεργούν για να προωθήσουν το υγρό.



Εικόνα 36. Τριχωειδές φαινόμενο

Όταν η διείδυση τοποθετείται στην επιφάνεια ενός συστατικού που έχει ασυνέχεια, η τριχωειδής δράση αντλεί διείδυση στην ασυνέχεια, μετακινώντας τον αέρα μέσα. Οι φυσαλίδες μερικές φορές μπορούν να φανούν, σε ένα συστατικό που περιέχει μεγάλη ασυνέχεια, στην επιφάνεια της διείδυσης.

Μια άλλη σημαντική ιδιότητα των διειδυτικών είναι το ιξώδες, το οποίο είναι η αντίσταση ενός ρευστού να ρέει. Μια διείδυση με υψηλό ιξώδες θα χρειαστεί περισσότερο χρόνο για να εισέλθει σε μια δεδομένη ασυνέχεια από μια διείδυση με μικρότερο ιξώδες.

3.4.6.4|Αφαίρεση διειδυτικών υγρών

Η αφαίρεση διείδυσης είναι ένα ακόμη βήμα που, αν και αρκετά απλό, είναι εύκολο να γίνει λάθος. Εάν αυτό το βήμα δεν πραγματοποιηθεί σωστά, πρέπει να εκτελεστεί ξανά ολόκληρη η δοκιμή.

Μια ιδανική κατάσταση είναι όταν η υπερβολική διείσδυση απομακρύνεται μόνο από την επιφάνεια του συστατικού και καμία διείσδυση δεν αφαιρείται από ασυνέχειες.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές μέθοδοι για την απομάκρυνση της υπερβολικής διείσδυσης, ανάλογα με τον τύπο διείσδυσης που χρησιμοποιείται. Θα εξετάσουμε κάθε μέθοδο αφαίρεσης σε βάθος.

α. Αφαίρεση διαλυτών

Αυτό το σύστημα διείσδυσης χρησιμοποιείται πολύ συχνά επί τόπου. Είναι πολύ φορητό και αποτελείται από τρία δοχεία ψεκασμού υπό πίεση: το πρώτο περιέχει διαλύτη, ο οποίος χρησιμοποιείται τόσο για τον προ – καθαρισμό όσο και για την απομάκρυνση της περίσσειας διεισδύσεως από το συστατικό, το δεύτερο περιέχει τη διείσδυση και το τρίτο περιέχει το υλικό ανάπτυξης.

Για να αφαιρεθεί η περίσσεια διείσδυσης από ένα συστατικό μετά την παρέλευση του απαιτούμενου χρόνου παραμονής, ο όγκος της περίσσειας διεισδυτικής ουσίας σκουπίζεται με το χέρι χρησιμοποιώντας ξηρό πανί χωρίς χνούδι. Εκτελείται ένα δεύτερο σφουγγάρισμα της επιφάνειας έπειτα χρησιμοποιώντας πανί που έχει υγρανθεί με διαλύτη (είναι πολύ σημαντικό ο διαλύτης να μην ψεκάζεται ποτέ απευθείας στην επιφάνεια, καθώς αυτό μπορεί να ξεπλυθεί μαζί με τη διείσδυση από τις ασυνέχειες και έτσι η δοκιμή θα καταστραφεί). Ένα τρίτο σκούπισμα γίνεται με ξηρό πανί. Εάν έχει χαθεί οποιαδήποτε διεισδυτική ουσία, το ξηρό πανί θα έχει λεκέδες διείσδυσης και ένα άλλο σκούπισμα με ένα υγρό πανί με διαλύτη θα αφαιρέσει τελικά τα τελευταία από την περίσσεια διεισδύσεως.

β. Αφαίρεση μέσω νερού

Παρόλο που τα διεισδυτικά είναι βασισμένα σε πετρέλαιο, μερικά παρασκευάζονται με ένα γαλακτωματοποιητή που επιτρέπει την απομάκρυνση του διεισδυτικού με νερό. Αυτά τα διεισδυτικά είναι ιδανικά για χρήση σε μεγάλο αριθμό μικρών εξαρτημάτων ή εξαρτημάτων με τραχείς, ανομοιόμορφες επιφάνειες, όπως αυτές που συναντώνται με κάποιους τύπους χυτών.

Συνήθως, με μεγάλο αριθμό μικρών εξαρτημάτων, θα βυθιστούν σε διείσδυση χρησιμοποιώντας ένα καλάθι και μετά από τον σωστό χρόνο διείσδυσης, θα μεταφερθούν σε μια δεξαμενή σταθμού πλυσίματος εξοπλισμένη με γραμμές αέρα/νερού και μια αποστράγγιση. Το μείγμα αέρα/νερού παρέχει ένα ψεκασμό νερού χοντρών σταγονιδίων χαμηλής πίεσης, ο οποίος είναι ιδανικός για την απομάκρυνση της υπερβολικής διείσδυσης.

γ. Μετα – γαλακτωματοποιημένη αφαίρεση

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα διεισδυτικά μέσα είναι βασισμένα στο πετρέλαιο και μερικά έχουν σχεδιαστεί ώστε να προστίθενται ένας ξεχωριστός γαλακτωματοποιητής μετά την παρέλευση του χρόνου διείσδυσης. Ένας τύπος γαλακτωματοποιητή χρησιμοποιείται αραιωμένος σε νερό και είναι μία σύνθεση απορρυπαντικού, η οποία ονομάζεται υδρόφιλος γαλακτωματοποιητής. Με αυτόν τον τύπο, χρησιμοποιείται αρχικά ένα πρώτο στάδιο ψεκασμού με νερού για τη μηχανική απόξεση του μεγαλύτερου μέρους της περίσσειας διεισδύσεως από την επιφάνεια. Στη συνέχεια εφαρμόζεται με εμβάπτιση ο υδρόφιλος γαλακτωματοποιητής. Το υπόλοιπο του μίγματος διεισδύσεως και γαλακτωματοποιητή μπορεί ακολούθως να απομακρυνθεί με χρήση πλύσης με ψεκασμό ύδατος μετά την παρέλευση του σωστού χρόνου.

Ένας δεύτερος τύπος γαλακτωματοποιητή που χρησιμοποιείται είναι βασισμένος σε έλαιο και ονομάζεται λιπόφιλος γαλακτωματοποιητής. Χρησιμοποιείται αδιάλυτος και λειτουργεί ταχύτερα από τους υδρόφιλους γαλακτωματοποιητές. Δεν απαιτείται πλύση πρώτου σταδίου και μετά την παρέλευση του χρόνου διείσδυσης, το υλικό βυθίζεται σε δεξαμενή που περιέχει τον γαλακτωματοποιητή. Το πλεόνασμα μίγματος διεισδύσεως και γαλακτωματοποιητή στη συνέχεια απομακρύνεται με ψεκασμό νερού. Το μεγάλο πλεονέκτημα του μετα – γαλακτωματοποιημένου συστήματος είναι ότι οι μεγάλες ρηχές ασυνέχειες είναι λιγότερο πιθανό να απομακρύνουν την διείσδυση εάν το στάδιο γαλακτωματοποίησης γίνει σωστά. Από την άλλη πλευρά, ο χρόνος γαλακτωματοποίησης είναι πολύ σημαντικός και εάν ο γαλακτωματοποιητής παραμείνει πολύ ώρα, η διείσδυση στις ασυνέχειες μπορεί να ξεπλυθεί, οδηγώντας τους χειριστές να χάνουν σοβαρές ασυνέχειες.

3.4.6.5|Ανάπτυξη

Αφού αφαιρεθεί η περίσσεια διεισδυτικού, εφαρμόζεται στην επιφάνεια του συστατικού ένα υλικό ανάπτυξης. Λειτουργεί ως παράγοντας στυσίματος, τραβώντας διεισδυτικά από τις ασυνέχειες στην επιφάνεια για να δώσει μια ένδειξη. Αυτό το υλικό ανάπτυξης μπορεί επίσης να παρέχει ένα φόντο σε αντίθεση, καθώς και τη διάδοση της διείσδυσης έξω σε μια ευρύτερη περιοχή, καθιστώντας ευκολότερες τις ενδείξεις.

Διάφοροι τύποι είναι για κοινές χρήσεις, θα εξετάσουμε τον καθένα με τη σειρά του:

α. Ξηρού τύπου

Ο ξηρού τύπου είναι μια πολύ ελαφριά, χνουδωτή λευκή σκόνη. Συχνά εφαρμόζεται με ηλεκτροστατικό ψεκασμό ή με τοποθέτηση ενός εξαρτήματος σε ένα κλειστό θάλαμο καταίγιδας σκόνης. Οι ξηρού τύπου θα κολλήσουν σε υγρές περιοχές, όπως η διείσδυση σε ασυνέχειες, οπότε

είναι ζωτικής σημασίας, μετά το πλύσιμο με νερό, να στεγνώσουν σωστά τα μέρη πριν από την εφαρμογή αυτή. Είναι ο λιγότερο ευαίσθητος διαθέσιμος τύπος, επομένως χρησιμοποιούνται συνήθως με διείσδυση τύπου υψηλής ευαισθησίας. Δίνουν καλή ανίχνευση ενδείξεων καθώς ελαχιστοποιείται η ροή διείσδυσης από τις ασυνέχειες.

β. Με βάση το νερό

Υπάρχουν δύο τύποι υλικού ανάπτυξης με βάση το νερό: το διαλυτό και το αιωρούμενο. Οι διαλυτοί τύποι έχουν τη σκόνη του διαλύτη διαλυμένη στο νερό και έτσι, όταν αναμειγνύονται, δεν απαιτούν ανάδευση, ενώ στην περίπτωση του αιωρούμενου, τα σωματίδιά του δεν διαλύονται και απαιτούν ανάδευση πριν και κατά τη χρήση.

Επειδή και οι δύο τύποι είναι με βάση το νερό, το εξάρτημα δεν θα χρειαστεί ξήρανση μετά το στάδιο πλύσης με νερά, αλλά θα απαιτήσει ξήρανση μετά την εφαρμογή του υλικού ανάπτυξης, το οποίο μπορεί να γίνει με εμβάπτιση ή ροή. Η συγκέντρωση του υλικού ανάπτυξης θα πρέπει να αποφεύγεται καθώς η παχιά βαριά επίστρωση σκόνης θα παραμείνει μόλις εξατμιστεί το νερό, γεγονός που μπορεί να καλύψει μικρά ελαττώματα.

γ. Βασισμένο σε διαλύτες

Αυτός ο τύπος έχει αιωρούμενα σωματίδια σε πτητικό διαλύτη. Ο διαλύτης μπορεί να αναμειχθεί με το διεισδυτικό στις ασυνέχειες, μειώνοντας το ιξώδες και καθιστώντας ευκολότερο να τραβήξει το διεισδυτικό στην επιφάνεια για να δώσει μια ένδειξη. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα υλικά ανάπτυξης αυτού του τύπου θεωρούνται τα πιο ευαίσθητα. Περιέχονται κυρίως σε δοχεία υπό πίεση, οπότε η εφαρμογή γίνεται με ψεκασμό. Απαιτείται ξήρανση ενός εξαρτήματος μετά τον κύκλο πλύσης και πριν από την εφαρμογή του υλικού ανάπτυξης και καθώς το υλικό ανάπτυξης βασίζεται σε διαλύτες, εξατμίζεται σχεδόν στιγμιαία.

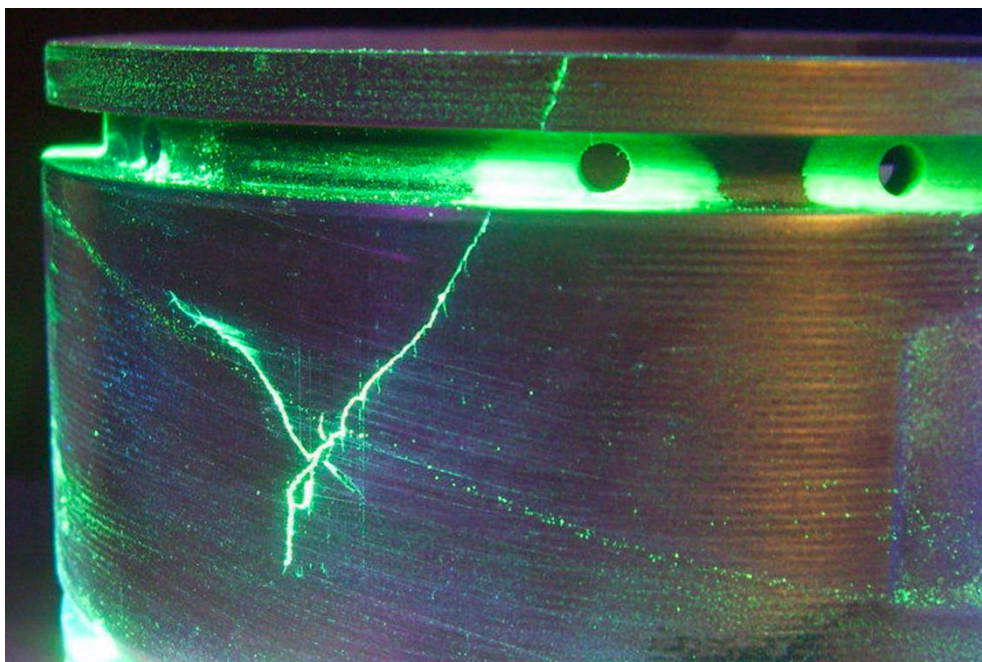
δ. Τύπου ταινίας

Αυτός ο τύπος εφαρμόζεται με ψεκασμό και χρησιμοποιείται σπάνια και μόνο σε ειδικές εφαρμογές. Μόλις στεγνώσει η βάση του διαλύτη αφήνει μια επίστρωση πλαστικής μεμβράνης. Οι ενδείξεις που σχηματίζονται έχουν καλή ανάλυση και η ταινία μπορεί να αφαιρεθεί για να παρέχει μόνιμη καταγραφή.

3.4.6.6|Επιθεώρηση

Υπάρχουν δύο διαφορετικές κατηγορίες διείσδυσης και η διαφορά τους είναι στον τύπο χρωστικής που χρησιμοποιείται για την παρασκευή κάθε κατηγορίας.

Ένας τύπος καλείται διείσδυση χρώματος – αντίθεσης και γίνεται με έντονη κόκκινη βαφή – ο έλεγχος διεξάγεται με λευκό φως. Ο δεύτερος τύπος ονομάζεται φθορίζον διεισδυτικό και παρασκευάζεται με φθορίζουσα βαφή.



Εικόνα 37. Φθορίζοντα υγρά και εφαρμογή για ανίχνευση επιφανειακών ρωγμών

Σε λευκό φως, μια ένδειξη με φθορίζουσα διείσδυση θα ήταν πολύ δύσκολο να γίνει ορατή. Ωστόσο, εάν η επιθεώρηση πραγματοποιηθεί σε σκοτεινό θάλαμο με χρήση υπεριώδους φωτός, η ένδειξη θα ήταν ένα λαμπερό φωτεινό κιτρινοπράσινο χρώμα. Η βαφή απορροφά το υπεριώδες φως, το οποίο το ανθρώπινο μάτι δεν μπορεί να ανιχνεύσει και εκπέμπει εκ νέου την ενέργεια αυτή σε κιτρινοπράσινα μήκη κύματος – αυτό φαίνεται στην Εικόνα 37.

Τα φθορίζοντα διεισδυτικά θεωρούνται ότι είναι πιο ευαίσθητα από τα διεισδυτικά χρώματος – αντίθεσης. Οι διεισδυτές υποδιαιρούνται περαιτέρω σε μεθόδους αφαίρεσης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Υπάρχει επίσης ένας τρίτος τύπος διείσδυσης, ο οποίος ονομάζεται διπλού – τύπου ή διπλής ευαισθησίας. Η υγρή διεισδυτική ουσία διπλής ευαισθησίας περιέχει χρωστικές ουσίες που χρωματίζονται κάτω από λευκό φως ή κάτω από φθορισμό με υπεριώδες φως. Ωστόσο, οι εντάσεις του ορατού χρώματος (συνήθως κόκκινου) και του φθορίζοντος χρώματος (συνήθως πορτοκαλί) είναι μικρότερες από τις αποχρώσεις που παράγονται από την ορατή και φθορίζουσα υγρή διεισδυτική ουσία, αντίστοιχα.

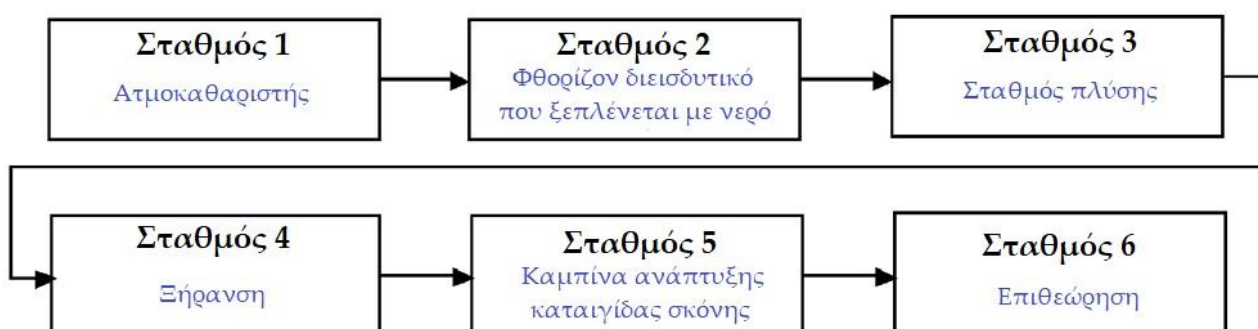
3.4.6.7|Καθαρισμός μετά

Γιατί είναι σημαντικό να καθαριστεί μετά από μια δοκιμή διείσδυσης υγρού μετά την απομάκρυνση ενός συστατικού; Τα υπολείμματα διείσδυσης θα μπορούσαν να παρεμποδίσουν τις επακόλουθες διεργασίες ή θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε προβλήματα διάβρωσης. Σε ορισμένες εφαρμογές, ο καθαρισμός είναι κρίσιμος, για παράδειγμα σε πυρηνικές εφαρμογές ή με εξαρτήματα που έρχονται σε επαφή με υγρό οξυγόνο. Οποιοδήποτε ίχνος υπολειμμάτων διεισδύσεως υδρογονανθράκων θα αντιδρούσε βίαια με το υγρό οξυγόνο.

Μπορεί να είναι ικανοποιητικό να χρησιμοποιηθεί μια ροή αέρα για να απομακρυνθεί η ξεραμένη σκόνη ενός υλικού ανάπτυξης ή μπορεί να χρειαστεί μια πιο εμπεριστατωμένη μέθοδος, όπως ένας αποστειρωτής ατμού.

3.4.6.8|Εξοπλισμός

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα απλό φορητό σύστημα δοκιμής διείσδυσης αποτελείται από τρία δοχεία ψεκασμού υπό πίεση που περιέχουν διαλύτη αφαίρεσης, χρωστική διείσδυση διείσδυσης και διαλύτη αναστολής. Με ορισμένα υφάσματα καθαρισμού και επαρκές φως, ο χειριστής μπορεί να εκτελέσει μια δοκιμή σχεδόν οπουδήποτε.

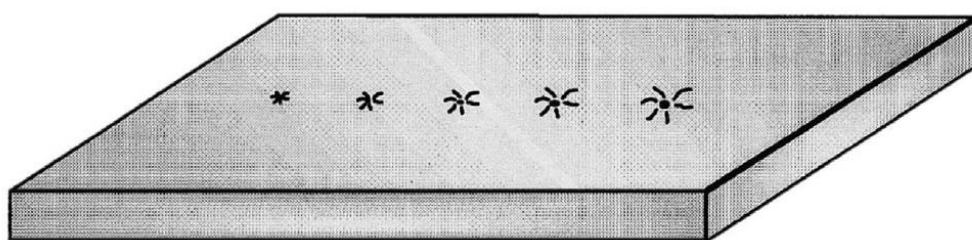


Σχήμα 1. Μια τυπική γραμμή εφαρμογής διείσδυσης

Σε μια πειραματική εγκατάσταση, είναι πολύ συνηθισμένο να υπάρχουν γραμμές δοκιμής διείσδυσης που χρησιμοποιούν μαζικά υλικά διείσδυσης σε μεγάλες δεξαμενές, τα οποία επιτρέπουν την εμβύθιση μεμονωμένων μεγάλων υλικών ή πολλών μικρών αντικείμενων βυθισμένων στο διεισδυτικό σε καλάθια.

Μια τυπική δοκιμαστική γραμμή διείσδυσης παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 1. Στον Σταθμό 3, θα εγκατασταθεί φως λυχνίας χαμηλής έντασης με υπεριώδη ακτινοβολία για να βοηθήσει κατά τη διάρκεια της φάσης πλυσίματος της δοκιμής. Στο Σταθμό 6, θα χρησιμοποιηθεί μια υπεριώδης λάμπα υψηλής έντασης για την επιθεώρηση των εξαρτημάτων.

Για την παρακολούθηση της καθημερινής απόδοσης των υλικών διείσδυσης, πραγματοποιείται έλεγχος απόδοσης της εγκατάστασης στην αρχή κάθε βάρδιας. Χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι δοκιμαστικών ομάδων και ένας κοινός τύπος παρουσιάζεται στην Εικόνα 38. Οι εσοχές γίνονται στην μία πλευρά ενός μπλοκ, το οποίο προκαλεί ρωγμές της επίστρωσης χρωμίου στην αντίθετη πλευρά. Οι εσοχές κατασκευάζονται με χρήση ελαφριών και βαριών δυνάμεων, δημιουργώντας πέντε διαφορετικά μεγέθη ρωγμών. Εάν το σύστημα διείσδυσης είναι νέο και εντοπίζει τέσσερις ρωγμές, ο καθημερινός έλεγχος πρέπει να εντοπίζει τέσσερις ρωγμές κάθε φορά. Αν μία ημέρα μπορεί να εντοπιστεί μόνο τρεις, αυτό υποδεικνύει ένα πρόβλημα, το οποίο πρέπει να εντοπιστεί και να διορθωθεί πριν να ξεκινήσει πάλι ο έλεγχος.



Εικόνα 38. Δοκιμαστικό τεστ εργοστασιακών επιδόσεων

Ο χειριστής πρέπει επίσης να εργαστεί σε γραπτές οδηγίες δοκιμής ή σε ένα τεχνικό δελτίο, έτσι ώστε ανεξάρτητα από το ποιος διεξήγαγε τη δοκιμή, να γίνεται συνεχώς με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Το τεχνικό φύλλο μπορεί επίσης να έχει πληροφορίες αποδεκτών κριτηρίων, οι οποίες συνήθως δηλώνονται από τον πελάτη και οι οποίες επιτρέπουν στον χειριστή να γνωρίζει ποιες ασυνέχειες είναι αποδεκτές και ποιες όχι.

3.4.6.9|Συστατικά

Το μεγάλο πλεονέκτημα της δοκιμής διείσδυσης είναι η ευελιξία της. Δεν περιορίζεται απλώς στη δοκιμή σιδηρομαγνητικών μετάλλων όπως η δοκιμή μαγνητικών σωματιδίων. Δεν περιορίζεται ακόμη και στον έλεγχο των μετάλλων – το γυαλί και τα πλαστικά είναι επίσης κατάλληλα για δοκιμές με διεισδυτικά. Επίσης μικρά αντικείμενα ή πολύ μεγάλα μπορούν εύκολα να δοκιμαστούν.

Το μειονέκτημα είναι ότι η δοκιμή διείσδυσης μπορεί να εντοπίσει μόνο επιφανειακές ασυνέχειες, όπως ρωγμές, ραφές, πορώδες, έλλειψη σύντηξης βρίσκονται εύκολα, καθώς και ασυνέχειες κατά τη λειτουργία, όπως ρωγμές κόπωσης και ρωγμές διάβρωσης λόγω τάσης.

3.4.6.10|Συγκεκριμένα παραδείγματα

Η δοκιμή διείσδυσης χρησιμοποιείται ευρέως σε κάθε βιομηχανία και βρίσκει ιδιαίτερη χρήση στην αεροδιαστημική και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπου χρησιμοποιούνται πολλά υψηλής θερμοκρασίας μη μαγνητικά κράματα υψηλής αντοχής.

Η δοκιμή διαρροών είναι μια άλλη εφαρμογή διείσδυσης, καθώς η ποιότητα των συγκολλημένων αρμών των δεξαμενών και των δοχείων προσδιορίζεται με την εφαρμογή διείσδυσης στη μία πλευρά και την επιθεώρηση για διαρροές που ελέγχονται από την αντίθετη πλευρά.

Οι δοκιμές διείσδυσης χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή αντικειμένων όπως λεπίδες και άξονες στροβίλου καθώς και βαλβίδες, δοχεία υψηλής πίεσης και ωστενιτικές σωληνώσεις ανοξείδωτου χάλυβα σε αντιδραστήρες πεπιεσμένου νερού.

3.4.6.11| Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του ελέγχου διείσδυσης

Πλεονεκτήματα

- Μια εύκολη μέθοδος μάθησης.
- Πολύ ευπροσάρμοστο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξέταση μετάλλων και μη.
- Ευαίσθητος σε μικρές επιφανειακές ασυνέχειες.
- Τα μετα – γαλακτωματοποιήσιμα συστήματα μπορούν να ανιχνεύσουν μεγάλες και ρηχές ασυνέχειες.
- Πολύ καλός για μαζική παραγωγή.

Μειονεκτήματα

- Ο προ – καθαρισμός πρέπει να είναι πλήρης.
- Δεν θα ανιχνεύσει ασυνέχειες κάτω από την επιφάνεια.
- Σκληρές επιφάνειες ή επιφάνειες με πορώδες μπορούν να προκαλέσουν υπερβολικό βάθος, γεγονός που θα παρεμποδίσει την επιθεώρηση.
- Τα φθορίζοντα διεισδυτικά είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στη μόλυνση, τα οποία θα επηρεάσουν σοβαρά την απόδοση και μπορεί να απαιτηθούν εκτεταμένοι έλεγχοι απόδοσης για τα αναλώσιμα υλικά. [8]

3.4.7| Έλεγχος ακουστικής εκπομπής – Acoustic emission testing (AE or AT)

Η ακουστική εκπομπή (AE) είναι το φαινόμενο ακτινοβολίας ακουστικών (ελαστικών) κυμάτων σε στερεά που συμβαίνει όταν ένα υλικό υφίσταται μη αναστρέψιμες μεταβολές στην εσωτερική δομή του, π.χ. ως αποτέλεσμα του σχηματισμού ρωγμών ή πλαστικών παραμορφώσεων λόγω γήρανσης, μεταβολών θερμοκρασίας ή εξωτερικών μηχανικών καταπονήσεων. Συγκεκριμένα, η AE λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια των διαδικασιών μηχανικής φόρτισης υλικών και δομών που συνοδεύονται από δομικές αλλαγές που παράγουν τοπικές πηγές ελαστικών κυμάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μικρές επιφανειακές μετατοπίσεις ενός υλικού που παράγεται από ελαστικά ή κύματα

καταπόνησης που παράγονται όταν απελευθερώνεται γρήγορα η συσσωρευμένη ελαστική ενέργεια σε ένα υλικό ή στην επιφάνεια του. Τα κύματα που παράγονται από πηγές ΑΕ έχουν πρακτικό ενδιαφέρον για την παρακολούθηση της δομικής υγείας ενός υλικού ή συστήματος (Structural Health Monitoring – SHM), τον ποιοτικό έλεγχο, την ανατροφοδότηση του συστήματος, την παρακολούθηση της παραγωγής και άλλους τομείς. Στις εφαρμογές SHM, η ΑΕ τυπικά χρησιμοποιείται για την ανίχνευση, τον εντοπισμό και τον χαρακτηρισμό βλαβών, ατελειών κλπ.

Καθώς η συγκεκριμένη διπλωματική αφορά την μέθοδο της Ακουστικής Εκπομπής και πως αυτή εφαρμόζεται στον έλεγχο δικτύων και δεξαμενών καυσίμων, θα γίνει εκτεταμένη αναφορά σχετικά στο Κεφάλαιο 4.

4 | Η Μέθοδος της Ακουστικής Εκπομπής

4.1 | Εισαγωγή

Η ακουστική εκπομπή είναι ένα καταπληκτικό, ελπιδοφόρο και προκλητικό αντικείμενο της σύγχρονης τεχνολογίας και επιστήμης. Είναι γνωστή στην καθημερινή μας ζωή, καθώς συναντάμε: τον ήχο θραύσης γυαλιού, την πτώση ενός δέντρου, τον πάγο που ραγίζει κ.α., φαινόμενα τα οποία αποτελούν μερικά παραδείγματα θορύβου που μπορούμε να ακούσουμε από διάφορα αντικείμενα που υποβάλλονται σε πίεση – καταπόνηση. Επιστημονικά ορισμένα, η ακουστική εκπομπή αποτελεί ένα φαινόμενο παραγωγής ήχου και υπερήχων από υλικά που υφίστανται διαδικασίες παραμόρφωσης και θραύσης. Οι πηγές που παράγουν ΑΕ στα διαφορετικά υλικά είναι μοναδικές. Για παράδειγμα, στα μέταλλα, οι πρωτογενείς μακροσκοπικές πηγές είναι άλματα ρωγμών, διαδικασίες που σχετίζονται με την ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων και τη διάρρηξη και την αποσύνδεση των εγκλεισμάτων. Τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των ακουστικών κυμάτων εκπομπής που παράγονται από πηγές διαφορετικής φύσης, εξαρτώνται άμεσα από τις ιδιότητες των υλικών και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Διαρροές, τριβές, χτυπήματα, χημικές αντιδράσεις, μεταβολές μεγέθους μαγνητικών τομέων είναι άλλα παραδείγματα πηγών που παράγουν κύματα ακουστικής εκπομπής. Αυτές οι πηγές ανήκουν σε μια άλλη δευτεροβάθμια κλάση ακουστικής εκπομπής, η οποία συνήθως διακρίνεται από την κύρια κατηγορία πηγών που σχετίζονται με την παραμόρφωση και την ανάπτυξη ρωγμών. Η κατανόηση της φύσης του εκπεμπόμενου ήχου, των χαρακτηριστικών του και του τι αντιπροσωπεύει, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη χρήσιμων τεχνολογικών λύσεων σε μη καταστρεπτικές δοκιμές, υλικές μελέτες, έλεγχο παραγωγής, ιατρικές εξετάσεις, ανάλυση χημικών αντιδράσεων και πολλές άλλες ενδιαφέρουσες εφαρμογές. [9]

Ιστορία

Η ιστορία της ακουστικής εκπομπής μπορεί να χωριστεί σε δύο κύριες περιόδους: προ – τεχνολογική και τεχνολογική. Από την αρχή της ανθρωπότητας, οι άνθρωποι παρακολουθούσαν την ακουστική εκπομπή όταν άκουγαν τον ήχο από ραγισμένες πέτρες, σχισίματα οστών, ραγίσματα ξύλου στη φωτιά και ούτω καθεξής (Εικόνα 39). Μερικές φορές οι άνθρωποι χρησιμοποίησαν την εμπειρία τους και σκόπιμα παρατηρούσαν ακουστικά διαφορετικές δομές για να ανιχνεύσουν αν βρίσκονται σε κίνδυνο. Με την ανάπτυξη των βιοτεχνιών, η ακουστική εκπομπή βοήθησε τους κατασκευαστές να ελέγξουν την ποιότητα της παραγωγής. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια της

κατασκευής κεραμικών, οι ήχοι πυρόλυσης ήταν ενδείξεις γρήγορης ή μη ομοιόμορφης ξήρανσης κεραμικών και αυτή η παρατήρηση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την προσαρμογή της διαδικασίας παραγωγής.



Εικόνα 39. Ακουστικός έλεγχος ασφάλειας

Στην Εικόνα 39 βλέπουμε έναν προϊστορικό άνθρωπο ο οποίος πιέζοντας και ακούγοντας ένα ξύλο προσπαθεί να αξιολογήσει αν είναι ασφαλές να περάσει.

Η τεχνολογική εποχή της ακουστικής εκπομπής ξεκίνησε στις αρχές του 20ού αιώνα, όταν οι έρευνες σε διάφορες χώρες άρχισαν να αναφέρουν για ακουστικούς ήχους κατά τη διάρκεια της έρευνας παραμόρφωσης υλικού. Έτσι, το 1916, ο J. Czoehrlski σημείωσε μια κραυγή κασσίτερου κατά την ένωση κρυστάλλων κασσιτέρου και ψευδαργύρου. Το 1923, οι A. Portevin και F. Le Chatelier ανέφεραν μικρούς ακουστικούς ήχους υψηλής συχνότητας που μπορούσαν να ακουστούν κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης ενός κράματος αλουμινίου, μαγγανίου και χαλκού. Το 1924, οι P. Ehrenfest και A. Yoffe παρατήρησαν ότι η διαδικασία διατμητικής παραμόρφωσης αλατιού και ψευδαργύρου συνοδεύεται από παραγωγή ήχων. Η πρώτη ανάπτυξη και χρήση οργάνων για την ανίχνευση της ΑΕ έγινε από τον σεισμολόγο F. Kishinouye κατά τη διάρκεια των πειραμάτων του πάνω σε ξύλο το 1933. Ανεξάρτητα, το 1936, ο F. Forster και ο E. Scheil

δημιούργησαν και εφάρμοσαν όργανα καταγραφής ΑΕ που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια μαρτενσιτικών μετασχηματισμών.

Το 1950, ο J. Kaiser ερευνώντας διαφορετικά υλικά μηχανικής ανέφερε σχετικά με το φαινόμενο της απουσίας ακουστικής εκπομπής σε υλικά κάτω από επίπεδα καταπόνησης, χαμηλότερα από αυτά που είχαν προηγουμένως εφαρμοστεί σε αυτό το υλικό. Αυτό το φαινόμενο, που φέρει το όνομα του Kaiser, χρησιμοποιείται ευρέως στις σημερινές δοκιμές ακουστικών εκπομπών. Μετά από έρευνες, που έγιναν τις τελευταίες δεκαετίες, αποκαλύφθηκε ότι το φαινόμενο Kaiser είναι ένα συγκεκριμένο υλικό και δεν το επιδεικνύουν όλα τα υλικά, για παράδειγμα τα διάφορα σύνθετα υλικά. Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι το φαινόμενο δεν παρατηρείται συνήθως σε δομές που περιέχουν αναπτυσσόμενες ρωγμές.

Στη δεκαετία του 1960, παράλληλα σε διάφορες χώρες προτάθηκε η χρήση τεχνολογίας ακουστικών εκπομπών για πρακτική μη καταστροφική εξέταση διαφόρων δομών. Έτσι, το 1961 στις ΗΠΑ, οι A. Green, C. Lockman και R. Steele χρησιμοποίησαν ακουστική εκπομπή για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας των περιβλημάτων κινητήρων πυραύλων που κατασκευάζονται για το Πολεμικό Ναυτικό των Ηνωμένων Πολιτειών. Το 1963, ο H. Dunegan πρότεινε να χρησιμοποιήσει την ΑΕ για την επιθεώρηση των δοχείων πίεσης και το 1969 ο P. Knauss ίδρυσε και την πρώτη εταιρεία ΑΕ στις ΗΠΑ. Παράλληλα, στην πρώην Σοβιετική Ένωση, πολλά ινστιτούτα επιστημονικών ερευνών άρχισαν να ερευνούν την ακουστική εκπομπή και να αναπτύσσουν την εφαρμογή τους για ανίχνευση ρωγμών, υλικές μελέτες, μη καταστρεπτικό έλεγχο διαφόρων δομών και άλλες, κυρίως στρατιωτικές, εφαρμογές.

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας ακουστικών εκπομπών και την έναρξη της εκτεταμένης εφαρμογής της, εμφανίστηκε η ανάγκη επικοινωνίας μεταξύ ερευνών, ανταλλαγής γνώσεων και κοινής ορολογίας. Για το σκοπό αυτό, ξεκινώντας από τα τέλη του 1960, οργανώθηκαν ομάδες εργασίας με ακουστικές εκπομπές στις ΗΠΑ, τη Γερμανία, την Ιαπωνία και άλλες χώρες. Επίσης, αναπτύχθηκαν πρότυπα για την εξέταση δομών, οργάνων και ορολογίας. Σήμερα, οι δοκιμές ακουστικών εκπομπών χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλες σχεδόν τις βιομηχανίες και σε πολλά ερευνητικά κέντρα παγκοσμίως.

Η φύση του φαινομένου

Η κατανόηση της φύσης της ακουστικής εκπομπής σε διάφορα υλικά αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο στην ανάπτυξη της τεχνολογίας ακουστικών εκπομπών. Η επιτυχία και το βάθος των τεχνολογικών δυνατοτήτων εξαρτώνται από την ικανότητα προσδιορισμού της διασύνδεσης μεταξύ των χαρακτηριστικών της ακουστικής εκπομπής και των πηγών που παράγει. Ωστόσο, η δημιουργία

αυτής της διασύνδεσης για διάφορα υλικά και δομές αποτελεί μια πραγματική επιστημονική και τεχνολογική πρόκληση. [9]

Προσέγγιση του όρου Ακουστική Εκπομπή

Παρά τη μακροχρόνια χρήση του, ο ορισμός της Ακουστικής Εκπομπής αποτέλεσε πηγή διαμάχης για τα τελευταία πενήντα χρόνια. Αυστηρά, το “ακουστικό” αναφέρεται στα κύματα πίεσης που ανιχνεύονται από το ανθρώπινο αυτί. Ωστόσο, τα ελαστικά κύματα σε στερεά δεν περιορίζονται σε κύματα πίεσης και επίσης όλα τα είδη δονήσεων δημιουργούνται από πηγές ακουστικών εκπομπών. Ακόμα κι έτσι, ο όρος Ακουστική Εκπομπή έχει γίνει σχεδόν καθολικά χρησιμοποιημένος για τα φαινόμενα των ελαστικών κυμάτων που παράγονται από ένα εσωτερικό γεγονός σε ένα μέσο. Στην παρούσα εργασία, το “ακουστικό” θα αναφέρεται σε οποιοδήποτε ελαστικό κύμα που παράγεται από πηγή ακουστικής εκπομπής. Η ακουστική εκπομπή, λοιπόν, είναι η δημιουργία ενός ελαστικού κύματος από την ταχεία μεταβολή στην κατάσταση καταπόνησης κάποιας περιοχής του υλικού. Αυτή η αλλαγή προκαλείται συνήθως από την εφαρμογή ενός εξωτερικού ερεθίσματος στο υλικό. Το υλικό μπορεί να είναι ένα στερεό, υγρό, αέριο ή πλάσμα και η εξωτερική καταπόνηση μπορεί να εφαρμοστεί μηχανικά, θερμικά, μαγνητικά κ.λπ. Η αλλαγή τάσης πρέπει να είναι αρκετά γρήγορη για να μεταδώσει κάποια ενέργεια στο περιβάλλον υλικό και να διαχέεται ως ένα ελαστικό κύμα. Σε μακροσκοπική κλίμακα, ο ορισμός αυτός περιλαμβάνει σεισμούς και βροντές, ενώ σε μικροσκοπική κλίμακα περιλαμβάνει μικροθραύση των κρυσταλλιτών και τους μετασχηματισμούς της μαρτενσιτικής φάσης. Η εμφάνιση της έκρηξης ενέργειας καθορίζεται εξ ολοκλήρου από τις τοπικές συνθήκες, το τοπικό πεδίο στρες και τη φυσική κατάσταση της περιοχής. Ως αποτέλεσμα, δεν μπορεί να προσδιοριστεί εκ των προτέρων ούτε ο ακριβής χρόνος κατά τον οποίο λαμβάνει χώρα η έκρηξη ενέργειας ούτε οι ακριβείς λεπτομέρειες του παραγόμενου κύματος. Γενικά, το γεγονός που δημιουργεί τις εκπομπές είναι μη αναστρέψιμο π.χ. ούτε ένα γεωλογικό ρήγμα, ούτε ένας θρυμματισμένος κρυσταλλίτης σε μια μεταλλική πλάκα θα επουλωθούν αυθόρμητα.

Τι συμβαίνει

Μόλις δημιουργηθεί το ελαστικό κύμα, τότε ταξιδεύει σε όλο το υλικό και μπορεί να ανιχνευθεί σε μεγάλες αποστάσεις από το σημείο προέλευσής του. Ταξιδεύοντας από την πηγή του στο σημείο ανίχνευσης, το κύμα υπόκειται σε όλα τα χαρακτηριστικά και τις παραλλαγές της ακουστικής πορείας του. Η ενέργειά του εξασθενεί λόγω γεωμετρικής διάδοσης και σκέδασης τόσο με μικροσκοπικές όσο και μακροσκοπικές μεταβολές στη δομή του υλικού. Μπορούν επίσης να υπάρχουν και άλλα είδη εξασθενήσεων. Το περιεχόμενο συχνότητας του κύματος παράγεται από την

πηγή και τροποποιείται καθώς μετακινείται στην ακουστική πορεία. Οι κύριες πληροφορίες που μεταφέρονται από το κύμα είναι ο χρόνος άφιξης και η ελαστική ενέργεια που ανιχνεύεται σε κάθε αισθητήρα στη δομή. Η διέγερση ενός αισθητήρα υποδηλώνει ότι κάτι συνέβη στο δείγμα σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ενώ το πλάτος δείχνει το επίπεδο της διαταραχής. Η προφανής θέση της πηγής και όλα τα άλλα χαρακτηριστικά του ανιχνευμένου σήματος τροποποιούνται από τα χαρακτηριστικά της διαδρομής του κυματισμού σε κάθε αισθητήρα καθώς και από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Ως αποτέλεσμα, σε ένα εξαιρετικά ελεγχόμενο εργαστηριακό πείραμα, μπορεί να γίνει μια λογική εκτίμηση των χαρακτηριστικών της πηγής εκπομπών. Ωστόσο, σε μια δοκιμή με μια πραγματική δομή, περιοριζόμαστε σε ό, τι είναι στατιστικά εκτιμώμενο από πολλαπλές εκπομπές για να μας δείξει τι συμβαίνει στο δείγμα. Η στατιστική ανάλυση δεν χρησιμοποιείται γενικά στη μελέτη των ακουστικών εκπομπών, αλλά η κατάσταση των δειγμάτων και των συντεταγμένων θέσης των πηγών συνάγεται από τους μέσους όρους υπολογισμένων τιμών από πολλαπλές εκπομπές.

Η ελαστική ενέργεια είναι πανταχού παρούσα. Ταξιδεύει μέσα από όλα τα υλικά όπου υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των ατόμων. Μόνο στο απόλυτο κενό δεν μεταδίδεται ελαστική ενέργεια. Η απόσταση από την πηγή πάνω στην οποία μπορεί να ανιχνευθεί ένα ακουστικό σήμα εξαρτάται από το αρχικό πλάτος και τα ακουστικά χαρακτηριστικά του υλικού μέσω του οποίου κινείται. Για πολλά δομικά υλικά, ακουστικά σήματα εκπομπής μπορούν να ανιχνευθούν σχεδόν από οπουδήποτε στη δομή. Αυτό επιτρέπει σε μια δοκιμή AE να καλύψει μια ολόκληρη δομή χωρίς να περιοριστεί σε μια μικρή περιοχή. Ωστόσο, πολλά ακουστικά σήματα που δεν έχουν καμία σχέση με τη δοκιμή μπορούν να είναι παρόντα και ανιχνεύσιμα. Η ακουστική απομόνωση του αντικειμένου δοκιμής είναι ιδιαίτερα επιθυμητή. Οι περισσότερες δοκιμές ακουστικών εκπομπών φιλτράρουν ακουστικά σήματα σε συχνότητες κάτω των 20 kHz, αγνοώντας έτσι τον θόρυβο του περιβάλλοντος και τη λεκτική επικοινωνία στην περιοχή δοκιμής.

Μια δοκιμή ακουστικών εκπομπών λαμβάνει χώρα σε πραγματικό χρόνο. Η δοκιμή δεν βρίσκει προϋπάρχοντα ελαττώματα, **αλλά ανιχνεύει την ανάπτυξη ελαττωμάτων** καθώς αυτά εμφανίζονται. Εάν η εφαρμογή καταπόνησης προσομοιώνει τις συνθήκες που η δομή δοκιμής έχει σχεδιαστεί για να αντιμετωπίσει την πραγματική λειτουργία, η έγκυρη ακουστική εκπομπή θα δείξει παθολογικά ελαττώματα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε βλάβη μέρους ή ολόκληρης της δομής. Η ποσότητα των εκπομπών που εντοπίζονται και οι θέσεις των πηγών εκπομπών θα εξαρτηθεί τόσο από το σχεδιασμό της δομής όσο και από τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της. Για παράδειγμα, συγκρίνουμε την κάμψη μιας πλάκας από γυαλί και μιας πλάκας FRP (ενισχυμένου πλαστικού με ίνες) με ίδιες διαστάσεις. Η πλάκα γυαλιού θα δώσει πιθανώς μία μόνο έκρηξη (ή και ριπή) εκπομπής υψηλού πλάτους μόνο σε περίπτωση βλάβης, ενώ το FRP θα

παρουσιάσει μια περίοδο εκπομπών χαμηλού επιπέδου ακολουθούμενη από μερικές υψηλότερες εκπομπές επιπέδου και έπειτα μία ή περισσότερες εκπομπές υψηλού πλάτους καθώς η λωρίδα αρχίζει να αποτυγχάνει και στη συνέχεια χωρίζεται ή σπάει. Η ερμηνεία των ανιχνευόμενων εκπομπών είναι η εργασία του μηχανικού που εκτελεί τις δοκιμές. Η αξία των πληροφοριών που λαμβάνονται από μια δοκιμή προσδιορίζεται πρώτα από το σχεδιασμό της δοκιμής και δεύτερον, από την ανάλυση της ανιχνευθείσας εκπομπής. Για σύνθετες δομές, τόσο ο σχεδιασμός και η ερμηνεία των δοκιμών είναι σπάνια απλοί. [10]

Πηγές ακουστικής εκπομπής

Οι ακουστικές εκπομπές είναι ακουστικά κύματα που παράγονται από μια γρήγορη μεταβολή της κατάστασης τάσης μιας περιοχής σε ένα υλικό. Τα ακουστικά κύματα είναι μια από τις δύο μη ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους μετάδοσης ενέργειας μέσω υλικού. Η άλλη μέθοδος είναι η θερμική διάχυση. Μια διαφορά μεταξύ των δύο είναι ότι η θερμική διάχυση περιλαμβάνει άμεση μεταφορά ενέργειας μεταξύ μεμονωμένων ατόμων, ενώ ένα ακουστικό κύμα μεταφέρει ενέργεια με συνεργατική κίνηση πολλών ατόμων. Ένα ακουστικό κύμα μπορεί να είναι τόσο απλό όσο ένας παλμός πίεσης σε ένα αέριο ή υγρό, ή τόσο περίπλοκο όπως οι πολλοί τρόποι μετάδοσης σε ένα οριοθετημένο στερεό. Η δημιουργία ενός ακουστικού κύματος περιλαμβάνει πάντα μια μεγάλη περιοχή ατόμων. [10]

A. Υλικές πηγές ακουστικής εκπομπής

Οι στόχοι των ελέγχων ακουστικών εκπομπών σε βιομηχανικές εφαρμογές σήμερα είναι η ανίχνευση, η θέση και η αξιολόγηση των ελαττωμάτων στις κατασκευές από μέταλλο, σκυρόδεμα ή σύνθετα υλικά. Στα υλικά αυτά, η ανάπτυξη θραύσεων με τη μορφή διάδοσης ρωγμών αποτελεί πρωταρχική πηγή ακουστικής εκπομπής. Τα στοιχειώδη άλματα διάδοσης ρωγμών κάτω από στατικά ή δυναμικά φορτία ακολουθούνται από ταχεία απελευθέρωση ενέργειας. Ένα μέρος αυτής της ενέργειας απελευθερώνεται υπό μορφή κυμάτων στρες ως αποτέλεσμα της ταχείας ανακατανομής ενός πεδίου τάσης στην κορυφή της ρωγμής. Τα κύματα τάσης που παράγονται είναι ελαστικά κύματα, αλλά μπορούν να δημιουργηθούν και ανελαστικά κύματα όταν οι τάσεις υπερβαίνουν το όριο απόδοσης. Αυτό συμβαίνει, για παράδειγμα, στη πλαστική ζώνη μιας ρωγμής που αναπτύσσεται σε ένα όλκιμο μέταλλο.

Άλλες πρωτογενείς πηγές ακουστικής εκπομπής σε υλικά που υφίστανται θραύση είναι:

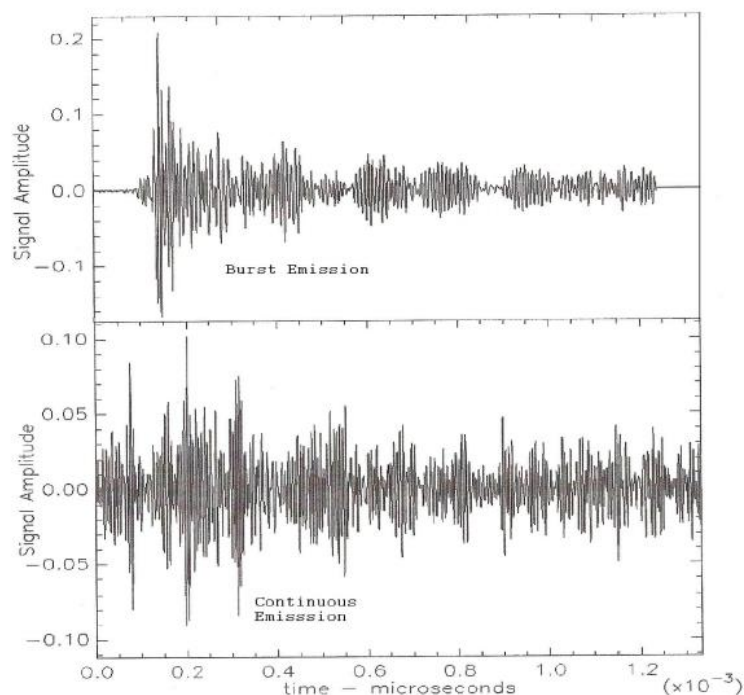
- Ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων και θραύση σκληρών εγκλεισμάτων σε μέταλλα.
- Σπάσιμο ινών, ρωγμές μήτρας και αποκόλληση σε σύνθετα υλικά.
- Συγκεντρωτικές μικροθραύσεις, κλείσιμο κενών κλπ. σε σκυρόδεμα.

B. Μη υλικές δευτερεύουσες πηγές ακουστικής εκπομπής

Ο εξοπλισμός ακουστικής εκπομπής είναι ικανός να ανιχνεύει και να αναλύει πηγές ακουστικής εκπομπής μη-υλικής προέλευσης, για παράδειγμα, μηχανικές πηγές τριβής, χτυπήματα, διαρροές κ.ο.κ. Υπάρχουν πολλαπλές εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται η τεχνολογία ακουστικής εκπομπής για την αποκάλυψη διαρροών, την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των μηχανημάτων, την ανίχνευση δυναμικών γεγονότων στρες στις δομές και άλλων που χρησιμοποιούν αυτές τις δυνατότητες. [9]

Τα πιο κοινά ακουστικά κύματα είναι ηχητικά κύματα στον αέρα και το νερό. Αυτά παράγονται με δονήσεις μιας επιφάνειας όπως το φωνητικό όργανο ενός ζώου, ένα φύλλο στον άνεμο ή το διάφραγμα ενός ηχείου. Αυτές οι πηγές είναι σχεδόν συνεχείς, που περιλαμβάνουν διαμορφωμένη δόνηση διεπαφής μεταξύ της περιοχής παραγωγής και του μέσου μετάδοσης. Ένας άλλος τύπος ακουστικού κύματος δημιουργείται από μια ξαφνική διαταραχή πάνω ή μέσα στο ίδιο το υλικό, ένα μεταβατικό γεγονός που παράγει ένα παροδικό ακουστικό κύμα. Ένα τέτοιο παροδικό κύμα είναι αυτό που ορίζουμε ως ακουστική εκπομπή. Μπορεί να έχει τη μορφή ενός μοναδικού αποσβεσμένου κύματος με πολύπλοκο περιεχόμενο συχνότητας ή μπορεί να εμφανίζονται τόσα μικρά παροδικά γεγονότα τα οποία συνοψίζονται σε σχεδόν συνεχή θόρυβο. Τα πρωταρχικά χαρακτηριστικά του είναι ότι παράγεται στο μέσο που το μεταδίδει και είναι μεταβατικό. Οποιαδήποτε ξαφνική κίνηση μιας ομάδας ατόμων σε ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα του ήχου σε ένα υλικό μπορεί να προκαλέσει ένα παροδικό ακουστικό κύμα. Τα φαινομενικά σχεδόν συνεχόμενα σήματα που παρατηρούνται συχνά μπορούν να δημιουργηθούν με την επικάλυψη πολλών μεταβατικών γεγονότων αντί για συνεχή δόνηση μιας επιφάνειας. Η Εικόνα 40 δείχνει κυματομορφές τόσο από ένα μεταβατικό συμβάν όσο και από την υπέρθεση πολλών μεταβατικών γεγονότων. Η μεγάλη απόσβεση του μεταβατικού γεγονότος παράγεται από τις αντανakλάσεις του αρχικού κύματος στο πολύπλοκο μεταλλικό δείγμα.

Το μέγεθος της περιοχής που παράγει μια εκπομπή μπορεί να ποικίλει από μια σχετικά μικρή σειρά ή πλάκα ατόμων που κινούνται ταυτόχρονα σε μια νέα κρυσταλλική θέση κατά τη διάρκεια μίας μεταβατικής μαρτενσιτικής φάσης σε θραύση στη ζώνη υποδιέγερσης μεταξύ δύο ηπειρωτικών πλακών. Η ενέργεια που απελευθερώνεται σε ένα γεγονός ακουστικής εκπομπής θα είναι περίπου ανάλογη προς τον όγκο της πηγής. Η ενέργεια από αυτά τα κύματα κυμαίνεται από μικρότερη από ένα ηλεκτρονιοβόλτ έως την ενέργεια που περιέχεται σε μία βροντή ή σε ένα σεισμό μεγέθους 9.



Εικόνα 40. Παραδείγματα εκπομπής έκρηξης και συνεχούς εκπομπής από κράμα αλουμινίου υψηλής αντοχής

Οι συχνότητες κυμάτων γενικά σχετίζονται αντιστρόφως με τον όγκο της περιοχής παραγωγής, που κυμαίνεται από χιλιάδες Hertz για σεισμούς έως αρκετά MHz σε λεπτά μέταλλα. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της ακουστικής εκπομπής στα στερεά είναι ότι η θραύση της περιοχής συμβαίνει όταν ο τοπικός φορέας αντοχής υπερβαίνει την ισχύ της περιοχής ώστε να αντέξει αυτόν τον φορέα. Με άλλα λόγια, ο ακριβής χρόνος κατά τον οποίο συμβαίνει η εκπομπή εξαρτάται αυστηρά από τις τοπικές συνθήκες. Σε ένα μέταλλο, για παράδειγμα, το ακριβές περιβάλλον κάθε κρυσταλλίτη διαφέρει και η θραύση ενός κρυσταλλίτη ή του ορίου μεταξύ δύο κρυσταλλιτών θα προκαλέσει μικρές αλλαγές στους τοπικούς φορείς καταπόνησης στους άλλους κρυσταλλίτες. Αυτή η πλήρης εξάρτηση από τις τοπικές συνθήκες σημαίνει ότι είναι αδύνατο να προβλεφθεί ο ακριβής χρόνος οποιασδήποτε εκπομπής ή το χρονικό διάστημα μεταξύ οποιωνδήποτε δύο εκπομπών. Οι ακουστικές εκπομπές εμφανίζονται απρόβλεπτα στο χρόνο. Αποτελούν απάντηση όχι στην εφαρμοζόμενη εξωτερική καταπόνηση αλλά στα τοπικά πεδία καταπόνησης που παράγονται σε κάθε θέση σε όλο το υλικό. Οι παράμετροι της ανιχνευόμενης εκπομπής εξαρτώνται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά της πηγής εκπομπής αλλά και από τα χαρακτηριστικά και τη γεωμετρία του μέσου μεταξύ της πηγής και του αισθητήρα αλλά και από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα και του συζεύγματος μεταξύ του αισθητήρα και του μέσου.

Τα χαρακτηριστικά σήματος που ανιχνεύονται από μεμονωμένους ίδιους αισθητήρες τοποθετημένους σε διάφορες θέσεις πάνω σε ένα δείγμα, συχνά ποικίλλουν σημαντικά για μία μόνο

εκπομπή. Όσο πιο σύνθετο είναι το μέσο στο οποίο παράγεται και μεταδίδεται η εκπομπή, τόσο πιθανότερο είναι να υπάρξουν μεγάλες διαφορές μεταξύ ανιχνευόμενων σημάτων από την ίδια εκπομπή σε διαφορετικούς αισθητήρες. Ο απρόβλεπτος χρόνος δημιουργίας και η μεγάλη ποικιλία κυματομορφών σε ξεχωριστές εκπομπές είναι θεμελιώδη χαρακτηριστικά της ακουστικής εκπομπής. Ως εκ τούτου, αυτοί οι παράγοντες έχουν βαθιά επίδραση στον τύπο της ανάλυσης που χρησιμοποιείται για τις ανιχνευόμενες εκπομπές.

Στα δομικά μέταλλα, τόσο η διαμέσου – κοκκώδης όσο και η δια – κοκκώδης πυρόλυση μεταλλικών κρυσταλλιτών μπορεί να παράγει ακουστική εκπομπή χαμηλού επιπέδου. Η εκπομπή θα δημιουργηθεί επίσης στις εγκλείσεις τόσο από τη θραύση της έγκλησης όσο και από το σπάσιμο των δεσμών μεταξύ της έγκλησης και του μετάλλου. Η ανάπτυξη ρωγμών όπου εμπλέκονται τουλάχιστον μερικοί κρυσταλλίτες μπορεί να παράγει εκπομπές μέτριων έως μεγάλων μεγεθών. Η παρουσία διάβρωσης σε μια μεταλλική επιφάνεια μπορεί να ανιχνευθεί από μικροθραύσεις των εύθραυστων υποπροϊόντων διάβρωσης ενώ η ενεργός διάβρωση μπορεί να προκαλέσει εκπομπή από το σχηματισμό φυσαλίδων. Σε περιβάλλοντα υψηλής καταπόνησης, η διδυμία (μια μορφή κρυσταλλικής παραμόρφωσης) μπορεί να συμβεί σε μερικά μέταλλα και αυτό μπορεί να προκαλέσει εκπομπές. Η απότομη μεταβολής της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στα μέταλλα μπορεί να συνεπάγεται την κίνηση των καταναγκασμών στα μέταλλα. Εργαστηριακά πειράματα υποστηρίζουν ότι είναι σε θέση να ανιχνεύσουν εκπομπές πολύ χαμηλού πλάτους από ερπυσμό. Ο ρυθμός ερπυσμού στα δομικά υλικά υπό κανονική χρήση είναι συνήθως πολύ αργός για την παραγωγή ακουστικής εκπομπής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανίχνευση ελαττωμάτων.

Οι μηχανισμοί πηγής στο FRP (Fibre – Reinforced Plastic (FRP) – Το ενισχυμένο με ίνες πλαστικό FRP είναι ένα σύνθετο υλικό κατασκευασμένο από πολυμερή μήτρα ενισχυμένη με ίνες) περιλαμβάνουν ρωγμές μήτρας, ρινίσματα μεταξύ της μήτρας και των ινών, θραύσεις ινών και διάδοση ρωγμών. Αυτοί οι μηχανισμοί εκπομπής μπορούν όλοι να ενεργοποιηθούν με την εφαρμογή εξωτερικής τάσης. Με βάση την ιδέα ότι το πλάτος των εκπομπών σχετίζεται με τον όγκο της πηγής, η ρωγμή της μήτρας θα πρέπει να παράγει τη χαμηλότερη εκπομπή πλάτους, ακολουθούμενη από αποκοπή ινών μήτρας. Η θραύση των ινών θα είναι ακόμα πιο έντονη, εν μέρει λόγω της ποσότητας ενέργειας που απελευθερώνεται από τη θραύση μιας ίνας υψηλής αντοχής. Τέλος, η διάδοση ρωγμών, η οποία περιλαμβάνει και τους τρεις προηγούμενους μηχανισμούς, θα παράγει τις υψηλότερες εκπομπές πλάτους.

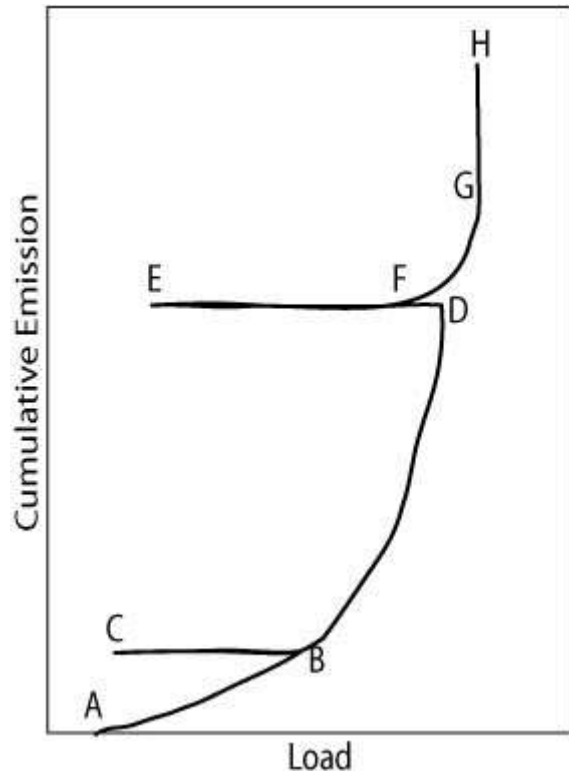
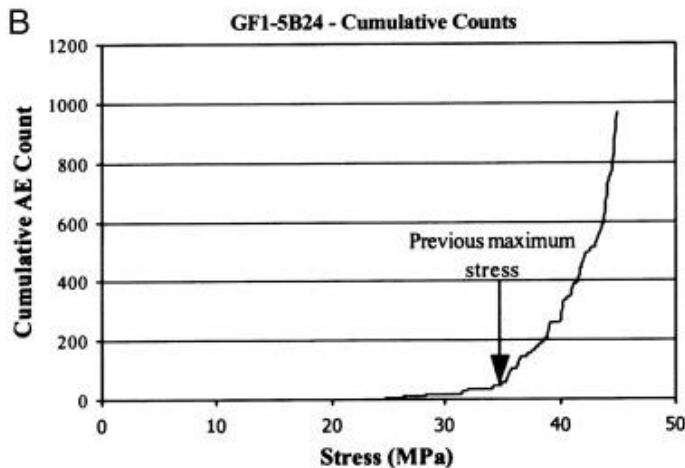
Αυτό φαίνεται γενικά να συμβαίνει, αλλά η προσπάθεια ποσοτικοποίησης του ως κανόνας δεν λειτούργησε πολύ καλά, πιθανότατα επειδή το FRP συνήθως λόγω κατασκευής έχει πολλές ατέλειες και ποτέ δεν ομοιάζει στη δομική ομοιομορφία ενός καλά ανοπτημένου μετάλλου. Η πρώτη μηχανική φόρτιση μιας δομής FRP θα παράγει ακουστική εκπομπή σε φορτία πολύ κάτω από την

ισχύ της δομής. Η πιο πιθανή αιτία αυτής της εκπομπής είναι η ανακούφιση, με μικρές μικροθραύσεις στο FRP κατά την πρώτη φόρτιση, των υψηλών παραμενουσών τάσεων που αναπτύχθηκαν σε τοπικές περιοχές κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σκλήρυνσης. Οι μικροθραύσεις έχουν μικρή επίδραση στην αντοχή του υλικού και η εκπομπή συνήθως σταματά πριν φτάσουν τα σχεδιαστικά φορτία. Αυτή η εκπομπή σπάνια παρατηρείται κατά τη δεύτερη και τις επόμενες φορτίσεις. Μια άλλη πηγή εκπομπής στις δομές FRP παρατηρείται συχνά κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης. Αυτή η εκπομπή εμφανίζεται στις μεσαίες περιοχές του κυκλικού φορτίου (κόπωση) όταν ο ρυθμός μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης είναι υψηλότερος, έναντι των φορτίων αιχμής. Φαίνεται ότι προκαλείται από την τριβή μεταξύ μικρών περιοχών της δομής που δεν είναι συνδεδεμένες. Αυτός ο τύπος εκπομπής μπορεί να υπάρχει κατά τη διάρκεια ολόκληρης της δοκιμής κυκλικού φορτίου. Ωστόσο, δεν συσχετίζεται με δομική ζημιά στο αντικείμενο δοκιμής. Οι δομικές βλάβες σχετίζονται με εκπομπές που συμβαίνουν κοντά στα φορτία αιχμής, ειδικά κατά την αύξηση του φορτίου.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι περισσότεροι μηχανισμοί ακουστικής εκπομπής συνεπάγονται μόνιμη αλλαγή στη μικροδομή του υλικού. Μόλις εμφανιστεί μια μικροθραύση, δεν θα ξανασυμβεί εκτός αν υπάρχει κάποιος μηχανισμός επούλωσης. Συνεπώς, η ακουστική εκπομπή εμφανίζεται μη αναστρέψιμη. Το φαινόμενο Kaiser, όπου η επαναφόρτιση ενός δείγματος δεν παράγει ακουστική εκπομπή έως ότου ξεπεραστεί η προηγούμενη στάθμη φορτίου, προκαλείται από αυτήν την μη αναστρέψιμη κατάσταση. Το φαινόμενο Kaiser διατηρείται πολύ καλά για την άμεση εκ νέου τάση ενός μεταλλικού δείγματος, αλλά λιγότερο καλά για σύνθετα υλικά. Το πρόβλημα είναι ότι η εκ νέου εφαρμογή ενός εξωτερικού στρες δεν διοχετεύεται αναγκαστικά στο δείγμα κατά μήκος της ίδιας διαδρομής. Παρατηρούνται συχνά εκπομπές σε επακόλουθες φορτίσεις σε φορτία χαμηλότερα από ό,τι είχε επιτευχθεί προηγουμένως. Ο λόγος της τιμής φορτίου, όταν αρχίζει η εκπομπή στις επόμενες φορτίσεις, προς τη μέγιστη τιμή φορτίου που επιτεύχθηκε στην προηγούμενη φόρτιση, γνωστός και ως λόγος Felicity –υποδεικνύει πιθανή ζημιά που προκλήθηκε από την προηγούμενη φόρτιση. Πολλές δοκιμές ΜΚΕ των δομών FRP εφαρμόζουν το φορτίο δοκιμής σε μια σειρά βημάτων, επιστρέφοντας στο μηδέν μεταξύ κάθε βήματος. Η εμφάνιση λόγου Felicity σε τιμή πολύ μικρότερη από 1.0 είναι μια καλή ένδειξη ότι σημειώθηκαν σημαντικές ζημιές σε προηγούμενες φορτίσεις. [10]

Στο παρακάτω Διάγραμμα 2 βλέπουμε το φαινόμενο Kaiser στα σημεία BCB και το Felicity στα DEF.

$$\text{felicity ratio} = \frac{\text{stress at onset of AE}}{\text{previous maximum stress}}$$



Διάγραμμα 2. Φαινόμενο Kaiser και Felicity ratio

Πολλαπλασιασμός κυμάτων

Η διάδοση ακουστικών κυμάτων εκπομπής από την πηγή που παράγεται πάνω από τη δομή είναι πάντα ένα πολύπλοκο μηχανικό παζλ. Κύματα διαφόρων τύπων διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες και με διαφορετικές κατευθύνσεις ταλάντωσης. Επιπλέον, περνώντας μέσα από ένα μέσο, τα κύματα υποβάλλονται σε πολλαπλές αλλαγές εξαιτίας της εξασθένησης, της διασποράς, της περίθλασης, της σκέδασης, της αντανάκλασης από τα όρια, της αλληλεπίδρασης με τις αντανάκλασεις και άλλων. Σε αυτές τις εφαρμογές, όπου είναι δυνατόν, είτε αναλυτικά είτε αριθμητικά, να περιγραφεί η διάδοση κύματος, είναι δυνατόν να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό της τοποθεσίας της πηγής και τον χαρακτηρισμό της. Για παράδειγμα, σε ανισότροπα υλικά, είναι δυνατή μια ακριβής θέση όταν ενσωματώνεται μια αποτελεσματική ταχύτητα κύματος σε έναν αλγόριθμο θέσης ως συνάρτηση μιας γωνίας διάδοσης.

Ποιοτικοί τύποι ακουστικής εκπομπής

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί ποιοτικοί τύποι ακουστικής εκπομπής: έκρηξης και συνεχής:

- Η έκρηξη – στιγμιαία εκπομπή – ή εκπομπή ριπής είναι ένας τύπος εκπομπής που σχετίζεται με μεμονωμένα γεγονότα που συμβαίνουν σε ένα υλικό και που έχει ως αποτέλεσμα διακριτά σήματα ακουστικής εκπομπής.

- Συνεχής είναι ένας τύπος εκπομπής που σχετίζεται με χρονική επικάλυψη και/ή διαδοχικά συμβάντα εκπομπών από μία ή περισσότερες πηγές που έχει ως αποτέλεσμα τα παρατεταμένα σήματα.

Η ανίχνευση, η ικανότητα διάκρισης και ανάλυσης σημάτων που προκύπτουν από τους δύο τύπους εκπομπών είναι σημαντική για πολλές εφαρμογές ακουστικών εκπομπών. Για παράδειγμα, στα όλκιμα μέταλλα, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται στις διαδικασίες θραύσης πηγαίνει στην ανάπτυξη μιας πλαστικής παραμόρφωσης, η οποία κανονικά συνοδεύεται από συνεχή ακουστική εκπομπή. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο συνήθως τα ελαττώματα στα αρχικά στάδια τους σε όλκιμα μέταλλα μπορούν να ανιχνευθούν κυρίως με συνεχή εκπομπή. Επίσης, η αξιόπιστη ανίχνευση συγκεκριμένων ατελειών, όπως η ρωγμή και η ολίσθηση της διάβρωσης, εξαρτώνται από την ανίχνευση και την ανάλυση της συνεχούς ακουστικής εκπομπής. Ταυτόχρονα, υπάρχουν ελαττώματα ή καταστάσεις που μπορούν να ανιχνευθούν με ακουστική εκπομπή έκρηξης, όπως θραύση μη μεταλλικών εγκλεισμάτων, θραύση προϊόντων διάβρωσης, άλματα ρωγμών σε εύθραυστα ή προοδευτικά στάδια σε όλκιμα μέταλλα και άλλα.

Ακουστικές εκπομπές και συνθήκες φόρτισης

Ελαττώματα αναπτύσσονται σε υλικά υπό συνθήκες καταπόνησης, όχι απαραίτητα μόνο δυναμικά αλλά και/ή λόγω έκθεσης σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Δεδομένου ότι η ακουστική εκπομπή συνοδεύει τις διαδικασίες θραύσης, είναι σημαντικό για την επιτυχία της εξέτασης ακουστικών εκπομπών να μάθουν για τα κοινά ελαττώματα που υπάρχουν στην δομή που εξετάστηκαν και για λειτουργικές και πεδία τάσεων που μπορεί να προκαλέσουν την δημιουργία και την εμφάνιση ελαττωμάτων. Μόλις δημιουργηθούν αυτοί οι παράγοντες, μπορεί να αναπτυχθεί μια διαδικασία για την εκτίμηση της ΑΕ. Η θεμελιώδης αρχή αυτής της διαδικασίας είναι η διεξαγωγή εξετάσεων υπό τις πραγματικές ή προσομοίωση πραγματικών συνθηκών φόρτωσης που προκαλούν ελάττωμα προέλευσης και ανάπτυξης. Για παράδειγμα, εάν είναι γνωστό ότι ένας σωλήνας με παχύ τοίχωμα πάσχει από θερμική κόπωση εξαιτίας μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας, μπορεί να είναι αναποτελεσματικό να εξεταστεί αυτός ο σωλήνας υπό συνθήκες υδραυλικής πίεσης και θερμοκρασίας περιβάλλοντος, απλώς και μόνο επειδή η κατανομή τάσεων θα είναι διαφορετική και δεν θα αναπτυχθεί το ελάττωμα και κατά συνέπεια δεν θα εκλυθεί ενεργώς ακουστική εκπομπή κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Μερικές φορές, είναι απαραίτητο να εκτελεστεί μια δοκιμασία υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας και πίεσης, προκειμένου να ανιχνευθούν και να αξιολογηθούν διαφορετικοί τύποι ελαττωμάτων.

Εφαρμογή της μεθόδου ακουστικής εκπομπής ως διαγνωστικού εργαλείου για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας

Η εφαρμογή της ακουστικής εκπομπής ως διαγνωστικής μεθόδου, ως εργαλείο δηλαδή αξιολόγησης δομικής ακεραιότητας είναι δυνατή όταν καθορίζεται ποιοτική ή ποσοτική σχέση μεταξύ ανιχνευόμενης ακουστικής εκπομπής και συνθηκών υλικού για ένα συγκεκριμένο υλικό και δομή. Υπάρχουν δύο σημαντικές προσεγγίσεις για την επίτευξη αυτού του στόχου:

- Προσδιορισμός πειραματικά ενός χαρακτηριστικού συνόλου (δακτυλικών αποτυπωμάτων) παραμέτρων ακουστικών εκπομπών και των χαρακτηριστικών τους που περιγράφουν με μοναδικό τρόπο μία κατάσταση υλικού, ένα στάδιο θραύσης, έναν τύπο ελαττώματος κ.λπ. για παράδειγμα, ο εντοπισμός χαρακτηριστικών ακουστικών εκπομπών δακτυλικών αποτυπωμάτων σκασίματος και διάβρωσης σκυροδέματος.
- Καθορισμός μιας θεωρητικής σχέσης μεταξύ παραμέτρων ακουστικών εκπομπών και των χαρακτηριστικών τους και ιδιοτήτων υλικών, παραμέτρων μηχανικής κάμψης και κλπ. για παράδειγμα, τη σχέση μεταξύ της ενέργειας ακουστικής εκπομπής και της τιμής του J – ολοκληρώματος μιας ρωγμής. [11]

Πολλές εργασίες για την ανάπτυξη και των δύο προσεγγίσεων έγιναν για διαφορετικές δομές και υλικά, όπως για παράδειγμα πρότυπες μέθοδοι δοκιμής για την αξιολόγηση της κατάστασης του δοχείου πίεσης ή μοντέλα που διασυνδέουν παραμέτρους ακουστικής εκπομπής και μηχανικής θραύσης όπως μοντέλο πλαστικής παραμόρφωσης, μοντέλο ρωγμών κόπωσης κ.α. [9]

4.2|Ακουστικά κύματα σε στερεά

Οι ακουστικές εκπομπές είναι ακουστικά κύματα που παράγονται από ένα υλικό, συνήθως σε απόκριση μιας αλλαγής στην καταπόνηση. Μόλις δημιουργηθούν, αυτά τα κύματα διαδίδονται σύμφωνα με τους ίδιους κανόνες με οποιοδήποτε άλλο ακουστικό κύμα. Είναι μια συλλογική κίνηση σε μια συλλογή ατόμων. Η κίνηση των ακουστικών κυμάτων είναι μια συνεργατική κίνηση των ατόμων σε ένα υλικό που εκτείνεται πάνω από ένα τεράστιο αριθμό ατόμων. Αυτή η συλλογική κίνηση υποδηλώνει ότι το μήκος κύματος είναι μακρύ σε σύγκριση με την απόσταση μεταξύ των ατόμων. Το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογο με τη συχνότητα ενός κύματος. Ως εκ τούτου, ένα ακουστικό κύμα θεωρείται συνήθως ότι είναι σχετικά χαμηλής συχνότητας. Για παράδειγμα, μια συχνότητα έως 10^9 Hz στο Αλουμίνιο θα συνεπαγόταν ακόμα ένα κύμα που εκτείνεται σε πάνω από $1,5 \times 10^4$ θέσεις πλέγματος. Ο απλούστερος τύπος ακουστικού κύματος είναι ένα κύμα πίεσης το οποίο συμβαίνει όταν ένα κέλυφος υλικού γύρω από μια περιοχή συμπιέζεται ξαφνικά από μια διαταραχή στην περιοχή αυτή. Αυτή η συμπίεση μπορεί να είναι είτε θετική είτε

αρνητική, όπως μια φυσαλίδα που εκρήγνυται ή εκφυλίζεται. Το υλικό σε αυτό το κέλυφος εμφανίζει μια αλλαγή στην πυκνότητα του. Αυτή η μεταβολή πυκνότητας μεταφέρεται στη συνέχεια στο επόμενο κέλυφος με σύζευξη μεταξύ των ατόμων.

Η πυκνότητα στο πρώτο κέλυφος στη συνέχεια ανακάμπτει, συνήθως πηγαίνει πέρα από την αρχική τιμή της, σε μια μεταβολή μικρότερης πυκνότητας στην αντίθετη κατεύθυνση. Αυτή η μεταβολή της πυκνότητας μεταδίδεται στο επόμενο κέλυφος και ούτω καθεξής σε όλο το υλικό. Η δύναμη της σύζευξης μεταξύ των ατόμων ή των μορίων του υλικού και η πυκνότητα του υλικού καθορίζει την ταχύτητα με την οποία διαδίδεται η διαταραχή. Το κύμα που προκύπτει είναι γνωστό ως κύμα συμπίεσης και εμφανίζεται σε όλα τα υλικά, στερεά, υγρά, αέρια και πλάσματα. Σε ένα κύμα συμπίεσης, η μέση κίνηση των ατόμων παραλληλίζεται με την κατεύθυνση της κίνησης του κύματος. Καθώς τα υλικά γίνονται πιο άκαμπτα και διατεταγμένα, οι δυνάμεις μεταξύ των ατόμων γίνονται πολύ πιο πολύπλοκες και εξαρτώνται από τις γεωμετρικές θέσεις των ατόμων. Είναι δυνατοί περισσότεροι τρόποι κίνησης κυμάτων και δεν περιορίζονται πλέον οι μέσες ατομικές κινήσεις στο να είναι παράλληλες προς την κατεύθυνση διάδοσης. Η εισαγωγή ορίων σε ένα υλικό θα εισαγάγει περαιτέρω επιπλοκές. Καθώς ένα κύμα περνά μέσα από ένα σημείο τομής προς ένα άλλο υλικό, η διαφορά στην φυσική ιδιότητα μεταξύ των υλικών θα παράγει αντανakλάσεις και διαθλάσεις καθώς και μεταβολές στους τρόπους διάδοσης. Ένα κύμα που ταξιδεύει κατά μήκος μιας επιφάνειας ενός υλικού θα έχει πολύ διαφορετικές κινήσεις σωματιδίων από ένα που διαδίδεται στο κύριο μέρος του υλικού αυτού.

4.2.1 | Χαρακτηριστικά ακουστικών κυμάτων

Τα σήματα ακουστικής εκπομπής δημιουργούν πολυπλοκότητα καθώς το κύμα ταξιδεύει εντός του υλικού μέσου. Η κατανόηση των σημάτων ακουστικής εκπομπής απαιτεί γνώση των κυματολογικών χαρακτηριστικών, ξεκινώντας από τις ιδιότητες του μέσου μέσω του οποίου ταξιδεύει το κύμα. Όλα τα υλικά είναι συλλογές ατόμων που συγκρατούνται από ελκυστικές δυνάμεις ενώ ταυτόχρονα εμποδίζονται, από απωθητικές δυνάμεις μικρής εμβέλειας, στο να πλησιάζουν πολύ κοντά. Η υπέρθεση αυτών των δυνάμεων οδηγεί σε μια θέση ισορροπίας για το άτομο με τη χαμηλότερη ενέργεια του, την πιο σταθερή διαμόρφωση του υλικού. Στους κρυστάλλους, για παράδειγμα, οι δυνάμεις μεγάλης εμβέλειας μεταξύ των ατόμων καταλήγουν σε καθορισμένες τοποθεσίες για αυτές τις θέσεις ισορροπίας. Το αποτέλεσμα είναι μια κρυσταλλική δομή. Σε ένα υγρό η δομή είναι άμορφη, αλλά μία κατά προσέγγιση απόσταση μεταξύ των ατόμων έχει ως αποτέλεσμα μία ομοιόμορφη πυκνότητα. Σε ένα υγρό, ορίζεται μόνο η πυκνότητα. Δεν

υπάρχουν σταθερές θέσεις για τα άτομα όπως συμβαίνει σε ένα κρυσταλλικό πλέγμα. Η ικανότητα των ατόμων να αλλάζουν θέση μετريέται από το ιξώδες του υγρού, το οποίο μπορεί να κυμαίνεται από πολύ χαμηλό έως εξαιρετικά υψηλό. Στα δύο άκρα των τιμών του ιξώδους υπάρχουν ένα αέριο και ένα στερεό. **Ένα αέριο είναι ένα υγρό με πολύ χαμηλό ιξώδες και το γυαλί είναι ένα υγρό με εξαιρετικά υψηλό ιξώδες.** Η πυκνότητα ενός αερίου μπορεί να οριστεί με τη συνολική μάζα του και τον όγκο του δοχείου στο οποίο περιέχεται. Οι ακουστικές ιδιότητες ενός υλικού εξαρτώνται από την πυκνότητα του και από τις σταθερές σύζευξης μεγάλης απόστασης μεταξύ των ατόμων του.

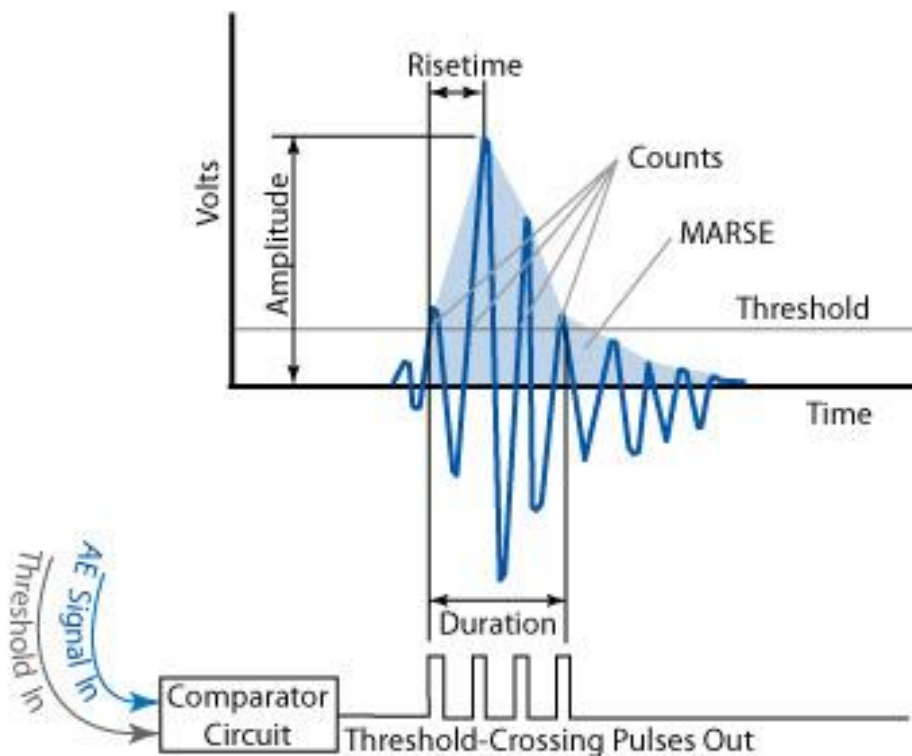
Οι συσχετίσεις μεγάλης εμβέλειας σε ένα ακουστικό κύμα έχουν ως αποτέλεσμα πολλά άτομα σε μια μικρή περιοχή να μετατοπίζονται προς την ίδια κατεύθυνση από τις θέσεις ισορροπίας τους. Αυτή η μετατόπιση είναι μια τοπική δυναμική καταπόνηση στον κρύσταλλο, η κατεύθυνση και το μέγεθος του στελέχους αλλάζουν διαρκώς καθώς μετακινούνται τα άτομα. Όταν η ατομική κίνηση είναι ψευδο – ταλαντευτική, το ίδιο ισχύει και για το στέλεχος. Ένα ακουστικό κύμα είναι ένα ταλαντευόμενο στέλεχος που κινείται μέσα από ένα υλικό. Επειδή το στρες και η καταπόνηση είναι πάντα άμεσα σχετιζόμενες με ένα υλικό, υπάρχει επίσης ένα ταλαντευόμενο πεδίο στρες. Ως εκ τούτου, ένα ακουστικό κύμα μπορεί να περιγραφεί είτε ως δυναμική πίεση είτε ως πεδίο παραμόρφωσης ενός υλικού.

4.2.2 | Παράμετροι σήματος ΑΕ

Έχοντας τον εξοπλισμό ρυθμισμένο και την εγκατάσταση ολοκληρωμένη, μπορεί να ξεκινήσει η δοκιμή ΑΕ. Ο αισθητήρας συνδέεται με την επιφάνεια δοκιμής και συγκρατείται στη θέση του με ταινία ή κόλλα. Ένας χειριστής παρακολουθεί τα σήματα τα οποία διεγείρονται από τις επαγόμενες καταπονήσεις στο αντικείμενο. Δεδομένου ότι λαμβάνεται σωστά ένα χρήσιμο σήμα μπορούν να υπολογισθούν παράμετροι όπως **Πλάτος (Amplitude)**, **Παλμοί (Counts)**, **Μετρούμενη Περιοχή Κάτω από το Εύρος Διορθωμένου Σήματος (Measured Area under the Rectified Signal Envelope MARSE)**, **Διάρκεια (Duration)** και **Χρόνος Ανόδου (Rise Time)**. Κάθε χαρακτηριστικό του σήματος ΑΕ φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 41 και περιγράφεται παρακάτω.

- **Το Πλάτος A (Amplitude, A)**, είναι η μεγαλύτερη μετρούμενη τάση σε κυματομορφή και μετράται σε ντεσιμπέλ (dB). Αυτή είναι μια σημαντική παράμετρος στην επιθεώρηση ακουστικών εκπομπών επειδή καθορίζει την ανιχνευσιμότητα του σήματος. Δεν θα καταγραφούν σήματα με πλάτος κάτω από το καθορισμένο από τον χειριστή ελάχιστο όριο.
- **Ο Χρόνος Ανύψωσης R (Rise Time R)**, είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ της πρώτης διέλευσης κατωφλίου και της κορυφής του σήματος. Αυτή η παράμετρος σχετίζεται με τη διάδοση του κύματος μεταξύ της πηγής του συμβάντος ακουστικής εκπομπής και του

αισθητήρα. Συνεπώς, ο χρόνος ανόδου χρησιμοποιείται για την πιστοποίηση των σημάτων και ως κριτήριο για το φίλτρο θορύβου.



Εικόνα 41. Παράμετροι σήματος ΑΕ

- **Διάρκεια D (Duration, D)** είναι η διαφορά ώρας μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας διέλευσης κατωφλίου. Η διάρκεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό διαφορετικών τύπων πηγών και για το φιλτράρισμα του θορύβου. Όπως και στους παλμούς (N), αυτή η παράμετρος βασίζεται στο μέγεθος του σήματος και στην ακουστική του υλικού.
- **Η Μετρούμενη Περιοχή Κάτω από το Εύρος Διορθωμένου Σήματος E (Measured Area under the Rectified Signal Envelope MARSE)**, ή αλλιώς **MARSE E**, το οποίο μερικές φορές αναφέρεται ως μετρήσεις ενέργειας, είναι το μέτρο της περιοχής κάτω από το εύρος του διορθωμένου γραμμικού σήματος χρόνου τάσης από τον μορφομετατροπέα. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως το σχετικό εύρος σήματος και είναι χρήσιμο επειδή μέσω αυτού μπορεί να προσδιοριστεί η ενέργεια της εκπομπής. Το MARSE είναι επίσης ευαίσθητο στη διάρκεια και στο πλάτος του σήματος, αλλά δεν χρησιμοποιεί μετρήσεις ή καθορισμένα από το χρήστη κατώφλια και συχνότητες λειτουργίας. Το MARSE χρησιμοποιείται τακτικά στις μετρήσεις ακουστικών εκπομπών.

- **Παλμοί N (Counts N)**, αναφέρονται στον αριθμό των παλμών που εκπέμπονται από το κύκλωμα μέτρησης αν το πλάτος του σήματος είναι μεγαλύτερο από το κατώφλι. Ανάλογα με το μέγεθος του συμβάντος AE και τα χαρακτηριστικά του υλικού, ένα χτύπημα μπορεί να παράγει έναν ή περισσότερους παλμούς. Παρόλο που πρόκειται για μια σχετικά απλή παράμετρο για συλλογή, πρέπει συνήθως να συνδυαστεί με μετρήσεις εύρους και/ή διάρκειας για την παροχή ποιοτικών πληροφοριών σχετικά με το σχήμα ενός σήματος. [12]

4.2.3 | Κίνηση κύματος

Η πιο γνωστή απεικόνιση ενός κύματος είναι μια ημιτονοειδής καμπύλη όπως φαίνεται στο Σχήμα 2(a). Το πλάτος κυμαίνεται ανάμεσα στα θετικά και τα αρνητικά όρια με ένα σταθερό ρυθμό, γνωστό ως συχνότητα, και η καμπύλη εκτείνεται επ' αόριστον. Αυτή η καμπύλη μπορεί να γραφεί εξίσου καλά ως συνάρτηση του χώρου ή του χρόνου. Σε ένα μέσο, ένα κύμα έχει τόσο χωρική όσο και χρονική συνιστώσα. Μια εξίσωση για μια τέτοια καμπύλη είναι

$$Y = A \sin(\omega t - kx) \text{ (1a) και } v = \lambda u \text{ (1b)}$$

όπου A είναι το πλάτος, το ω είναι 2π φορές η συχνότητα u και k ο αριθμός κύματος, είναι 2π πάνω από το μήκος κύματος λ . Η συχνότητα, το μήκος κύματος και η ταχύτητα κύματος, v σχετίζονται με την εξίσωση (1b). Το κύμα που περιγράφεται στην εξίσωση (1a) διαδίδεται μόνο προς μία κατεύθυνση. Σε τρεις διαστάσεις, το μέτωπο κυμάτων, το οποίο είναι μια επιφάνεια σταθερής φάσης για το κύμα, είναι ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα X . Ένα τέτοιο κύμα είναι γνωστό ως επίπεδο κύμα. Τα περισσότερα κύματα που προέρχονται από ένα σημείο σε ένα εκτεταμένο μέσο έχουν αρχικά ένα σφαιρικό μέτωπο κύματος. Ωστόσο, σε κάποια απόσταση από το σημείο προέλευσης, η σφαιρική επιφάνεια θα προσεγγίσει ένα επίπεδο σε μια μικρή περιοχή. Για απλότητα, θα δεχτούμε επίπεδα κύματα για την υπόλοιπη ανάλυση.

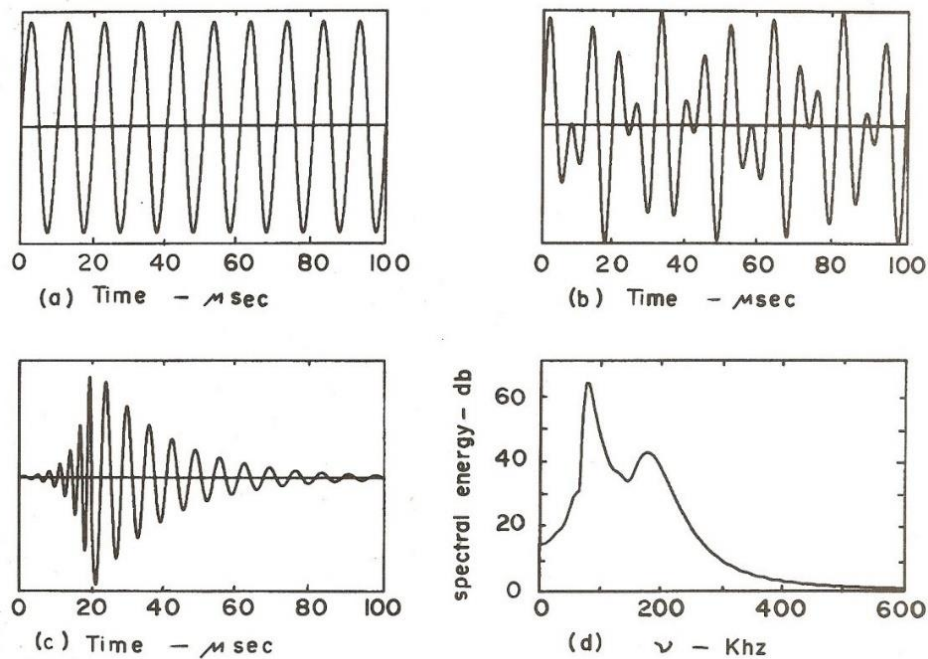
Αν δύο κύματα υπάρχουν ταυτόχρονα σε ένα μέσο, τα πλάτη τους θα προστεθούν αλγεβρικά. Το Σχήμα 3 δείχνει το άθροισμα των δύο κυμάτων

$$Y = A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t \text{ (2)}$$

όπου για λόγους σαφήνειας απεικονίζεται μόνο το στοιχείο χρόνου. Έτσι, το άθροισμα των απλών κυμάτων μπορεί να αντιπροσωπεύει μία σύνθετη μορφή κύματος. Είναι πολύ γνωστό ότι οποιαδήποτε αυθαίρετη παροδική λειτουργία που δεν περιέχει ασυνέχεια μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα άπειρο άθροισμα των ημιτονοειδών κυμάτων γνωστών ως σειρά Fourier. Μια μορφή μιας τέτοιας σειράς μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$f(t) = A_0 / 2 + \sum A_n \sin(n\omega_n t + \alpha_n) \text{ (3)}$$

όπου A_0 και A_n είναι τα πλάτη των ημιτονοειδών καμπυλών, οι ω_n είναι οι συχνότητες και οι α_n είναι οι φάσεις.



Σχήμα 2. Κύματα (a) Απλό ημιτονοειδές, (b) άθροισμα δύο ημιτονοειδών, (c) παροδικό, (d) φάσμα μεταβατικού

Η σειρά Fourier δεν υπαγορεύει ότι η καμπύλη ή η μορφή κύματος είναι συνεχείς. Ένα μεταβατικό κύμα όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 2(c) μπορεί να περιγραφεί με μια σειρά Fourier. Μια χρήσιμη μέθοδος ανάλυσης ενός κύματος είναι να εξετάσουμε τα συστατικά της συχνότητας. Μια γραφική παράσταση του τετραγώνου των μεγεθών των συνιστωσών συχνότητας, Α στην εξίσωση (3), έναντι της συχνότητας ν , είναι γνωστή ως το φάσμα συχνοτήτων του κύματος. Το Σχήμα 2(d) δείχνει το φάσμα για το κύμα που φαίνεται στο Σχήμα 2(c).

4.2.4|Ακουστικά μέσα

Ένα ακουστικό κύμα υπάρχει μόνο σε ένα υλικό, είτε πρόκειται για στερεό, υγρό, αέριο ή πλάσμα. Τα χαρακτηριστικά του υλικού καθορίζουν την ταχύτητα του κύματος. Όσο ισχυρότερη είναι η δύναμη μεταξύ γειτονικών ατόμων, τόσο πιο κοντά θα είναι η κίνηση τους. Από την άλλη πλευρά, όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα των ατόμων, τόσο μεγαλύτερη δύναμη πρέπει να εφαρμοστεί για την ίδια επιτάχυνση. Επειδή ένα κύμα είναι μια συγχρονισμένη κίνηση ενός μεγάλου αριθμού ατόμων, είναι στην πραγματικότητα η πυκνότητα του υλικού ρ και όχι η μάζα των μεμονωμένων ατόμων που διέπει την κίνηση των κυμάτων. Έτσι, η ταχύτητα κύματος πρέπει να είναι ευθέως ανάλογη με την ατομική δύναμη αποκατάστασης μεταξύ των ατόμων ή των μορίων και αντιστρόφως ανάλογη της πυκνότητας. Η πραγματική σχέση είναι:

$$V_i = \sqrt{C_i / \rho} \quad (4)$$

όπου V_i είναι η ταχύτητα για τον συγκεκριμένο τύπο κύματος και το C_i είναι γνωστό ως η ελαστική σταθερά για αυτόν τον τύπο κύματος. Η ελαστική σταθερά είναι ένα μέτρο της αντοχής της σύζευξης μεταξύ των ατόμων για το συγκεκριμένο είδος κίνησης. Οι διαφορετικές σχετικές κινήσεις των ατόμων θα έχουν διαφορετικές τιμές της ελαστικής σταθεράς. Μια άλλη ιδιότητα του υλικού είναι η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση, που ορίζεται από την εξίσωση (5), ως εξής:

$$Z_i = \rho v_i = \sqrt{\rho C_i} \quad (5)$$

Η αντανάκλαση και η μετάδοση των ακουστικών κυμάτων σε μια διεπιφάνεια μεταξύ δύο υλικών εξαρτώνται από τις χαρακτηριστικές ακουστικές αντιστάσεις των δύο υλικών. Αυτή η εξάρτηση δίνεται στην εξίσωση (10). Οι ακουστικές ταχύτητες, οι ακουστικές εμπεδήσεις και οι πυκνότητες για ορισμένα υλικά που παρατηρούνται συχνά στις δοκιμές ακουστικής εκπομπής δίδονται στον Πίνακα 3.

4.2.5 | Τύποι ακουστικών κυμάτων

Η διαδρομή που εντοπίζεται από ένα σωματίδιο υπό την επίδραση ενός ακουστικού κύματος μπορεί γενικά να αναπαρασταθεί από μια έλλειψη με έναν από τους άξονές του κύματος, προσανατολισμένους κατά μήκος της κατεύθυνσης της διαδρομής του. Ο τύπος κύματος σε ογκώδη υλικά καθορίζεται από τη σχέση μεταξύ της μέσης κίνησης των σωματιδίων και της κατεύθυνσης κίνησης του κύματος. Για υλικά με όρια, οι ακριβείς λεπτομέρειες της κίνησης των κυμάτων και των σωματιδίων θα προσδιορίζονται από τις ιδιότητες των υλικών, τη φυσική γεωμετρία του δείγματος και τη συχνότητά του.

Τα κύματα που μετακινούνται μέσω ενός εκτεταμένου μέσου (ένα των οποίων οι διαστάσεις είναι πολύ μεγαλύτερες από το ακουστικό μήκος κύματος) ονομάζονται χύδην κύματα. Οι δύο τύποι καθαρών κύριων κυμάτων είναι τα διαμήκη (συμπιεσμένα) και κύματα διάτμησης (εγκάρσια). Και στα δύο αυτά κύματα, ο δευτερεύων άξονας των ελλειπτικών ατομικών μονοπατιών καταρρέει προς το μηδέν, με αποτέλεσμα μια κατά προσέγγιση γραμμική ταλαντωτική κίνηση. Για τα διαμήκη κύματα, η μέση κίνηση των ατομικών διαδρομών σε μια περιοχή του υλικού είναι παράλληλη προς την κατεύθυνση της διάδοσης των κυμάτων, τα κύματα διάτμησης έχουν τον μέσο όρο της κίνησης αυτής κάθετο προς την κατεύθυνση της διάδοσης. (Η κίνηση των ατόμων γύρω από τη θέση ισορροπίας τους είναι πολύ περίπλοκη με συστατικά πολύ υψηλότερης συχνότητας από τα ακουστικά κύματα.)

Υλικά	V_l	V_s	V_r	ρ	Z_l	Z_s	Z_r
Μονάδες μέτρησης	mm/ μ sec	mm/ μ sec	mm/ μ sec	mg/mm ³	mg/mm ² μ s ec	mg/mm ² μ se c	mg/mm ² μ se c
Αλουμίνιο	6.42	3.04	2.87	2.70	17.30	8.20	7.70
Ορείχαλκος	4.70	2.11	1.99	8.60	40.60	18.30	17.10
Ατσάλι	5.94	3.25	3.03	7.80	46.50	25.40	23.60
Νάιλον	2.62	1.07	1.01	1.11	2.86	1.18	1.12
Πλεξιγκλάς	2.68	1.10	1.04	1.18	3.16	1.30	1.23
Νερό	1.50	-	-	1.00	1.50	-	-
Αέρας	0.33	-	-	0.00123	0.0004	-	-

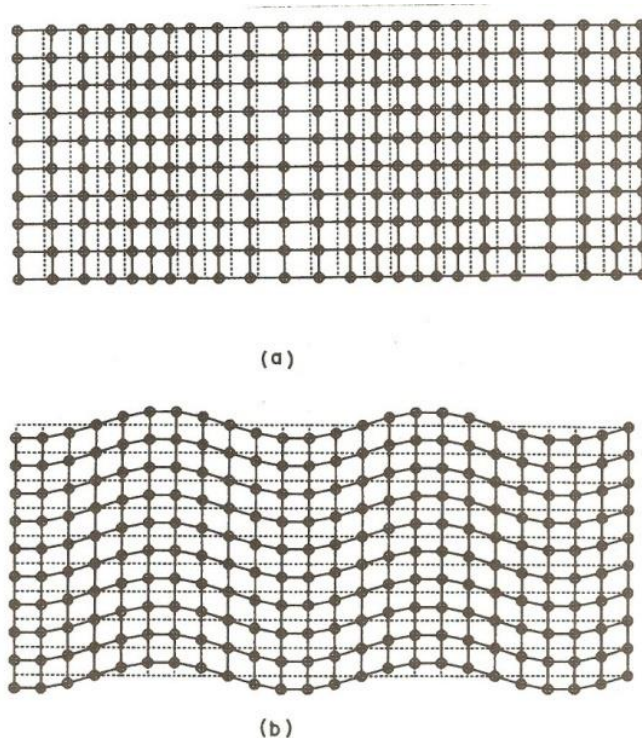
Πίνακας 4. Ακουστικές ταχύτητες και αντίσταση για διαμήκη, κύματα διάτμησης και Raleigh κύματα για διάφορα υλικά

Τα ακουστικά κύματα είναι μέσοι όροι πάνω σε ένα πολύ μεγάλο αριθμό ατόμων στο πλέγμα. Η μέση ακουστική κίνηση θα εκλείψει γύρω από τη θέση πλέγματος αλλά δεν υπάρχει απαίτηση οι άξονες της έλλειψης να αντιστοιχούν σε κατευθύνσεις συμμετρίας στο πλέγμα). Η κίνηση των σωματιδίων σε διαμήκη και κύματα διάτμησης απεικονίζονται στα Σχήματα 3(a) και 3(b). Δεδομένου ότι οι σχετικές κινήσεις των σωματιδίων σε αυτά τα δύο κύματα είναι διαφορετικές, οι ελαστικές σταθερές και οι ταχύτητες κύματος, ως εκ τούτου, διαφέρουν επίσης. Γενικά, η ταχύτητα διάτμησης είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από το ήμισυ της διαμήκου ταχύτητας. Τα κύματα συχνά έχουν τόσο διατμητική όσο και διαμήκη συνιστώσα με κάθε στοιχείο να κινείται με δική του ταχύτητα. Σε ένα μη εξασθενητικό μέσο που δεν διασκορπίζεται, ένα μεταβατικό κύμα δείγματος σε κάποια απόσταση από το σημείο προέλευσης του μπορεί να φαίνεται να είναι δύο ξεχωριστά κύματα, ένα διαμήκες και ένα διάτμησης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.

Η ανισοτροπία των δυνάμεων σύζευξης μεταξύ των ατόμων στην επιφάνεια ενός οριοθετημένου στερεού θα παράγει επιπρόσθετους τύπους κυμάτων. Ένα επιφανειακό κύμα έχει το μέγιστο εύρος του στην επιφάνεια του στερεού. Το πλάτος του μειώνεται με την απόσταση από την επιφάνεια. Το επίπεδο της έλλειψης κίνησης των σωματιδίων μπορεί να είναι είτε παράλληλο (κύματα Love) είτε κάθετα (κύματα Rayleigh) στην επιφάνεια.

Ωστόσο, επειδή οι περισσότεροι αισθητήρες ακουστικών εκπομπών εντοπίζουν κίνηση κάθετα στην επιφάνεια, παρατηρείται σπάνια το παράλληλο στοιχείο. Η ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh είναι ελαφρώς χαμηλότερη από την ταχύτητα διάτμησης. Εάν το στερεό οριοθετείται από δύο επιφάνειες έτσι ώστε να είναι μια πλάκα και το πάχος της πλάκας είναι της τάξης μερικών ή

λιγότερων ακουστικών κυμάτων, μπορούν να εμφανιστούν κύματα πλάκας (Κύματα Lamb). Ένα κύμα πλάκας είναι ουσιαστικά δύο επιφανειακά κύματα συγχρονισμένα είτε συμμετρικά είτε αντισυμμετρικά. Οι κινήσεις των σωματιδίων στα κύματα Rayleigh και τα κύματα πλάκας απεικονίζονται στο Σχήμα 5.

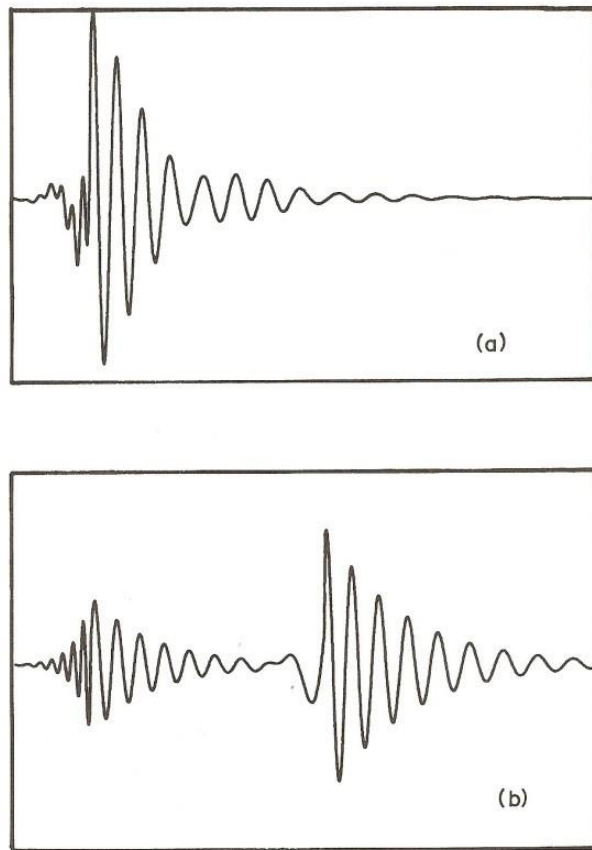


Σχήμα 3. Μετατόπιση σωματιδίων για τα μαζικά ακουστικά κύματα, (a) κύμα συμπίεσης, (b) κύμα διάτμησης

Τα κύματα όγκου, τα επιφανειακά κύματα και τα κύματα πλακών είναι οι σημαντικότεροι τύποι κυμάτων που παρατηρούνται στον τομέα της ακουστικής εκπομπής. Ωστόσο, αυτά δεν είναι τα μόνα είδη κυμάτων που βρίσκονται σε στερεά. Γενικά, τα οριακά στερεά με μέτρια συμμετρική γεωμετρία μπορούν να υποστηρίξουν μοναδικούς τύπους κυμάτων.

4.2.6 | Διασπορά και ταχύτητα ομάδας

Η ταχύτητα που ορίζεται στην εξίσωση (4) είναι η ταχύτητα φάσης. Για απεριόριστα μέσα και επιφανειακά κύματα σε μία μόνο επιφάνεια, αυτή η ταχύτητα κύματος είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα. Αντίθετα, όλα τα κύματα που ταξιδεύουν σε οριακά μέσα (όπου οι φυσικές διαστάσεις είναι μέσα σε μια τάξη μεγέθους του ακουστικού μήκους κύματος) είναι διασκορπιστικές, δηλαδή η ταχύτητα φάσης είναι συνάρτηση της συχνότητας.



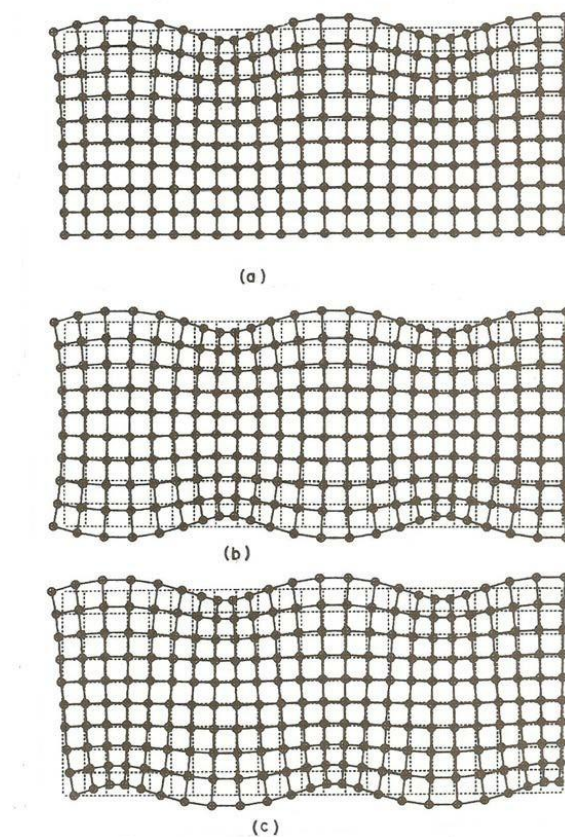
Σχήμα 4. Κυματομορφή με συμπίεση και κύμα διάτμησης (a) στην αρχή, (b) σε κάποια απόσταση από την προέλευση

Το Σχήμα 6 απεικονίζει αυτή την αρχή, δείχνοντας τις εξάρσεις συχνοτήτων των ταχυτήτων για συμμετρικά και αντίθετα συμμετρικά κύματα πλάκας. Η διασπορά θα είχε μικρή επίδραση στα συνεχή κύματα. Ωστόσο, οι ακουστικές εκπομπές είναι πακέτα κυμάτων που μπορούν να θεωρηθούν ως υπέρθεση συνεχών κυμάτων, όπως φαίνεται στην εξίσωση (3). Εάν κάθε ακολουθία κυμάτων (wave train), που συνθέτει το πακέτο, ταξιδεύει σε διαφορετική ταχύτητα, το πακέτο κύματος θα αλλάξει σχήμα καθώς ταξιδεύει μέσα από το μέσο. Ως αποτέλεσμα, η ίδια ακουστική εκπομπή μπορεί να φαίνεται διαφορετική όταν ανιχνεύεται από τον ίδιο αισθητήρα σε διαφορετικές θέσεις. Η ενέργεια σε ένα κύμα πακέτων δεν κινείται με την ταχύτητα φάσης, αλλά με την ταχύτητα της ομάδας. Η ταχύτητα φάσης μπορεί να οριστεί με την επανεγγραφή της εξίσωσης (4) ως:

$$V_p = \omega/k \quad (6)$$

ενώ η ομαδική ταχύτητα ορίζεται ως:

$$V_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (7)$$



Σχήμα 5. Οι μετατοπίσεις σωματιδίων για ακουστικά κύματα

Στο Σχήμα 5 έχουμε μετατοπίσεις σωματιδίων για ακουστικά κύματα: (a) Rayleigh Wave, (b) Κύμα πλάκας, πρώτος συμμετρικός τρόπος λειτουργίας (c) Κύμα πλάκας, πρώτος αντισυμμετρικός τρόπος λειτουργίας.

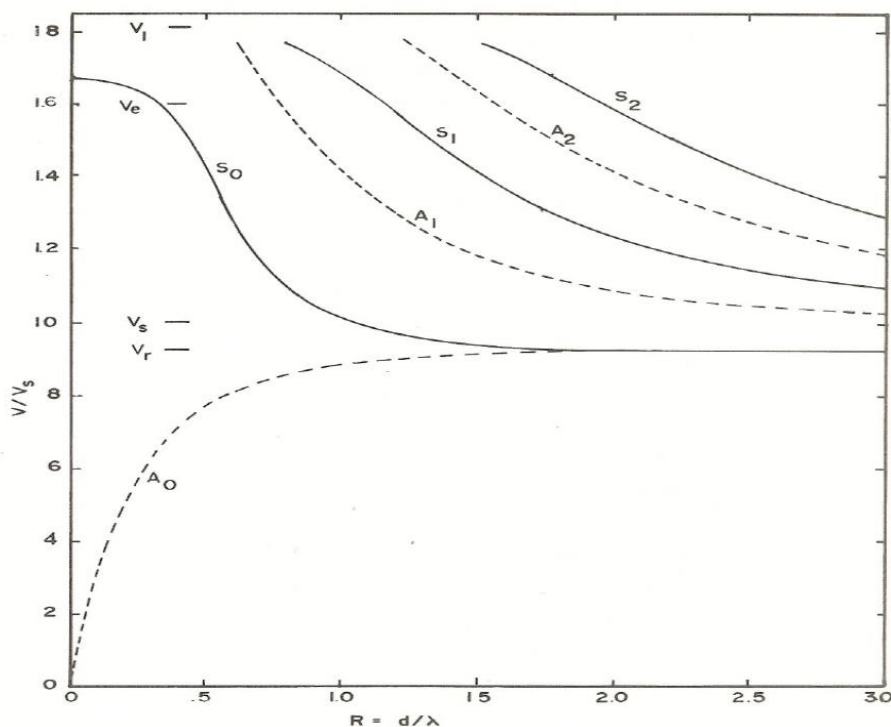
Σε απουσία διασποράς, αυτές είναι στην ίδια ταχύτητα, αλλά στα περισσότερα οριοθετημένα στερεά η ταχύτητα ομάδας θα είναι μικρότερη από την ταχύτητα φάσης. Μια ταχύτητα εξαρτώμενη από τη συχνότητα μπορεί να έχει πραγματικές επιπτώσεις στην ακουστική εκπομπή όταν κάποιος προσπαθεί να εντοπίσει την πηγή μετρώντας τις διαφορές των χρόνων άφιξης σε δύο ή περισσότερους αισθητήρες.

4.2.7|Απόσβεση

Ένα πακέτο κύματος παράγεται με μια καλά καθορισμένη ενέργεια. Καθώς το πακέτο μεταδίδεται μακριά από την πηγή του, το ενεργειακό περιεχόμενο θα παραμείνει σταθερό αν δεν υπάρχουν μηχανισμοί διασποράς.

Ωστόσο, εάν το μέτωπο κύματος του πακέτου επεκτείνεται, η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας στο μέτωπο κύματος πρέπει να μειωθεί για να διατηρηθεί η συνολική ενέργεια στο μέτωπο κύματος. Ο ρυθμός αυτής της μείωσης θα εξαρτηθεί από τη γεωμετρία του μέσου. Σε τρεις διαστάσεις, η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας θα μειωθεί ως το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή, ενώ σε

δύο διαστάσεις η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας θα μειωθεί γραμμικά με αυτή την απόσταση. Εάν το πακέτο περιορίζεται σε μία διάσταση, όπως και στην διάδοση κάτω από μια ράβδο, η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας θα είναι ανεξάρτητη από την απόσταση από την πηγή. Κανονικά, στο πλαίσιο των ακουστικών κυμάτων, κάποιος αντιλαμβάνεται ένα επίπεδο κύμα που ταξιδεύει μόνο σε μία διάσταση. Επομένως αυτό το γεωμετρικό αποτέλεσμα στην ενέργεια των πακέτων των κυμάτων αγνοείται.



Σχήμα 6. Ταχύτητες φάσης για διαφορετικούς τρόπους κυματομορφών πλάκας

Στο Σχήμα 6 έχουμε ταχύτητες φάσης για διαφορετικούς τρόπους κυματομορφών πλάκας σχεδιασμένες ως προς την αναλογία πάχους πλάκας προς ακουστικό μήκος κύματος. Σχεδιάστηκε για χάλυβα με αναλογία Poisson 0.28. Εμφανίζονται οι ταχύτητες των διαμήκη, επιμήκη, διατμητικών και Raleigh κυμάτων.

Ωστόσο, σε δοκιμή ακουστικών εκπομπών, όπου ούτε η θέση της πηγής ούτε η γεωμετρία του δείγματος βρίσκονται υπό τον έλεγχο του ερευνητή, αυτή η γεωμετρική επίδραση πρέπει να εξετάζεται σε κάθε προσπάθεια μέτρησης της ενέργειας του παραγόμενου κύματος πακέτου. Η εξασθένηση ενός επίπεδου κύματος προέρχεται από τους μηχανισμούς διαλογής ή τη διασπορά καθώς το κύμα διαδίδεται. Σε ένα ομοιογενές μέσο, αυτές οι απώλειες συμβαίνουν συνήθως ως ένα σταθερό ποσοστό της ενέργειας των πακέτων κυμάτων ανά μονάδα μήκους διαδρομής.

Μαθηματικά, πρόκειται για μια εκθετική μείωση του εύρους κύματος με την απόσταση που μπορεί να εκφραστεί ως:

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \text{ ή } A = A_0 e^{-\beta t} \quad (8)$$

όπου α είναι σταθερά εξασθένησης ανά μονάδα μήκους και β είναι σταθερά εξασθένησης ανά μονάδα χρόνου.

Οι δύο σταθερές σχετίζονται με την ακουστική ταχύτητα όπως φαίνεται από:

$$\beta = \alpha V \quad (9)$$

Οι περισσότεροι από τους πολλούς τύπους μηχανισμών ακουστικής εξασθένησης έχουν κάποια μορφή εξάρτησης από τη συχνότητα. Ευτυχώς, στην περιοχή συχνοτήτων συνηθισμένης ακουστικής εκπομπής από 50kHz έως 1.0MHz, τόσο η εξάρτηση συχνοτήτων όσο και το μέγεθος πολλών από αυτούς τους μηχανισμούς εξασθένησης είναι μικροί σε μεταλλικά δομικά υλικά. Ωστόσο, στα σύνθετα υλικά, τα γεωλογικά υλικά και το σκυρόδεμα, η εξασθένηση μπορεί να είναι ένας σοβαρά περιοριστικός παράγοντας στις δοκιμές ακουστικών εκπομπών, περιορίζοντας συχνά το εύρος συχνοτήτων που μπορούν να χρησιμοποιηθεί στα 100KHz και κάτω.

4.2.8 | Διεπαφές, Ανταπόκριση, Μετάδοση και Μετατροπή Λειτουργίας

Εάν ένα επίπεδο κύμα χτυπά μια επιφάνεια μεταξύ δύο υλικών με διαφορετικές ακουστικές αντιστάσεις, μέρος του κύματος θα αντανακλάται και θα μεταδίδεται μερικώς. Οι εντάσεις των ανακλώμενων και μεταδιδόμενων συνιστωσών δίδονται από:

$$A_t = 4Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)^2$$

$$A_r = [(Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2)]^2 \quad (10)$$

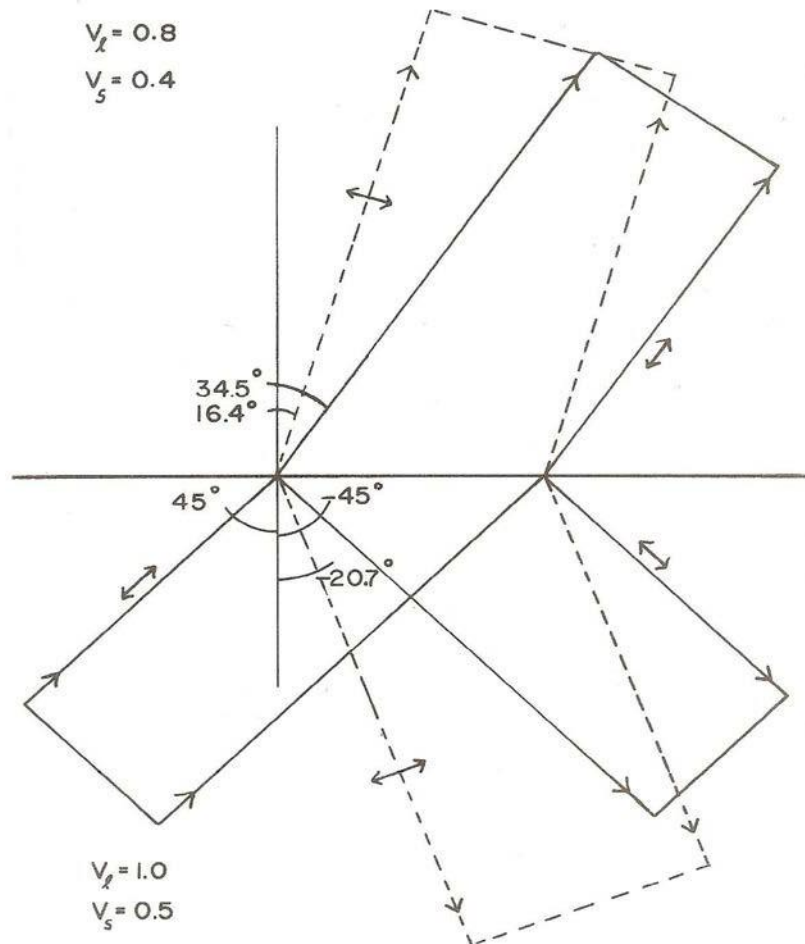
όπου το Z_i είναι η ακουστική σύνθετη αντίσταση των υλικών. Αυτές οι εξισώσεις είναι συμμετρικές, δηλαδή δεν έχει σημασία σε ποιο μέσο το κύμα κινείται όταν χτυπά τη διεπαφή. Οι διαφορές στις ακουστικές εμπέδησης μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες διαφορές στις ακουστικές εντάσεις που μεταδίδονται μέσω των διεπαφών. Για παράδειγμα, η μεταφερόμενη ένταση διαμήκων κυμάτων είναι 78% για χάλυβα – αλουμίνιο, 12% για χάλυβα – νερό και 0,004% για τη διεπαφή χάλυβα – αέρα.

Όταν ένα επίπεδο κύμα χτυπά τη διεπαφή, οι γωνίες των ανακλώμενων και μεταδιδόμενων κυμάτων διέπονται από το νόμο του Snell όπου ισχύει:

$$\sin \theta_1 / V_1 = \sin \theta_2 / V_2 \quad (11)$$

όπου θ_1 είναι η γωνία πρόσπτωσης, θ_2 είναι η γωνία ανάκλασης ή διάθλασης και τα V_i είναι οι ταχύτητες στα υλικά. Στην εξίσωση (11), μια μεταδιδόμενη ταχύτητα είναι θετική και μία ανακλώμενη, αρνητική. Η κίνηση των σωματιδίων οπουδήποτε σε ένα κύμα μπροστά από ένα επίπεδο κύμα είναι η ίδια. Θέλει να παραμείνει η ίδια ακόμη και όταν το κύμα περνάει από μια διεπαφή. Ωστόσο, σε μια διεπαφή, η κατεύθυνση της διάδοσης θα αλλάξει παρόλο που η κίνηση των σωματιδίων δεν γίνεται. Για ένα κύμα κάθετο προς την επιφάνεια ($\theta_1 = 0^\circ$), αυτό οδηγεί σε μία

αλλαγή φάσης των 180° στη σχετική κίνηση του σωματιδίου προς την κατεύθυνση του κύματος χωρίς να αλλάξει ο χαρακτήρας του κύματος. Για τις μη κάθετες γωνίες πρόσπτωσης, τα ανακλώμενα και μεταδιδόμενα κύματα θα έχουν τόσο διαμήκη όσο και διατμητική συνιστώσα (εκτός αν η κίνηση των σωματιδίων είναι παράλληλη με τη διεπαφή) εξαιτίας της αλλαγής της γωνίας μεταξύ της κίνησης των σωματιδίων και της κατεύθυνσης διάδοσης. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7. Αντικατοπτρίζοντα και μεταδιδόμενα κύματα σε μια διεπαφή

Στο Σχήμα 7 έχουμε αντικατοπτρίζοντα και μεταδιδόμενα κύματα σε μια διεπαφή. Το κύμα προσπίπτουσας είναι ένα διαμήκες κύμα με γωνία πρόσπτωσης 45° . Τα διπλά βέλη δείχνουν την κατεύθυνση της κίνησης σωματιδίων που σχετίζονται με κάθε κύμα.

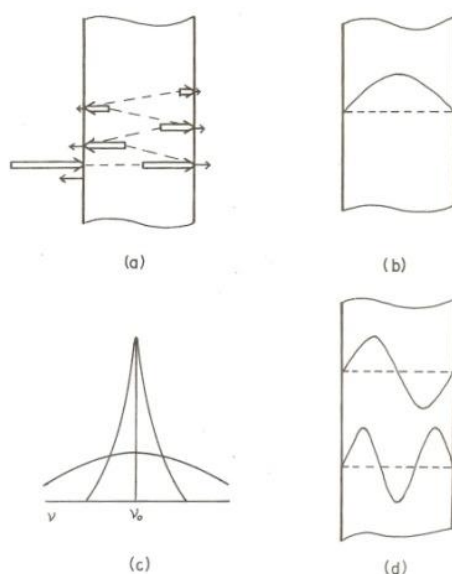
Η διαδικασία παραγωγής και των δύο τρόπων κυμάτων όγκου κατά την αντανάκλαση ή τη διάθλαση είναι γνωστή ως μετατροπή του τρόπου. Στην ακουστική εκπομπή, όπου δεν υπάρχει κανένας έλεγχος της κυματοδιαδρομής, σχεδόν αναπόφευκτα το κύμα που φθάνει στον αισθητήρα

αποτελείται τόσο από διαμήκη όσο και από διατμητικά στοιχεία, ανεξάρτητα από την αρχική πόλωση του. Στις περισσότερες περιπτώσεις, υπάρχουν και επιφανειακά κύματα. Δεδομένου ότι η μετατροπή του τρόπου πραγματοποιείται σχεδόν σε κάθε ανάκλαση, είναι μια σχεδόν συνεχής διαδικασία καθώς το κύμα διαδίδεται σε ένα οριοθετημένο περιβάλλον.

Λόγω αυτού του συνεχή μετασχηματισμού μεταξύ των τρόπων που ταξιδεύουν σε διαφορετικές ταχύτητες κύματος, η μεταβατική μορφή κύματος θα επιμηκύνεται στο χρόνο καθώς ταξιδεύει, αντί να διαιρείται σε χωριστά διαμήκη και διατμημένα μέρη όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.

4.2.9 | Απήχηση

Το φαινόμενο του συντονισμού συμβαίνει με τα ανακλώμενα κύματα και τις κανονικές γεωμετρίες. Υποθέτουμε ότι τοποθετούμε μια πλάκα από ένα υλικό σε ένα άλλο υλικό, όπως μια χαλύβδινη πλάκα βυθισμένη στο νερό. Όταν ένα ακουστικό κύμα κατευθύνεται σε αυτό, θα μεταδίδονται και ανακλώνται κύματα σε κάθε διεπαφή. Το Σχήμα 8(a) δείχνει πώς τα κύματα θα αναπηδήσουν εμπρός και πίσω στην πλάκα. Ο αριθμός των ανακλάσεων θα εξαρτηθεί τόσο από τις ακουστικές σύνθετες αντιστάσεις του χάλυβα όσο και από το νερό και από την εξασθένηση του χάλυβα. Εάν η πλάκα είναι ένα μισού πάχους μήκος κύματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8(b), κάθε ανακλώμενο κύμα θα βρίσκεται σε φάση και τα στελέχη θα προστίθενται αλγεβρικά.



Σχήμα 8. Αντικατοπτρίζοντα και μεταδίδοντα κύματα μέσα σε ένα πιάτο βυθισμένο στο νερό

Στο Σχήμα 8 έχουμε αντικατοπτρίζοντα και μεταδίδοντα κύματα μέσα σε ένα πιάτο βυθισμένο στο νερό. (a) Οι διαδοχικές αντανάκλασεις έχουν εκτοπιστεί για λόγους σαφήνειας. (b) Στέλεχος σε πλάκα πάχους μισού μήκους κύματος. (c) Το πλάτος ως συνάρτηση της συχνότητας στην πλάκα για υλικά υψηλού και χαμηλού Q . (d) Στέλεχος σε πλάκα ενός μήκους κύματος και πάχους ενός και

μισού μήκους κύματος.

Αν υπάρχουν πολλές αντανακλάσεις, η μέγιστη τάση μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλό επίπεδο. Αν υπάρχουν μόνο λίγες ανακλάσεις, το πλάτος της κορυφής θα είναι πολύ μικρότερο και η κορυφή θα εξαπλωθεί σε ένα μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Η συχνότητα αυτού του κύματος δεν χρειάζεται να είναι ακριβώς αυτή του μισού μήκους κύματος για να πάρει κάποια εκ νέου ενίσχυση. Ωστόσο, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ανακλάσεων, τόσο μικρότερο θα είναι το επιτρεπόμενο εύρος συχνοτήτων στη μέγιστη τάση και όσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη αυτή ένταση. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 8(c). Η αιχμηρή απότομη κορυφή πλάτους λέγεται ότι έχει υψηλό Q , όπου Q είναι ο λόγος ανά κύκλο ενέργειας που αποθηκεύεται σε ενέργεια που διαχέεται. Αυτή η αύξηση του επιπέδου τάσης ή καταπόνησης σε ένα υλικό με πάχος μισού κύματος είναι γνωστή ως συντονισμός όπου u_0 είναι η συχνότητα συντονισμού. Στο Σχήμα 8(b), βλέπουμε ότι σε συντονισμό, η μέση τάση σε ολόκληρη την πλάκα είναι η μέγιστη.

Οι συντονισμοί μπορούν να εμφανιστούν όπου μια κανονική γεωμετρία επιτρέπει στα ακουστικά κύματα να αντανakλούν με τέτοιο τρόπο ώστε τα στελέχη από διάφορες αντανακλάσεις του κύματος να υπερτίθενται. Στους πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους, οι πολύ υψηλοί συντονισμοί Q επιτρέπουν την ακριβή παραγωγή κυμάτων μοναδικής συχνότητας.

4.3 | Ανίχνευση ακουστικής εκπομπής

4.3.1 | Αισθητήρες

Ένας αισθητήρας είναι μια συσκευή που παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα όταν διεγείρεται από ένα ακουστικό κύμα. Οι αισθητήρες ακουστικής εκπομπής (ΑΕ) μπορούν να βασίζονται σε διάφορες φυσικές αρχές. Τα σήματα μπορούν να δημιουργηθούν από ηλεκτρομαγνητικές συσκευές, όπως φωνογράφους, χωρητικά μικρόφωνα, συσκευές μαγνητοσυστολής, πιεζοηλεκτρικές συσκευές αλλά και με τη χρήση συμβολόμετρων λέιζερ για την ανίχνευση της μετατόπισης του δείγματος. Η ακριβής σχέση μεταξύ των χαρακτηριστικών του κυματισμού και εκείνων του σήματος θα εξαρτηθεί τόσο από τον αισθητήρα όσο και από το κύμα. Ένας ιδανικός αισθητήρας θα παράγει μια καμπύλη τάσης – χρόνου ίδια με την καμπύλη πλάτους – χρόνου του κύματος στο σημείο όπου βρίσκεται ο αισθητήρας. Παρόλο που κανένας αισθητήρας δεν προσεγγίζει αυτό το ιδανικό, για ορισμένους τύπους ακουστικών κυμάτων, χρησιμοποιείται η συμβολομετρία με λέιζερ (laser interferometry). Πολλοί διαθέσιμοι αισθητήρες λειτουργούν αρκετά καλά για συγκεκριμένους τύπους κυμάτων σε περιορισμένο εύρος παραμέτρων. Λόγω της ευρείας κλίμακας συχνοτήτων και των διαφορετικών ακουστικών τρόπων που περιέχονται στα περισσότερα ακουστικά σήματα εκπομπής, σχεδόν οποιοσδήποτε αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει κάποια ΑΕ. Ωστόσο, ένας βέλτιστος αισθητήρας θα

βελτιώνει πάντα τα δεδομένα και είναι συχνά η διαφορά μεταξύ επιτυχούς ή ανεπιτυχούς δοκιμής ή πειράματος, ειδικά όταν πρόκειται για εκπομπές χαμηλού πλάτους. Για χρήση σε ΜΚΕ, οι περισσότεροι αισθητήρες ΑΕ είναι πιεζοηλεκτρικοί.

4.3.2 | Πιεζοηλεκτρικότητα

Η πιεζοηλεκτρικότητα είναι το όνομα που δίνεται στη σύζευξη μεταξύ της τάσης και της ηλεκτρικής πόλωσης που συμβαίνει σε πολλούς κρυστάλλους. Αυτό το γεωμετρικό αποτέλεσμα προκύπτει μόνο σε υλικά που στερούνται ενός κέντρου κρυσταλλικής συμμετρίας. Αυτό δεν αποτελεί αυστηρό περιορισμό καθώς 21 εκ των 32 τάξεων κρυσταλλικής δομής στερούνται ενός κέντρου συμμετρίας. Σε αυτούς τους κρυστάλλους, ένα στέλεχος θα μεταφέρει τα κέντρα θετικής και αρνητικής κατανομής φορτίου έτσι ώστε να μην συμπίπτουν πλέον. Αυτή η μετατόπιση παράγει μια ηλεκτρική διπολική ροπή σε όλο τον κρύσταλλο. Η πόλωση ενός κρυστάλλου ορίζεται ως η στιγμή του διπόλου ανά μονάδα όγκου. Όταν υπάρχει πόλωση σε ένα μη αγωγίμο κρύσταλλο, ηλεκτρικά φορτία θα εμφανιστούν σε ορισμένες επιφάνειες. Η τοποθέτηση ηλεκτροδίων σε αυτές τις επιφάνειες επιτρέπει τη μέτρηση του φορτίου, το οποίο είναι άμεσα ανάλογο με την καταπόνηση. Το αποτέλεσμα είναι συμμετρικό, επειδή η εφαρμογή των φορτίων στα ηλεκτρόδια αλλάζει την τάση. Δεδομένου ότι τα πεδία τάσης και καταπόνησης σε ένα υλικό σχετίζονται άμεσα, το πιεζοηλεκτρικό αποτέλεσμα μπορεί να οριστεί εξίσου ως η σύζευξη μεταξύ της τάσης και της πόλωσης σε ένα κρύσταλλο. Η ακριβής τάση ή καταπόνηση που μετράται (ή παράγεται) μπορεί να επιλεγεί με βάση την προσεκτική επιλογή των κρυσταλλικών υλικών του αισθητήρα. Σε οποιαδήποτε φυσική μέτρηση, μια γραμμική παραγωγή είναι ιδιαίτερα επιθυμητή. Δηλαδή, το σήμα εξόδου πρέπει να διαφέρει από το σήμα εισόδου μόνο με την ίδια πολλαπλασιαστική σταθερά σε ένα μεγάλο φάσμα εύρους. Το πιεζοηλεκτρικό μπορεί να εκπληρώσει αυτή την απαίτηση σε πάνω από εννέα τάξεις μεγέθους.

Αρχικά, όλες οι πιεζοηλεκτρικές συσκευές κατασκευάστηκαν από μονοκρυστάλλους. Τα πιο χρήσιμα από αυτά ήταν ο χαλαζίας, το άλας της Rochelle και δισόξινο φωσφορικό αμμώνιο. Αργότερα, μια κατηγορία υλικών γνωστών ως σιδηροηλεκτρικά (πιεζοηλεκτρικά υλικά τα οποία έχουν μια πόλωση ακόμη και απουσία ενός στελέχους) μελέτηθηκαν και αξιοποιήθηκαν. Κεραμικά κατασκευασμένα από σιδηροηλεκτρικό υλικό θα μπορούσαν να έχουν μια ομοιόμορφη διεύθυνση πόλωσης παρόμοια με εκείνη που βρίσκεται σε ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο. Έγινε δυνατή η παραγωγή σιδηροηλεκτρικών κεραμικών με πολλές ιδιότητες ανώτερες από πιεζοηλεκτρικούς μονούς κρυστάλλους, με αποτέλεσμα σχεδόν σήμερα όλοι οι αισθητήρες ακουστικών εκπομπών να κατασκευάζονται από μια ποικιλία σιδηροηλεκτρικών κεραμικών.

4.3.3 | Εφέ μεγέθους

Ένα απaráμιλλο κομμάτι πιεζοηλεκτρικού υλικού με πολλά διαφορετικά σύνολα ηλεκτροδίων εντελώς ενσωματωμένα σε ένα δείγμα θα πλησιάσει πολύ κοντά στον ιδανικό αισθητήρα. Ωστόσο, όταν ανεβάζουμε το πιεζοηλεκτρικό σε ένα διαχειρίσιμο μέγεθος, τοποθετώντας ένα σύνολο ηλεκτροδίων στην εξωτερική επιφάνεια του δείγματος, απομακρυνόμαστε γρήγορα από αυτή την ιδανική κατάσταση. Το φυσικό μέγεθος του αισθητήρα έχει ως αποτέλεσμα δύο κύριες επιδράσεις, τον συντονισμό και τον καταμερισμό των καταστάσεων. Και τα δύο μπορούν να γίνουν σημαντικά όταν οι φυσικές διαστάσεις του αισθητήρα πλησιάζουν ή υπερβαίνουν το μήκος κύματος του ακουστικού κύματος. Δεδομένου ότι η έξοδος ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου είναι ανάλογη προς την τάση (και αναλογική προς τη μέση τάση για ένα κρύσταλλο πεπερασμένων διαστάσεων), η μέγιστη έξοδος ενός αισθητήρα συμβαίνει στις συχνότητες συντονισμού του. Η θεμελιώδης συχνότητα συντονισμού μίας πλάκας συμβαίνει όταν το πάχος της πλάκας είναι ένα μήκος μισού κύματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 8 (b). Το ανακλώμενο κύμα είναι σε φάση με το προσπίπτον κύμα στην επιφάνεια και τα στελέχη προσθέτουν. Εάν η συχνότητα αυξάνεται μέχρις ότου υπάρχει ένα πλήρες μήκος κύματος στον κρύσταλλο, θα υπάρξει και πάλι επανεξέταση του στελέχους λόγω των ανακλώμενων κυμάτων. Ωστόσο, μπορούμε να δούμε στο Σχήμα 8 (d) ότι ενώ το επίπεδο τάσης μπορεί να είναι πολύ μεγάλο σε αυτή τη συχνότητα $2u_0$, η μέση τάση επί του κρυστάλλου ακυρώνεται ακριβώς έτσι ώστε η έξοδος του αισθητήρα να είναι μηδέν.

Αυξάνοντας τη συχνότητα σε $3u_0$, βλέπουμε 1.5 φορές τα μήκη κύματος στον κρύσταλλο και προκύπτει πάλι ενίσχυση. Η μέση τάση πάνω από τα δύο τρίτα του κρυστάλλου ακυρώνεται τώρα, αλλά η μέση τάση στο τελευταίο τρίτο φτάνει στο μέγιστο. Το αποτέλεσμα είναι ότι ένας πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας θα έχει μέγιστη απόδοση όταν το πάχος, d , είναι:

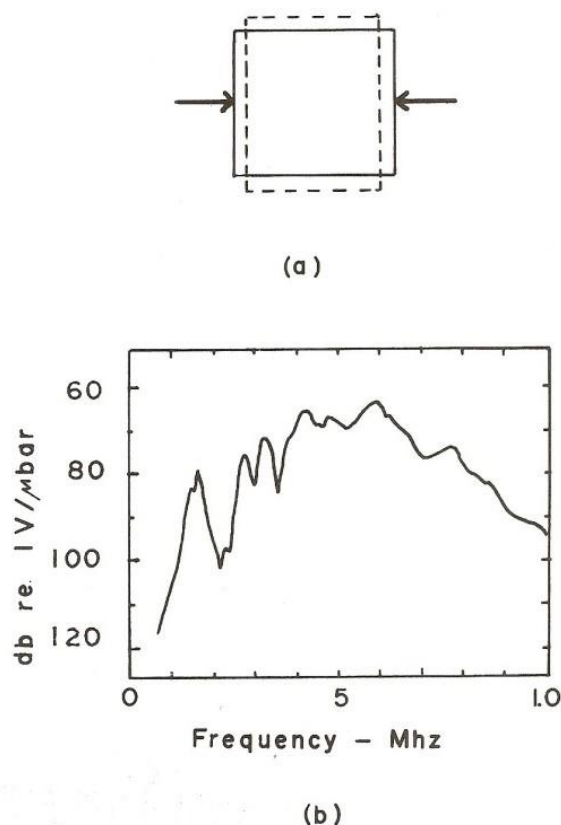
$$d = (2n - 1) \lambda / 2 \quad (12)$$

και χωρίς έξοδο όταν:

$$d = n\lambda \quad (13).$$

Επομένως, ένας αισθητήρας μπορεί να λειτουργήσει είτε στη θεμελιώδη συχνότητα του nu_0 είτε στις αρμονικές του συχνότητες, όπου n είναι περιττός. Το Q του μορφοτροπέα εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των ανακλάσεων στον αισθητήρα. Επομένως, το Q είναι ανεξάρτητο από την αρμονική στην οποία λειτουργεί ο αισθητήρας, εφόσον το υλικό του αισθητήρα δεν παρουσιάζει εξασθένηση εξαρτώμενη από τη συχνότητα. Επίσης, ο αισθητήρας θα έχει πάντα έξοδο σε συχνότητες κάτω από τη θεμελιώδη συχνότητα u_0 . Σε συχνότητες μικρότερες από περίπου $3u_0/4$, ο συντονισμός δεν θα έχει καμία επίδραση και η έξοδος θα είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη από τη συχνότητα. Στην πραγματικότητα, ένα υλικό δεν μπορεί να τεντωθεί σε μία διάσταση χωρίς να παράγει στελέχη σε

άλλες κατευθύνσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 9 (a).



Σχήμα 9. Παραμόρφωση υλικού και φασματική απόκριση αισθητήρα AE

Στο Σχήμα 9 έχουμε στο (a) Παραμόρφωση υλικού με πολυαξονική καταπόνηση λόγω μονοαξονικής δύναμης (b) φασματική απόκριση ενός αισθητήρα AE.

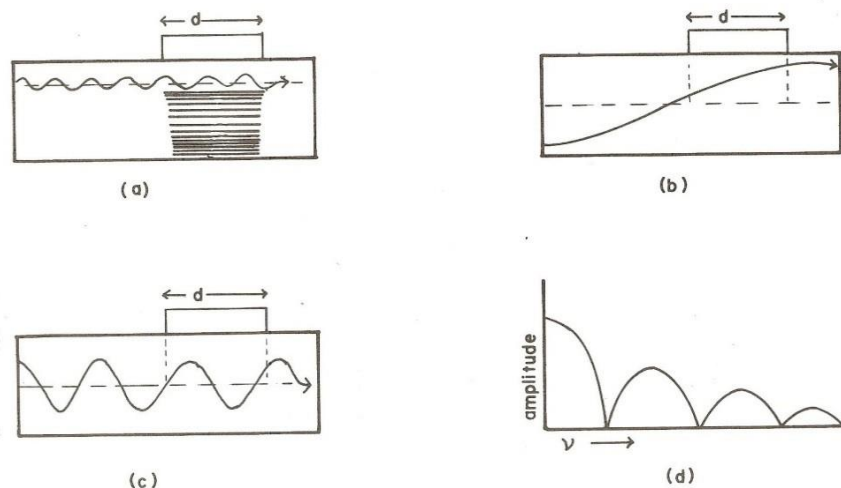
Πολλοί αισθητήρες ακουστικής εκπομπής το χρησιμοποιούν αυτό για να αποκτήσουν μια μέγιστη απόκριση, χρησιμοποιώντας ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο σε σχήμα κατακόρυφου κυλίνδρου. Ένα κύμα με κατακόρυφη μετατόπιση στην επιφάνεια του κυλίνδρου θα διεγείρει τον ακτινικό συντονισμό. Αυτός ο συντονισμός θα δώσει στη συνέχεια ένα μεγάλο σήμα εξόδου. Αυτός ο τύπος αισθητήρα είναι ένας πολύ ευαίσθητος ανιχνευτής ακουστικής εκπομπής. Ωστόσο, δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του φάσματος συχνοτήτων ούτε την πραγματική μορφή κύματος του ακουστικού κύματος, καθώς αυτή η σταυροειδής σύζευξη των λειτουργιών δόνησης μπορεί να δώσει μια παραμορφωμένη αναπαράσταση του κύματος. Η πιεζοηλεκτρικότητα είναι πολύ περίπλοκη.

Ένα μεγάλο μέρος της ιστορίας της ακουστικής αφορά μια αναζήτηση για συγκεκριμένους προσανατολισμούς κρυστάλλου, όπου μόνο ορισμένες εντάσεις θα δημιουργήσουν φόρτιση σε ένα ζεύγος ηλεκτροδίων. Οι σύγχρονοι αισθητήρες ακουστικών εκπομπών, κατασκευασμένοι από πολωμένο σιδηροηλεκτρικό κεραμικό, υποφέρουν επίσης από πολλαπλούς συντονισμούς. Ωστόσο,

επειδή τα κεραμικά έχουν εγγενώς χαμηλή τιμή του Q , ούτε οι κορυφές ούτε οι κοιλάδες είναι ιδιαίτερα έντονες. Έτσι, οι περισσότεροι αισθητήρες έχουν μια ευρεία αλλά πολύ έγχρωμη καμπύλη φασματικής απόκρισης όπως φαίνεται στο Σχήμα 9(b).

Εκτός από τα αποτελέσματα συντονισμού, υπάρχει και μια άλλη σημαντική πτυχή του μέσου όρου της έντασης από έναν αισθητήρα. Το Σχήμα 10(a) δείχνει ένα μπλοκ με έναν αισθητήρα τοποθετημένο πάνω του. Αν ο αισθητήρας είναι ενεργοποιημένος από ένα κύμα συμπίεσης που κινείται κάθετα στην επιφάνεια του, ολόκληρη η όψη του αισθητήρα θα κινηθεί σε φάση. Εξαιρουμένων των συντονισμών, η μέση τάση στον αισθητήρα θα είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα. Στη συνέχεια, σκεφτείτε ένα κύμα Rayleigh που κινείται παράλληλα με την επιφάνεια του αισθητήρα και έχει την κίνηση των σωματιδίων κάθετα στην επιφάνεια του αισθητήρα. Σε αυτή την περίπτωση, η κατανομή της έντασης στον μορφομετατροπέα θα ποικίλει ως συνάρτηση της απόστασης κατά μήκος του κύματος. Το Σχήμα 10(b) δείχνει την παραμόρφωση της έντασης όταν η διάμετρος του αισθητήρα είναι μικρότερη από $\lambda/2$. Εδώ η έξοδος εξακολουθεί να είναι ανάλογη προς το πλάτος του κύματος. Στο Σχήμα 10(c), η διάμετρος του αισθητήρα είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος. Στην περίπτωση αυτή, για κάθε πλήρες μήκος κύματος κάτω από τον αισθητήρα, η καταπόνηση είναι κατά μέσο όρο μηδενική. Μόνο το επιπλέον κλάσμα του μήκους κύματος κάτω από τον αισθητήρα συμβάλλει στην παραγωγή του. Αυτός ο μέσος όρος μειώνει ουσιαστικά την αποτελεσματική περιοχή του αισθητήρα και όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση. Επιπροσθέτως, σε ορισμένες συχνότητες, ανάλογα με το σχήμα του αισθητήρα και την ακουστική ταχύτητα του δείγματος, η ολική καταπόνηση υπολογίζεται κατά μέσο όρο στο μηδέν. Αυτές οι επιδράσεις απεικονίζονται στο Σχήμα 10(d) όπου η απόκριση για αυτόν τον τύπο επιφανειακού κύματος σχεδιάζεται για έναν αισθητήρα με μια επίπεδη απόκριση συχνότητας σε κύματα συμπίεσης κάθετα προς την όψη του.

Η απόκριση υψηλής συχνότητας ενός τέτοιου αισθητήρα θα εξαρτηθεί δραστικά από τη γωνία προσβολής με την οποία το κύμα πλήττει τον αισθητήρα. Αυτό το φαινόμενο μέσου όρου εξαρτάται από το ακουστικό μήκος κύματος στο υλικό. Επομένως, η απόκριση του αισθητήρα όχι μόνο θα ποικίλει ανάλογα με τη συχνότητα και τη γωνία πρόσπτωσης, αλλά επίσης θα ποικίλει όταν χρησιμοποιείται σε διαφορετικά υλικά. Η καλύτερη απάντηση σε αυτό το πρόβλημα του μέσου όρου μήκους κύματος του ήχου πάνω από την επιφάνεια του αισθητήρα, είναι να κάνουμε τον αισθητήρα φυσικά μικρό. Για τον χάλυβα, ένας αισθητήρας διαμέτρου 3mm θα πρέπει να λειτουργεί αρκετά κάτω από τα 500kHz. Ο αναπόφευκτος συμβιβασμός είναι ότι ο μικρότερος αισθητήρας έχει χαμηλότερη χωρητικότητα και συνεπώς μειωμένη αποτελεσματική ευαισθησία.



Σχήμα 10. Αισθητήρες, καταπόνηση και απόκριση

Στο Σχήμα 10 έχουμε (a) Συγκρότημα δειγμάτων με αισθητήρα τοποθετημένο στη μία πλευρά, παρουσιάζεται ένα κύμα συμπίεσης που κινείται κάθετα στην επιφάνεια του αισθητήρα και ένα κύμα Rayleigh που κινείται παράλληλα προς την επιφάνεια (b) Στιγμιαία καταπόνηση στην επιφάνεια του μπλοκ από το κύμα Rayleigh με μήκος κύματος πολύ μεγαλύτερο από τη διάμετρο του αισθητήρα (c) Στέλεχος στην επιφάνεια από κύμα Rayleigh με μήκος κύματος μικρότερο από τη διάμετρο του αισθητήρα (d) Έξοδος αισθητήρα ως συνάρτηση της συχνότητας για κύματα Rayleigh με ίσα πλάτη

4.3.4|Συζευκτές

Υποθέσαμε ότι ο αισθητήρας απλά τοποθετήθηκε στην επιφάνεια του υλικού που περιείχε το ακουστικό κύμα. Όταν δοκιμάζεται αυτό, διαπιστώνεται ότι ο αισθητήρας παράγει ένα πολύ ασθενές σήμα. Εάν τοποθετηθεί ένα λεπτό στρώμα υγρού μεταξύ του αισθητήρα και της επιφάνειας, λαμβάνεται ένα πολύ μεγαλύτερο σήμα. Αυτό το ρευστό προσφέρει τη σύζευξη που εξασφαλίζει καλή επαφή μεταξύ δύο επιφανειών σε μικροσκοπικό επίπεδο. Η χρήση κάποιου τύπου συνδέσμου είναι σχεδόν απαραίτητη για την ανίχνευση ακουστικών σημάτων χαμηλού επιπέδου. Φυσικά, αυτό μπορεί να εξηγηθεί εξετάζοντας το ακουστικό κύμα σαν ένα κύμα πίεσης που μεταδίδεται σε δύο επαφές. Σε μικροσκοπική κλίμακα, οι επιφάνειες του αισθητήρα και του υλικού είναι αρκετά τραχιές και στην πραγματικότητα αγγίζουν μόνο μερικά σημεία όταν έρχονται σε επαφή. Η καταπόνηση είναι η δύναμη ανά μονάδα περιοχής και η πραγματική περιοχή που μεταδίδει μια δύναμη είναι πολύ μικρή. Εάν τα μικροσκοπικά κενά γεμίσουν με ένα ρευστό, η πίεση μεταφέρεται ομοιόμορφα μεταξύ των επιφανειών. Για ένα κύμα διατμήσεως με ένα συστατικό μεταβλητής τάσης παράλληλο στις επιφάνειες, πολύ μικρή ένταση μεταφέρεται μεταξύ των επιφανειών λόγω των ελάχιστων σημείων πραγματικής επαφής. Σε αυτή την περίπτωση, η πλήρωση των κενών με υγρό χαμηλού ιξώδους δεν θα βοηθήσει πολύ, αφού ένα τέτοιο υγρό δεν θα υποστηρίξει τη διάδοση διατμητικής τάσης που

φυσικά εκφράζεται ως πίεση. Ωστόσο, ένα υγρό ή στερεό υψηλού ιξώδους θα βοηθήσει στη μετάδοση παράλληλων τάσεων μεταξύ των επιφανειών.

Αν και οι όροι δεσμός και συζεύκτης έχουν χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά σε πολλές αναφορές ΑΕ, οι έννοιες τους διαφέρουν σημαντικά. Αυστηρά, ένας συζεύκτης είναι οποιοδήποτε υλικό που βοηθάει τη μετάδοση ακουστικών κυμάτων μεταξύ δύο επιφανειών, ενώ ένας δεσμός είναι ένας σύνδεσμος ο οποίος συγκρατεί φυσικά τον αισθητήρα στην επιφάνεια. Για παράδειγμα, το νερό είναι ένας συζεύκτης, αλλά η σκληρυμένη εποξική ρητίνη είναι ένας δεσμός. Πολλά προβλήματα έχουν προκύψει από τη χρήση ενός δεσμού με ανεφάρμοστο τρόπο. Εάν χρησιμοποιείται άκαμπτος δεσμός για τη σύνδεση ενός αισθητήρα σε ένα δείγμα που παραμορφώνεται ελαστικά κατά τη διάρκεια της δοκιμής, το φυσιολογικό αποτέλεσμα είναι ένας σπασμένος δεσμός και μια ανεπαρκής ή απύσχα ευαισθησία στο ακουστικό κύμα. Παρομοίως, σε ένα πείραμα όπου η θερμοκρασία μεταβάλλεται αισθητά, η χρήση ενός άκαμπτου υλικού συγκόλλησης μπορεί να οδηγήσει σε θραυσμένους δεσμούς λόγω της διαφορεικής θερμικής διαστολής μεταξύ του αισθητήρα και του δείγματος. Επομένως, οι παράγοντες σύνδεσης πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά, λαμβάνοντας υπόψη τη συμβατότητα των υλικών υπό τις συνθήκες δοκιμής. Συνήθως, αν ο δεσμός κρατήσει τον αισθητήρα ενεργοποιημένο, θα έχουμε επαρκή σύζευξη. Για ένα κύμα συμπίεσης, οποιοδήποτε υγρό θα λειτουργεί ως συζευκτικός παράγοντας. Ένα υψηλά ιξώδες ρευστό θα μεταφέρει κάποια τάση διατμήσεως κατά μήκος του ορίου που ίσως να αποτελεί ή όχι πλεονέκτημα.

Σχεδόν όλοι οι συζεύκτες έδειξαν αύξηση της ισχύος του σήματος $30 \pm 2dB$ μεγαλύτερη από αυτό χωρίς συζεύκτη. Η διακύμανση ήταν λίγο μεγαλύτερη από την αβεβαιότητα της μέτρησης. Πρακτικά, ένας συζεύκτης μπορεί να είναι ένα λεπτό στρώμα οποιουδήποτε ιξώδους υγρού που διαβρέχει και τις δύο επιφάνειες. Ο αισθητήρας πρέπει να συγκρατείται στην επιφάνεια με κάποια πίεση που παράγεται από μαγνήτες, ελατήρια, ταινία, ταινίες από καουτσούκ κλπ. Το μυστικό είναι να χρησιμοποιηθεί όσο το δυνατόν λεπτότερο στρώμα. Εάν χρησιμοποιείται άκαμπτη σύνδεση, πρέπει να υπάρχει ελάχιστη διαφορική διαστολή μεταξύ των δύο επιφανειών.

Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ένας εύκαμπτος δεσμός. Με τα χρόνια διαπιστώθηκαν εξαιρετικά αποτελέσματα με τη μονωτική σιλικόνη GE Silicone II. Διατίθεται ως καθαρή οικιακή κόλλα η οποία τοποθετείται και μέσα σε περίπου 12 ώρες γίνεται σταθερή όταν αυτή χρησιμοποιείται π.χ. μεταξύ ενός αισθητήρα διαμέτρου μιας ίντσας και μιας μεταλλικής ή πλαστικής επιφάνειας. Σε μία δοκιμή που χρησιμοποιήθηκε αυτή η κόλλα, εφαρμόστηκε μια κάθετη ημιτονοειδής δύναμη περίπου 100G και δεν δημιούργησε αποτυχίες δεσμών. Είναι αρκετά ευέλικτη, επιτρέποντας την απομάκρυνση του αισθητήρα από την επιφάνεια με μια λεπίδα μαχαιριού ή με ένα ξύλινο σκαρπέλο που ολισθαίνει μεταξύ του αισθητήρα και της επιφάνειας. Στον Πίνακα 5, παρουσιάζονται μερικοί συνηθισμένοι συζεύκτες μαζί με το εύρος θερμοκρασίας στο οποίο μπορούν

να χρησιμοποιηθούν.

Συζεύκτης	Κατά προσέγγιση θερμοκρασιακά πεδία
Κόλλα σιλικόνης Dow Corning V-9	~ – 40°C έως 100°C
Γράσο υψηλού κενού	~ – 40°C έως 200°C
Συζεύκτες υπερήχων	Θερμοκρασία δωματίου
Πετρέλαιο/Γράσο	Θερμοκρασία δωματίου
Υγρό Dow Corning 200	– 273°C έως – 70°C και – 30°C έως 200°C
Οδοντικό τσιμέντο (Dental Cement)	~ 0°C έως ~50°C
50% μίγμα Ινδίου – 50% Γαλλίου	~20°C έως 700°C
GE Σιλικόνη II	5°C έως 200°C

Πίνακας 5. Ορισμένοι συνηθισμένοι συζεύκτες ακουστικών εκπομπών και τα κατά προσέγγιση θερμοκρασιακά τους πεδία

4.3.5 | Επιδράσεις θερμοκρασίας

Η εξάρτηση της πιεζοηλεκτρικότητας από τη θερμοκρασία είναι περίπλοκη. Ορισμένα αποτελέσματα μπορούν να οδηγήσουν σε προβλήματα όταν χρησιμοποιείται αισθητήρας σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Πρώτον, τα σιδηροηλεκτρικά υλικά, όπως τα κεραμικά PZT (Lead(Pb) Zirconate Titanate – Μόλυβδος Ζirkονίτης Τιτανάτης), έχουν θερμοκρασία Curie πάνω από την οποία το υλικό μετασχηματίζεται σε μια άλλη, και συνήθως μη σιδηροηλεκτρική, φάση. Η χρήση ενός σιδηροηλεκτρικού αισθητήρα σε θερμοκρασία Curie θα απομακρύνει την πόλωση, καταστρέφοντας τις πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες του αισθητήρα και μπορεί να καταστρέψει και το κεραμικό. Οι σιδηροηλεκτρικοί αισθητήρες συνήθως λειτουργούν καλά μέχρι τις θερμοκρασίες σε περιοχή έως 50°C κάτω της θερμοκρασίας Curie, εάν τα άλλα υλικά στον αισθητήρα μπορούν να αντέξουν αυτή τη θερμοκρασία. Οι θερμοκρασίες Curie των κεραμικών PZT κυμαίνονται μεταξύ 300 και 400°C.

Τα σιδηροηλεκτρικά κεραμικά είναι πολύκρυσταλλικά. Κάθε κρυσταλλίτης μπορεί να περιέχει έναν ή περισσότερους σιδηροηλεκτρικούς τομείς, δηλαδή περιοχές όπου η πηγαία πόλωση είναι προς μία κατεύθυνση. Αυτή η πόλωση υπάρχει μόνο κατά μήκος συγκεκριμένων κατευθύνσεων

στην κρυσταλλική δομή. Όταν το κεραμικό είναι πολωμένο, αυτές οι περιοχές είναι ευθυγραμμισμένες, όσο πιο κοντά το επιτρέπει ο προσανατολισμός του κρυστάλλου, στην κατεύθυνση της πόλωσης. Λόγω του τυχαίου προσανατολισμού των κρυσταλλιτών, ένας ακριβής αριθμός θα έχει αρκετούς δυνατούς προσανατολισμούς που προσεγγίζουν την κατεύθυνση της πόλωσης στο κεραμικό. Μικρές εντάσεις μπορεί να είναι αρκετές για να αναγκάσουν τον τομέα να αλλάξει προσανατολισμό. Μια τέτοια περιστροφή ενός τομέα μπορεί να προκαλέσει μια πολύ μικρή αλλαγή στην πόλωση του αισθητήρα. Ωστόσο, αυτή η αλλαγή είναι η ίδια τάξη μεγέθους με την αλλαγή που προκαλείται από ένα μικρό ακουστικό κύμα. Σε γενικές γραμμές, είναι αδύνατο να γίνει διάκριση ενός ηλεκτρικού σήματος που προκαλείται από έναν αναστροφικό τομέα, από ένα που προκαλείται από ακουστική εκπομπή. Η πίεση που είναι απαραίτητη για την παραγωγή ενός αναστροφικού τομέα μπορεί να προέλθει από την αλλαγή της θερμοκρασίας ενός αισθητήρα. Έτσι, η αλλαγή της θερμοκρασίας ενός κεραμικού αισθητήρα μπορεί να παράγει σήματα που δεν διακρίνονται από την ακουστική εκπομπή, τα οποία προκύπτουν στον αισθητήρα και όχι στο δείγμα.

Εμπειρικά, η αλλαγή θερμοκρασίας που είναι απαραίτητη για την παραγωγή αξιόλογων ποσοτήτων αυτών των σημάτων αναστροφής τομέα είναι περίπου 100°C σε PZT. Αυτό το φαινόμενο δεν εμποδίζει τη χρήση των κεραμικών αισθητήρων σε διαφορετικές θερμοκρασίες, αλλά πριν ληφθούν τα δεδομένα πρέπει να επιτευχθεί θερμική ισορροπία. Εάν κάποιος επιθυμεί να μετρήσει την ΑΕ ενώ αλλάζει τη θερμοκρασία, συνιστάται η χρήση σιδηροηλεκτρικών κεραμικών μόνο για θερμοκρασιακές αποκλίσεις μικρότερες των 100°C. Για τη μέτρηση της ακουστικής εκπομπής σε μεγάλες θερμοκρασιακές αποκλίσεις, θα πρέπει να χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας κατασκευασμένος από έναν μόνο κρύσταλλο, όπως χαλαζία ή νιοβικό λίθιο.

4.3.6 | Ευαισθησία αισθητήρα – Επιδράσεις των καλωδίων

Η ευαισθησία ενός αισθητήρα καθορίζεται από την εγγενή ευαισθησία του πιεζοηλεκτρικού υλικού, τις διαστάσεις του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, τον σχεδιασμό και τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση του.

Στην πράξη, λαμβάνεται από τον κατασκευαστή μια μετρημένη καμπύλη απόκρισης ως προς ένα τυποποιημένο σήμα και την χωρητικότητα του αισθητήρα. Αυτή η καμπύλη παρουσιάζεται συχνά σαν να ήταν ανεξάρτητη από την τεχνική μέτρησης. Ωστόσο, η ευαισθησία ενός αισθητήρα εξαρτάται πάντα, εν μέρει, από τον εξοπλισμό με τον οποίο χρησιμοποιείται. Η τάση ανοικτού κυκλώματος που παράγεται από έναν αισθητήρα είναι μια ιδιότητα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και είναι:

$$V_0(S) = Q(S) / C_0 \quad (14)$$

όπου Q είναι το φορτίο που παράγεται από ένα στέλεχος S , και C_0 είναι η χωρητικότητα του

αισθητήρα.

Όταν συνδέεται σε προενισχυτή, η πραγματική τάση στην αντίσταση εισόδου του προενισχυτή (δεδομένης της μεγάλης αντίστασης εισόδου) είναι:

$$V(S) = Q(S) / (C_0 + C_c + C_I) \quad (15)$$

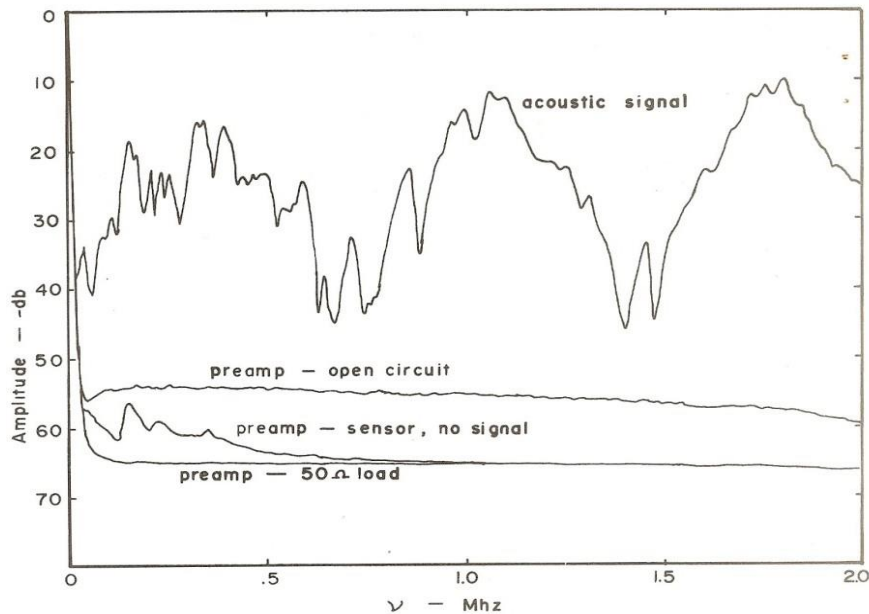
όπου το C_c είναι η χωρητικότητα του καλωδίου και το C_I είναι η χωρητικότητα εισόδου του προενισχυτή.

Οι αισθητήρες ακουστικών εκπομπών έχουν συνήθως χωρητικότητα που κυμαίνεται μεταξύ 100 και 1500pf (picofarad). Οι χωρητικότητες εισόδου προενισχυτή κυμαίνονται μεταξύ 20 και 40pf. Η χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους των ομοαξονικών καλωδίων εξαρτάται από την σύνθετη αντίσταση των καλωδίων με τιμές περίπου 30pf/ft για καλώδιο 50Ω, 20pf/ft για καλώδιο 75Ω και 15pf/ft για καλώδιο 95Ω. Για να δείτε το εύρος αυτής της μείωσης της ευαισθησίας του αισθητήρα, μπορείτε να υπολογίσετε μια χωρητικότητα εισόδου 30pf και 5ft καλωδίου 50Ω. Για έναν αισθητήρα με χωρητικότητα 100pf, θα έχουμε τάση εξόδου που θα είναι $V = 0,36V_0$, ή μείωση στην ευαισθησία κατά 9 dB. Ένας αισθητήρας χωρητικότητας 1600pf θα έχει $V = 0,9V_0$, μια μείωση στην ευαισθησία του 1dB. Έτσι, η απώλεια ευαισθησίας μπορεί να είναι αισθητή για τους αισθητήρες χαμηλής χωρητικότητας. Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος της επιπλέον χωρητικότητας προέρχεται από το καλώδιο, είναι μια καλή πρακτική να διατηρείται το μήκος του καλωδίου μεταξύ του αισθητήρα και του προενισχυτή όσο το δυνατόν μικρότερο. Αυτό είναι επίσης ένα πρόβλημα για μικρούς αισθητήρες, καθώς η χωρητικότητα είναι άμεσα ανάλογη με την περιοχή του δίσκου.

4.3.7 | Ευαισθησία αισθητήρα – Επίδραση του θορύβου προενισχυτή

Η καμπύλη φασματικής απόκρισης ενός συνδυασμού καλωδίου – προενισχυτή αισθητήρα σε ένα ακουστικό σήμα φαίνεται στο Σχήμα 11. Επίσης παρουσιάζονται τρεις καμπύλες απόκρισης του προενισχυτή χωρίς ακουστικό σήμα. Το ακριβές σχήμα της φασματικής απόκρισης ενός αισθητήρα σε ένα ακουστικό σήμα εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από τα χαρακτηριστικά εισόδου του προενισχυτή και από την χωρητικότητα του καλωδίου. Η υπερβολική χωρητικότητα του καλωδίου θα τείνει να μειώνει τις υψηλές συχνότητες σε σχέση με τις χαμηλές συχνότητες.

Οι διαφορετικοί προενισχυτές θα δώσουν διαφορετικές καμπύλες απόκρισης ακόμη και με τον ίδιο συνδυασμό καλωδίων – αισθητήρων, αν και η διαφορά είναι μικρή μεταξύ των περισσότερων προενισχυτών ακουστικής εκπομπής. Η χρήση προενισχυτών που δεν έχουν σχεδιαστεί για ακουστική εκπομπή μπορεί να έχει αξιοσημείωτη επίδραση στο χαρακτηριστικό φασματικής απόκρισης ενός αισθητήρα.



Σχήμα 11. Απόκριση συχνότητας του συνδυασμού αισθητήρα – προενισχυτή

Στο Σχήμα 11 έχουμε την απόκριση συχνότητας του συνδυασμού αισθητήρα – προενισχυτή. Η πάνω καμπύλη είναι η απόκριση σήματος και τα υπόλοιπα είναι αποκρίσεις χωρίς σήμα σε ανοικτό κύκλωμα εισόδου προενισχυτή, μόνο με αισθητήρα ή μόνο με φόρτιση 50Ω.

Οι τρεις καμπύλες φασματικής απόκρισης προενισχυτή στο Σχήμα 11 είναι, από την κορυφή προς τα κάτω, η απόκριση ανοικτού κυκλώματος, η απόκριση με καλώδιο και αισθητήρα απουσία ακουστικού σήματος και η απόκριση του προενισχυτή με την είσοδο βραχυκυκλωμένη με ένα φορτίο 50Ω. Ο θόρυβος σε βραχυκύκλωμα προενισχυτή δημιουργείται από τις τρέχουσες διακυμάνσεις στην πρώτη συσκευή ενίσχυσης. Εάν η είσοδος δεν είναι βραχυκυκλωμένη, ο θόρυβος μπορεί να θεωρηθεί ότι παράγεται από τις τρέχουσες διακυμάνσεις στην αντίσταση εισόδου. Η τάση θορύβου RMS (Root – Mean – Square) για μια τέτοια αντίσταση δίνεται από την εξίσωση:

$$V_n^2 = 4KTR\Delta\nu \quad (16)$$

όπου K είναι η σταθερά του Boltzmann, T είναι η θερμοκρασία, R είναι η αντίσταση και $\Delta\nu$ είναι το εύρος ζώνης του προενισχυτή.

Εάν το στάδιο εισόδου του προενισχυτή είναι ανοιχτό, R είναι η αντίσταση εισόδου εκείνης της βαθμίδας, αλλά αν υπάρχει συνδεδεμένος αισθητήρας, το R είναι κάποια ισοδύναμη αντίσταση. Η χωρητικότητα του αισθητήρα και του καλωδίου θα τείνει να μειώσει τις υψηλότερες συχνότητες θορύβου. Οι κορυφές στην καμπύλη του αισθητήρα στο Σχήμα 11 προκαλούνται από τους μηχανικούς συντονισμούς του αισθητήρα που αυξάνουν την σύνθετη αντίσταση του συνδυασμού αισθητήρα – καλωδίου στις συχνότητες συντονισμού. Το επίπεδο θορύβου ενός προενισχυτή καθορίζεται συνήθως από τους κατασκευαστές, καθώς η τάση εξόδου RMS διαιρείται με το κέρδος

όταν η είσοδος είναι βραχυκυκλωμένη.

$$V_s = V_0 / G \quad (17)$$

Ο θόρυβος που προκύπτει από τον συνδυασμό αισθητήρα – καλωδίου μπορεί να εκτιμηθεί από την Εξίσωση (16). Θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια τιμή θερμοκρασίας 295°K και μια αντίσταση εξόδου του συνδυασμού αισθητήρα – καλωδίου ως ισοδύναμη αντίσταση R . Αυτή η αντίσταση εξόδου μπορεί εύκολα να μετρηθεί με ένα απλό κύκλωμα. Μια μεταβλητή αντίσταση παράλληλα με την είσοδο του προενισχυτή μειώνεται μέχρις ότου η έξοδος του προενισχυτή να είναι το ήμισυ της τιμής που προκύπτει χωρίς την παράλληλη αντίσταση. Η αντίσταση εξόδου του συνδυασμού καλωδίων αισθητήρων είναι τότε ίση με την αντίσταση εισόδου του προενισχυτή (ουσιαστικά η τιμή του δικτύου παράλληλων αντιστάσεων που σχηματίζεται από την αντίσταση εισόδου του προενισχυτή και την τιμή της μεταβλητής αντιστάσεως). Για τους περισσότερους αισθητήρες ακουστικών εκπομπών, αυτή η σύνθετη αντίσταση θα είναι μεταξύ 50 και 1000Ω (Εξίσωση 16) και μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

$$V_n^2 = 0.004 \sqrt{Z_0 \Delta \nu} \quad (18)$$

όπου το Z_0 είναι η αντίσταση του αισθητήρα σε KΩ και το $\Delta \nu$ είναι στο Hertz. Η κατά προσέγγιση τάση θορύβου του συνδυασμού προενισχυτή – αισθητήρα – καλωδίου θα είναι:

$$V_{noise} = \sqrt{V_s^2 + V_n^2} \quad (19)$$

Αυτή η τάση θορύβου μετριέται από ένα βολτόμετρο RMS που μετράει τη θερμαντική ισχύ. Υποθέτει ότι η τάση θορύβου είναι επίπεδη σε σχέση με το εύρος ζώνης, $\Delta \nu$. Στο Σχήμα 11 είδαμε ότι αυτό δεν συμβαίνει αυστηρά. Το επίπεδο θορύβου σε ορισμένες συχνότητες μπορεί να είναι έξι έως οκτώ dB υψηλότερο από το υπόλοιπο εύρος ζώνης. Όσο τα σήματα ακουστικής εκπομπής περιέχουν μεγάλο εύρος συχνοτήτων, αυτές οι μικρές κορυφές θορύβου δεν πρέπει να έχουν σημασία, αλλά εάν περιορίζονται σε μία στενή ζώνη συχνοτήτων και βρίσκονται σε σχετικά χαμηλό επίπεδο, οι κορυφές θορύβου ενδέχεται να παρουσιάζουν προβλήματα.

4.3.8 | Βαθμονόμηση αισθητήρα

Όλοι οι κατασκευαστές παρέχουν καμπύλες βαθμονόμησης για τους αισθητήρες τους. Οι μονάδες που είναι σήμερα αποδεκτές είναι dB αναφερόμενες σε 1volt ανά μέτρο ανά δευτερόλεπτο. Πολλοί κατασκευαστές παρέχουν επίσης βαθμονόμηση με μονάδες dB που αναφέρονται σε 1volt ανά μbar. Το ακουστικό σήμα που χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση των αισθητήρων μπορεί να είναι είτε κύμα επιφάνειας είτε κύμα συμπίεσης. Μια τυπική καμπύλη βαθμονόμησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 9(b). Οι καμπύλες βαθμονόμησης για τον ίδιο μετατροπέα δεν θα είναι οι ίδιες για τις βαθμονομήσεις στην ταχύτητα (μέτρα/δευτερόλεπτο) ή στην πίεση (μbar). Η πίεση είναι ανάλογη

της τάσης η οποία σχετίζεται με την μετατόπιση της επιφάνειας, ενώ η ταχύτητα σχετίζεται με το χρονικό παράγωγο της μετατόπισης επιφάνειας. Για σταθερή συχνότητα ισχύουν οι σχέσεις:

$$V_{displacement} \approx D \sin \omega t \quad (20)$$

$$V_{velocity} \approx d/dt (D \sin \omega t) = D \omega \cos \omega t \quad (21)$$

όπου D είναι η μετατόπιση της επιφάνειας και V είναι η επιφανειακή ταχύτητα. Ότι η καμπύλη βαθμονόμησης ταχύτητας είναι περίπου η καμπύλη βαθμονόμησης πίεσης πολλαπλασιασμένη με τη συχνότητα, τείνει να καταστήσει την καμπύλη ταχύτητας πιο επίπεδη, καθώς δεν πέφτει τόσο γρήγορα στις υψηλότερες συχνότητες. Κατά την επιλογή ενός αισθητήρα, θα πρέπει να έχουμε κάποια ιδέα τόσο για την περιοχή συχνοτήτων όσο και για τον τύπο των κυμάτων που αναμένονται. Οι καμπύλες βαθμονόμησης μπορούν στη συνέχεια να συγκριθούν, υπό τον όρο ότι αντιπροσωπεύουν τον ίδιο τύπο πηγής και τις ίδιες μονάδες.

Το NBS (National Bureau of Standards – Εθνικό Γραφείο Προτύπων) έχει αναπτύξει μια βαθμονόμηση αισθητήρων για κύματα Rayleigh η οποία περιλαμβάνει μια μετατόπιση σημείου στο κέντρο ενός μεγάλου χαλύβδινου μπλοκ για την παραγωγή του κύματος. Ο αισθητήρας τοποθετείται αρκετά κοντά στην πηγή ώστε να επιτρέπεται μια διαφοροποίηση μεταξύ του άμεσου κύματος και των ανακλώμενων κυμάτων από την άκρη ή το κάτω μέρος του μπλοκ. Η έξοδος του αισθητήρα ψηφιοποιείται και υπολογίζεται το φάσμα του λαμβανόμενου κύματος. Αυτό το φάσμα συγκρίνεται με αυτό ενός χωρητικού αισθητήρα αναφοράς τοποθετημένου σε μια συγκρίσιμη θέση στο μπλοκ. (Ο χωρητικός αισθητήρας είναι ευαίσθητος μόνο στη μέση μετατόπιση της επιφάνειας του μπλοκ που παράγεται από το κύμα Rayleigh). Αυτή η βαθμονόμηση ισχύει μόνο για κύματα που μετακινούνται στην επιφάνεια του μπλοκ με μετατόπιση κάθετα προς την επιφάνεια, αλλά αυτά είναι τα πιο συνηθισμένα κύματα που παρατηρούνται στις δοκιμές ακουστικών εκπομπών. Επιπλέον, η βαθμονόμηση ισχύει αυστηρά μόνο για χάλυβα ή άλλα υλικά με ακουστικές αντιστάσεις παρόμοιες με εκείνες του χάλυβα. Ωστόσο, οι βαθμονομήσεις του NBS προσφέρουν αξιόπιστη σύγκριση των χαρακτηριστικών των αισθητήρων. Για τη δοκιμή των περισσότερων δομών, τα χαρακτηριστικά συχνότητας και ευαισθησίας των αισθητήρων που δίδονται από τις βαθμονομήσεις του NBS είναι περισσότερο από επαρκή. Ωστόσο, κάθε προσπάθεια προσδιορισμού των χαρακτηριστικών πηγής ΑΕ από κυματομορφές που ανιχνεύονται από αισθητήρες ρουτίνας ΑΕ θα πρέπει να περιλαμβάνει μια πολύ βαθύτερη μελέτη της σχέσης μεταξύ ακουστικών κυμάτων και πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων από ό, τι δίνεται εδώ. Οι τρέχουσες μελέτες δείχνουν ότι το σχήμα του εμπρόσθιου κύματος, η γωνία πρόσπτωσης της μετατόπισης στην επιφάνεια του αισθητήρα αλλά ακόμη και οι λεπτομέρειες κατασκευής του αισθητήρα μπορούν να επηρεάσουν τις κυματομορφές εξόδου του αισθητήρα.

4.4| Ενοργάνιση (Instrumentation) / Συλλογικά όργανα μέτρησης

4.4.1| Ακουστικά συστήματα εκπομπής

Αν και τα όργανα ακουστικής εκπομπής έχουν αλλάξει δραστικά τα τελευταία σαράντα χρόνια, ο βασικός ανιχνευτής ακουστικών κυμάτων εξακολουθεί να είναι ένας πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας. Τα όργανα ανάλυσης ήταν αρχικά ενισχυτές, ένας παλμογράφος και ένα ηλεκτρονικός μετρητής. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν υπολογιστικά συστήματα όπου παράμετροι σήματος όπως ο χρόνος άφιξης του σήματος, ο χρόνος ανόδου, το εύρος κορυφής και η διάρκεια, μετρούνταν με τη χρήση αναλογικών κυκλωμάτων. Αυτά επέτρεψαν τον υπολογισμό των θέσεων των πηγών ακουστικών εκπομπών, καθώς επίσης και πιο εξελιγμένων οθονών και μεθόδων ανάλυσης.

Ωστόσο, περιορίζονταν τόσο από τις σχετικά αργές ταχύτητες επεξεργασίας όσο και από τις μικρές μνήμες των πρώιμων υπολογιστών και από την ανάγκη χωριστών αναλογικών κυκλωμάτων για την ανίχνευση κάθε επιθυμητής παραμέτρου ακουστικής εκπομπής. Τα τρέχοντα συστήματα υπολογιστών είναι πολύ ταχύτερα και έχουν πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα μνήμης. Αντί για αναλογικά κυκλώματα για τις παραμέτρους ακουστικών εκπομπών, τα σήματα από τους προενισχυτές ψηφιοποιούν απευθείας. Αυτό επιτρέπει τη χρήση οποιωνδήποτε πιθανών παραμέτρων σήματος στην ανάλυση για την οποία μπορεί κανείς να γράψει έναν κώδικα. Ένα εμπορικό σύστημα μπορεί να απαριθμεί είκοσι ή περισσότερα πιθανά χαρακτηριστικά σήματος. Στην πράξη, ωστόσο, η ανάλυση των σημάτων ακουστικής εκπομπής περιορίζεται συχνά σε ψηφιοποιημένες εκδόσεις των παλαιών αναλογικών παραμέτρων.

Εκτός από την ταχύτητα και την ευελιξία, η νέα τεχνολογία υπολογιστών έχει οδηγήσει σε πολύ μικρότερα συστήματα ακουστικής εκπομπής. Είκοσι τέσσερα συστήματα καναλιών, τα οποία ξεκίνησαν απαιτώντας τουλάχιστον ένα πλήρες εξάρτημα οργάνων, αποτελούνται πλέον από τρεις κάρτες PCI 8 καναλιών και ένα φορητό υπολογιστή. Οκτώ κανάλια σε μία κάρτα αποτελούν σήμερα ένα λογικό όριο. Αυτό το όριο καθορίζεται εν μέρει από τον αριθμό των ομοαξονικών συνδέσμων που μπορεί να χωρέσει στην είσοδο μιας κάρτας και εν μέρει από την ποσότητα κυκλωμάτων που απαιτείται ακόμα για κάθε κανάλι. Προς το παρόν απαιτούνται ομοαξονικά καλώδια μεταξύ των πλακετών κυκλωμάτων και των συνδυασμών αισθητήρα – προενισχυτή σε μεγάλα πολυκαναλικά συστήματα. Η χρήση ραδιοσυχνοτήτων μεταξύ των αισθητήρων και του υπολογιστή περιορίζεται σε συστήματα με λίγα μόνο κανάλια (μέρος αυτού του περιορισμού είναι η ανάγκη χρήσης του ίδιου σήματος ρολογιού για κάθε κανάλι). Ως εκ τούτου, θεωρούμε έναν φορητό υπολογιστή με ξεχωριστό κουτί που περιέχει πολυκαναλικές ψηφιακές κάρτες και ομοαξονικά καλώδια στους αισθητήρες. Οι κάρτες με οκτώ κανάλια δεν είναι τόσο ευέλικτες όσο οι κάρτες τεσσάρων ή δύο

καναλιών – οι περιορισμοί περιλαμβάνουν έναν πιο αργό ρυθμό ψηφιοποίησης και μικρότερα μέγιστα μήκη για ψηφιοποιημένα σήματα. Ωστόσο, η αυξημένη ευελιξία της ικανότητας ψηφιοποίησης των μικρότερων καρτών είναι πιο σημαντική σε εργαστηριακά πειράματα παρά σε πεδία δοκιμών.

Έχει κατασκευαστεί μεγάλος αριθμός εμπορικών συστημάτων ακουστικής εκπομπής. Τα συστήματα που ψηφιοποιούν τα σήματα εκπομπών διατίθενται από τα μέσα της δεκαετίας του '90. Τρεις από τους μεγαλύτερους κατασκευαστές που πωλούν στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι οι εταιρείες Physical Acoustics Corporation, Vallen Corporation και Digital Wave Corporation. Άλλα συστήματα έχουν παραχθεί σε πολλές χώρες όπως στην Ιαπωνία, την Κίνα, τη Ρωσία, την Αγγλία και το Ισραήλ. Όλα αυτά τα συστήματα εκτελούν τις ίδιες βασικές λειτουργίες, αν και μπορούν να χρησιμοποιούν διαφορετική ονοματολογία και μεθόδους ανάλυσης. Εμείς θα αναλύσουμε τη λειτουργία των συστημάτων της εταιρείας Physical Acoustic Corporation.

4.4.2 | Λειτουργία συστήματος

Η βασική μέτρηση σε ένα σύστημα πολλαπλών καναλιών ακουστικών εκπομπών είναι ο χρόνος του συστήματος. Αυτό αρχίζει όταν ξεκινήσει η δοκιμή και σταματά όταν λήξει. Τα συστήματα PAC χρησιμοποιούν ένα ρολόι 4MHz που δίνει χρόνο ανάλυσης 0,25 μικροδευτερόλεπτα. Κάθε φορά που ένας αισθητήρας ανιχνεύει ένα σήμα, καταγράφεται η ακριβής ώρα άφιξης στον χρόνο δοκιμής. Κάθε κανάλι του συστήματος είναι ανεξάρτητο, οπότε αν ένα ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό σήμα θορύβου επρόκειτο να χτυπήσει το σύστημα, κάθε κανάλι θα μπορούσε να καταγράψει την ίδια ώρα άφιξης. Κάθε κανάλι έχει επίσης το δικό του ρολόι, το οποίο ξεκινά όταν πρώτα περάσει το όριο ενεργοποίησης αυτού του καναλιού. Αυτό το ρολόι καναλιού τρέχει έως ότου το σήμα πέσει κάτω από το κατώφλι για προκαθορισμένο χρόνο ή υπερβεί το προγραμματισμένο μέγιστο μήκος σήματος. Αυτό το ρολόι χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του χρόνου αύξησης του σήματος και του μήκους του σήματος. Κάθε κανάλι έχει ένα καθορισμένο PDT (Peak Definition Time – Χρόνος Ορισμού Κορυφής).

Όταν το πλάτος σήματος φτάσει στο μέγιστο και αρχίσει να υποχωρεί, η κάρτα σημειώνει το χρόνο και το μέγιστο πλάτος και στη συνέχεια περιμένει έναν πρόσθετο PDT για να δει εάν το πλάτος του προηγούμενου σήματος έχει ξεπεραστεί. Αν ισχύει η μέτρηση συνεχίζεται. Εάν δεν υπάρχει σήμα υψηλότερου εύρους μέσα στον PDT, το προηγούμενο πλάτος είναι το εύρος κορυφής και ο χρόνος από την αρχή του σήματος ορίζεται ως ο χρόνος ανύψωσης του σήματος. Καθώς το σήμα συνεχίζεται, η κάρτα καταγράφει πάντα την ώρα της τελευταίας διέλευσης κατωφλίου. Εάν δεν υπάρχει περαιτέρω διέλευση εντός του HDT (Hit Definition Time – Χρόνος Ορισμού Χτυπήματος ή γεγονότος), ο τελευταίος χρόνος καταγραφής καθορίζει το μήκος του σήματος. Μετά

την επίτευξη του HDT, η κάρτα περιμένει έως ότου λήξει ο χρόνος κλειδώματος HLT (Hit Lockout Time – Χρόνος Κλειδώματος Χτυπήματος). Σε αυτό το σημείο, η κάρτα επαναρυθμίζεται και είναι έτοιμη να ανιχνεύσει το επόμενο σήμα. Ο χρόνος HLT εμποδίζει το κανάλι να επεξεργάζεται μια ανάκλαση του πρώτου σήματος ως μια νέα εκπομπή. Ωστόσο, ένας υπερβολικά μεγάλος χρόνος HLT μπορεί να αποτρέψει τη σύλληψη των ραγδαίως εμφανιζόμενων εκπομπών. Στις περισσότερες δοκιμές ΑΕ, οι ακριβείς τιμές αυτών των τριών χρόνων δεν είναι κρίσιμες, αλλά θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι τιμές των ρυθμίσεων, ειδικά εάν αναμένεται υψηλό μέσο ποσοστό επανάληψης με σύντομες εκπομπές. Ταυτοχρόνως με αυτές τις χρονικές μετρήσεις, η κάρτα ψηφιοποιεί και αποθηκεύει αυτό το σήμα, σε περίπτωση που επιθυμούμε κυματομορφές.

Τόσο οι μετρήσεις χρόνου όσο και η ψηφιοποίηση της κυματομορφής εκπομπής αρχίζουν όταν ξεπεραστεί ένα προκαθορισμένο όριο. Η ψηφιοποίηση διαρκεί έως ότου ξεπεραστεί ένας προκαθορισμένος αριθμός δειγμάτων. Ο ψηφιοποιητής λειτουργεί πραγματικά συνεχώς με τα δείγματα να σαρώνουν τη μνήμη. Όταν ενεργοποιηθεί η κάρτα, αποθηκεύει τον αριθμό των χαρακτήρων που έχουν οριστεί για το μήκος εγγραφής, αλλά ξεκινάει την εγγραφή με ένα ορισμένο χρόνο (π.χ. 50 έως 200 μικροδευτερόλεπτα) πριν από την ενεργοποίηση. Έχει ως αποτέλεσμα, κάποιος να έχει μια εγγραφή της κυματομορφής που περιλαμβάνει 50+ μικροδευτερόλεπτα πριν από τον αρχικό χρόνο ενεργοποίησης.

Επομένως, η πραγματική έναρξη της κυματομορφής μπορεί να εξεταστεί, αν είναι απαραίτητο, για να προσδιοριστεί με ακρίβεια η ακριβής τιμή της πρώτης διασταύρωσης κατωφλίου που ορίζει την αιχμή του σήματος. Το μήκος σήματος ορίζεται από την τελευταία φορά που το σήμα διασχίζει το κατώφλι. Ωστόσο, τα σήματα είναι συχνά μεγαλύτερα από το καθορισμένο μήκος ψηφιοποιημένης λέξης. Συνεπώς, το μήκος σήματος συνήθως μετριέται από το ρολόι συστήματος, όχι από την ψηφιακή εγγραφή. Ο Χρόνος Ανύψωσης (Rise Time) και το πλάτος κορυφής μπορούν εξίσου καλά να μετρηθούν από το ψηφιοποιημένο σήμα όπως από το ρολόι συστήματος.

Η μετάβαση από αναλογικά σε ψηφιακά συστήματα ακουστικής εκπομπής έγινε δυνατή με την πρόοδο των ψηφιοποιητών σήματος. Όταν σχεδιάστηκαν τα πρώτα μηχανογραφημένα συστήματα ακουστικής εκπομπής, οι διαθέσιμοι ψηφιοποιητές σήματος έτρεχαν σε ταχύτητες μέχρι ένα MHz και είχαν εύρος 8 – bit. Με ένα bit σήματος, μια καταχώρηση 8 – bit δίνει μια ακρίβεια ενός τμήματος στα 128. Αυτό δίνει μια δυναμική περιοχή 42dB, λίγο πάνω από δύο τάξεις μεγέθους. Τα σύγχρονα συστήματα διαθέτουν ψηφιοποιητές σήματος που λειτουργούν μέχρι 40MHz και έχουν καταχωρήσεις 16 – bit οι οποίες, σε ένα κομμάτι 32.768, τους δίνουν μια δυναμική περιοχή 90dB ή $4^{1/3}$ τάξεις μεγέθους. Αυτή η απόδοση είναι περισσότερο από επαρκής για τη συνήθη δοκιμή ΑΕ. Τα περισσότερα υλικά μηχανικής έχουν σχετικά υψηλές ακουστικές εξασθενίσεις σε συχνότητες άνω του ενός MHz.

Η ακουστική εξασθένηση των πλαστικών και των σύνθετων υλικών περιορίζει τις αξιοποιήσιμες εκπομπές κάτω από τα 500kHz. Το δυναμικό εύρος ακουστικών εκπομπών από δομικές δοκιμές είναι συνήθως κάτι μικρότερο από 80dB μεταξύ της στάθμης θορύβου υποβάθρου και του μεγαλύτερου σήματος που ανιχνεύθηκε. Οι τρέχοντες ψηφιοποιητές έχουν έτσι ικανοποιητική απόδοση για τις περισσότερες δοκιμές ΑΕ. Ένας περιοριστικός παράγοντας, ωστόσο, είναι ο αριθμός των λέξεων σε ένα αρχείο ψηφιακού σήματος. Το μήκος εγγραφής που επιλέγεται κατά το σχεδιασμό της δοκιμής υπόκειται σε ένα όριο υλικού, συνήθως μεταξύ 4.096 και 16.384 λέξεων. Για υψηλούς ρυθμούς ψηφιοποίησης και μεγάλα σήματα, επιτυγχάνεται συχνά το μήκος εγγραφής και το ψηφιακό σήμα περικόπτεται προτού πέσει στο θόρυβο του περιβάλλοντος. Αυτό δεν είναι συνήθως ένα μείζον πρόβλημα, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας στα μεταβατικά σήματα εμφανίζεται στην αρχή της εγγραφής με το τελευταίο τμήμα του μεταβατικού αποτελούμενο από εκθετική αποσύνθεση χαμηλού πλάτους στο θόρυβο του περιβάλλοντος.

Ο περιορισμός του ρυθμού ψηφιοποίησης καθορίζεται από τη συχνότητα των σημάτων ακουστικής εκπομπής που εκπέμπονται από το δείγμα. Αυτό το περιεχόμενο με τη σειρά του συνήθως καθορίζεται από τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο δείγμα. Η ανώτερη συχνότητα ενός συμβάντος ακουστικής εκπομπής θα καθορίζεται από το μέγεθος της εμπλεκόμενης περιοχής και την ταχύτητα με την οποία λαμβάνει χώρα η κίνηση. Σε μικροσκοπική κλίμακα, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πολύ υψηλές συχνότητες. Ωστόσο, σε δοκιμές που αφορούν δομικά υλικά, οι ανιχνευόμενες συχνότητες θα εξαρτηθούν από τα χαρακτηριστικά εξασθένησης των εμπλεκόμενων υλικών. Για μέταλλα όπως το αλουμίνιο, ο χάλυβας και το τιτάνιο, συχνά ανιχνεύονται συχνότητες έως 1MHz. Για το μόλυβδο και το χαλκό, οι μέγιστες ανιχνευόμενες συχνότητες δεν θα υπερβαίνουν τα 500kHz. για τα πλαστικά και τα σύνθετα υλικά, οι μέγιστες ανιχνευόμενες συχνότητες θα είναι περίπου 200kHz. Αυτό το μέγιστο δεν σημαίνει ότι δεν θα υπάρχουν υψηλότερες συχνότητες, αλλά μόνο ότι πρόκειται για δευτερεύουσες συνιστώσες των σημάτων μεγαλύτερου πλάτους. Σε συνδυασμό με τα κριτήρια Nyquist (η ψηφιακή εγγραφή πρέπει να έχει τουλάχιστον δύο δείγματα ανά μήκος κύματος της υψηλότερης συχνότητας που έχει καταγραφεί για να αποφευχθεί εγγενής παραμόρφωση) υποδηλώνει ότι τα ποσοστά δειγματοληψίας 2.0MHz για τα πλαστικά και τα σύνθετα υλικά και 10MHz για τα μέταλλα είναι τόσο υψηλά όσο χρειάζεται. Τα μειονεκτήματα των σημάτων που περιέχουν συχνότητες υψηλότερες από το ήμισυ της συχνότητας Nyquist είναι ότι αυτά τα συστατικά υψηλότερης συχνότητας είναι ψευδεπίγραφα ή αναδιπλωμένα στο χαμηλότερο εύρος συχνοτήτων. Στις χειρότερες περιπτώσεις, αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες στρεβλώσεις του αρχικού σήματος. Εάν χρησιμοποιείται χαμηλότερη συχνότητα δειγματοληψίας, τα φίλτρα χαμηλής διέλευσης στο σύστημα θα πρέπει να ρυθμιστούν για πολύ μικρότερη από τη συχνότητα Nyquist.

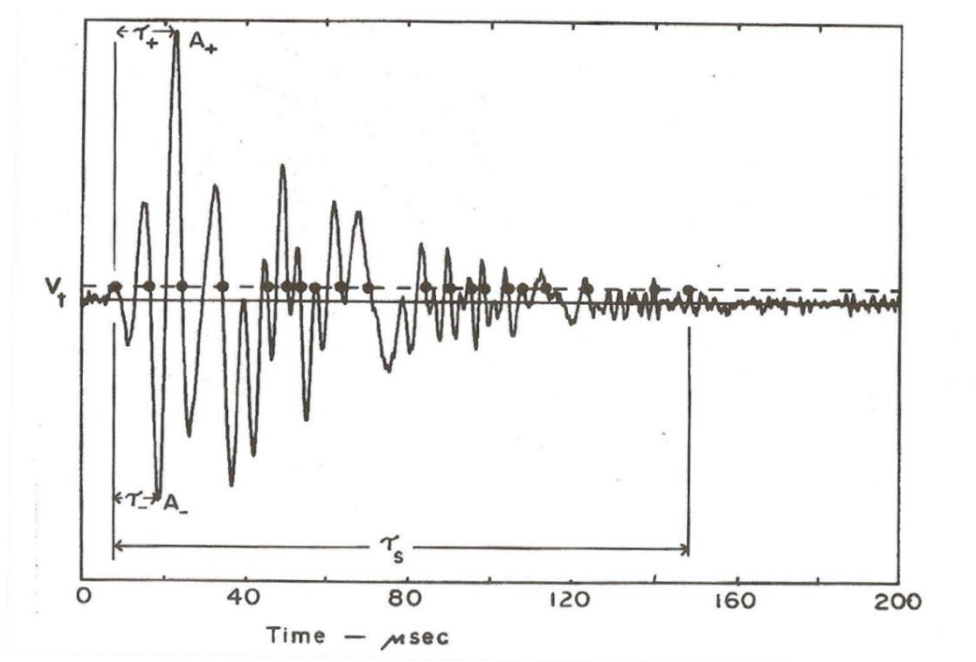
Όπως διαπιστώθηκε χρησιμοποιήθηκαν αρκετές παράμετροι ακουστικής εκπομπής από τις πρώτες ημέρες της ακουστικής εκπομπής, όταν τα σχήματα σήματος περιορίζονταν στην χρήση ενός παλμογράφου. Παρακάτω θα γίνει επεξήγηση κάποιων όρων και παραμέτρων σχετικών με τις δοκιμές ακουστικών εκπομπών για την διευκόλυνση της κατανόησης τους.

Ένα **Χτύπημα (Hit)** ορίζεται ως ένα μεταβατικό σήμα από έναν αισθητήρα ο οποίος ανεβαίνει πάνω από το **Όριο ή Σκαλοπάτι Ανίχνευσης (Detection Threshold)**. Ο **Χρόνος Αφίξης (Arrival Time)** του είναι ο χρόνος που το σήμα χτυπήματος υπερβαίνει το όριο ανίχνευσης για πρώτη φορά. Το όριο ανίχνευσης έχει οριστεί κατά τη ρύθμιση του υλικού. Είναι η τιμή (σε dB πάνω από 1.0μV) στην οποία το κανάλι αυτό θα ανιχνεύσει ένα σήμα και θα ενεργοποιήσει τον ψηφιοποιητή σήματος. Κανονικά, όλα τα κανάλια στη δοκιμή έχουν το ίδιο όριο ανίχνευσης, αλλά αν ένα κανάλι αναπτύξει πρόβλημα θορύβου κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής, το κατώφλι ανίχνευσης για αυτό το κανάλι μπορεί να αυξηθεί έτσι ώστε το κανάλι να βλέπει μόνο μεγαλύτερα σήματα. Το όριο ανίχνευσης περιορίζεται από το θόρυβο του περιβάλλοντος στο σύστημα. Εάν δεν υπάρχει ακουστικός θόρυβος στο δείγμα, το όριο θα είναι, στην καλύτερη περίπτωση, η στάθμη θορύβου στον προενισχυτή. Η Εξίσωση (16) υποδεικνύει ότι το σήμα θορύβου στην είσοδο του προενισχυτή είναι ανάλογο με την τετραγωνική ρίζα της σύνθετης αντίστασης εισόδου, την απόλυτη θερμοκρασία και το εύρος ζώνης. Για τους προενισχυτές ακουστικής εκπομπής και τους αισθητήρες, αυτή η τάση θορύβου κυμαίνεται μεταξύ περίπου 5 και 15μV. Αυτό υποδηλώνει ότι για ένα ήσυχο δείγμα, ένα κατώφλι ανίχνευσης 30dB (32μV) θα ήταν λογικό.

Μια **Ομάδα Συμβάντων (Event Group)** ορίζεται ως αριθμός **Χτυπημάτων (Hits)** που εμφανίζονται από διαφορετικούς αισθητήρες μέσα σε ένα προκαθορισμένο χρονικό παράθυρο. Αυτό το παράθυρο καθορίζεται από τον μηχανικό δοκιμής από την ακουστική εξασθένηση του δείγματος, τη γεωμετρία του και τη γεωμετρία της διάταξης του αισθητήρα. Κάθε χτύπημα ελέγχεται για να διαπιστωθεί εάν βρίσκεται σε μια ομάδα συμβάντων ή ξεκινά μία άλλη. Για παράδειγμα, για να αποφευχθεί η εμφάνιση αρκετών χτυπημάτων από το ίδιο κανάλι κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής πολλαπλών καναλιών μιας σφαίρας, το χρονικό παράθυρο ρυθμίζεται τη χρονική στιγμή που ένα ακουστικό σήμα με την ταχύτητα διάτμησης (το πιο αργό κύμα) χρειάζεται να ταξιδέψει στη μέση της σφαίρας. Οποιοδήποτε σήμα που εμφανίζεται μετά από αυτό το χρόνο, μετρημένο από το πρώτο χτύπημα στην ομάδα, δεν θα συμπεριληφθεί στην ομάδα. Ένα **Εντοπιζόμενο Γεγονός (Located Event)** ΑΕ ορίζεται ως μία ομάδα συμβάντων για την οποία το πρόγραμμα του συστήματος μπορεί να υπολογίσει μια θέση στο δείγμα από τους χρόνους άφιξης στην ομάδα συμβάντων. Μία **Συστάδα (Cluster)** είναι μια ομάδα εντοπισμένων συμβάντων που συμβαίνουν σε μια καθορισμένη περιοχή στο δείγμα. Η περιοχή ή ο όγκος της συστάδας μπορεί να οριστεί είτε στην ανάλυση μετά την εξέταση είτε στο πρόγραμμα του συστήματος, το οποίο επιτρέπει στο σύστημα να αναγνωρίζει τη

συστάδα σε πραγματικό χρόνο. Το λογισμικό AEwin μπορεί να ρυθμιστεί για τον εντοπισμό συστάδων διαφορετικών μεγεθών και την παρακολούθησή τους ως προς το μέγεθος ή την καταμέτρηση του περιεχομένου, αλλά όχι ως προς το **Απόλυτο Ενεργειακό (Absolute Energy)** περιεχόμενο.

Το Σχήμα 12 δείχνει ένα τυπικό σήμα ακουστικής εκπομπής με πολλές καθορισμένες παραμέτρους σήματος: τη **Διάρκεια του Σήματος (Signal Duration)** (τον χρόνο μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας διέλευσης κατωφλίου), τον **Χρόνο Ανόδου του Σήματος (Signal Rise Time)** (ο χρόνος μεταξύ της πρώτης διασταύρωσης και του **Χρόνου του Μεγίστου Πλάτους του Σήματος (Signal Peak Amplitude)**), το μεγαλύτερο πλάτος του σήματος, που συνήθως δίδεται σε ντεσιμπέλ. Για μακρά σήματα, όπως μεγάλη επίδραση σε ένα κομμάτι αλουμινίου, ο χρόνος που χρειάζεται για να μετριάσει το σήμα κάτω από το κατώφλι ανίχνευσης είναι πολύ μεγαλύτερος από όσο μπορεί να κρατήσει η μεγαλύτερη διαθέσιμη ψηφιακή εγγραφή. Ένα πολύ μικρό μήκος σήματος, μικρότερο από $\approx 50\mu\text{sec}$, υποδηλώνει ότι το σήμα είναι πιθανώς ηλεκτρική ακίδα θορύβου και όχι ακουστικό σήμα ενώ ένα μήκος σήματος μεγαλύτερο από 10 χιλιοστά του δευτερολέπτου υποδηλώνει είτε μια προέλευση λόγω τριβής ή μια πολύ χαμηλή εξασθένηση για το ακουστικό σήμα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 12, η διάρκεια του σήματος είναι μια συνάρτηση του κατωφλίου ενεργοποίησης όπως είναι και η μέτρηση. Για αυτό το λόγο τόσο η μέτρηση όσο και το μήκος σήματος είναι καλές ποιοτικές μετρήσεις της ποσότητας ακουστικών εκπομπών που εμφανίζονται, αλλά δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται για ποσοτικούς υπολογισμούς.



Σχήμα 12. Σήμα ακουστικής εκπομπής

Στο Σχήμα 12 έχουμε το σήμα ακουστικής εκπομπής που δείχνει την μέτρηση (τον αριθμός των

διασταυρώσεων του κατωφλίου ενεργοποίησης, $n = 20$), τον χρόνο ανόδου T_+ , το πλάτος κορυφής A_+ και τη διάρκεια σήματος T_s

Τα πλάτη κορυφής είναι ένας καλός δείκτης για το πόσο ισχυρές είναι οι εκπομπές. Η σημαντικότερη ιδιότητα του εύρους της κορυφής είναι ότι μετριέται σε λογαριθμική κλίμακα. Ένας συντελεστής 10 στην τάση εξόδου του αισθητήρα είναι ίσος με 20dB στο πλάτος κορυφής. Ο κρίσιμος παράγοντας είναι η διαφορά μεταξύ του επιπέδου θορύβου καναλιού και εκείνου των σημάτων AE. Για την καλή θέση της πηγής AE, τα μέγιστα πλάτη των μεγαλύτερων σημάτων AE πρέπει να είναι 30dB πάνω από το επίπεδο θορύβου καναλιού. Για τις περισσότερες δοκιμές, πλάτη κορυφής άνω των 40dB πάνω από τον θόρυβο υποβάθρου είναι ενδείξεις βλάβης στο δείγμα. Ένα λογικό σημείο για να ξεκινήσει το όριο ενεργοποίησης για το σύστημα είναι 3 έως 5dB πάνω από το μέσο επίπεδο θορύβου υποβάθρου. Ένα καλό επίπεδο ενεργοποίησης θα πρέπει να προκαλεί περιστασιακά μια κορυφή θορύβου.

Από το Σχήμα 4(b) που δείχνει τη χρονική διαφορά μεταξύ κορυφών ενός ιδανικού σήματος που περιέχει τόσο συμπίεστικά όσο και διατμητικά κύματα, θα φαινόταν πιθανό να προσδιοριστεί πόσο μακριά είχε διανύσει ένα σήμα από το χρόνο μεταξύ των δύο κορυφών. Δυστυχώς, τα πραγματικά σήματα AE σπανίως είναι τόσο απλά. Ωστόσο έχει χρήση η παράμετρος του χρόνου ανόδου. Εάν ένα κανάλι ενεργοποιείται εκ νέου ελαφρώς μετά από την επίτευξη ενός σήματος, η προκύπτουσα κυματομορφή είναι συνήθως ένα κύμα αποσυνθέσεως. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο χρόνος ανόδου που συχνά καταγράφεται είναι ο χρόνος από τον οποίο το κατώφλι διασχίζεται στην πρώτη ταλαντευτική κορυφή. Για τα κανονικά σήματα ο χρόνος ανύψωσης θα είναι αρκετά μεγάλα μήκη κύματος.

Επομένως, εάν ο χρόνος ανόδου είναι σύντομος, λιγότερο από 10 έως 15 μικροδευτερόλεπτα, πιθανότατα το κανάλι που ενεργοποιείται στη μέση ενός σήματος και η εγγεγραμμένη ώρα άφιξης για το συγκεκριμένο κανάλι είναι πιθανώς λανθασμένα. Όλα τα δεδομένα από το σήμα αυτό μπορούν να αγνοηθούν εκτός αν είναι ένα πολύ μεγάλου πλάτους σήμα. Αν ένα σήμα έχει πολύ μεγάλο χρόνο ανόδου, ειδικά μεγαλύτερο από το ήμισυ του μήκους σήματος, είναι σχεδόν βέβαιο ότι δεν είναι παροδικό. Ένα τέτοιο σήμα AE μπορεί επίσης να αγνοηθεί. Ο χρόνος ανύψωσης του σήματος μπορεί να υποδείξει αν το ληφθέν σήμα είναι στην πραγματικότητα από ένα μεταβατικό συμβάν στο δείγμα ή αν είναι παραμορφωμένο ή εξωγενές.

Η Μέτρηση Ακουστικών Εκπομπών (Acoustic Emission Count) ήταν μία από τις πρώτες παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στον τομέα της ακουστικής εκπομπής. Είναι απλά η έξοδος ενός ηλεκτρονικού μετρητή που εφαρμόζεται σε ένα σήμα AE. Κάθε φορά που το σήμα διασχίζει ένα προκαθορισμένο όριο προς μία κατεύθυνση (μείωση ή αύξηση), καταγράφεται ένας αριθμός. Εάν αυτός ο αριθμός μετράται συνεχώς, δίνει ιστορικό της εκπομπής από το δείγμα. Εάν έχει γραφεί μια μέτρηση ανά μονάδα χρόνου, τότε παρέχεται ιστορικό του ρυθμού εκπομπής. Αποτελεί ένα από

τα απλούστερα και πιο χρήσιμα μέτρα της AE, αλλά είναι επίσης σχεδόν αδύνατο να συνδεθεί άμεσα με οποιαδήποτε φυσική παράμετρο. Η μέτρηση εξαρτάται από το όριο ανίχνευσης, τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα, το κέρδος και το εύρος ζώνης του προενισχυτή, την ποιότητα της ακουστικής σύζευξης και τα χαρακτηριστικά και τη γεωμετρία του δείγματος. Το μόνο πράγμα που μπορεί να λεχθεί για την καταμέτρηση από ένα σήμα AE είναι ότι εάν το σήμα έχει μόνο μία μέτρηση, πιθανότατα είναι ηλεκτρονικός θόρυβος. Ένα σήμα ακουστικής εκπομπής περιέχει, σχεδόν πάντα, πολλές ταλαντώσεις.

Η **Ενέργεια Σήματος (Signal Energy)** είναι εύκολο να οριστεί αλλά είναι δύσκολο να μετρηθεί με ένα αναλογικό κύκλωμα. Μπορεί να οριστεί ως το ολοκλήρωμα της καμπύλης τάσης σε σχέση με το χρόνο σε σχέση με το μήκος του σήματος. Το πρόβλημα με μια αναλογική μέτρηση είναι το δυναμικό εύρος των σημάτων. Εάν μια δοκιμή AE έχει δυναμική περιοχή 80dB, η οποία είναι σχετικά συνηθισμένη, τότε το ενεργειακό εύρος αυτών των σημάτων θα καλύπτει τουλάχιστον οκτώ τάξεις μεγέθους. Αναλογικά κυκλώματα με αυτή τη δυναμική περιοχή δεν είναι συνηθισμένα. Εάν τα σήματα AE είχαν όλα τα ίδια χαρακτηριστικά σήματος, τότε θα ήταν δυνατό να σχεδιαστεί αναλογικό κύκλωμα για τη μέτρηση της ενέργειας. Αλλά τα σήματα AE έρχονται σε μια μεγάλη ποικιλία σχημάτων και μεγεθών στην ίδια δοκιμή. Για ένα ψηφιοποιημένο σήμα, η ενέργεια σήματος ορίζεται ως:

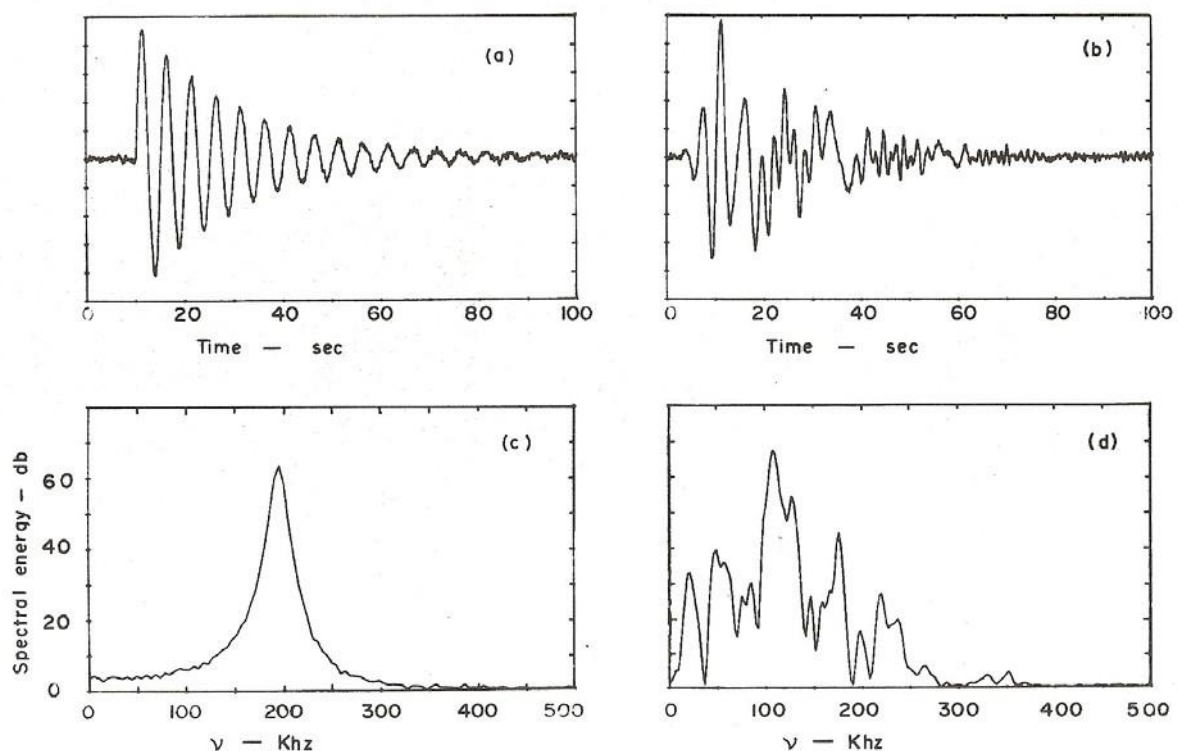
$$E = (\Delta_t/R) \sum_i V_i^2(t) = A(\Delta_t/R) \quad (22)$$

όπου Δ_t είναι το πλάτος δείγματος σε δευτερόλεπτα, R είναι η αντίσταση σε ohms, $V_i(t)$ είναι το εύρος του δείγματος σε volts και το άθροισμα είναι πάνω από το T, το συνολικό μήκος σήματος σε δευτερόλεπτα. Στα συστήματα Physical Acoustics Corp., αυτό ονομάζεται **Απόλυτη Ενέργεια (Absolute Energy)**.

Κατά τη βαθμονόμηση της απόλυτης ενέργειας για ένα σύστημα PAC, το άθροισμα των τετραγώνων των τάσεων του δείγματος, A, πολλαπλασιάζεται με $9,31 \times 10^{-4}$ για να δώσει την ενέργεια σε μονάδες 10^{-21} Joules. Εάν το A πολλαπλασιαστεί με 6.7041×10^{-6} , η ενέργεια δίδεται σε μονάδες Mev (εκατομμύρια ηλεκτρονιοβόλτ). Το μόνο πρόβλημα με αυτή τη μέτρηση, ωστόσο, είναι ότι καλύπτει μόνο το ψηφιακό μήκος σήματος. Εάν το μεταβατικό σήμα είναι μεγαλύτερο, η υπολογισμένη ενέργεια θα είναι κάπως μικρότερη από την πραγματική ενέργεια του σήματος. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του σήματος σε ένα παροδικό είναι κοντά στην αρχή της ψηφιακής εγγραφής. Το μικρό ποσοστό της ενέργειας του σήματος που χάθηκε από την περικοπή του είναι ασήμαντο σε σύγκριση με τις άλλες αβεβαιότητες στη μέτρηση της ενέργειας του.

Πρέπει να τονιστεί ότι ενώ η ενέργεια σήματος δίνεται σε φυσικές μονάδες, δεν είναι η

πραγματική ενέργεια της εκπομπής, αλλά μόνο η ενέργεια που εκπέμπεται από τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα. Η πραγματική ενέργεια εκπομπής ακτινοβολήθηκε σε όλο το δείγμα και μετρήθηκε μόνο η ενέργεια που πραγματικά χτυπάει την επιφάνεια του αισθητήρα. Η ενέργεια που ανιχνεύεται από τον αισθητήρα επηρεάζεται έντονα από την απόσταση μεταξύ της πηγής και του αισθητήρα. Στις αναλύσεις που γίνονται, αθροίζονται οι απόλυτες ενέργειες από τους τρεις αισθητήρες που βρίσκονται πλησιέστερα στην πηγή εκπομπής, με σκοπό να εκτιμηθεί καλύτερα η πραγματική ισχύς της πηγής.



Σχήμα 13. Φάσματα κύματος και σήματος ΑΕ

Στο Σχήμα 13 έχουμε το φάσμα (c) ενός αποσβεσμένου ημιτονοειδούς κύματος (a) και το φάσμα (d) ενός σήματος ακουστικής εκπομπής (b).

Η τελευταία παράμετρος σήματος, η οποία είναι χρήσιμη για τον υπολογισμό από τη μορφή ψηφιοποιημένου κύματος είναι το **Φάσμα Σήματος (Signal Spectrum)**. Πρόκειται για μετασχηματισμό Fourier του ψηφιοποιημένου σήματος. Το σήμα φαίνεται στο Σχήμα 13(b) και το φάσμα του στο Σχήμα 13(d). Θεωρητικά, θα πρέπει να είμαστε σε θέση να μάθουμε πολλά για τα χαρακτηριστικά της πηγής από το φάσμα. Στην πράξη, ένας αντίστροφος υπολογισμός στα πραγματικά χαρακτηριστικά της πηγής είναι σχεδόν αδύνατος επειδή πρέπει να γνωρίζουμε τη λειτουργία απόκρισης του αισθητήρα για τον ακριβή συνδυασμό των ακουστικών κυμάτων που τον διεγείρουν. Επίσης, απαραίτητη για τον υπολογισμό, είναι η συνάρτηση απόκρισης του δείγματος

για όλες τις ακουστικές διαδρομές των παραγόμενων ακουστικών κυμάτων που φθάνουν στον αισθητήρα. Έχουν γίνει προσπάθειες για να υπολογιστεί εκ νέου η λειτουργία απόκρισης αισθητήρα στο εργαστήριο, αλλά αυτές είναι πολύ μακριά από μια πραγματική δοκιμή.

4.4.3 | Καταστολή θορύβου

Τα καθοριστικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των σημάτων ακουστικής εκπομπής είναι σε τυχαία χρονική εμφάνιση, τυχαίες συχνότητες, πλάτη, διάρκειες και κυματομορφές των οποίων το μοναδικό κοινό χαρακτηριστικό είναι ότι είναι μεταβατικά. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στη δοκιμή ακουστικών εκπομπών είναι ο ανεπιθύμητος θόρυβος. **Θόρυβος (Noise)** μπορεί να οριστεί ως οποιοδήποτε σήμα που ανιχνεύεται από το σύστημα ΑΕ, το οποίο δεν αποτελεί επιθυμητή απόκριση στο εφαρμοζόμενο ερέθισμα. Αυτό περιλαμβάνει όλους τους τύπους ηλεκτρονικών παρεμβολών και ακουστικών σημάτων που δεν παράγονται από το ερέθισμα, καθώς και ανεπιθύμητες απαντήσεις στο εφαρμοζόμενο ερέθισμα. Στο παρελθόν, ο ηλεκτρονικός θόρυβος υπήρξε μείζον πρόβλημα. Ακόμη και τα μεταβατικά σήματα, εάν εμφανίζονται αρκετά γρήγορα, μπορούν να υπερτεθούν και να εμφανιστούν ως ένα συνεχές σήμα. Η απόκριση σε τέτοιο ηλεκτρικό θόρυβο έχει βελτιωμένη θωράκιση σε αισθητήρες και προενισχυτές, χρησιμοποιώντας διπλό θωρακικό ομοαξονικό καλώδιο όταν χρειάζεται και πολύ βελτιωμένο φιλτράρισμα σε τροφοδοτικά συστήματος. Αυτό έχει εξαλείψει πολλές παρεμβολές από ραδιοφωνικούς και τηλεοπτικούς σταθμούς, συστήματα ανάφλεξης σε κινητήρες εσωτερικής καύσης και εξωτερικά σήματα στις γραμμές ισχύος εισόδου. Εντούτοις, αντιμετωπίζονται συχνά προβλήματα όπως οι βρόχοι γείωσης στα καλώδια ΑΕ και οι πολλαπλοί και κακώς συνδεδεμένοι ηλεκτρικοί χώροι στο χώρο εργασίας. Σχεδόν κάθε βιομηχανική περιοχή μπορεί να έχει απροσδόκητες πηγές ηλεκτρικού θορύβου, πράγμα που δεν θα ήταν πρόβλημα εάν δεν αναζητούσαμε σήματα ευρείας ζώνης μέχρι το επίπεδο των 10 microvolt.

Τα σήματα ακουστικής εκπομπής εμφανίζονται τυχαία και δεν έχουν καθορισμένα χαρακτηριστικά εκτός από τη μεταβατική προέλευσή τους, έτσι δεν είναι δυνατές πολλές παραδοσιακές ηλεκτρονικές μέθοδοι μείωσης θορύβου. Τα περιορισμένα ηλεκτρονικά εύρους ζώνης, οποιοσδήποτε τύπος κλειδωμένων συχνοτήτων και προκαθορισμένα χρονικά παράθυρα είτε δεν λειτουργούν ή εξαλείφουν πραγματικά σήματα εκπομπής. Οι συχνότητες κάτω των 20kHz αποφεύγονται για καλό λόγο. Τα περισσότερα σήματα ΑΕ, με εξαίρεση τους σεισμούς, περιέχουν επαρκή ενέργεια άνω των 20kHz. Είναι επιθυμητό να μπορεί κάποιος να συζητάει κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής και δεν θέλουμε αυτός ο τοπικός θόρυβος να είναι ανιχνεύσιμος από τα όργανα. Οι ραδιοφωνικοί και τηλεοπτικοί σταθμοί αποτελούσαν κάποτε πρόβλημα, αλλά χρησιμοποιώντας καλά ομοαξονικά καλώδια και θωράκιση τόσο στους προενισχυτές όσο και στους αισθητήρες, έχει

σχεδόν εξαλειφθεί η παρέμβασή τους. Τα σύγχρονα συστήματα ΑΕ διαθέτουν πολύ καλά φίλτρα για τα τροφοδοτικά τους, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν καταστάσεις σε βιομηχανικές περιοχές όπου υπάρχει ύποπτος θόρυβος στις γραμμές εισόδου. Όταν εξακολουθεί να εντοπίζεται ο υποτιθέμενος θόρυβος ραδιοσυχνότητας ακόμη και όταν οι αισθητήρες βρίσκονται σε σφραγισμένο δοχείο γεμισμένο με αφρό ή ακόμα καλύτερα σε κενό, μια καλή πρακτική είναι να γειώσουμε τα πάντα, ακόμη και όσα είναι απομακρυσμένα συνδεδεμένα στο σύστημα. Και πάλι, είναι δυνατόν να περάσουν χρόνια αναζητώντας αυτό το τυχαία εμφανιζόμενο σήμα με ελάχιστη επιτυχία.

Τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα συνήθως ανιχνεύονται ως πολύ σύντομα, συχνά με μία μόνο ακίδα με μήκος μικρότερου μικροδευτερολέπτων ή λιγότερο. Σε αντίθεση, τα περισσότερα ακουστικά σήματα έχουν αρκετές ταλαντώσεις στο ελάχιστο. Φιλτράροντας όλα τα σήματα μόνο με μία μέτρηση, συνήθως δεν αφαιρείται κανένα σημαντικό ακουστικό σήμα. Ένα άλλο χρήσιμο φίλτρο είναι η διάρκεια του σήματος. Αν υποθέσουμε ότι ένα ακουστικό σήμα έχει πάνω από τρεις κύκλους της κυρίαρχης συχνότητας, θα μπορούσαμε να φιλτράρουμε τυχόν σήματα μικρότερα από 10μsec για συχνότητα 300kHz ή 50μsec για συχνότητα 60kHz.

Ένα άλλο πρόβλημα είναι ο ανεπιθύμητος ακουστικός θόρυβος. Οποιοσδήποτε δύο επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή και έχουν την ελαφρά κίνηση μεταξύ τους μπορούν να παράγουν σχετικά μεγάλα ακουστικά σήματα που μπορούν να ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις στα μέταλλα. Οι επιπτώσεις στις επιφάνειες μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλα ανιχνεύσιμα σήματα, π.χ. μια καταιγίδα διαβρέχει ένα κομμάτι σιδηροδρόμου σε μήκος ενός τετάρτου του μιλίου από τον αισθητήρα. Κάθε δοκιμή που περιλαμβάνει κίνηση, όπως η περιστροφή ενός ρουλεμάν ή η περιστροφή ενός πτερυγίου ανεμογεννήτριας, θα παράγει μερικά ακουστικά σήματα συνεχούς τύπου. Σε ένα καλό ρουλεμάν, τα κανονικά σήματα θα είναι κάτω από το φίλτρο χαμηλής διέλευσης των 20kHz στο κανάλι σήματος. Οποιοσδήποτε φέρουσες ενδείξεις που περνούν από αυτό το φίλτρο μπορεί να δηλώνουν προβλήματα με το ρουλεμάν. Στην κόπωση των υλικών FRP, όπως το πτερύγιο του ανεμοστρόβιλου, παρατηρούνται συχνά μεγάλα σήματα θορύβου. Αν σχεδιαστούν σε σχέση με το πού εμφανίζονται στον κύκλο φόρτωσης, πολλά εμφανίζονται στη μέση του κύκλου όπου το φορτίο αλλάζει ταχύτερα. Αυτό υποδηλώνει ότι μπορεί να υπάρχουν μερικές μικρές περιοχές του πτερυγίου που τρίβονται μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της φόρτωσης. Από την άλλη πλευρά, τα σήματα από ελαττώματα στο τμήμα εμφανίζονται συνήθως κατά τη διάρκεια του αυξανόμενου φορτίου στην κορυφή ή κοντά στην κορυφή.

Στο σημείο αυτό πρέπει να βρεθούν σήματα ανάπτυξης ελαττωμάτων. Τα τρέχοντα συστήματα ΑΕ περιέχουν διατάξεις για μια ηλεκτρονικά ελεγχόμενη **Πύλη Χρόνου Τάσης (Voltage Time Gate)**. Αυτή η πύλη μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε το σύστημα να δέχεται δεδομένα μόνο κατά τη διάρκεια του επιθυμητού τμήματος του κύκλου φορτίου. Σε δοκιμές κόπωσης των πτερυγίων

ανεμογεννητριών, αυτή η πύλη είναι ανοικτή μόνο για το 10% του φορτίου. Αυτή η διαδικασία έχει λειτουργήσει καλά για να φιλτράρει ανεπιθύμητα σήματα. Δεν παρατηρούνται, σχεδόν καθόλου, έγκυρα σήματα ΑΕ, καθώς το φορτίο μειώνεται από 100% σε 90%.

Ένα τελευταίο σχόλιο σχετικά με τα σήματα θορύβου: κανένα ανιχνευόμενο σήμα δεν πρέπει να αφαιρεθεί από ένα σύνολο δεδομένων μέχρις ότου να διερευνηθεί η προέλευσή του. Κάθε ακουστικό σήμα παράγεται από κάποιο μηχανισμό. Σε κάθε πραγματική δοκιμή, πρέπει να γίνει προσπάθεια να εντοπιστεί και να κατανοηθεί αυτός ο μηχανισμός πριν απορριφθούν τα δεδομένα του σήματος. Συχνά τα σήματα μπορούν να αποδοθούν στο θόρυβο μόνο αφού έχουν καταγραφεί οι θέσεις τους.

4.5 | Εγκατάσταση του συστήματος δοκιμών και εκπομπών

Οι δοκιμές ακουστικών εκπομπών εκτελούνται για διάφορους λόγους. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται μόνο οι δοκιμές δομών. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι δομικών δοκιμών:

1. Δοκιμές απόδειξης όπου ο στόχος της δοκιμής είναι να αποδειχθεί ότι η δομή είναι ανθεκτική μέχρι ένα φορτίο απόδειξης.
2. Δοκιμές αποτυχίας όπου ο στόχος είναι να βρεθεί σε ποιο φορτίο η δομή αρχίζει να αποτυγχάνει.
3. Δοκιμές κόπωσης όπου εφαρμόζεται ένα κυκλικό φορτίο στη δομή για να αποκτηθεί κάποια ιδέα για το ποια είναι η διάρκεια ζωής της κατασκευής.

Η παρακολούθηση της ακουστικής εκπομπής μιας δοκιμασίας απόδειξης θα δείξει εάν το φορτίο απόδειξης προκαλεί οποιαδήποτε ζημιά στη δομή. Σε δοκιμές σε βλάβη, είτε στατική είτε κυκλική, η παρακολούθηση ακουστικών εκπομπών μπορεί να δείξει εάν πρόκειται για ξαφνική ή παρατεταμένη αστοχία και αν υπάρχουν αρκετές άλλες περιοχές που αρχίζουν να αποτυγχάνουν όταν συμβαίνει η κύρια αστοχία. Μια τέτοια παρακολούθηση μπορεί επίσης να παράσχει ορισμένες πληροφορίες σχετικά με τους μηχανισμούς της αστοχίας.

Ο σχεδιασμός μιας δοκιμής ακουστικών εκπομπών συνεπάγεται συνενώσεις τόσο στην φυσική διάταξη της δοκιμής όσο και στον τύπο της ανάλυσης που χρησιμοποιείται. Τις περισσότερες φορές, η γεωμετρία και η κατασκευή του δείγματος και η μέθοδος εφαρμογής της δοκιμαστικής τάσης θα απλοποιήσουν τις επιλογές. Άλλοι περιορισμοί περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά του συστήματος ακουστικών εκπομπών, τον αριθμό των καναλιών στο σύστημα και τους διαθέσιμους αισθητήρες. Για λόγους σαφήνειας, διάφορα θέματα δοκιμής ΑΕ θα συζητηθούν ξεχωριστά, παρακάτω, παρόλο που όλα αλληλεπιδρούν σε κάποιο βαθμό σε μια πραγματική δοκιμασία.

4.5.1 | Αξιολόγηση δοκιμών

Το πρώτο βήμα στη διεξαγωγή δοκιμής ακουστικών εκπομπών είναι η μελέτη του σχεδιασμού

και της λειτουργίας της δομής. Ποια είναι η λειτουργία της; Πόσο καλά φαίνεται να έχει σχεδιαστεί για αυτή τη λειτουργία; Ποιο είναι το τεστ που σχεδιάστηκε για να την προσδιορίσει; Η προτεινόμενη φόρτωση αντιγράφει τις τάσεις που παρατηρούνται στην πραγματική χρήση;

Μια δοκιμή ακουστικών εκπομπών μπορεί να ανιχνεύσει μόνο τα αυξανόμενα ελαττώματα εάν ενεργοποιηθούν με τον ίδιο τρόπο κατά τη δοκιμή όπως και κατά την κανονική λειτουργία. Εάν ο μηχανισμός για το φορτίο δοκιμής δεν αντιστοιχεί στην κανονική λειτουργία της δομής, η αξία της δοκιμής είναι αμφισβητήσιμη. Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ο βαθμός φόρτωσης. Εάν η ταχύτητα είναι πολύ γρήγορη, η εκπομπή μπορεί να τελματίσει τα όργανα, ενώ αν είναι πολύ αργή, η δοκιμή μπορεί να διαρκέσει για πάντα. Τελικά ποια είναι τα δομικά υλικά; Είναι γνωστός ο χειριστής της δοκιμής ΑΕ ή όχι; Εάν όχι, υπάρχει διαθέσιμη βιβλιογραφία, που να μας παρέχει πληροφορίες για προηγούμενες δοκιμές ΑΕ στο υλικό; Μήπως υπάρχουν δείγματα που θα μπορούσαν να δοκιμαστούν; Από όλα αυτά τα ερωτήματα, τα πιο σημαντικά είναι η μέθοδος εφαρμογής του φορτίου και ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των υλικών. Μόνο τότε θα πρέπει να καθοριστεί η επιλογή των αισθητήρων και των θέσεων που πρέπει να τοποθετηθούν.

4.5.2 | Ακουστικές ιδιότητες υλικών

Τα δομικά υλικά μπορούν να χωριστούν σε πέντε κατηγορίες: μέταλλα, κεραμικά, γυαλιά, σύνθετα υλικά και ξύλο. Τα σύνθετα υλικά περιλαμβάνουν μέταλλο – μέταλλο με ενισχυμένο πλαστικό υλικό (FRP). Το ξύλο μπορεί να αντιμετωπιστεί ως περίπλοκο και όχι ομοιόμορφο σύνθετο υλικό. Τα μέταλλα είναι γενικά σχεδόν όλα κρυσταλλικά, αποτελούμενα από πολλούς μικρούς κρυσταλλικούς τύπους τυχαίων προσανατολισμών και διαφορετικών συνθέσεων. Σε μακροσκοπική κλίμακα, τα μέταλλα είναι σχετικά ομοιογενή και τα ακουστικά μήκη κύματος για τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται συνήθως στη δοκιμή ΑΕ είναι πολύ μεγαλύτερα από τους κρυσταλλίτες. Συνεπώς, οι ακουστικές ιδιότητες των μετάλλων είναι μέσοι όροι έναντι μεγάλου αριθμού κρυσταλλιτών και θα είναι ανεξάρτητοι από τη συχνότητα και την κατεύθυνση της διάδοσης. Αυτές οι ιδιότητες όγκου, τόσο οι ακουστικές ταχύτητες όσο και οι σύνθετες αντιστάσεις, είναι ομοιογενείς με μία απλή συμπίεση και μία απλή ταχύτητα διάτμησης.

Οι ακουστικές εξασθενήσεις, ωστόσο, προκύπτουν από μεγάλο αριθμό μηχανισμών και δεν μπορούν να χαρακτηριστούν τόσο εύκολα. Σε μια μικροσκοπική κλίμακα, τα κεραμικά είναι παρόμοια με τα μέταλλα καθώς αποτελούνται από τυχαία προσανατολισμένους κρυσταλλίτες. Τα γυαλιά έχουν μια άμορφη δομή με μέση πυκνότητα και συντελεστή σύζευξης μεταξύ των ατόμων. Αν και τα γυαλιά και τα κεραμικά έχουν ογκώδεις ακουστικές ιδιότητες παρόμοιες με τα μέταλλα, διαφέρουν από τα μέταλλα στο ότι και τα δύο είναι αρκετά εύθραυστα και τείνουν να σπάζουν ξαφνικά όταν φτάνουν στο ελαστικό τους όριο. Τα μέταλλα είναι εύκαμπτα σε κάποιο βαθμό και

υφίστανται πλαστική παραμόρφωση πριν εμφανιστεί η θραύση. Τα πλαστικά σπάνια χρησιμοποιούνται από μόνα τους ως κρίσιμα δομικά υλικά. Θα μπορούσαν να ταξινομηθούν ως πολύ εύπλαστα γυαλιά και αποτελούν συνήθως ένα συστατικό των σύνθετων υλικών. Τα σύνθετα υλικά διαφέρουν από τα μέταλλα που αποτελούνται από διάφορα υλικά τα οποία διαχωρίζονται σε ξεχωριστές δομές. Γενικά, αυτές οι υποδομές είναι μεγαλύτερες από τους μεταλλικούς κρυσταλλίτες που έχουν ως αποτέλεσμα ακουστικές ιδιότητες που δεν είναι ομογενείς. Κάθε συστατικό υλικό (ίνα, ρητίνη πλήρωσης κλπ.) έχει διαφορετικές μηχανικές και ακουστικές ιδιότητες και αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες ταχύτητες οι οποίες είναι ανισότροπες και μπορούν να παρουσιάσουν καθορισμένα αποτελέσματα συχνότητας. Μια διαφορά που παρατηρείται συχνά στα σύνθετα υλικά είναι ότι το ελαστικό όριο δεν είναι τόσο απότομο όσο στα κεραμικά ή τα μέταλλα. Τα σύνθετα υλικά μπορούν να βιώσουν μια πολύ μεγάλη χρονική περίοδο μεταξύ του φορτίου όπου φθάνει το ελαστικό όριο και του φορτίου όπου συμβαίνει βλάβη. Σε μερικές δοκιμές σε περύγια ανεμογεννητριών, η σύνθετη μήτρα στο περίβλημα του πτερυγίου άρχισε να μετατρέπεται σε σκόνη πριν υπάρξει δομική αστοχία.

4.5.3 | Ακουστικές συχνότητες εκπομπών

Οι ακουστικές συχνότητες που παράγονται από ακουστικές εκπομπές καλύπτουν ένα ευρύ φασματικό εύρος, από πολύ λιγότερο από ένα Hz σε σεισμούς έως πολύ πάνω από ένα MHz σε μέταλλα και κεραμικά. Συνήθως, η δοκιμή ΑΕ περιορίζεται σε μια διακοπή χαμηλής συχνότητας γύρω στα 20kHz και σε μια διακοπή υψηλής συχνότητας εξαρτώμενη από το εξεταζόμενο υλικό. Η αποκοπή χαμηλής συχνότητας έχει οριστεί ώστε να αποκλείει μεγάλο μέρος του εξωτερικού θορύβου που παράγεται σε μια περιοχή δοκιμής, όπως φωνές, θόρυβος μηχανών και άλλοι περιβαλλοντικά παραγόμενοι ακουστικοί θόρυβοι. Το ανώτατο όριο καθορίζεται συνήθως από το υλικό και τον στόχο της δοκιμής. Χαρακτηριστικά εύρη συχνοτήτων από 100 έως 500kHz χρησιμοποιούνται με κεραμικά και μέταλλα και 20 έως 100kHz με σύνθετα υλικά. Η επιλογή καθορίζεται συχνά από τους διαθέσιμους αισθητήρες. Εάν είναι επιθυμητή η ακρίβεια της θέσης, προτείνονται αισθητήρες υψηλότερης συχνότητας.

4.5.4 | Απλές μετρήσεις εξασθένησης και ταχύτητας

Επειδή οι ακουστικές ιδιότητες ποικίλλουν τόσο με το υλικό όσο και με τη γεωμετρία, συνιστάται η μέτρηση των ακουστικών ταχυτήτων και των εξασθενήσεων στο πραγματικό δείγμα δοκιμής. Η παρακάτω διαδικασία μπορεί να δώσει μια εύλογα ακριβή μέτρηση. Τοποθετήστε δύο από τους αισθητήρες δοκιμής που θα χρησιμοποιηθούν στο δοκίμιο σε μια περιοχή χωρίς συγκολλήσεις, παραλλαγές στο πάχος του δείγματος και άλλα χαρακτηριστικά που θα μπορούσαν να

δημιουργήσουν παρεμβολές στη διαδρομή της ακουστικής μετάδοσης. Η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων πρέπει να είναι περίπου 200mm για σύνθετα υλικά και 1000mm για μέταλλα. Κάνετε πέντε θραύσεις μολυβιού περίπου 5 έως 10cm πίσω από κάθε έναν από τους αισθητήρες και περίπου στη γραμμή που συνδέει τους αισθητήρες. Αυτή η διαδικασία έχει σχεδιαστεί για να δημιουργεί τουλάχιστον παρόμοιες ακουστικές κυματομορφές που διεγείρουν τους δύο αισθητήρες. Το κατώφλι ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις θα πρέπει να είναι περίπου το ίδιο με αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στη δοκιμή. Καταγράψτε τους χρόνους άφιξης και τις απόλυτες ενέργειες για κάθε θραύση μολυβιού. Η ταχύτητα είναι η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων που χωρίζεται από το χρόνο διέλευσης μεταξύ των δύο αισθητήρων και η εξασθένηση είναι δέκα φορές το λογαριθμικό ($\text{ενέργεια}_2 / \text{ενέργεια}_1$) διαιρούμενο με την απόσταση μεταξύ των αισθητήρων.

Οι μέσοι όροι των δύο συνόλων αριθμών πρέπει να παρέχουν εύλογες τιμές για την ταχύτητα και την εξασθένηση για αυτή τη διαδρομή. Η τιμή της ταχύτητας θα έχει πιθανώς μικρότερη διακύμανση από την τιμή εξασθένησης. Για τα σύνθετα υλικά, η ταχύτητα και η εξασθένηση πρέπει να μετριοούνται τουλάχιστον σε τρεις κατευθύνσεις: κατά μήκος του κύριου άξονα ινών, κάθετα προς τον άξονα αυτό και σε 45 μοίρες μεταξύ των δύο. Μια μεταβολή της ταχύτητας μεταξύ των δύο κάθετων αξόνων 10% ή λιγότερο μπορεί να μην προκαλέσει μεγάλη διαφορά στην ακρίβεια της θέσης της πηγής, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μέσος όρος των τριών ταχυτήτων. Ωστόσο, μια διαφορά 30% ή περισσότερο μπορεί να προκαλέσει μια μεγάλη διαφορά και πρέπει να ληφθεί υπόψη ένας υπολογισμός ανισότροπης ταχύτητας. Εάν αυτό είναι απαραίτητο, οι μετρήσεις ταχύτητας πρέπει να γίνονται κάθε δέκα βαθμούς μεταξύ των κάθετων αξόνων. Προγράμματα που μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια ανισότροπη ταχύτητα σε τοποθεσίες μπορεί να συμπεριληφθούν σε κάποιο λογισμικό ενός συστήματος ΑΕ.

4.5.5 | Διάταξη αισθητήρα

Ο στόχος των περισσότερων δομικών δοκιμών ΑΕ είναι η παρακολούθηση των εκπομπών από όλες τις σημαντικές περιοχές όπου θα μπορούσαν να παρουσιαστούν αστοχίες. Είναι σημαντικό να καλυφθούν οι περιοχές ενδιαφέροντος έτσι ώστε όλα τα μέρη της περιοχής να βρίσκονται εντός ακουστικής περιοχής τουλάχιστον τριών αισθητήρων. Όπου οι περιοχές είναι χωρισμένες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλά προγράμματα τοποθεσίας. Όπου είναι επιθυμητό να εμφανίζονται χωριστά οι γειτονικές περιοχές, όπως η άνω και κάτω επιφάνεια ενός πτερυγίου στροβίλου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κοινοί αισθητήρες σε ξεχωριστά προγράμματα. Για να τοποθετηθούν οι αισθητήρες, ξεκινάμε με ένα γενικό μοτίβο αισθητήρα, όπως τα τριγωνικά μπλοκαρίσματα ή τα ορθογώνια σύμπλεξης. Το τριγωνικό μοτίβο καλύπτει κάπως μεγαλύτερη περιοχή ανά αισθητήρα, ενώ το ορθογώνιο σχέδιο έχει μια κάπως αυξημένη πιθανότητα τουλάχιστον τέσσερις αισθητήρες

να χτυπούν με μια εκπομπή, επιθυμητή για ένα υπερπροσδιορισμένο σύνολο δεδομένων. Μόλις οριστεί το γενικό σχέδιο, μπορούν να προσδιοριστούν οι πραγματικές θέσεις από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Όχι μόνο δεν είναι απαραίτητο να συμμορφωθούμε αυστηρά με την αρχική γεωμετρική διάταξη, αλλά είναι χρήσιμο οι πραγματικές θέσεις των αισθητήρων να διαφέρουν κάπως από τα γεωμετρικά σημεία. Όταν χρησιμοποιούμε ένα μη γραμμικό πρόγραμμα ελαχίστων τετραγώνων για εντοπισμό των πηγών, έχοντας αρκετούς αισθητήρες να βρίσκονται σε ευθεία γραμμή τοποθεσίας ευνοούνται φαινόμενα τοπικών σφαλμάτων.

Μια σημαντική παράμετρος για τη ρύθμιση μιας δοκιμής είναι η ακουστική εξασθένηση της επιφάνειας δείγματος. Αυτό θα υποδείξει τον μέγιστο διαχωρισμό αισθητήρων. Η εξασθένηση θα πρέπει να μετράται, εάν η τιμή της δεν είναι ήδη γνωστή. Για ακριβή τοποθεσία με υπολογισμό προσέγγισης, ένα υπερβολικά καθορισμένο σύνολο δεδομένων θα έχει τουλάχιστον τέσσερα **Χτυπήματα Ανά Συμβάν** για δισδιάστατη θέση ή πέντε χτυπήματα ανά συμβάν για τρισδιάστατη. Επομένως, ο χώρος του αισθητήρα πρέπει να είναι αρκετά μικρός ώστε να επιτρέπει στους αισθητήρες, έξω από το άμεσο τρίγωνο γύρω από μια έντονη πηγή, να διεγείρονται. Γενικά, η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο αισθητήρων πρέπει να έχει ακουστική εξασθένηση μεταξύ 30 και 40dB. Επομένως, μια εξασθένηση επιφάνειας 0.1dB/mm θα υποδείκνυε μέγιστο διαχωρισμό 400mm, ενώ μια εξασθένηση 0.01dB/mm θα μπορούσε να έχει διαχωρισμό των μέσων όρων μεταξύ των αισθητήρων κατά μέσο όρο 4 μέτρα. Αυτή η μέγιστη απόσταση είναι ένας στόχος, όχι μια απόλυτη απαίτηση. Οποιαδήποτε μέτρηση εξασθένησης σε ένα σύνθετο υλικό δεν πρέπει να θεωρείται ακριβής για καλύτερη από μία τάξη μεγέθους λόγω των διαφορών στην ακουστική σκέδαση με διαφορετικές δομικές κατασκευές των συστατικών.

4.5.6|ΑΕ – Ρύθμιση συστήματος

Η εγκατάσταση του συστήματος ΑΕ αποτελείται από δύο μέρη, τις παραμέτρους απόκτησης εκπομπών και τα γραφήματα πραγματικού χρόνου. Οι παράμετροι απόκτησης περιλαμβάνουν το κατώφλι ενεργοποίησης, τις παραμέτρους χρονισμού, ενδεχομένως το κέρδος και τις ρυθμίσεις εύρους ζώνης καναλιού και κυματομορφής. Το κατώφλι ενεργοποίησης ρυθμίζεται σε dB πάνω από 1.0 μικροδευτερόλεπτα από τον αισθητήρα. Μπορεί να είναι είτε μια σταθερή τιμή είτε μια σταθερή τιμή πάνω από το επίπεδο θορύβου υποβάθρου, ένα λεγόμενο κυμαινόμενο κατώφλι (floating threshold). Για τις δοκιμές πολλαπλών διαύλων δεν συνιστάται ένα κυμαινόμενο κατώφλι. Είναι αρκετά δύσκολο να πάρουμε σύνολα δεδομένων από χτυπήματα πολλαπλών αισθητήρων που όλοι ενεργοποιούν περίπου το ίδιο σημείο στις κυματομορφές, χωρίς να έχουμε αναπήδηση προς τα πάνω και προς τα κάτω από το κατώφλι κάθε αισθητήρα. Το σταθερό κατώφλι πρέπει να ρυθμιστεί με λίγα dB πάνω από το επίπεδο ενεργοποίησης του επιπέδου θορύβου του δείγματος. Όλοι οι αισθητήρες

θα πρέπει να έχουν το ίδιο επίπεδο ενεργοποίησης.

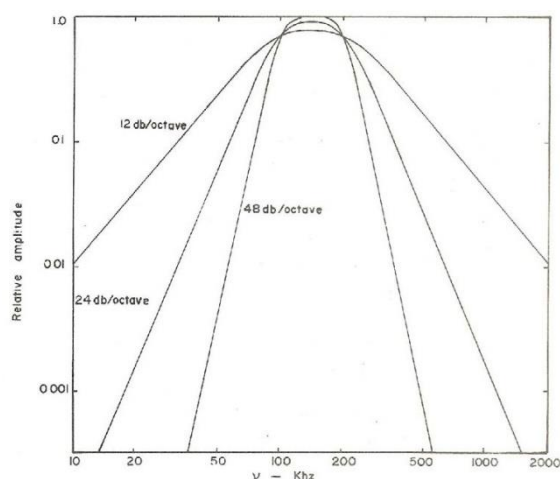
Περιστασιακά κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής, το επίπεδο θορύβου ενός καναλιού θα αυξηθεί στο σημείο της συνεχούς ενεργοποίησης αυτού του καναλιού. Όταν συμβεί αυτό, το επίπεδο ενεργοποίησης του καναλιού μπορεί να αυξηθεί.

Ωστόσο, τα συμβάντα που εντοπίζονται χρησιμοποιώντας αυτό το κανάλι θα έχουν μεγαλύτερο σφάλμα τοποθεσίας. Για ένα γεγονός πολύ υψηλής ενέργειας, η απόλυτη ενεργειακή τιμή ενός συμβάντος που ανιχνεύεται με υψηλότερο επίπεδο ενεργοποίησης σε ένα κανάλι θα είναι πιθανώς ακόμα έγκυρη, παρόλο που η τοποθεσία είναι λιγότερο βέβαιη.

Οι παράμετροι χρονισμού PDT, HDT και HLT σε συστήματα PAC δεν είναι κρίσιμες για τις περισσότερες δοκιμές. Η PDT, η παράμετρος ορισμού κορυφής, συχνά ορίζεται στα 200μsec. Αυτή η παράμετρος βοηθά στη μέτρηση των χρόνων ανύψωσης που συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 50 και 1000μsec για εκπομπή σε δοκιμή FRP. Μία χρήση του χρόνου αύξησης είναι να βοηθήσει φιλτράροντας τα χτυπήματα που έχουν ξεκινήσει λίγο πριν το οπλισμό του καναλιού. Τα χτυπήματα με χρόνους ανόδου μικρότερες από μερικούς κύκλους της κυματομορφής είναι ύποπτα. Η HDT παράμετρος, ο χρόνος ορισμού του χτυπήματος, βοηθά να προσδιοριστεί πότε τελείωσε το χτύπημα. Η σταθερή τιμή των 800μsec φαίνεται λογική. Όταν εμφανιστεί η τελευταία υπέρβαση κατωφλίου ενός χτυπήματος, το σύστημα διατηρεί το χρονικό διάστημα που τρέχει για ένα ακόμη HDT δευτερόλεπτων. Εάν δεν υπάρχει άλλη διέλευση κατωφλίου εκείνη τη στιγμή, το ρολόι διακόπτεται και τα δευτερόλεπτα HDT αφαιρούνται από τη διάρκεια του χτυπήματος. Η HLT παράμετρος, ο χρόνος κλειδώματος του χτυπήματος, καθορίζει πόσο σύντομα μπορεί να επανεκκινήσει το κανάλι μετά την ολοκλήρωση ενός χτυπήματος. Οι περισσότερες δοκιμές με σχετικά χαμηλό ρυθμό αύξησης φορτίου δείχνουν επαναλαμβανόμενα συμβάντα σε ένα κανάλι με διαστήματα τουλάχιστον μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου. Ένα κενό επανασύνδεσης ενός ή δύο χιλιοστών του δευτερολέπτου σπάνια δημιουργήσε ένα αναγνωρισμένο πρόβλημα. Ωστόσο, ένα χάσμα των είκοσι χιλιοστών του δευτερολέπτου θα μπορούσε να ξεκινήσει μια απώλεια στα δεδομένα. Η ρύθμιση **Μέγιστης Διάρκειας (Max Duration)** θα πρέπει να οριστεί υψηλότερη από τη μεγαλύτερη διάρκεια που αναμένεται κατά τη δοκιμή. Για το FRP, μια ρύθμιση των 10 χιλιοστών του δευτερολέπτου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη. Για τα μέταλλα όπως το αλουμίνιο και ο χάλυβας, μπορεί να χρειαστεί μια τιμή 50 χιλιοστών του δευτερολέπτου ή περισσότερο για να συμπεριλάβει το πλήρες μήκος σήματος των επιτυχιών υψηλού πλάτους. Αν μια δοκιμή έχει τυχόν ειδικές απαιτήσεις ανάλυσης σήματος, η προκαταρκτική εγγραφή και η εξέταση των κυματομορφών θα βοηθήσουν στη ρύθμιση των παραμέτρων χρονισμού.

Το μεγαλύτερο μέρος του κέρδους σήματος αισθητήρα βρίσκεται στον προενισχυτή, ο οποίος συχνά είναι σταθερός στα 40dB όταν ο προενισχυτής είναι ενσωματωμένος με τον αισθητήρα. Με

90dB δυναμικού εύρους στο σύστημα, είναι συνήθως επαρκές κέρδος προενισχυτή 40dB. Το πρόσθετο κέρδος στην πλακέτα του υπολογιστή φαίνεται περιττό. Το επιλεγμένο εύρος ζώνης θα πρέπει να εξαλείφει το μεγαλύτερο θόρυβο χώρου και οποιοδήποτε θόρυβο με πραγματικά υψηλή συχνότητα (1MHz +). Τα μεγέθη του άνω και κάτω εύρους ζώνης είναι για τα “γόνατα” της καμπύλης όπως φαίνεται στο Σχήμα 14. Ένα σήμα μεγάλου πλάτους με ενέργεια εκτός αυτού του εύρους ζώνης, θα είναι ικανό να περάσει αισθητή ενέργεια μέσω του φίλτρου.



Σχήμα 14. Ηλεκτρονικά χαρακτηριστικά ζώνης διέλευσης διαφορετικών φίλτρων ως συνάρτηση της συχνότητας.

Οι απαιτούμενες ρυθμίσεις λήψης κυματομορφής είναι ο ρυθμός ψηφιοποίησης και ο αριθμός των λέξεων σε ένα δείγμα. Το ποσοστό ψηφιοποίησης πρέπει να είναι 1 έως 2MHz για τα σύνθετα υλικά και 4 έως 6MHz για τα μέταλλα. Το πρόβλημα με τα υψηλά ποσοστά ψηφιοποίησης είναι ότι χρειάζονται περισσότερες λέξεις για το ίδιο δείγμα μήκους. Οι τρέχοντες πίνακες οκτώ καναλιών PAC περιορίζονται σε δείγματα λέξεων 4.000, τα οποία δίνουν κυματομορφή 4 χιλιοστών σε 1MHz, αλλά μόνο μια κυματομορφή 1,33 χιλιοστών του δευτερολέπτου στα μέγιστα ποσοστά δειγματοληψίας 3MHz. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι το χτύπημα σε ένα σύστημα ΑΕ έχει μήκος εγγραφής μόλις περίπου 30bytes ενώ μια κυματομορφή 4.000 χαρακτήρων έχει μήκος εγγραφής πάνω από 8.000bytes. Αν ανιχνευθεί πολύ χαμηλή εκπομπή πλάτους, τα αρχεία δεδομένων που περιλαμβάνουν κυματομορφές μπορούν γρήγορα να καταστούν απρόσκοπτα μακρά. Για παράδειγμα, ένα αρχείο 5megabyte θα περιέχει περίπου 500 χτυπήματα με 4.000 κυματομορφές λέξης ή έως 200.000 χτυπήματα χωρίς κυματομορφές. Μια δοκιμή κόπωσης μιας σύνθετης δομής κοντά στο σημείο αστοχίας μπορεί να παράγει αυτές τις 200.000 χτυπήματα σε λίγο περισσότερο από ένα λεπτό.

Ένα χρήσιμο χαρακτηριστικό ενός τυπικού συστήματος ΑΕ είναι τα εμπρόσθια φίλτρα. Αυτά μπορεί να είναι ανεκτίμητα σε ένα θορυβώδες περιβάλλον, αποκλείοντας αυτόματα τα χτυπήματα

που δεν εμπίπτουν στα προκαθορισμένα παράθυρα για παραμέτρους σήματος. Οι πιο χρήσιμες παράμετροι φίλτρων που έχουν διαπιστωθεί είναι ο αριθμός των ακουστικών εκπομπών, η διάρκεια του σήματος και ο χρόνος αύξησης για την θέση της πηγής. Μια μέτρηση για ένα χτύπημα είναι συνήθως χωρίς νόημα – μια απλή διαδρομή ενός ακουστικού θορύβου ακίδας πάνω από το όριο. Τέτοια χτυπήματα έχουν χαμηλά πλάτη και διάρκεια. Μπορεί να μην εμφανίζονται πολύ συχνά, αλλά θα κλειδώνουν το κανάλι για όλη τη διάρκεια του HLT για κάθε χτύπημα. Δυστυχώς, ορισμένοι ηλεκτρικοί εξοπλισμοί μπορεί να παράγουν σύντομες, έντονες αιχμές RF. Ένα μικρό οξείδιο σε ένα ομοαξονικό σύνδεσμο ή μια ελαφρά κοπή σε μια θωράκιση καλωδίου μπορεί να επιτρέψει στο καλώδιο να λειτουργεί ως κεραία για τις εισόδους προενισχυτή. Εάν η παρεμβολή επαναληφθεί σε αρμονικές των 60Hz, μπορεί να κλειδώσει εντελώς ένα κανάλι. Ένα φίλτρο εμπρόσθιου άκρου που εξαλείφει όλα τα χτυπήματα με μία μέτρηση μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο και με σχεδόν καμία επίδραση στην ανίχνευση πραγματικών εκπομπών.

Επειδή τα περισσότερα ακουστικά σήματα περιέχουν σημαντικά περισσότερες από τρεις ταλαντώσεις, ένα φίλτρο εμπρόσθιου άκρου που απορρίπτει σήματα με διάρκειες μικρότερες από τρία μήκη κύματος της κυρίαρχης συχνότητας που παρατηρείται στη δοκιμή μπορεί να αφαιρέσει άλλες μορφές ηλεκτρικού θορύβου που είναι σύντομες μεταβατικές. Το φιλτράρισμα σημάτων για λιγότερο από 50μsec σε δοκιμές FRP λειτούργησε πολύ καλά. Το φιλτράρισμα σημάτων με χρόνους ανύψωσης λιγότερους από μερικά μήκη κύματος κατά τη διάρκεια των δοκιμών θέσης μπορεί να αφαιρέσει τα σήματα που έχουν ξεκινήσει πριν την επαναφορά του ενεργοποιητή καναλιού. Αυτά τα σήματα, ενώ είναι πραγματικές εκπομπές, έχουν χρόνους άφιξης που θα συγχέουν τους αλγόριθμους θέσης. Ενώ τέτοια φίλτρα είναι χρήσιμα, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται συγκρατημένα.

Μια βασική παράμετρος για κάθε δοκιμή φορτίου είναι ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο προς το φορτίο. Σε περίπτωση άμεσης κίνησης υδραυλικού φορτίου, ο υδραυλικός ελεγκτής απαιτεί ένα σήμα από μια κυψέλη φορτίου. Αυτό μπορεί ή όχι να είναι εύκολα διαθέσιμο στο σύστημα ακουστικών εκπομπών. Όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο σήμα φορτίου, όπως σε δοκιμή κόπωσης συντονισμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σήμα από ένα μετρητή τάσης. Αυτός ο μετρητής πρέπει να βρίσκεται σε μια περιοχή όπου η καταπόνηση είναι μια γραμμική συνάρτηση του φορτίου. Ο μετρητής μπορεί να βαθμονομηθεί εφαρμόζοντας ένα στατικό φορτίο στη δομή.

Σε δοκιμασία απόδειξης ή δοκιμή φορτίου προς αποτυχία, το επίπεδο θορύβου υποβάθρου είναι συνήθως σταθερό και ανεξάρτητο από το φορτίο. Η μοναδική ανάγκη φιλτραρίσματος εδώ είναι να ρυθμιστεί το κατώφλι σκανδαλισμού λίγα dB πάνω από το επίπεδο θορύβου. Ωστόσο, στις δοκιμές κόπωσης, μπορεί να δημιουργηθούν μεγάλες ποσότητες θορύβου όπου το φορτίο είναι χαμηλό αλλά ο ρυθμός μεταβολής του φορτίου είναι υψηλός. Οι περισσότερες δομικές βλάβες που παράγονται από το φορτίο πρέπει να εμφανίζονται εντός του 10% του μέγιστου φορτίου. Άλλες εκπομπές μπορεί

να δημιουργηθούν με τρίψιμο της τριβής στο δείγμα και δεν έχουν καμία σχέση με την πρόκληση ζημιάς. Αυτές μπορούν να φιλτραριστούν θέτοντας το σύστημα σε λειτουργία πύλης τάσης χρόνου χρησιμοποιώντας το σήμα φορτίου ως αναφορά. Χρησιμοποιώντας την πύλη τάσης χρόνου για να σταματήσει η λήψη του σήματος, εκτός αν το φορτίο είναι πάνω από το 90% της μέγιστης τιμής του, θα αγνοηθεί ο μεγαλύτερος θόρυβος λόγω τριβής. Ως απόδειξη της προϋπόθεσης, σχεδόν όλες οι εκπομπές συμβαίνουν στην ανύψωση ή στο φορτίο αιχμής. Σχεδόν τίποτα δεν παρατηρείται όταν το φορτίο πέφτει από το 100% στο 90% του μέγιστου. Σημείο ενδιαφέροντος και προσοχής είναι ότι σε μια δοκιμή κόπωσης συντονισμού, το σήμα που οδηγεί την πύλη χρόνου τάσης πρέπει να παρέχεται από την περιοχή του δείγματος όπου αναμένεται βλάβη. Το σήμα μετατόπισης από μια περιοχή μακριά από το φορτίο οδήγησης μπορεί να έχει μια φάση που είναι μετρήσιμα διαφορετική από αυτή του φορτίου οδήγησης. Η άλλη εναλλακτική λύση είναι να φιλτραριστούν μόνο τα σήματα που συμβαίνουν κοντά στη μέγιστη αλλαγή στο φορτίο οδήγησης.

4.5.7|ΑΕ – Ρύθμιση συστήματος για την τοποθεσία

Η λειτουργία του υλικού (hardware) στα περισσότερα συστήματα ΑΕ θα είναι παρόμοια. Ωστόσο, τα προγράμματα τοποθεσίας και οι συνοδευτικές διαδικασίες εγκατάστασης υλικού μπορεί να διαφέρουν μεταξύ των κατασκευαστών. Στην παρούσα εργασία αναφερόμαστε μόνο σε συστήματα PAC. Θα περιγράψουμε λεπτομερώς τις λειτουργίες διαφορετικών παραμέτρων και διαδικασιών ώστε οι χρήστες άλλων συστημάτων να μπορούν να αναγνωρίσουν παρόμοιες παραμέτρους στα συστήματά τους.

Ο πίνακας ρύθμισης θέσης επιτρέπει τον προσδιορισμό διαφορετικών προγραμμάτων θέσης για διαφορετικές ομάδες αισθητήρων. Τα προγράμματα περιλαμβάνουν: Θέση Ζώνης– Zonal Location (όλες οι επισκέψεις για κάθε αισθητήρα), Γραμμική Θέση – Linear Location (αισθητήρες σε γραμμή μόνο), Θέση επιπέδου διάταξης– Planer Location (2 διαστάσεις με ισοτροπικές ή ανισότροπες ακουστικές ταχύτητες), Ογκομετρική θέση – Volumetric Location (τριδιάστατα) και Κυλινδρική και Σφαιρική διάταξη– Cylindrical and Spherical Location (επιφάνειες). Επίσης, μπορεί να διατίθενται από τον κατασκευαστή και άλλες ειδικές γεωμετρίες σε μια προσαρμοσμένη βάση.

Με οποιοδήποτε λογισμικό τοποθεσίας, το πρώτο πρόβλημα είναι να οριστεί ένα **Γεγονός Ακουστικής Εκπομπής – Acoustic Emission Event**. Τα χτυπήματα φτάνουν στον υπολογιστή με τιμή χρόνου άφιξης για κάθε χτύπημα. Ο υπολογιστής αποθηκεύει αυτά τα χτυπήματα, συμπεριλαμβανομένων όλων των μετρημένων παραμέτρων, με τη σειρά των χρόνων άφιξης τους στον αισθητήρα. Ένας ορισμός εργασίας ενός γεγονότος ακουστικής εκπομπής για ένα μηχανογραφικό σύστημα είναι μια ακολουθία από χτυπήματα που προκαλούνται από το ίδιο ακουστικό κύμα. Αυτά όλα θα συμβούν μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που

καθορίζεται από τη γεωμετρία της συστοιχίας αισθητήρων και τις ακουστικές ιδιότητες της δομής. Το σύστημα υπολογιστή ή το εξωτερικό πρόγραμμα καθορίζει ποια χτυπήματα συμπεριλαμβάνονται χρησιμοποιώντας ένα **Παράθυρο Συμβάντος – Event Window**, ένα χρονικό διάστημα το οποίο πρέπει να περιλαμβάνει όλα τα έγκυρα χτυπήματα και το οποίο πρέπει να οριστεί από τον χειριστή ή τον αναλυτή. Ενώ η ακριβής τιμή του παραθύρου συμβάντος δεν είναι κρίσιμη, θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να δέχεται όλους τους αισθητήρες που έχουν πληγεί από το ίδιο κύμα και αρκετά μικρή ώστε να αποκλείει τα δευτερεύοντα χτυπήματα στον ίδιο αισθητήρα, είτε ένα κύμα που αντανακλάται από ένα όριο είτε μια επαν – ενεργοποίηση του ίδιου του αισθητήρα στον θόρυβο του περιβάλλοντος.

Στο λογισμικό AEwin, τρεις παράμετροι συνδέονται με το παράθυρο του συμβάντος: η Τιμή Ορισμού Συμβάντος – **Event Definition Value**, η Τιμή Κλειδώματος Συμβάντος – **Event Lockout Value** και η τιμή **Overcal για Μέγιστη Χρονική Διάρκεια**. Αυτές οι τρεις τιμές χρησιμοποιούνται κατά καιρούς από το πρόγραμμα, αλλά στο AEwin θα εισαχθούν είτε ως απόσταση είτε ως χρόνος, ανάλογα με το αν η ρουτίνα τοποθεσίας έχει ρυθμιστεί με μονάδες απόστασης ή ώρας. Εάν η τοποθεσία έχει ρυθμιστεί χρησιμοποιώντας μονάδες απόστασης (π.χ. mm), η τιμή ορισμού συμβάντος είναι η απόσταση μεταξύ των δύο πλέον διαχωρισμένων αισθητήρων που αναμένεται να καταχωρήσουν το ίδιο σήμα. Η απόσταση μετατρέπεται σε μια τιμή χρόνου στον υπολογιστή διαιρώντας με την ακουστική ταχύτητα. Το ακριβές σημείο ενεργοποίησης μιας κυματομορφής είναι αβέβαιο και αυτή η αβεβαιότητα αυξάνεται καθώς το κύμα προωθείται από την προέλευσή του. Μπορεί να γίνει προσαρμογή για μια τέτοια αβεβαιότητα με την προσθήκη μιας Overcal τιμής που θα προστεθεί στην τιμή ορισμού συμβάντος. Η τιμή κλειδώμα συμβάντος, όπως και η τιμή ορισμού συμβάντος, ξεκινά όταν ενεργοποιείται στο πρώτο χτύπημα ενός συμβάντος και ορίζει σε πόσο χρόνο μπορεί να ξεκινήσει το επόμενο συμβάν.

Αυτές οι τιμές ορίζουν ένα συμβάν για το πρόγραμμα τοποθεσίας. Δεν επηρεάζουν την ανίχνευση ή την αποθήκευση των δεδομένων επίσκεψης. Στην περίπτωση της ανάλυσης μετά την δοκιμή, ίσως είναι εξίσου εύκολο να εξετάσουμε μέσα από την ανάγνωση των δεδομένων χτυπήματος και να επιλέξουμε ένα παράθυρο συμβάντος με βάση τα δεδομένα αυτά.

Ο χρόνος πτήσης του σήματος χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του χρονικού πλαισίου για την ομάδα συμβάντων. Είναι προτιμότερο να σκεφτούμε το παράθυρο συμβάντος ως προς το χρόνο, για όσο τα δεδομένα AE έχουν ενδιαφέρουσα αξία.

Ωστόσο, μπορεί κανείς να θεωρήσει την τιμή ορισμού συμβάντος ως τη διαφορά μεταξύ των δύο πλέον απομακρυσμένων αισθητήρων που κάποιος θέλει να συμπεριληφθούν στο σύνολο δεδομένων. Επειδή τα ηλεκτρονικά ανιχνευθέντα δεδομένα έχουν πάντοτε αβεβαιότητα σε αυτό, η τιμή Overcal έχει ρυθμιστεί ώστε να περιλαμβάνει τα δεδομένα επισκεψιμότητας με κάπως

μεγαλύτερους χρόνους διέλευσης. Έτσι, το πραγματικό χρονικό παράθυρο που εισάγεται στον υπολογιστή είναι το άθροισμα των τιμών ορισμού συμβάντος και τιμές Overcal διαιρούμενης με την ακουστική ταχύτητα. Αυτό δεν λαμβάνει υπόψη τις ανισότροπες ταχύτητες, τους διαφορετικούς τρόπους διάδοσης ή τα δομικά στοιχεία με διαφορετικές ταχύτητες (ενισχυμένα με άνθρακα σφαιρικά καπάκια). Η τιμή κλειδώματος συμβάντος είναι επίσης ένας χρόνος που χρησιμοποιείται από τον υπολογιστή και υπολογίζεται επίσης διαιρώντας την απόσταση που εισάγεται με την ταχύτητα. Είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ της μέτρησης μιας εκπομπής και της όπλισης αυτού του καναλιού για το επόμενο. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων συνήθως δεν είναι κρίσιμες, αλλά ακατάλληλες τιμές μπορούν να διαστρεβλώσουν το σύνολο δεδομένων χάνοντας επόμενα χτυπήματα ή ενδεχόμενες ενεργοποιήσεις σε ανακλώμενα κύματα.

Μια άλλη καταχώρηση στον πίνακα θέσης που μπορεί να είναι χρήσιμη είναι τα **Χτυπήματα ανά Γεγονός – Hits per Event**, ιδιαίτερα όταν υπάρχει διαθέσιμος μεγάλος όγκος δεδομένων. Ο υπολογισμός θέσης για περισσότερους από δύο αισθητήρες είναι μια αριθμητική προσέγγιση που λειτουργεί καλύτερα με ένα σύνολο δεδομένων που έχει καθοριστεί υπερβολικά και θα περιγραφεί λεπτομερέστερα στη συνέχεια. Αυτή η παράμετρος καθορίζει τον αριθμό των χτυπημάτων που θα συμπεριληφθούν στον υπολογισμό θέσης. Για ένα επίπεδο, είναι απαραίτητα τρία χτυπήματα για την τοποθεσία καθώς υπάρχουν τρεις άγνωστοι, δηλαδή οι δύο συντεταγμένες της πηγής και ο χρόνος εκκίνησης όταν ξεκίνησε το συμβάν. Για ένα επίπεδο, τα καλύτερα σύνολα δεδομένων θα περιέχουν 4 έως 6 χτυπήματα. Τρία χτυπήματα οδηγούν σε έναν λεγόμενο ακριβή υπολογισμό, ο οποίος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακριβή ενεργοποίηση και στις τρεις κυματομορφές – (αρκεί ένα κακό σημείο και η απάντηση δεν έχει νόημα). Περισσότερο από έξι χτυπήματα περιλαμβάνουν συχνά ακουστικά κύματα που έχουν ταξιδέψει μακριά και των οποίων οι κυματομορφές έχουν εξελιχθεί πέρα από τον εύκολο ορισμό ενός σημείου ενεργοποίησης.

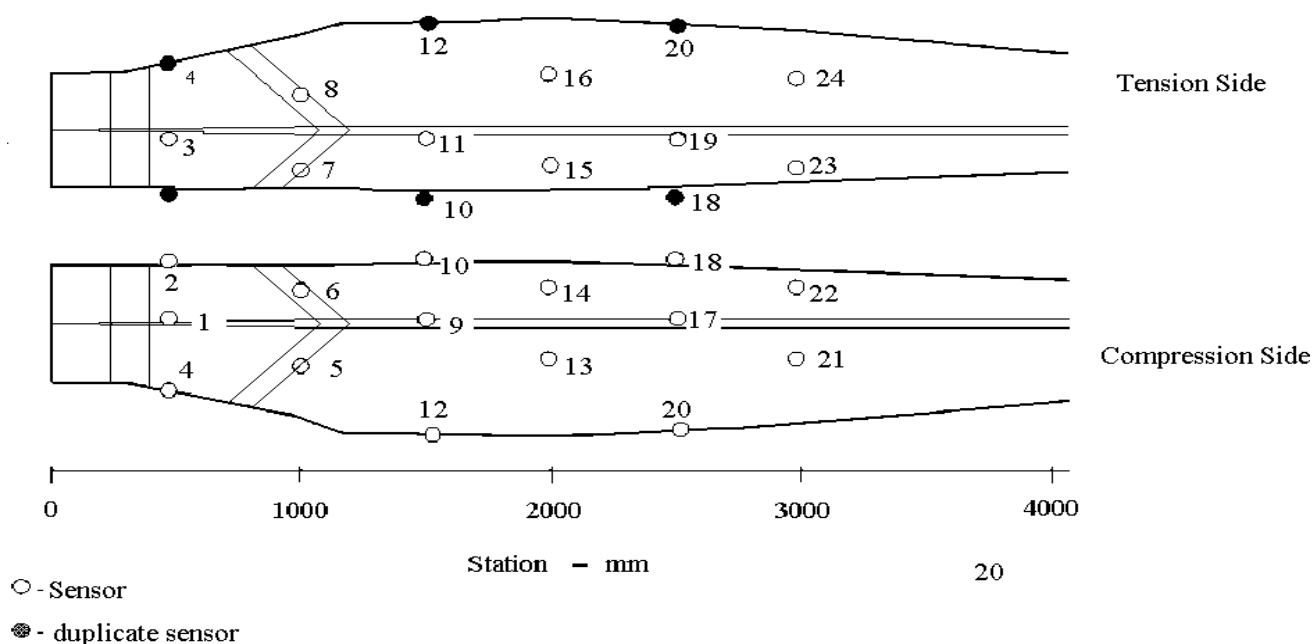
Οι υπολογισμοί με ένα υπερπροσδιορισμένο σύνολο δεδομένων παρέχουν την καλύτερη δυνατή προσαρμογή σε αυτό το σύνολο δεδομένων. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να θεωρηθεί ως η πιο πιθανή θέση της πηγής για αυτό το σύνολο δεδομένων. Η αλλαγή του αριθμού των αισθητήρων που περιλαμβάνονται στους υπολογισμούς θα έχει ως αποτέλεσμα μικρές αλλαγές στην απάντηση που δίνεται από τον υπολογισμό. Η τελευταία καταχώρηση στον πίνακα θέσης του AEWin είναι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό. Αυτό δεν έχει μεγάλη σημασία καθώς οι υπολογισμοί με δεδομένα AE θα φθάσουν το σημείο ελάχιστης απόκλισης από τα πειραματικά δεδομένα σε 5 έως 10 επαναλήψεις. Ή θα συγκλίνουν ή θα αποκλίνουν.

4.5.8| Παράδειγμα εγκατάστασης

Ο καλύτερος τρόπος για να παρουσιαστεί μια ρύθμιση δοκιμής ΑΕ είναι να μεταφερθούν σε χαρτί, τα βήματα που απαιτούνται για μια πιθανή ρύθμιση. Το δείγμα θα είναι ένα πτερύγιο ανεμογεννήτριας FRP 9 μέτρων. Θα θεωρηθούν οι ταχύτητες κατά μήκος του πτερυγίου 3,0mm/μsec και κατά μήκος της χορδής 2,4mm/μsec. Για αυτό το παράδειγμα, η μεταβολή ταχύτητας με γωνία θα είναι η προεπιλογή στο πρόγραμμα ανισότροπων 2D του AWin. Θα χρησιμοποιηθούν χωριστοί υπολογισμοί θέσης για την πλευρά συμπίεσης και τάσης του πτερυγίου. Θα υποτεθεί ότι η πλειονότητα των ζημιών που παράγονται στο πτερύγιο θα λάβουν χώρα μεταξύ 500 και 3.500mm, όπως φαίνεται στις περισσότερες δοκιμές πτερυγίων 9 μέτρων. Η διάταξη του αισθητήρα, που φαίνεται στο Σχήμα 15, αποτελείται από 6 σειρές από 4 αισθητήρες που κάθε ένας περιβάλλει το πτερύγιο κάθε 500mm κατά μήκος του.

Η πρώτη σειρά βρίσκεται στη χορδή σε απόσταση 500mm από τη βάση. Για λόγους συνέπειας, η ακολουθία αρίθμησης των αισθητήρων αρχίζει με το #1 τοποθετημένο στην κορυφή του διατμητικού ιστού σε σταθμό 500mm στην πλευρά συμπίεσης του πτερυγίου. Οι αισθητήρες τοποθετούνται στη συνέχεια σε σειρές και αριθμούνται, δεξιόστροφα, κοιτάζοντας από την άκρη του πτερυγίου. Η 2η, 4η και 6η σειρά περιστρέφονται 45 μοίρες από την κορυφή του ιστού διατμήσεως. Οι μετρήσεις χορδών για τους αισθητήρες στις δύο πλευρές αναφέρονται στις θέσεις του άνω και του κάτω μέρους του ιστού διάτμησης. Η χρησιμοποιούμενη σύμβαση είναι ότι η μέτρηση είναι θετική προς την εμπρόσθια ακμή και αρνητική προς την οπίσθια ακμή και στις δύο πλευρές του πτερυγίου. Οι αισθητήρες μπροστά τοποθετούνται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο κέντρο της πρόσθιας ακμής και εκείνοι στο πίσω μέρος τοποθετούνται είτε στο πάνω είτε στο κάτω μέρος της επιφάνειας του πίσω άκρου. Οι μετρήσεις των θέσεων των πίσω άκρων των αισθητήρων πρέπει να είναι είτε στο κέντρο της επιφάνειας του αισθητήρα είτε στο σημείο της άλλης πλευράς του πτερυγίου ακριβώς κάτω από το κέντρο του αισθητήρα. Όλες οι θέσεις των αισθητήρων θα πρέπει να μετρηθούν στα πλησιέστερα mm, αν είναι δυνατόν. Τα πραγματικά σφάλματα λίγων χιλιοστών συνήθως δεν είναι σημαντικά για τη συνολική δοκιμή.

Τώρα μπορούν να ρυθμιστούν τα προγράμματα τοποθεσίας. Η πλευρά συμπίεσης θα χρησιμοποιεί τους αισθητήρες 1, 2, 4, 5, 8, 9, 10, 12, 13, 16, 17, 18, 20, 21 και 24. Η πλευρά τάσης θα χρησιμοποιεί τους αισθητήρες 2, , 7, 10, 11, 12, 14, 15, 18, 19, 20, 22 και 23. Εκτός αν ο ιστός διάτμησης είναι κάθετος και στις δύο επιφάνειες, οι αισθητήρες πρόσθιου και τελικού άκρου μπορεί να έχουν ελαφρώς διαφορετικές τιμές θέσης στις δύο επιφάνειες.



Σχήμα 15. Διάγραμμα διάταξης 24 αισθητήρων στο πτερύγιο ανεμογεννήτριας BSDS

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα AEWin, ορίζουμε δύο ομάδες καναλιών – συμπίεσης και έντασης – και εισάγουμε τους αριθμούς αισθητήρων των ομάδων στον υπολογιστή. Ορίζουμε τον τύπο θέσης για κάθε ομάδα σε 2D ανισότροπο και στη συνέχεια ορίζουμε όλα τα σημεία για κάθε ομάδα. Αυτό επιτρέπει στους αισθητήρες ακμής να χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς και των δύο πλευρών. Στη συνέχεια, ορίζουμε την παράμετρο HLT σε 0,0 και για τις δύο ομάδες. Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη εμφάνιση χτυπημάτων και για τις δύο ομάδες τοποθεσιών. Έπειτα εισάγουμε τις θέσεις των αισθητήρων. Παρατηρούμε ότι στο λογισμικό AEWin, οι δύο ταχύτητες V_x και V_y εισάγονται σε διαφορετικούς πίνακες: ο V_x στον γενικό πίνακα ρύθμισης τοποθεσίας και ο V_y στον πίνακα προβολής αισθητήρων.

Το επόμενο βήμα είναι να ρυθμιστούν οι γραφικές παραστάσεις σε πραγματικό χρόνο στον υπολογιστή. Για μια δοκιμή με ένα μόνο φορτίο, ίσως είναι πιο χρήσιμο ένα γράφημα της αθροιστικής μέτρησης της AE ως συνάρτηση του φορτίου. Στη συνέχεια ακολουθούν γραφήματα θέσης και για τις δύο πλευρές, άθροιση απόλυτης ενέργειας για γραφικά εντοπισμένων συμβάντων και για τις δύο πλευρές, τα γεγονότα έναντι του πλάτους κορυφής. Σε μια δοκιμασία κόπωσης, μια γραφική παράσταση σημείων διάσπασης της παραμετρικής τάσης για κάθε χτύπημα έναντι του χρόνου μαζί με ένα παρόμοιο γράφημα για μετρήσεις ανά κτύπημα μπορεί να είναι χρήσιμη τόσο για

να δούμε πόσο καλά λειτουργεί ένα φίλτρο φορτίου όσο και για να παρακολουθεί το συνολικό ποσοστό εκπομπών. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι ένα σύστημα ΑΕ μπορεί να παράγει ένα τεράστιο αριθμό γραφημάτων αλλά κάθε ένα από αυτά τα γραφήματα χρειάζεται μνήμη και υπολογιστική ισχύ. Είναι πολύ πιθανό να επιβραδυνθεί σημαντικά το σύστημα εγκαθιστώντας πάρα πολλά γραφήματα. Οι σύγχρονοι υπολογιστές είναι αρκετά γρήγοροι, αλλά πάρα πολλά ταυτόχρονα γραφήματα μπορούν να αφήσουν το σύστημα πολύ πίσω από τη δοκιμή σε πραγματικό χρόνο. Συντηρητικά, μια δωδεκάδα γραφικών πραγματικού χρόνου θα πρέπει να αποτελούν το μέγιστο αριθμό. Πολλά ακόμη γραφήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την ανάλυση μετά την εξέταση, αλλά με κόστος ενός ταχέως αυξανόμενου χρόνου επανάληψης ανά αρχείο.

Τέλος, υπάρχει το πρόβλημα των πολλαπλών αρχείων. Το λογισμικό AEWin επιτρέπει τον προσδιορισμό του μέγιστου μεγέθους αρχείου για αρχεία που είναι ξεχωριστά ή ως συνέχεια. Ένα μέγεθος αρχείου 5–10 megabyte είναι κατάλληλο για ανάλυση και μεταφορά, ενώ αρχεία μεγαλύτερα από μερικές εκατοντάδες megabytes μπορεί να γίνουν αρκετά περίεργα. Τα χωριστά αρχεία είναι ευκολότερα στον χειρισμό από τα συνεχή και επίσης μπορούν εύκολα να ομαδοποιηθούν με τη χρήση ενός βοηθητικού προγράμματος ώστε να δημιουργηθεί ένα μεγάλο αρχείο όταν χρειάζεται. Εάν τα αρχεία καταγράφονται σε συνεχή λειτουργία, η βάση συνεχιζόμενου χρόνου μπορεί να κάνει τα μεμονωμένα αρχεία πιο δύσκολα για ανάλυση.

4.6 | Τοποθεσία πηγής

Η κύρια λειτουργία μιας δοκιμής ακουστικών εκπομπών είναι να εντοπιστεί η ανάπτυξη ελαττωμάτων σε μια δομή καθώς υφίσταται μια αυξανόμενη ή συνεχιζόμενη τάση. Στην ιδανική περίπτωση, η δοκιμή θα πρέπει να εντοπίσει τα ελαττώματα και να περιγράψει τον ρυθμό ανάπτυξης καθώς αυξάνεται το επίπεδο πίεσης ή η κατάσταση της τάσης συνεχίζεται με το χρόνο. Στις απλές δομές ένας μόνο αισθητήρας ΑΕ μπορεί να αναφέρει πως συμπεριφέρεται η ίδια η δομή. Ωστόσο, σύνθετες δομές θα έχουν πολλές πιθανές περιοχές αστοχιών. Μια τέτοια δομή, όταν είναι μεγάλη ή κατασκευασμένη από πολλαπλά υλικά, παρακολουθείται καλύτερα με πολλαπλούς αισθητήρες. Έτσι, το μεγαλύτερο μέρος της ανάπτυξης στον τομέα της ΑΕ κατά τα τελευταία 40 χρόνια υπήρξε στο σχεδιασμό συστημάτων πολλαπλών αισθητήρων και στις τεχνικές ανάλυσης τους. Η εστίαση αυτών των τεχνικών ήταν η θέση των πηγών ακουστικών εκπομπών σε μεγάλες κατασκευές. Ξεκινώντας από την πρόωπη εργασία των Greenetal. στην Εταιρεία AeroJet, πρωταρχική δομή ενδιαφέροντος ήταν τα δοχεία πίεσης. Τώρα, σχεδόν οποιαδήποτε δομή που βιώνει αλλαγές καταπόνησης σε κανονική λειτουργία είναι υποψήφια για ακουστικές δοκιμές και οι περισσότερες από αυτές τις δοκιμές περιλαμβάνουν την τοποθεσία πηγής.

Η βασική ιδέα στη θέση πηγής είναι να καλύψει μια επιφάνεια με ένα δίκτυο αισθητήρων. Αν κάποιος μπορεί να καθορίσει τους χρόνους άφιξης ενός σήματος εκπομπής σε αρκετούς αισθητήρες, τότε γνωρίζοντας την ακουστική ταχύτητα, είναι δυνατόν να τριγωνιστεί πίσω στη θέση της πηγής αυτής της εκπομπής. Η ιδέα είναι απλή, αλλά έχουν ήδη γίνει αρκετές υποθέσεις. Καταρχήν, υποθέτουμε ένα ισοτροπικό υλικό ώστε να υπάρχει μία ακουστική ταχύτητα. Δεύτερον, η βραχύτερη διαδρομή μεταξύ ενός ελαττώματος και ενός αισθητήρα μπορεί να προσδιοριστεί σε ολόκληρη τη δομή. Τρίτον, το ηχητικό σήμα είναι απλό και μπορεί να μετρηθεί ο ακριβής χρόνος άφιξής του. Και τέταρτον, το προκύπτον σύνολο μη γραμμικών εξισώσεων μπορεί να λυθεί εύκολα.

Αν υποθέσουμε ότι τα υλικά είναι ισότροπα μπορεί να φαίνονται ασφαλή για ένα μεταλλικό δοχείο πίεσης. Ωστόσο, μπορεί να μην είναι έγκυρες οι μοναδικές ακουστικές διαδρομές με γνωστές ταχύτητες. Η μικρότερη απόσταση ανάμεσα σε ένα ελάττωμα και έναν αισθητήρα μπορεί να περάσει από ή γύρω από τις διεισδύσεις των δοχείων ή τις συγκολλήσεις. Οι διακυμάνσεις στην ακουστική διαδρομή μπορεί να είναι μικρές αλλά είναι πραγματικές. Η ακουστική ταχύτητα σε μια πλάκα δεν είναι σταθερή αλλά είναι συνάρτηση της συχνότητας και του πάχους της πλάκας. Η γεωμετρία και η ταχύτητα θραύσης του ελαττώματος είναι άγνωστες. Μπορεί να υπάρχουν αρκετές συχνότητες και άγνωστες πολώσεις στο διεγερμένο ακουστικό κύμα. Καθώς ταξιδεύει προς τον αισθητήρα, τα εξαρτήματα συχνότητας και πόλωσης ενός ακουστικού κύματος μπορούν να αλλάξουν με την απόσταση. Το αποτέλεσμα είναι ότι οι κυματομορφές που εντοπίζονται στους ξεχωριστούς αισθητήρες μπορεί να είναι αρκετά διαφορετικές μεταξύ τους. Το εύρος του κύματος που αρχικά διασχίζει το επίπεδο σκανδάλης των ηλεκτρονικών δεν θα εμφανίζεται πάντα στο ίδιο τμήμα της κυματομορφής σε διαφορετικούς αισθητήρες. Θα υπάρξουν παραλλαγές στον χρόνο ενεργοποίησης κάθε αισθητήρα από αυτό που θα προβλεφθεί από οποιοδήποτε μοντέλο χρησιμοποιείται στην ανάλυση.

Οι εξισώσεις για την απόσταση μεταξύ δύο σημείων σε μια επιφάνεια είναι μη γραμμικές ακόμη και για ένα ισοπεδωμένο επίπεδο. Για να εντοπίσετε ένα σημείο σε ένα επίπεδο έχουμε δύο άγνωστους, τις συντεταγμένες του σημείου. Σε ένα πείραμα ακουστικής εκπομπής, καταγράφονται οι χρόνοι άφιξης του ακουστικού κύματος στους αισθητήρες, αλλά για να γνωρίζουμε τις αποστάσεις, ο χρόνος έναρξης του κύματος πρέπει να είναι γνωστός. Επομένως, για να τριγωνιστεί η θέση μιας πηγής ακουστικής εκπομπής, έχουμε τρεις αγνώστους, τις δύο συντεταγμένες της πηγής στο επίπεδο και τον χρόνο που συνέβη η εκπομπή που παράγεται από την πηγή αυτή. Ένα πρόβλημα με σύνολα μη γραμμικών εξισώσεων είναι ότι υπάρχουν τουλάχιστον αρκετές λύσεις στο σύνολο των εξισώσεων (εάν υπάρχει κάποια λύση). Τα πραγματικά πειραματικά δεδομένα είναι γεμάτα με μικρές αβεβαιότητες.

Η ενεργοποίηση ελαφρώς διαφορετικών τμημάτων της μορφής κυμάτων σε διάφορους

αισθητήρες καθώς και μικρές διαφορές διαδρομής από αυτές που προβλέπονται από το μοντέλο μπορούν να δημιουργήσουν σύνολα δεδομένων που δεν έχουν λύσεις. Τέλος, αναλυτικές λύσεις ακόμα και σε ένα ακριβές σύνολο μη γραμμικών εξισώσεων δεν εμφανίζονται εύκολα, αν βέβαια υπάρχουν καν.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα με την τοποθεσία πηγής ΑΕ είναι ότι πολλές δομές έχουν πολύπλοκες γεωμετρίες και μπορεί να έχουν πολλαπλές ακουστικές διαδρομές μεταξύ περιοχών. Κάποιος μπορεί να πάρει αναλυτικές λύσεις για τη μικρότερη διαδρομή μεταξύ δύο σημείων για τα επίπεδα και τις σφαιρικές επιφάνειες. Μπορούμε επίσης να συνδυάσουμε αυτούς τους δύο τύπους επιφανειών σε κυλίνδρους με ημισφαιρικά τελικά σώματα. Πρέπει να προσεγγίσουμε πέρα από αυτά τα σχήματα. Οι μεγάλες επιφάνειες που έχουν σταδιακές καμπύλες μπορούν να προσεγγιστούν από επίπεδα.

Ένα φτερό αεροσκάφους ή ένα πτερύγιο ανεμογεννήτριας μπορεί να προσεγγιστούν είτε με δύο ανεξάρτητες επιφάνειες είτε με μία επιφάνεια διπλωμένη στη μέση. Οι μεγάλες καμπύλες επιφάνειες μπορούν να προσεγγιστούν από μια ομάδα ενωμένων επιπέδων. Παρά τα προβλήματα αυτά, η θέση πηγής ΑΕ ως σημαντικό πλεονέκτημα στην ακριβή μοντελοποίηση μιας επιφάνειας, συχνά δεν είναι απαραίτητη. Ακόμη και αν το μοντέλο απέχει πολύ από την προσέγγιση ένα προς ένα της πραγματικής επιφάνειας, όλες οι εκπομπές από ένα σημείο στην επιφάνεια θα πρέπει να βρίσκονται σε μία θέση στο μοντέλο. Ενώ η θέση στο μοντέλο μπορεί να είναι κάποια απόσταση από το αντίστοιχο σημείο της δομής, όλες οι εκπομπές που εντοπίστηκαν στο σημείο αυτό προέκυψαν από την ίδια θέση στη δομή. Έτσι, μια ομάδα ή μια ομάδα σημείων στο μοντέλο αντιστοιχεί σε μια πραγματική θέση στη δομή. Ενώ οι θεωρητικές και υπολογισμένες θέσεις μπορεί να διαφέρουν, το γεγονός ότι υπάρχει ένα ενεργό ελάττωμα σε ένα σημείο της δομής είναι πραγματικό. Εάν είναι απαραίτητη η ακριβής θέση του ελαττώματος, μπορεί να εισάγονται σήματα στη δομή σε διάφορα σημεία μέχρι να βρεθεί η ίδια ακολουθία άφιξης στους διάφορους αισθητήρες.

Ένας δρόμος γύρω από το πρόβλημα των αναλυτικών λύσεων είναι η χρήση μιας αριθμητικής προσέγγισης, όπως μια μη γραμμική ρουτίνα προσαρμογής ελαχίστων τετραγώνων. Για ένα σύνολο δεδομένων, ένας τέτοιος υπολογισμός ξεκινά από μια δοκιμαστική λύση. Σε έναν υπολογισμό ΑΕ, αυτό είναι συνήθως ένα σημείο μέσα στο τρίγωνο που σχηματίζεται από τους τρεις πρώτους αισθητήρες χτυπημάτων. Η ρουτίνα ξεκινά με αυτή τη δοκιμαστική λύση και υπολογίζει τους χρόνους ταξιδιού του κύματος από το σημείο αυτό στους διεγερμένους αισθητήρες. Στη συνέχεια παίρνει το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών μεταξύ των υπολογιζόμενων χρόνων ταξιδιού και των μετρημένων χρόνων άφιξης για κάθε αισθητήρα. Αν το άθροισμα δεν είναι μηδέν, το πρόγραμμα θα κάνει μικρές μετατοπίσεις στη δοκιμαστική λύση και από τις αλλαγές στο άθροισμα, θα εκτιμήσει ποια θα ήταν η καλύτερη δοκιμαστική λύση. Αυτή η επανάληψη συνεχίζεται μέχρις

όπου το άθροισμα είτε φθάσει στο μηδέν (πραγματική λύση) ή στο ελάχιστο (η καλύτερη εκτιμώμενη λύση). Επειδή η πρώτη δοκιμαστική λύση ήταν μια λογική εκτίμηση από τη φυσική της δοκιμής, η λύση που βρέθηκε είναι συνήθως η πιο πιθανή θέση της πηγής.

Συχνά, μια μη γραμμική ρουτίνα ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζει μια παράμετρο καλής προσαρμογής, η οποία είναι μια εκτίμηση για το πόσο καλή είναι η απάντηση. Λόγω λαθών στα δεδομένα, είναι πάντοτε δυνατό να ληφθούν λύσεις που βρίσκονται πολύ μακριά από την περιοχή ενδιαφέροντος. Εάν η παράμετρος προσαρμογής είναι λογική και η λύση βρίσκεται εντός των ορίων του δικτύου αισθητήρων, μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η λύση είναι η πιο πιθανή θέση της πηγής. Ένα υπερπροσδιορισμένο σύνολο δεδομένων, το οποίο χρησιμοποιεί χτυπήματα από πρόσθετους αισθητήρες έξω από το τρίγωνο των τριών πρώτων χτυπημάτων, θα βελτιώσει γενικά την ακρίβεια του υπολογισμού. Ωστόσο, η χρήση περισσότερων από έξι έως οκτώ αισθητήρων αρχίζει να υποβαθμίζει τον υπολογισμό επειδή οι κυματομορφές μεταφοράς έχουν συχνά χάσει το μεγαλύτερο μέρος της σχέσης τους με την αρχική κυματομορφή και το σημείο ενεργοποίησης μπορεί να έχει μικρή συσχέτιση με εκείνο της αρχικής κυματομορφής. Έτσι, ο μετρημένος χρόνος άφιξης μπορεί να έχει ελάχιστη σχέση με την πραγματική ακουστική ταχύτητα.

Μια άλλη προσέγγιση που χρησιμοποιείται στη θέση πηγής είναι ότι η ακουστική ταχύτητα είναι ισότροπη και σταθερή. Αυτό δεν συμβαίνει συνήθως για τα σύνθετα υλικά και μπορεί να μην ισχύει για τις μεταλλικές κατασκευές εάν είναι κατασκευασμένες από πλάκες διαφορετικού πάχους. Ένα πρόγραμμα μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων μπορεί να χρησιμοποιεί ανισότροπες ταχύτητες. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των δεδομένων ΑΕ από σύνθετα υλικά, οι μικρές ανισοτροπίες στην ταχύτητα δεν είναι τόσο σημαντικές. Ωστόσο, αν η ανισοτροπία στην ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από 10%, η χρήση των μετρημένων ταχυτήτων στον υπολογισμό θέσης μπορεί να βελτιώσει την προσαρμογή. Μια ρουτίνα ανισότροπης ταχύτητας που είναι διαθέσιμη στο λογισμικό AEwin έχει σταθερή γωνιακή εξάρτηση από τις ταχύτητες. Σε πολλά, αλλά όχι σε όλα, σύνθετα υλικά, αυτό θα πρέπει να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Μία συστάδα ακουστικών εκπομπών είναι μια ομάδα πηγών εκπομπών που συμβαίνουν κοντά στην ίδια δομική τοποθεσία. Τα τρέχοντα εμπορικά προγράμματα ΑΕ περιλαμβάνουν διάφορες μεθόδους για την ανίχνευση και τον ορισμό μια συστάδας, η σημασία της οποίας δεν μπορεί να υπογραμμιστεί. Ένα αυξανόμενο ελάττωμα θα δημιουργήσει μια σειρά εκπομπών. Η πραγματική πηγή αυτών των εκπομπών μπορεί να είναι μια τοπική πηγή, όπως η κορυφή μιας αναπτυσσόμενης ρωγμής ή μια πιο διάχυτη πηγή, όπως ένα κομμάτι διάβρωσης. Λόγω μικρών σφαλμάτων στους μετρούμενους χρόνους άφιξης και οι δύο τύποι πηγών μπορούν να εμφανιστούν ως συστάδα πηγών σε μια μικρή αλλά καθορισμένη περιοχή. Ο σχεδιαστής δοκιμών πρέπει να ορίσει μία συστάδα. Ο συνήθης ορισμός είναι τουλάχιστον ένας αριθμός εντοπισμένων πηγών που εμφανίζονται σε μια

καθορισμένη περιοχή στην επιφάνεια του δείγματος. Συχνά είναι ευκολότερο να ορίσετε τις ομάδες κατά τη διάρκεια ή μετά τη δοκιμή. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της συστάδας είναι η ύπαρξή της, καθώς η παρουσία της δείχνει μια συγκεκριμένη περιοχή στο δείγμα στην οποία παράγεται ακουστική εκπομπή. Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι το μέγεθος της. Αυτό μπορεί να είναι είτε ο αριθμός των συμβάντων είτε η ποσότητα μιας παραμέτρου ακουστικής εκπομπής που περιέχεται στην συστάδα. Τα περισσότερα εμπορικά προγράμματα επιτρέπουν στο σύστημα να βαθμολογεί τις συστάδες με βάση είτε τον αριθμό των συμβάντων που περιέχονται είτε το μέγεθος της παραμέτρου που μετράται. Το τρίτο χαρακτηριστικό είναι η συμπεριφορά της συστάδας κατά τη διάρκεια μιας αυξανόμενης καταπόνησης. Το άθροισμα του αριθμού των συμβάντων στη συστάδα που σχεδιάστηκε ως προς την καταπόνηση ή τον χρόνο, μπορεί να δείξει έντονα εάν η συστάδα αυτή παράγεται από ένα ελάττωμα που υφίσταται σταθερή κατάσταση, δηλαδή ελεγχόμενη ανάπτυξη ή ανεξέλεγκτη ανάπτυξη που οδηγεί σε αστοχία του δείγματος. Αν η εκπομπή είναι αρκετά ομοιόμορφη έτσι ώστε η μεταβολή του αριθμού ακουστικών εκπομπών ή του πλάτους κορυφής να μην είναι πολύ πάνω από μια τάξη μεγέθους, ο αριθμός των εντοπισμένων συμβάντων στην συστάδα είναι ένα επαρκές μέτρο της ανάπτυξής της. Ωστόσο, εάν η παραλλαγή είναι μεγάλη, όπως συμβαίνει στα σύνθετα υλικά, μια γραφική παράσταση του αθροίσματος της απόλυτης ενέργειας των μελών της συστάδας είναι καλύτερο μέτρο της συμπεριφοράς της (βλ. Σχήμα 27). Δυστυχώς, τουλάχιστον με το τρέχον λογισμικό AEwin, οι γραφικές της απόλυτης ενέργειας ενός συμπλέγματος ως συνάρτηση του φορτίου ή του χρόνου δεν είναι απλές στον προσδιορισμό.

Όπως θα δούμε και στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα εργασία, μια μη γραμμική ρουτίνα προσαρμογής ελαχίστων τετραγώνων στην ανάλυση δεδομένων. Εκείνη την εποχή, αυτή η ρουτίνα χρησιμοποιήθηκε από αρκετούς φυσικούς της Sandia και εφαρμόστηκε στην ανάλυση ακουστικών εκπομπών. Το όνομα της ρουτίνας είναι το NRL, αλλά τα τελευταία 35 χρόνια κατά τη διάρκεια πολλών κινήσεων έχουν χαθεί όλες οι αναφορές στην προέλευσή του. Το πρόγραμμα είναι το θεμέλιο των τρεχουσών τεχνικών ανάλυσης και μια λίστα FORTRAN του προγράμματος εντοπισμού θέσης που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή του Sandia Sensor Blade είναι στο προσάρτημα. Αυτό το πρόγραμμα μπορεί να εντοπίσει πηγές εκπομπών και να σχεδιάσει τις θέσεις με την απόλυτη ενέργεια του καθενός, χρωματικά κωδικοποιημένη ως προς τη σειρά μεγέθους. Μπορεί επίσης να σχεδιάσει την απόλυτη ενέργεια των πηγών που βρίσκονται σε ένα σύμπλεγμα ως συνάρτηση του φορτίου ή του χρόνου. Αυτά τα γραφήματα ήταν πολύ χρήσιμα στην ανάλυση των αποτελεσμάτων των δομικών δοκιμών των πτερυγίων ανεμογεννητριών.

4.7|Ανάλυση

Οι κύριοι στόχοι μιας δοκιμής ακουστικής εκπομπής σε μια δομή είναι η ανίχνευση και η

παρακολούθηση ατελειών που επηρεάζουν την ακεραιότητα της δομής. Πρέπει να τονιστεί ότι η δοκιμή ακουστικών εκπομπών δεν είναι εξ ορισμού μη καταστρεπτική δοκιμή, καθώς οι ανιχνευόμενες εκπομπές παράγονται με μη αναστρέψιμες μεταβολές στο υπό δοκιμή υλικό. Ωστόσο, η ευαισθησία μιας δοκιμής ακουστικών εκπομπών είναι συνήθως αρκετά υψηλή ώστε να ανιχνεύει την ανάπτυξη ελαττωμάτων πολύ πριν φθάσει σε επίπεδο σοβαρότητας που θα επηρεάσει την αντοχή της δομής.

Ένα ελάττωμα μπορεί να οριστεί ως οποιοδήποτε ελάττωμα ή σφάλμα σε μια δομή που μπορεί να επηρεάσει τη δύναμη ή την ευημερία της δομής κατά τη διάρκεια της κανονικής χρήσης. Για το πεδίο ακουστικής εκπομπής, ο όρος ελάττωμα θα αναφέρεται μόνο σε ελαττώματα που επηρεάζονται από τα φορτία λειτουργίας στη δομή. Για παράδειγμα, ένα ελάττωμα όπως ένα ραγισμένο σκαλοπάτι στη σκάλα που οδηγεί σε γερανό είναι σοβαρό, αλλά δεν επηρεάζεται από το φορτίο που ανυψώνεται από τον γερανό. Η ανάπτυξη ενός ελαττώματος, όπως επηρεάζεται από το φορτίο, μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες: **ελεγχόμενη ανάπτυξη, ανεξέλεγκτη ανάπτυξη και καταστροφική ανάπτυξη ελαττώματος**. Για παράδειγμα, εξετάζοντας ένα μέταλλο που αποτελείται από πολλούς τυχαίους κρυσταλλίτες. Η ανάπτυξη μικρού ελαττώματος μπορεί να περιλαμβάνει είτε την μικροθραύση ενός κρυσταλλίτη, την μικροθραύση ενός ορίου μεταξύ δύο κρυσταλλιτών, την μικροθραύση ενός ορίου μεταξύ ενός κρυσταλλίτη και μιας έγκλησης στο μέταλλο, ή την μικροθραύση της έγκλησης. Όλες αυτές οι περιπτώσεις θα έχουν επίπεδο καταπόνησης όπου ένας εφαρμοσμένος φορέας καταπόνησης θα προκαλέσει μικροθραύση. Στην πραγματικότητα, είναι πιθανόν να υπάρχουν διάφορα επίπεδα καταπόνησης όπου διαφορετικοί φορείς πίεσης θα προκαλέσουν μικροθραύση του ίδιου κρυσταλλίτη. Η θραύση ενός μοναδικού κρυσταλλίτη συνήθως αναδιατάσσει τα διανύσματα τάσης στους περιβάλλοντες κρυσταλλίτες. Αυτή η αναδιάταξη μπορεί να αφήσει τους περιβάλλοντες μικροδιαταστικούς φορείς ουσιαστικά αμετάβλητους ή να μεταβάλει σε κάποιο βαθμό το επίπεδο μικροτραυματισμού σε μερικούς κρυσταλλίτες. Μια αύξηση σε επίπεδο μικρο – τάσης μπορεί να είναι αρκετή για να σπάσει άλλους κρυσταλλίτες. Σε μια τέτοια περίπτωση, μπορεί το τελικό αποτέλεσμα να είναι μια χιονοστιβάδα στο μακρο – θράυση. Όποιο και αν είναι το αποτέλεσμα, εξαρτάται εντελώς από το τοπικό περιβάλλον καταπόνησης και το τοπικό περιβάλλον υλικού. Δεν υπάρχει τρόπος πρόβλεψης του ακριβούς επιπέδου καταπόνησης ή της ακριβούς θέσης του πρώτου ή οποιουδήποτε άλλης μικροθραύσης.

Η ελεγχόμενη ανάπτυξη ελαττωμάτων θα συμβεί όταν η μικροθραύση ή η ομάδα των μικροθραύσεων δεν προκαλεί αναδιάταξη των τοπικών πεδίων αντοχής που προκαλούν περαιτέρω μικροθραύσεις. Ο ρυθμός εκπομπής θα παραμείνει σχετικά σταθερός ή ακόμα και μειωθεί καθώς το επίπεδο τάσης αυξάνεται. Μία μείωση του ποσοστού συνήθως υποδεικνύει ένα σχετικά μικρό αριθμό περιοχών όπου τα ενσωματωμένα υψηλότερα επίπεδα μικρο – στρες παρέμειναν από τη

διαδικασία παραγωγής. Όταν όλα αυτά έχουν καταστραφεί, ο ρυθμός εκπομπής θα μειωθεί έως ότου επιτευχθεί το επίπεδο τάσης θραύσης των πιο σοβαρών ελαττωμάτων. Τέτοιες περιοχές όπου τα επίπεδα μικροτραυματισμού είναι σημαντικά υψηλότερα από τον μέσο όρο συναντώνται συχνά σε νέες δομές FRP, αλλά σπάνια σε μεταλλικές δομές. Ελλείπει τέτοιων τεχνικών κατασκευών, οι περισσότερες δοκιμές ακουστικής εκπομπής ξεκινούν χωρίς εκπομπή (πάνω από το επίπεδο θορύβου υποβάθρου) και έπειτα προχωρούν σε ένα ελεγχόμενο καθεστώς ανάπτυξης ελαττωμάτων με σχετικά σταθερό ρυθμό εκπομπών σε κάποιο εύρος εφαρμοζόμενης εξωτερικής τάσης. Όταν ο ρυθμός εκπομπής αρχίζει να αυξάνεται ανάλογα με την καταπόνηση, τότε ξεκινάει και η ανεξέλεγκτη ανάπτυξη ελαττωμάτων.

Σε μια **ανεξέλεγκτη ανάπτυξη ελαττωμάτων**, οι μικροθραύσεις γενικά παράγουν μια αύξηση στα τοπικά πεδία καταπόνησης των γύρω περιοχών. Καθώς αυξάνεται το εξωτερικό πεδίο καταπόνησης, ο ρυθμός των εκπομπών αυξάνεται. Αργή στην αρχή, η αύξηση του ρυθμού τείνει προς μια εκθετική αύξηση. Εάν η εκθετική αύξηση δεν σταματήσει, η δοκιμή θα προχωρήσει γρήγορα στην αποτυχία του ελαττώματος. Αν η αύξηση του φορτίου είναι αργή, συνήθως υπάρχει αρκετός χρόνος σε αυτήν την ανεξέλεγκτη περιοχή ανάπτυξης ελαττωμάτων για να σταματήσει η δοκιμή και να αποφευχθεί μια σοβαρή αποτυχία. Αυτός είναι ένας από τους πρωταρχικούς σκοπούς πολλών δοκιμών ακουστικών εκπομπών. Σε **καταστροφική αποτυχία**, η εκθετική αύξηση στην ανάπτυξη ελαττωμάτων μπορεί να είναι αρκετά ταχεία. Η ταχύτητα της αποτυχίας είναι ιδιοκτησία του υλικού. Σε εύθραυστες μικροθραύσεις, υπάρχει μικρή ή καθόλου ακουστική εκπομπή πριν από την αποτυχία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η θραύση του γυαλιού. Μια δοκιμή ακουστικών εκπομπών μπορεί να πει τότε ένα μικρό γυάλινο τμήμα σε μια δομή σπάει, αλλά σπάνια θα δώσει προειδοποίηση για εύθραυστη μικροθραύση.

Η ανάλυση μιας δοκιμής ακουστικών εκπομπών συνίσταται κυρίως στην αναζήτηση της εμφάνισης ακουστικής εκπομπής και στη συνέχεια στη μέτρηση της ταχύτητας αυτής της εκπομπής σε σχέση με τη μεταβολή της στάθμης δοκιμαστικής τάσης. Στις δομές όπου χρησιμοποιούνται πολυκάναλες δοκιμές, οι στόχοι είναι η θέση των εκπομπών και η μέτρηση των ποσοστών εκπομπών για κάθε περιοχή. Μια ανάλυση μπορεί να γίνει είτε σε πραγματικό χρόνο (εάν η πρόληψη της δομικής βλάβης είναι ο στόχος δοκιμής) είτε στην ανάλυση μετά την εξέταση. Η ανάλυση σε πραγματικό χρόνο εξαρτάται κυρίως από την εμπειρία και τη γνώση των χειριστών. Μπορεί να γίνει ενδιαφέρουσα, ειδικά όταν η φόρτωση συνεπάγεται μεγάλα ενεργειακά επίπεδα και πιθανώς μπορεί να γίνει αντιληπτή μόνο από την εμπειρία.

Οι δοκιμές ακουστικών εκπομπών μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον τύπο της φόρτισης δοκιμής. Η πρώτη κατηγορία έχει μία μόνο φόρτωση είτε σε μέγιστο φορτίο είτε σε αποτυχία. Το φορτίο μπορεί να εφαρμοστεί συνεχώς ή με βήματα. Στις δοκιμές FRP, τα βήματα

μπορούν να διαχωριστούν από επιστροφές σε μηδενικό φορτίο μεταξύ κάθε βήματος. Αυτό επιτρέπει τον προσδιορισμό του λόγου ευστοχίας στην αρχή κάθε σταδίου. Σε ένα συνεχές φορτίο με βήματα, η διατήρηση φορτίου μεταξύ των βημάτων επιτρέπει τον προσδιορισμό του βαθμού με τον οποίο η εκπομπή μειώνεται καθώς η φόρτιση σταματά. Καθώς ένα δείγμα πλησιάζει την αποτυχία, η εκπομπή συχνά θα συνεχιστεί για μια χρονική περίοδο μετά την έναρξη της αναμονής/κράτησης. Όταν η εκπομπή συνεχίζεται κατά τη διάρκεια της περιόδου κράτησης, τότε είναι καλός χρόνος να δηλωθεί η δοκιμή και να μειωθεί το φορτίο, εκτός εάν το υπό δοκιμή αντικείμενο πρόκειται να αποτύχει πραγματικά.

Ο δεύτερος τύπος φόρτωσης είναι η δοκιμή κόπωσης. Το φορτίο ανακυκλώνεται περιοδικά σε σταθερό εύρος φορτίου. Αυτή η περιοχή μπορεί να είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της δοκιμής, αλλά συχνά αυξάνεται μετά από προκαθορισμένα διαστήματα κύκλου. Η δοκιμή μπορεί να παρακολουθείται συνεχώς ή το σύστημα ΑΕ μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο κοντά σε φορτία αιχμής με πύλη χρόνου τάσης. Η πρακτική της ανίχνευσης εκπομπών μόνο στα μέγιστα φορτία περιορίζει τις παρατηρούμενες πηγές εκπομπών σε εκείνες που παράγονται από την πραγματική ανάπτυξη ρωγμών και εξαλείφει τις πηγές τριβής οι οποίες είναι μέγιστες κατά τις περιόδους της ταχείας αλλαγής φορτίου. Στις δοκιμές κόπωσης υπάρχει συνήθως ένα διάστημα όπου ο ρυθμός εκπομπής από την ανάπτυξη ελαττωμάτων αυξάνεται αργά με το χρόνο. Ωστόσο, μπορεί να υπάρχουν εξαιρέσεις σε αυτόν τον κανόνα. Παρακάτω αναλύεται μια δοκιμασία κόπωσης όπου η αποτυχία εμφανίστηκε αρκετά ξαφνικά και μόνο η εκτεταμένη ανάλυση μετά την δοκιμή αποκάλυψε κάποια εκπομπή προ – αποτυχίας.

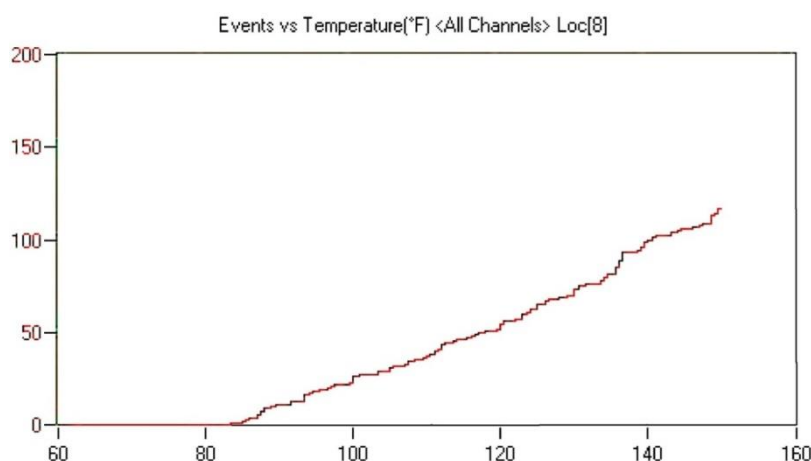
4.7.1 | Δοκιμή γραφικών

Η ανάλυση μιας δοκιμής σε πραγματικό χρόνο εξαρτάται από τον χειριστή του συστήματος ΑΕ. Ο χειριστής εξαρτάται πλήρως από τα γραφήματα που έχουν ρυθμιστεί στο σύστημα. Στα πρώιμα στάδια της δοκιμής ΑΕ, δύο από τα πιο σημαντικά όργανα της δοκιμαστικής εγκατάστασης ήταν ο παλμογράφος και το ηχητικό κανάλι. Ο παλμογράφος (scope) θα έδειχνε την έξοδο ενός καναλιού ΑΕ. Κάποιος θα μπορούσε να πάρει μια καλή ιδέα από το πεδίο της ταχύτητας της εκπομπής, του πλάτους και του γενικού σχήματος των εκπομπών. Τα σήματα θορύβου χωρίς εκπομπές θα εμφανίζονταν αμέσως. Η επικείμενη αποτυχία του δείγματος θα ήταν αρκετά εμφανής καθώς θα άναβε ολόκληρος ο παλμογράφος. Το κανάλι ήχου θα χρησιμοποιούσε συχνότητα κτύπων για να φέρει τις κύριες συχνότητες ΑΕ στην περιοχή ήχου. Ένας έμπειρος χειριστής θα μπορούσε να λάβει πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση της δοκιμής από τις αλλαγές στο πλάτος ή τη συχνότητα του ήχου. Από αυτά τα όργανα και από έναν καταγραφέα $x - y$ που θα απεικόνιζε αθροιστικές μετρήσεις έναντι του φορτίου ή του χρόνου, ένας έμπειρος χειριστής θα μπορούσε να

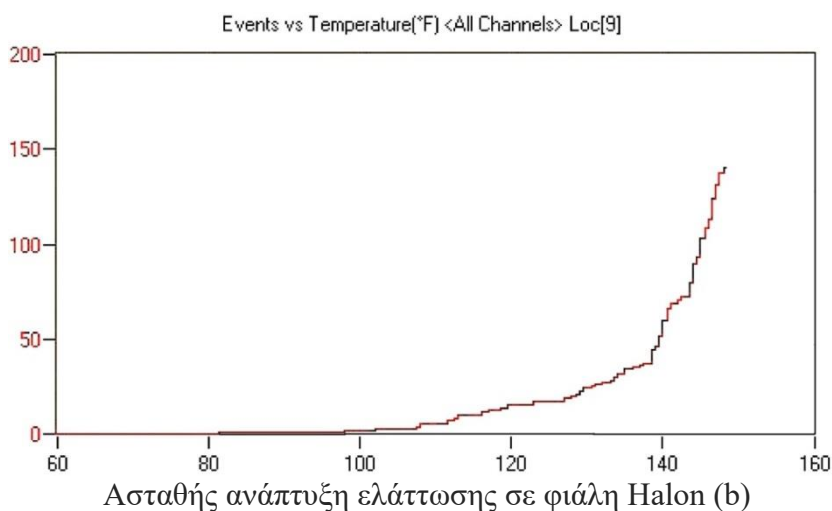
δώσει μια καλή εικόνα για το τι συνέβαινε στη δοκιμασία.

Με τα τρέχοντα ψηφιακά συστήματα ΑΕ, λείπει ο παλμογράφος και τα όργανα ήχου. Αυτά αντικαθίστανται από γραφήματα σε πραγματικό χρόνο στην οθόνη του υπολογιστή. Οι ακόλουθες απεικονίσεις είναι χρήσιμες τόσο σε πραγματικό χρόνο όσο και μετά την ανάλυση.

Ένα γράφημα των χτυπημάτων, των γεγονότων, του αριθμού ή της απόλυτης ενέργειας σε σχέση με το φορτίο ή το χρόνο είναι απαραίτητο. Είναι προτιμότερο το γράφημα των αθροιστικών επισκέψεων κ.λπ. σε σχέση με το γράφημα του ποσοστού των χτυπημάτων κ.λπ. επειδή είναι οπτικά πιο εύκολο να διαφοροποιήσουμε ένα αθροιστικό γράφημα από το να ενσωματώσουμε ένα γράφημα ρυθμού. Το κλασικό γράφημα παράμετρος εναντίων χρόνου χρησιμοποιήθηκε σχεδόν από την αρχή της δοκιμής ΑΕ. Η επιλογή της παραμέτρου ΑΕ θα εξαρτηθεί από το τι αναμένεται από τη δοκιμή. Οι εμφανίσεις ή οι μετρήσεις θα εμφανίζουν όλες τις ανιχνεύσιμες ΑΕ, με τις μετρήσεις να είναι πιο ευαίσθητες στην ένταση της εκπομπής. Ένας εντοπισμένος αριθμός συμβάντων είναι ευαίσθητος στις εκπομπές από τα πραγματικά ελαττώματα, αλλά μπορεί να χάσει περιοχές όπου ενεργοποιούνται μόνο από έναν ή δύο αισθητήρες. Η μέτρηση ή η απόλυτη ενέργεια ανά συμβάν θα δώσει τις περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση της ανάπτυξης ατελειών, αλλά μπορεί να γίνει σύγχυση όταν υπάρχουν πολλαπλές ατέλειες. Ένας ρυθμός απόλυτης ενέργειας ανά γράφημα διαστήματος φορτίου είναι ίσως ο πιο χρήσιμος, αλλά η χρήση του πρέπει να περιορίζεται στην ανάλυση μετά την δοκιμή δεδομένου ότι απαιτεί γνώση της συνολικής συμπεριφοράς όλων των συστάδων.



Σταθερή ανάπτυξη ελάττωσης στη φιάλη Halon (a)



Σχήμα 16. Σταθερή σε ασταθή ανάπτυξη ελάττωσης σε φιάλη Halon

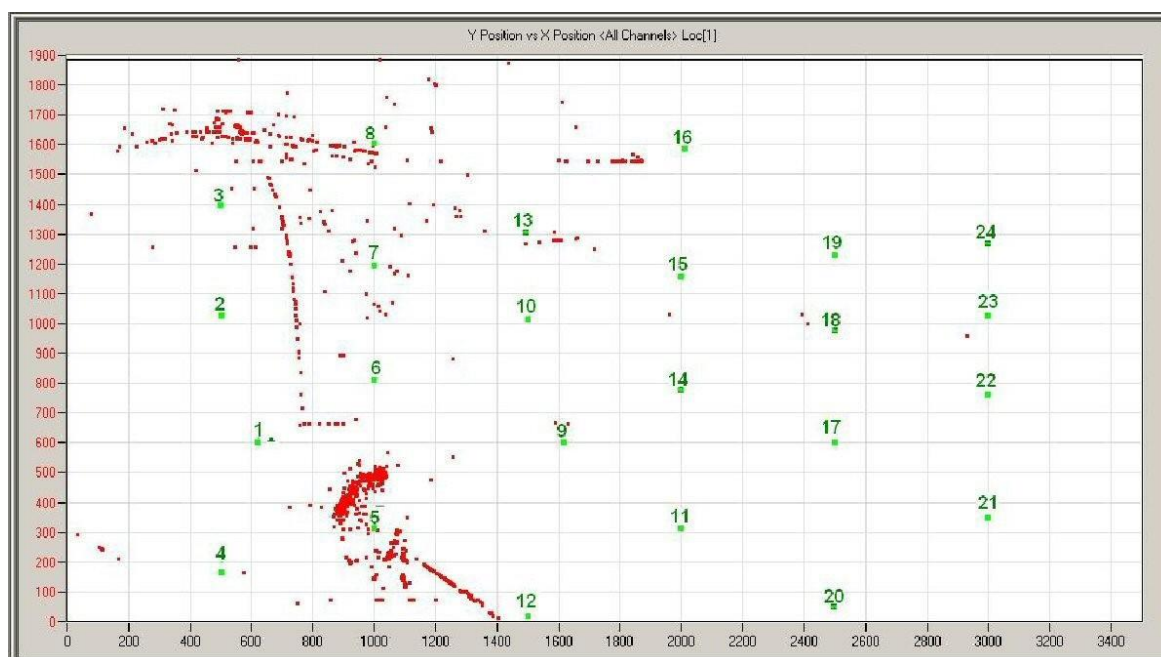
Στο Σχήμα 16 έχουμε τη μετάβαση από σταθερή ανάπτυξη ελαττωμάτων σε ασταθή ανάπτυξη ελάττωσης σε φιάλη Halon (b).

Οι αλλαγές στην κλίση του αθροιστικού γραφήματος υποδεικνύουν μεταβολές στον ρυθμό ακουστικών εκπομπών. Ο σταθερός ρυθμός απουσία εξωτερικού θορύβου υποδηλώνει ελεγχόμενη ανάπτυξη ατελειών ενώ ένας αυξανόμενος ρυθμός δείχνει ανεξέλεγκτη ανάπτυξη ελαττωμάτων. Όταν η κλίση της καμπύλης φαίνεται να αυξάνεται προς μια εκθετική ή παρουσιάζει ένα ξεχωριστό γόνατο, συνήθως παρατηρείται δομική αποτυχία. Το Σχήμα 16 δείχνει σταθερό ρυθμό εκπομπής στο 16(a) και αυξανόμενο ρυθμό εκπομπής στο 16(b). Αυτά τα γραφήματα δείχνουν τον αριθμό των συμβάντων που εντοπίστηκαν ως συνάρτηση της θερμοκρασίας (φορτίο) σε δύο δοκιμές φιαλών Halon. Και τα δύο μπουκάλια απέτυχαν στη δοκιμή αλλά για διαφορετικούς λόγους. Στο 16(a), ο αριθμός των συμβάντων σε μία συστάδα ξεπέρασε ένα προκαθορισμένο μέγιστο και στο 16(b) τόσο η κλίση της καμπύλης συμβάντος έναντι θερμοκρασίας για μία συστάδα όσο και ο αριθμός των συμβάντων στη συστάδα, ξεπέρασαν τα προκαθορισμένα μέγιστα. Η δοκιμή στο 16(b) τερματίστηκε νωρίς από το πρόγραμμα υπολογιστή για να αποφευχθεί καταστροφική αποτυχία.

Γραφήματα τοποθεσίας σε πραγματικό χρόνο

Αυτά τα γραφήματα σχεδιάζουν την υπολογιζόμενη θέση κάθε συμβάντος καθώς αυτό εμφανίζεται. Ο υπολογισμός θέσης μπορεί να ρυθμιστεί ως ένα γράφημα ή ως πολλαπλά γραφήματα. Τα γραφήματα που έχουν οριστεί για την οθόνη του συστήματος πιθανότατα δεν θα έχουν αντιστοιχία ενός προς ένα στη δομή. Σχετικά μικρές αποκλίσεις μεταξύ της γραφικής θέσης και της πραγματικής θέσης της συστάδας στη δομή δεν είναι πολύ σημαντικές για την

παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Συνήθως, οι περισσότερες εκπομπές που προέρχονται από μια περιοχή σε μια δομή θα έχουν τις υπολογιζόμενες θέσεις τους σε μια παρόμοια περιοχή σε ένα γράφημα, παρόλο που οι δύο περιοχές μπορεί να έχουν κάπως διαφορετικές θέσεις στη δομή. Η εμφάνιση μιας συστάδας συμβάντων σε ένα γράφημα σε πραγματικό χρόνο υποδηλώνει ένα αυξανόμενο ελάττωμα και η συμπεριφορά των γεγονότων με φορτίο θα καθορίσει πόσο σοβαρό είναι το ελάττωμα, ακόμα και αν η υπολογιζόμενη θέση φαίνεται να είναι ασαφής.



Σχήμα 17. Διάγραμμα τοποθεσίας δεδομένων από τη δοκιμή κόπωσης πτερυγίου ανεμογεννητριών BSDS

Το Σχήμα 17 είναι ένα γράφημα θέσης από τη δοκιμή κόπωσης των πτερυγίων ανεμογεννητριών BSDS. Το γράφημα καλύπτει 15.000 κύκλους νωρίτερα στο επόμενο επίπεδο φόρτισης για τη δοκιμή. Αυτή η αναπαράσταση προσεγγίζει το πτερύγιο ως κύλινδρο ώστε να επιτρέπεται η παρακολούθηση ολόκληρης της επιφάνειας του πτερυγίου σε ένα γράφημα. Η προσέγγιση είναι σχετικά καλή για το πρώτο μέτρο του πτερυγίου και σχετικά φτωχή από 3 μέτρα μέχρι το τέλος του. Οι αισθητήρες 2, 10 και 18 είναι τοποθετημένοι στην πρόσθια ακμή με τους αισθητήρες 1, 9 και 17 στο καπάκι πυροκροτητή στην πλευρά χαμηλής πίεσης και τους αισθητήρες 3, 13 και 19 που είναι τοποθετημένοι στο καπάκι πυροκροτητή της πλευράς υψηλής πίεσης του πτερυγίου. Οι αισθητήρες 4, 12 και 20 βρίσκονται στην οπίσθια ακμή. Οι διακριτές γραμμές στο 7 – 4 είναι ψευδομετρήσεις που συχνά παρατηρούνται σε δοκιμές που αφορούν τη θέση προέλευσης. Οι ευθείες γραμμές είναι συχνά ψευδομετρήσεις του υπολογισμού ενώ καμπύλες γραμμές συχνά προκύπτουν από παρεμβολές RF.

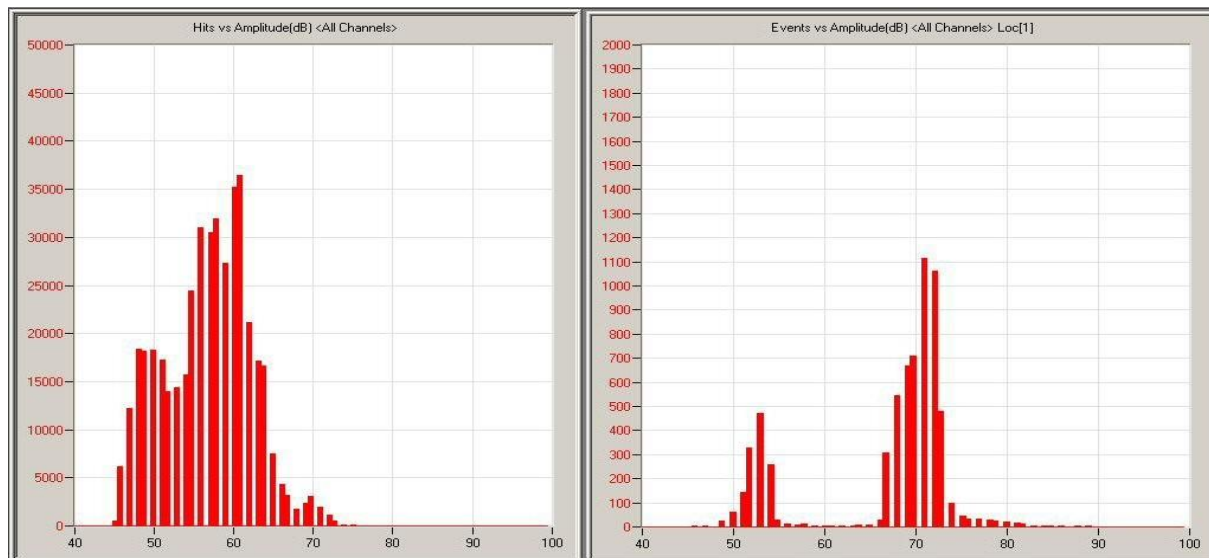
Και τα δύο μπορεί να οφείλονται σε σήματα παρεμβολών συχνότητας που παγιδεύονται στη συχνότητα φορτίου. Μπορεί να φαίνεται ότι είναι ακουστικής προέλευσης, αλλά τα συνηθισμένα

μοτίβα που παρατηρούνται συχνά στα δεδομένα δείχνουν ότι δεν είναι σήματα από ένα αυξανόμενο ελάττωμα. Θεωρούνται συνήθως ως γεγονότα που περιέχουν μόνο τρία χτυπήματα. Κατά κανόνα, η ΑΕ από ένα ελάττωμα είναι τυχαία στην εμφάνισή της. Οποιαδήποτε τακτικά μοτίβα που εμφανίζονται στα ακατέργαστα δεδομένα είτε υποδηλώνουν σήματα με προέλευση ή συμβάντα που δεν είναι ελαττωματικά κατά μήκος ενός δομικού στοιχείου.

Ένα άλλο σημείο που πρέπει να αναφερθεί στη δημιουργία γραφημάτων θέσης όπως στο Σχήμα 17 είναι ότι το λογισμικό που βασίζεται σε μια μη γραμμική ρουτίνα ελάχιστων τετραγώνων μπορεί να χρησιμοποιήσει πληροφορίες από οποιοδήποτε αριθμό αισθητήρων από το ελάχιστο απαραίτητο για τη γεωμετρία του υπολογισμού. Για μια επιφάνεια, ο ελάχιστος αριθμός αισθητήρων είναι τρεις. Συνήθως θα υπάρχουν περισσότερα από 3 συμβάντα αισθητήρων σε σχέση με την εμφάνιση 4, 5 ή 6 συμβάντων αισθητήρων, μόνο λόγω της κανονικής διακύμανσης των μεγεθών των συμβάντων. Ένα γεγονός με 3 αισθητήρες σε μια επιφάνεια συνήθως υποδηλώνει έναν ακριβή υπολογισμό. Το γράφημα θέσης 17 υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας όλα τα συμβάντα να περιέχουν 3 έως 6 αισθητήρες. Αν ο υπολογισμός περιοριζόταν σε 4 έως 6 αισθητήρες, οι ευθείες γραμμές και οι περισσότερες από τις ξεχωριστές καμπύλες γραμμές στο Σχήμα 17 θα εξαφανίζονται, αλλά η συστάδα γύρω από τον αισθητήρα 5 και τα διασκορπισμένα σημεία πάνω από τον αισθητήρα 3 θα παρέμεναν. Η χρήση 4 έως 6 αισθητήρων για επίπεδη θέση είναι πάντοτε επιθυμητή εάν υπάρχουν αρκετά δεδομένα για να παραχθεί ένα εύλογο γράφημα.

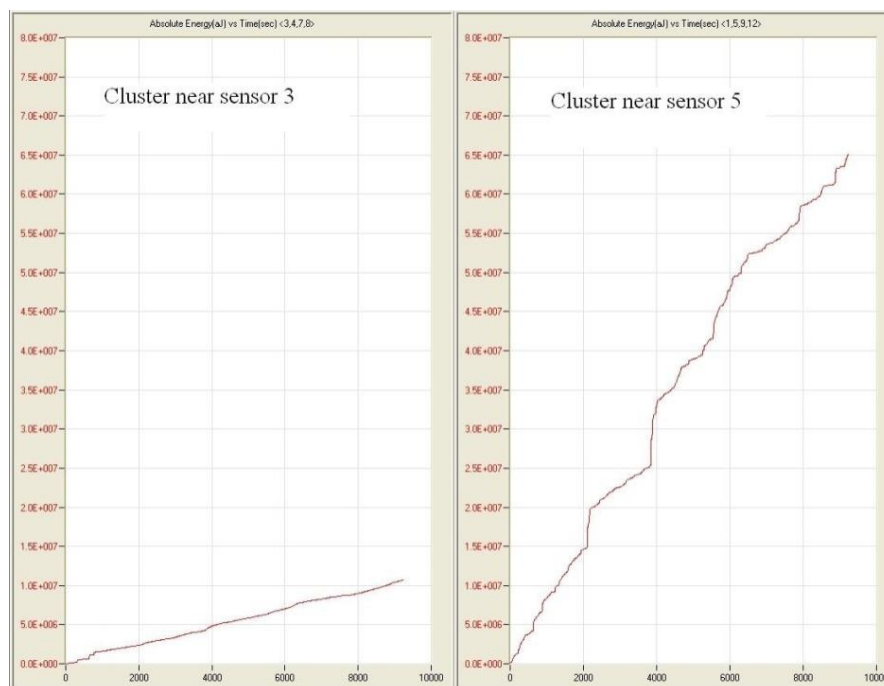
Γραφήματα κατανομών πλάτους κορυφής των χτυπημάτων και των συμβάντων

Τα Σχήματα 18 (a) και (b) δείχνουν τις κατανομές πλάτους κορυφής από τα δεδομένα που απεικονίζονται στο Σχήμα 17. Η κατανομή των χτυπημάτων δείχνει ότι τα περισσότερες από αυτά ήταν κάτω από το πλάτος κορυφής 65dB, ενώ τα συμβάντα έπεσαν σε δύο ομάδες, ένα κοντά στα 54dB και ένα κοντά στα 71dB. Υπήρξε ένας μεγάλος αριθμός χτυπημάτων σε σύγκριση με τον αριθμό των συμβάντων που εντοπίστηκαν για κάθε κορυφή, ωστόσο υπήρξαν πολλά περισσότερα γεγονότα ανά κτύπημα κοντά στα 71dB από τα 54dB περίπου. Αυτό συνεπάγεται την ανάπτυξη δύο διαφορετικών ελαττωμάτων που θα πρέπει να είναι εμφανή σε ένα γράφημα τοποθεσίας. Το γράφημα θέσης στο Σχήμα 17 δείχνει δύο μικρές συστάδες, μία μάλλον διάχυτη ένα κοντά στον αισθητήρα 3 και μία πιο συμπαγή κοντά στον αισθητήρα 5. Από τα γραφήματα στα Σχήματα 17 και 18 είναι δύσκολο να καταλάβουμε ποια συστάδα αντιστοιχεί σε ποια κατανομή πλάτους. Ωστόσο, στην ανάλυση μετά την δοκιμή είτε τα απλά γραφήματα που φαίνονται στα Σχήματα 19(a) και 19(b) είτε το πρόγραμμα εντοπισμού πηγής που περιλαμβάνει τη διαφοροποίηση χρώματος από την ενέργεια πηγής, μπορούν να βοηθήσουν στην αναγνώριση των συστάδων.



Σχήμα 18. Κατανομές εύρους επιδράσεων και συμβάντων από τα ίδια δεδομένα BDS (αριστερά (a) και δεξιά (b))

Στο γράφημα θέσης Σχήματος 17 εμφανίζονται δύο ομάδες: μία διάχυτη μεταξύ των αισθητήρων 3 και 4 και μία πιο συμπαγής κοντά στον αισθητήρα 5. Οι αθροιστικές απόλυτες ενέργειες από τους αισθητήρες που περιβάλλουν κάθε συστάδα σχεδιάζονται συναρτήσει του χρόνου στα Σχήματα 19(a) και 19(b). Η συστάδα κοντά στον αισθητήρα 5 δείχνει περίπου έξι φορές περισσότερη απελευθέρωση ενέργειας από εκείνη μεταξύ των αισθητήρων 3 και 4. Έτσι, η συστάδα κοντά στον αισθητήρα 5 είναι το πιο ενεργή. Αυτό θα ήταν επίσης προφανές εάν η γραφική απεικόνιση της θέσης περιελάμβανε τη διαφοροποίηση των χρωμάτων των πηγών από την ενέργεια.



Σχήμα 19. Σύνολο Απόλυτης Ενέργειας ως συνάρτηση του χρόνου

Στο Σχήμα 19 έχουμε το σύνολο Απόλυτης Ενέργειας ως συνάρτηση του χρόνου για συστάδες κοντά στον αισθητήρα 3 (αριστερά a) και τον αισθητήρα 5 (δεξιά b) για δεδομένα που φαίνονται στο Σχήμα 17. Ένα ραβδογράφημα του αριθμού των χτυπημάτων ανά κανάλι.

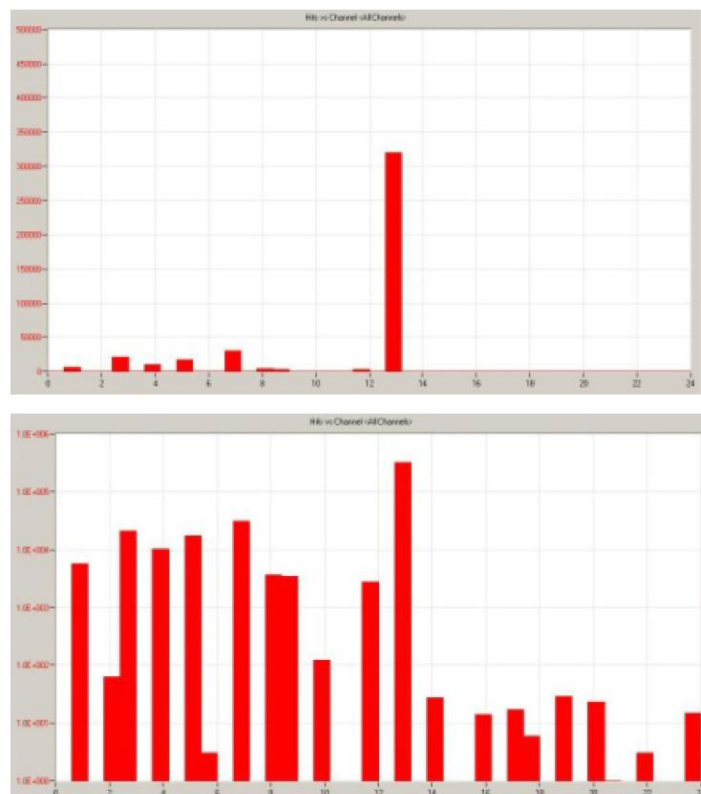
Τα Σχήματα 20(a) και 20(b) δείχνουν ένα γραμμικό και λογαριθμικό διάγραμμα των χτυπημάτων ανά κανάλι από τα ίδια δεδομένα όπως φαίνεται στα Σχήματα 17, 18 και 19. Η γραμμική γραφική παράσταση (a) δείχνει ότι το κανάλι 13 λαμβάνει τα περισσότερα από τα χτυπήματα. Είναι τόσο κυρίαρχο που οι περισσότεροι από τους άλλους αισθητήρες φαίνονται ανενεργοί. Χρησιμοποιώντας μια γραφική απεικόνιση των ίδιων δεδομένων (b), βλέπουμε ότι δεν συμβαίνει αυτό και μόνο οι αισθητήρες 11, 15, 21 και 23 εμφανίζονται εντελώς ανενεργοί, ενώ οι αισθητήρες 6, 17 και 22 έχουν μόνο λίγα χτυπήματα. Φαίνεται επίσης ότι το τμήμα της δομής που καλύπτεται από τους αισθητήρες 14 έως 24 δείχνει πολύ μικρή εκπομπή. Αυτά τα δεδομένα προέρχονταν από δοκιμή κόπωσης, επομένως η προσωρινή διακοπή της φόρτωσης δεν επηρέασε τη δοκιμή. Τα κανάλια χαμηλού πλάτους ελέγχθηκαν με διαλείμματα μολύβδου λίγο πριν καταγραφεί αυτό το σύνολο δεδομένων. Όλα τα κανάλια δοκιμάστηκαν καλά εκτός από το κανάλι 11. Προσδιορίστηκε ότι τα ηλεκτρονικά στοιχεία στο κανάλι 11 δεν λειτουργούσαν αλλά ο αισθητήρας λειτουργούσε. Ο αισθητήρας στη θέση 11 συνδέθηκε με το κανάλι 13, το οποίο είχε πολύ χαμηλή δραστηριότητα και ο διακόπτης εισήχθη στο αρχείο διαρρύθμισης. Το αν τα υπερβολικά σήματα που φαίνονται στο κανάλι 13 στο Σχήμα 18 προκαλούνται από αυτόν τον διακόπτη δεν είναι γνωστό. Ωστόσο, τα δεδομένα στο Σχήμα 18 και οι προκύπτουσες δοκιμές διάρρηξης μολύβδου έδειξαν ότι η έλλειψη εκπομπής από τους αισθητήρες 14 έως 24 ήταν πραγματική και όχι ηλεκτρονικό πρόβλημα.

Ένα γράφημα σημείων διάσπασης ως συνάρτηση του χρόνου της τιμής φορτίου για κάθε χτύπημα και ενός συνοδευτικού γραφήματος διασκορπισμένου σημείου της ακουστικής μέτρησης για κάθε χτύπημα.

Αυτά τα γραφήματα είναι χρήσιμα για δοκιμές κόπωσης. Σε μια δοκιμασία κόπωσης, η ανάπτυξη ελαττωμάτων θα συμβεί μόνο πάνω στο φορτίο αιχμής ή κοντά σε αυτό. Εντούτοις, σε μια σύνθετη δομή, όπως ένα πτερύγιο ανεμογεννήτριας, υπάρχουν συχνά περιοχές εντός του πτερυγίου όπου δημιουργείται φαινόμενη εκπομπή τριβής. Αυτή η εκπομπή είναι συνήθως πιο έντονη στην περιοχή μεσαίου φορτίου, όπου ο ρυθμός αλλαγής στο φορτίο είναι μέγιστος. Αν το φορτίο είναι μετατοπισμένο έτσι ώστε μία κορυφή του κύκλου να βρίσκεται στο κανονικό μηδενικό φορτίο του δείγματος, τότε το μέγιστο φορτίο βρίσκεται στην αντίθετη κορυφή του κύκλου.

Χρησιμοποιώντας μια πύλη ελεγχόμενη από την τάση για την αποδοχή δεδομένων μόνο στο δέκατο τοις εκατό του φορτίου, μπορεί κανείς να μειώσει σημαντικά την ποσότητα των δεδομένων που συλλέγονται. Αν το φορτίο δεν είναι μετατοπισμένο, είναι εφικτό να δεχτούμε δεδομένα τόσο από τις θετικές όσο και από τις αρνητικές κορυφές φορτίου. (Μια προσοχή: σε μια δοκιμή

συντονισμού κόπωσης, το σήμα φορτίου από μία θέση στο πτερύγιο μπορεί να είναι εκτός φάσης με τη μετατόπιση στη θέση ενός ελαττώματος. Η πύλη πρέπει να ρυθμιστεί έτσι ώστε να περιλαμβάνει τις κορυφές μετατόπισης στις θέσεις ελάττωσης, ακόμα κι αν σημαίνει αποδοχή μεγαλύτερων αρχείων δεδομένων.)



Σχήμα 20. Χτυπήματα ανά κανάλι (α) Γραμμική σχεδίαση (επάνω) και (β) λογαριθμική σχεδίαση (κάτω)

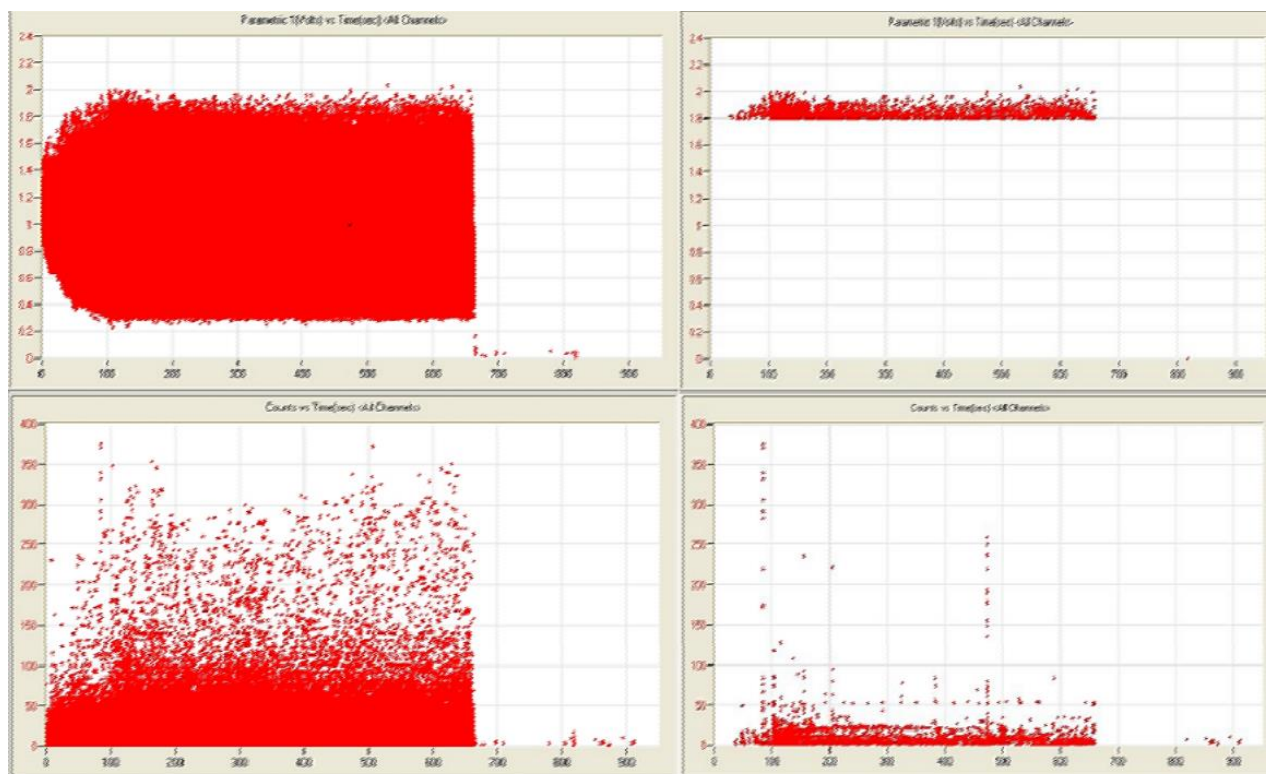
Το Σχήμα 20 δείχνει τις καμπύλες καταμέτρησης και φορτίσεως για ένα μικρό τμήμα μιας δοκιμής που είχε μεγάλη ποσότητα εκπομπών που εμφανίστηκε σε όλο τον κύκλο φορτίου. Τα καταγεγραμμένα δεδομένα περιελάμβαναν όλα τα χτυπήματα. Τα ανώτερα γραφήματα είναι γραφικά της παραμέτρου φορτίου ως συνάρτηση του χρόνου για κάθε χτύπημα. Το Σχήμα 20(a) περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί. Στο Σχήμα 20(b) είναι τα ίδια δεδομένα τα οποία φιλτράρονται ώστε να αφαιρεθούν όλα τα δεδομένα σε φορτία μικρότερα του 90% του μέγιστου φορτίου. Στις κατώτερες καμπύλες απεικονίζεται η καταμέτρηση ΑΕ για κάθε χτύπημα που εμφανίζεται στην άνω καμπύλη. Το Σχήμα 20(b) δείχνει ακριβώς ποιο θα ήταν το σύνολο δεδομένων εάν μια πύλη χρόνου τάσης χρησιμοποιήθηκε για να περάσει μόνο χτυπήματα που εμφανίστηκαν σε φορτία 90% του μέγιστου φορτίου ή υψηλότερα. Αυτό μείωσε τον αριθμό των επισκέψεων στο σύνολο δεδομένων από 566.077 σε 2.851 και ο αριθμός των συμβάντων που εντοπίστηκαν μεταβλήθηκε από 5.585 σε 7.

Παρατηρήστε τις διάφορες κατακόρυφες γραμμές επιτυχιών στην καμπύλη μέτρησης 20(b).

Αυτές είναι πηγές υψηλής ενέργειας που έχουν διεγείρει περισσότερους από έξι αισθητήρες. Έτσι, το φιλτράρισμα μειώνει σημαντικά το μέγεθος του αρχείου δεδομένων, αλλά εξακολουθεί να ανιχνεύει εκπομπές από διάφορες μεγάλες πηγές. Οι λίγες μεγάλες πηγές ήταν σύμφωνες με αυτή τη συγκεκριμένη περίοδο αυτής της δοκιμής. Αυτές οι γραφικές παραστάσεις δείχνουν την τιμή της αποδοχής δεδομένων μόνο στις κορυφές φορτίου. Το φιλτράρισμα δεδομένων είναι απαραίτητο όταν κάποιος αποκτήσει πολλά gigabytes δεδομένων ανά δοκιμή, αλλά πρέπει να διασφαλιστεί ότι αυτό που φιλτράρεται δεν είναι χρήσιμα δεδομένα. Είναι αδύνατο να δηλώσουμε ότι όλα τα χτυπήματα που φαίνονται στο Σχήμα 20(a) ήταν άχρηστοι θόρυβοι.

Ωστόσο, υπάρχουν πολλά δεδομένα που συγκεντρώθηκαν σε μια μέση δοκιμή ΑΕ, ώστε ένα μεγάλο μέρος του να είναι περιττό. Εάν η τιμή των φιλτραρισμένων δεδομένων είναι άγνωστη, ίσως είναι καλύτερα να καταγράφονται τα δεδομένα και στη συνέχεια να φιλτράρονται τα αρχεία στη διαδικασία μετα – επεξεργασίας.

Υπάρχει μια ακόμη διαδικασία που μπορεί να είναι χρήσιμη για τον προσδιορισμό των σημάτων που παράγονται από την πραγματική ανάπτυξη ρωγμών και τα οποία προκύπτουν από κάποιο άλλο μηχανισμό κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής κόπωσης. Μια δοκιμή κόπωσης ανεμογεννήτριας εφαρμόζει μεγάλη δύναμη και κίνηση σε ένα πτερύγιο και είναι βέβαιο ότι δεν παράγονται όλα τα ακουστικά σήματα λόγω υλικών βλαβών. Δεδομένου ότι η ακουστική εκπομπή είναι αποτέλεσμα τυχαίων διεργασιών, είναι χρήσιμο να δούμε την έξοδο μιας τέτοιας διαδικασίας. Ένα εύκολο πειραματικό παράδειγμα είναι η τήξη ενός πάγου σε ένα ποτήρι νερό. Καθώς κάθε κρυσταλλίτης του πάγου λιώνει, αλλάζει τα τοπικά πεδία καταπόνησης στον κύβο πάγου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή μικροσκοπική πυρόλυση στον κύβο πάγου και μια σταθερή παραγωγή ακουστικής εκπομπής. Καταγράφοντας την κατανομή των απόλυτων ενεργειών από τις εκπομπές που παράγονται από ένα λιωμένο πάγο έχουμε την καμπύλη που φαίνεται στο Σχήμα 21. Ενώ υπάρχουν πολύ περισσότερες εκπομπές στο τέλος της καμπύλης χαμηλής ενέργειας, όλες οι ενεργειακές τιμές εμφανίζονται αντιπροσωπευτικές. Με τις εκπομπές 7500, σχεδόν κάθε ενεργειακή τιμή μεταξύ 0 και 200 μονάδων έχει τουλάχιστον μία έκρηξη. Δεν υπάρχουν κορυφές σε αυτήν την κατανομή ενέργειας ούτε κενά. Αναμένουμε ότι η ακουστική εκπομπή από την ανάπτυξη ελαττωμάτων θα έχει αυτή τη γενική κατανομή των ενεργειών.

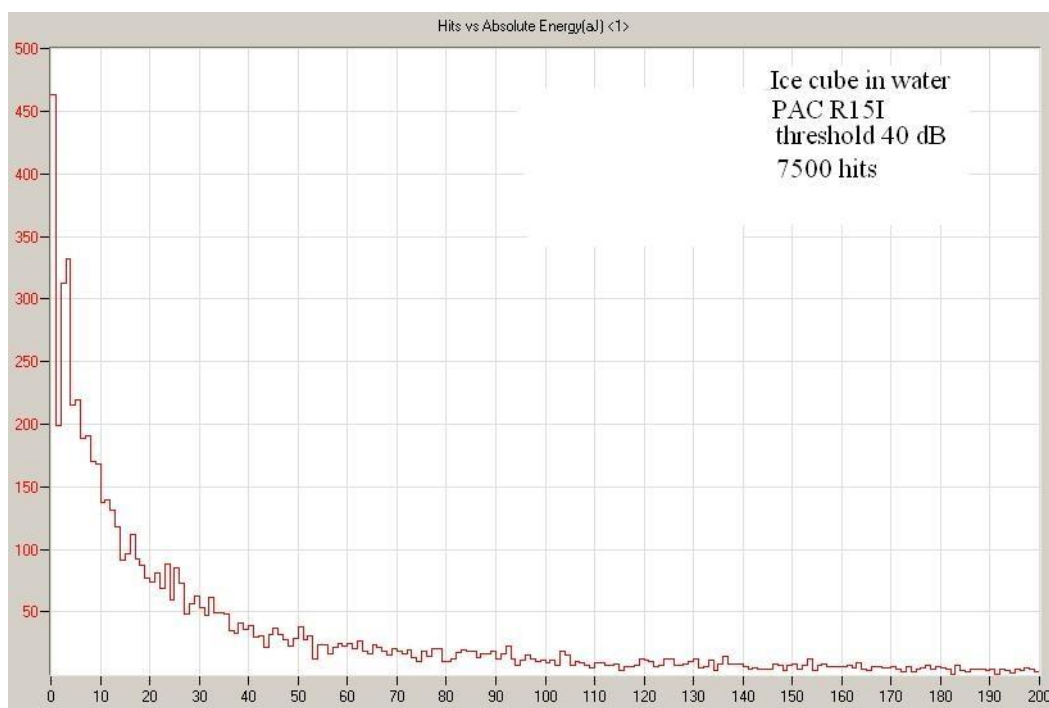


Σχήμα 21. Γραφήματα/διαγράμματα σημείων διασποράς

Στο Σχήμα 21 έχουμε γραφήματα/διαγράμματα σημείων διασποράς παραμέτρων μετρήσεων και φορτίου (πάνω) και μετρήσεων ΑΕ (κάτω) για χτυπήματα από σύντομο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής συντονισμού σε πτερύγιο. Το Σχήμα 20 (a) (αριστερά) περιέχει καμπύλες για το πλήρες σύνολο δεδομένων, ενώ το Σχήμα 20(b) (δεξιά) περιέχει μόνο χτυπήματα που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια του ανώτερου 10% του κύκλου φορτίου.

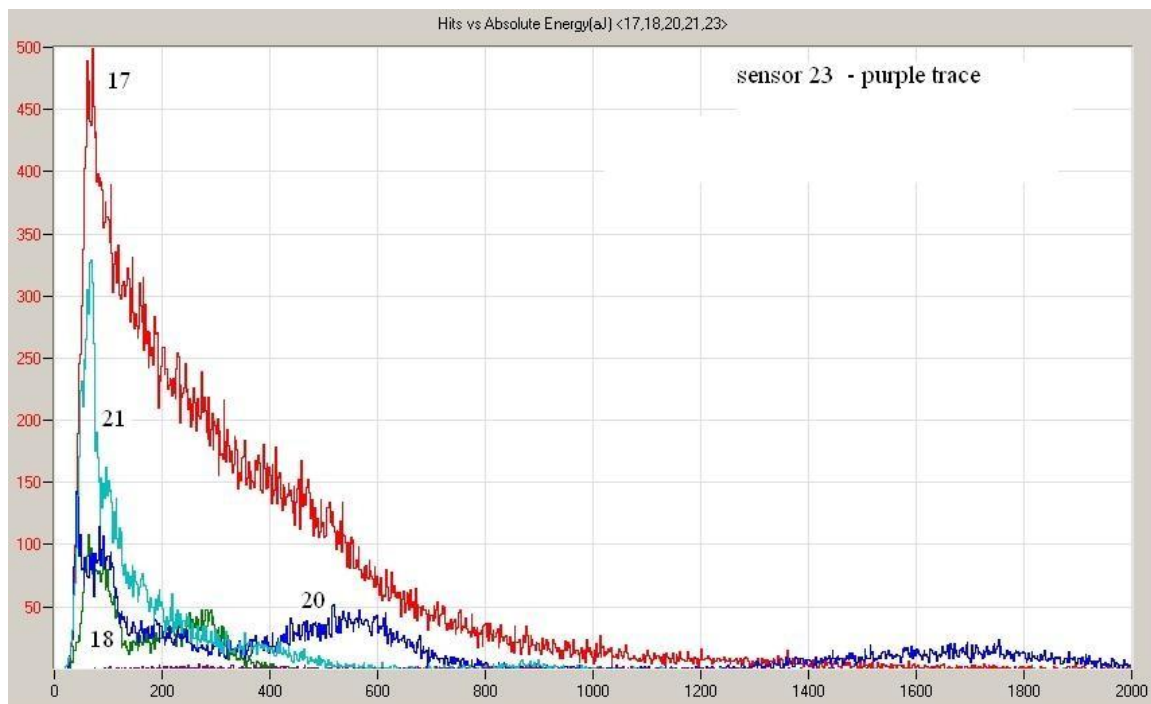
Το επόμενο Σχήμα 22 δείχνει τη διανομή ενεργειών από πέντε αισθητήρες που εκτείνονται σε δύο ενσωματωμένα ελαττώματα σε ένα πτερύγιο ανεμογεννήτριας που υποβλήθηκε σε δοκιμασία κόπωσης. Τα κανάλια 17 και 21 ακολουθούν την κατανομή που παρατηρείται στην εκπομπή του κύβου πάγου. Τα κανάλια 18 και 20 έχουν περισσότερη δομή αλλά εξακολουθούν να παρουσιάζουν ευρεία κατανομή ενεργειών εκπομπών. Ακόμη και το κανάλι 23, το οποίο είχε πολύ χαμηλή εκπομπή, παρουσιάζει μια ευρεία κατανομή ενεργειών. Αυτές οι καμπύλες υποδεικνύουν ότι αυτά τα δεδομένα είναι πραγματικές εκπομπές που παράγονται από διαρθρωτικές βλάβες στο πτερύγιο.

Ωστόσο, στο άκρο αυτής του πτερυγίου όπου η δύναμη του είναι πολύ μεγαλύτερη, δεδομένα από την ίδια σειρά που φαίνεται στο Σχήμα 22 έδειξαν μεγάλη ποσότητα εκπομπής σε μία περιοχή που βρίσκεται στην επιφάνεια του πτερυγίου. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 23 εμφανίζεται ως ένα παράξενο πρότυπο καμπύλων γραμμών που δεν έχουν καμία σχέση με τη δομή του πτερυγίου. Οι αισθητήρες 1 και 5 βρίσκονται στην αντίθετη πλευρά του πτερυγίου από τους αισθητήρες 2 και 6. Η κατανομή ενέργειας από τους έξι αισθητήρες στην περιοχή ρίζας παρουσιάζεται στο σχήμα 24.

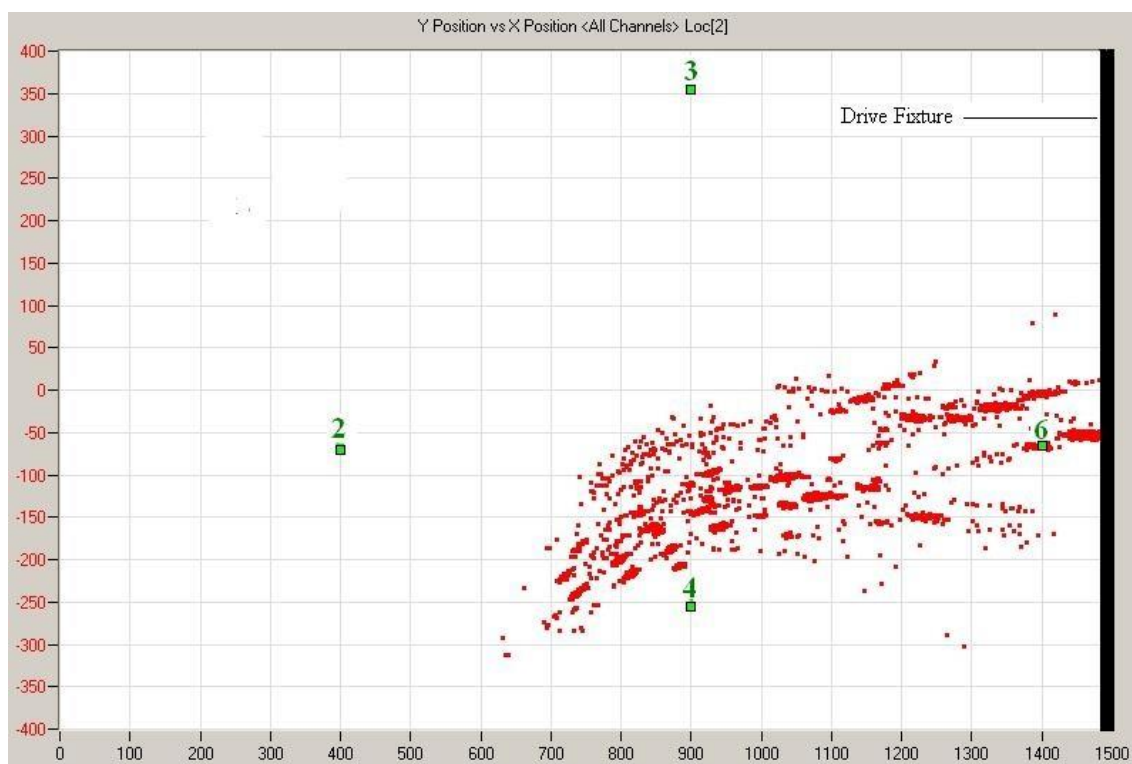


Σχήμα 22. Κατανομή των χτυπημάτων έναντι της απόλυτης ενέργειας για τις εκπομπές λόγω πήξης πάγου

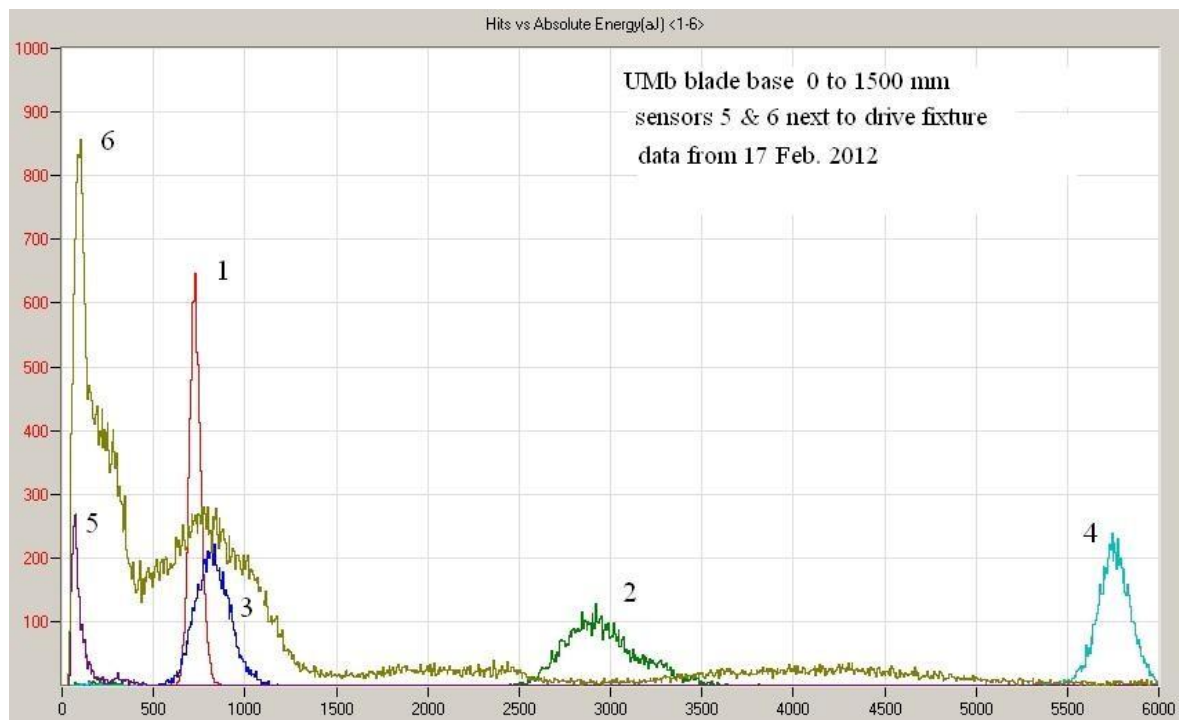
Ενώ ο αισθητήρας 6, ο οποίος ήταν δίπλα στο μηχανισμό κίνησης, παρουσιάζει μια κατανομή ενέργειας παρόμοια με εκείνη του κύβου πάγου, οι αισθητήρες 1 έως 4 δείχνουν ότι όλες οι ενέργειες που ανιχνεύονται από κάθε αισθητήρα βρίσκονται εντός στενών ενεργειακών ζωνών. Αυτά τα ακουστικά σήματα φαίνεται ότι παράγονται με κάποιον άλλο μηχανισμό παρά με υποβάθμιση των ελαττωμάτων. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ενώ τα σήματα από τον αισθητήρα 6 προήλθαν πιθανότατα από μικρές σχετικές κινήσεις μεταξύ της επιφάνειας του πτερυγίου και της διάταξης οδήγησης, οι εκπομπές που εντοπίστηκαν χρησιμοποιώντας δεδομένα από τους αισθητήρες 1 έως 4 ήταν πλήρη αντικείμενα που παράγονται από σήματα που διεγείρονται από την κίνηση του μηχανισμού οδήγησης κόπωσης. Όταν οι εντοπισμένες εκπομπές δεν φαίνεται να έχουν νόημα, είτε λόγω παράξενης τοποθεσίας είτε λόγω περιέργων κατανομών στο πτερύγιο, αυτός ο τύπος ανάλυσης μπορεί να είναι πολύ χρήσιμος.



Σχήμα 23. Χτυπήματα έναντι κατανομής ενέργειας από πέντε αισθητήρες κοντά σε ενσωματωμένα ελαττώματα στο πτερύγιο



Σχήμα 24. Εμφανείς τοποθεσίες ρωγμών σε επιφάνεια υψηλής πίεσης του πτερυγίου κοντά στο μηχανισμό κίνησης

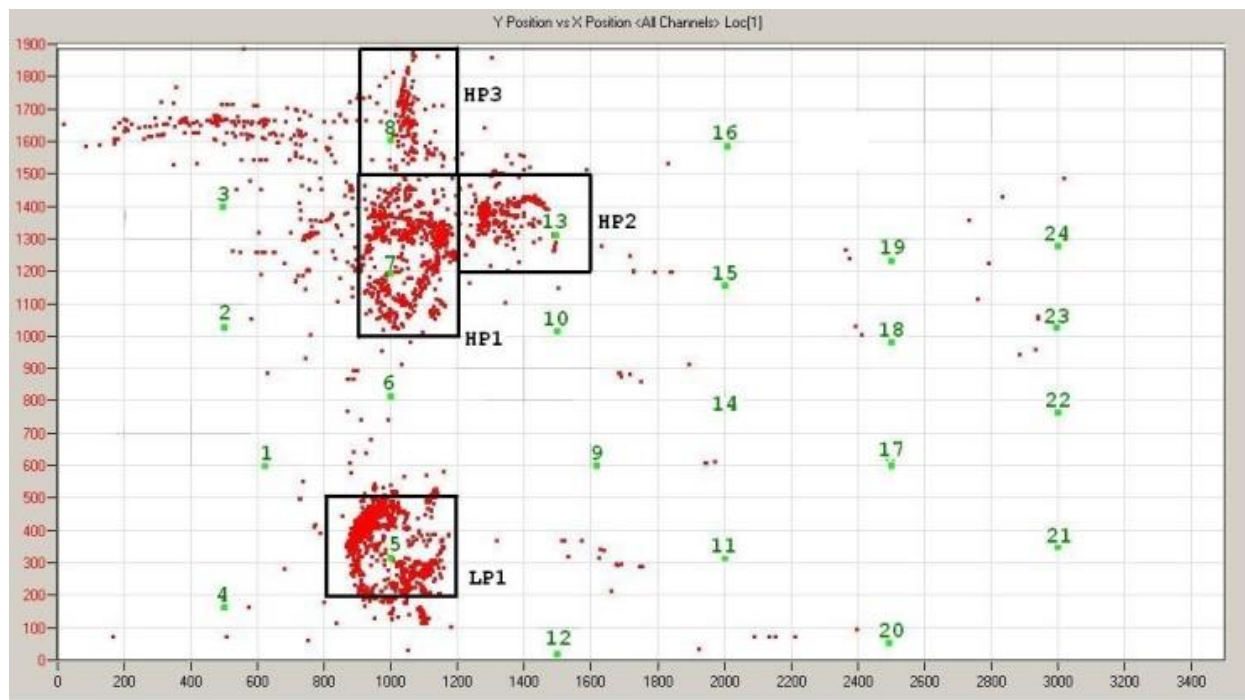


Σχήμα 25. Ενέργειες έναντι κατανομής ενέργειας για έξι αισθητήρες στην βάση του πτερυγίου - ίδια δεδομένα με το Σχήμα 23

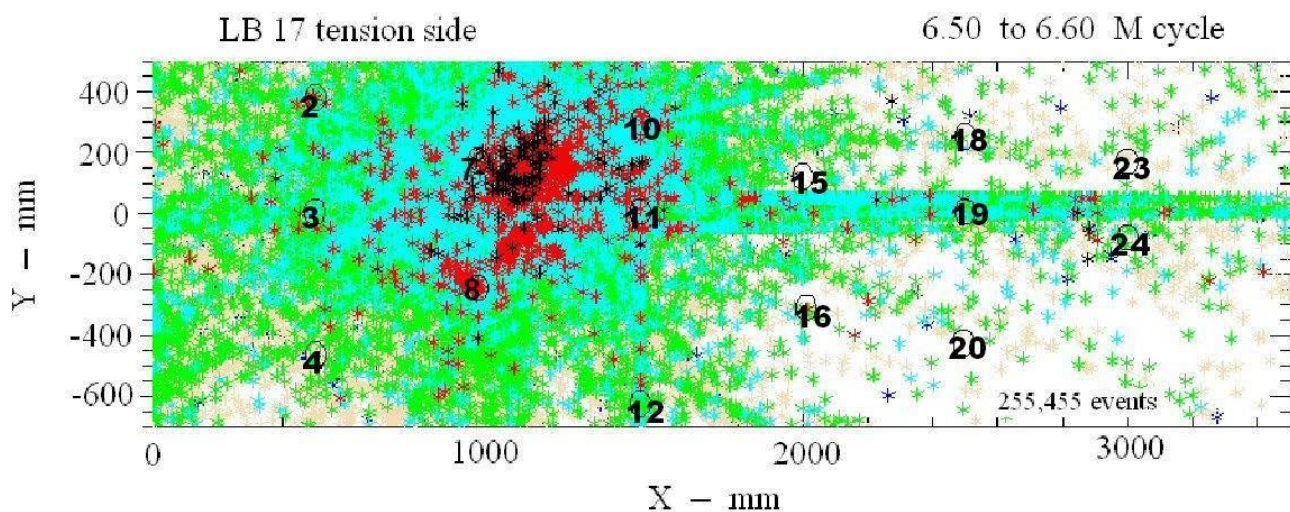
Ανάλυση μετά τη δοκιμή

Το πρώτο βήμα της ανάλυσης μετά την εξέταση θα πρέπει να είναι μια κριτική επισκόπηση όλων των δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Είναι συνήθως πολύτιμη η δημιουργία μιας χρονικής γραμμής της ακολουθίας φόρτωσης και η ταυτοποίηση πότε έχουν συμβεί όλα τα συμβάντα κατά τη διάρκεια αυτής της ακολουθίας. Σε μια δοκιμή κόπωσης, τυχόν χτυπήματα ή συμβάντα που συμβαίνουν τακτικά σε φάση με το σήμα φορτίου σπάνια παράγονται από την ανάπτυξη ελαττωμάτων, ακόμη και αν εμφανίζονται στις κορυφές φορτίου. Η μικροσκοπική ανάπτυξη ελαττωμάτων εξαρτάται από το τοπικό περιβάλλον υλικού. Η τακτική πρόοδος της ρωγμής κατά τη διάρκεια ενός επαναλαμβανόμενου φορτίου θα παρατηρηθεί μόνο κοντά στην αποτυχία, αν υπάρχει καθόλου.

Το μεγαλύτερο μέρος της ανάλυσης μετά την εξέταση συνίσταται στην προσπάθεια προσδιορισμού των θέσεων ελαττωμάτων και της συμπεριφοράς τους υπό συνθήκες πίεσης. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, κάποιος περιορίζεται στα γραφήματα που εφαρμόστηκαν για τη δοκιμή και για την τρέχουσα χρονική περίοδο. Ο αριθμός των γραφημάτων σε πραγματικό χρόνο περιορίζεται από την ταχύτητα και την ικανότητα του υπολογιστή. Η έναρξη της ανάλυσης μετά τη δοκιμή θα πρέπει να χρησιμοποιεί τα αρχικά γραφήματα πραγματικού χρόνου για να επαναλάβει τη δοκιμή. Μετά από αυτό, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί και άλλη γραφική ανάλυση.



Σχήμα 26. Διάγραμμα τοποθεσίας εκτεταμένου συνόλου δεδομένων Σχήματος 17 με τις θέσεις των αρχικών συστάδων

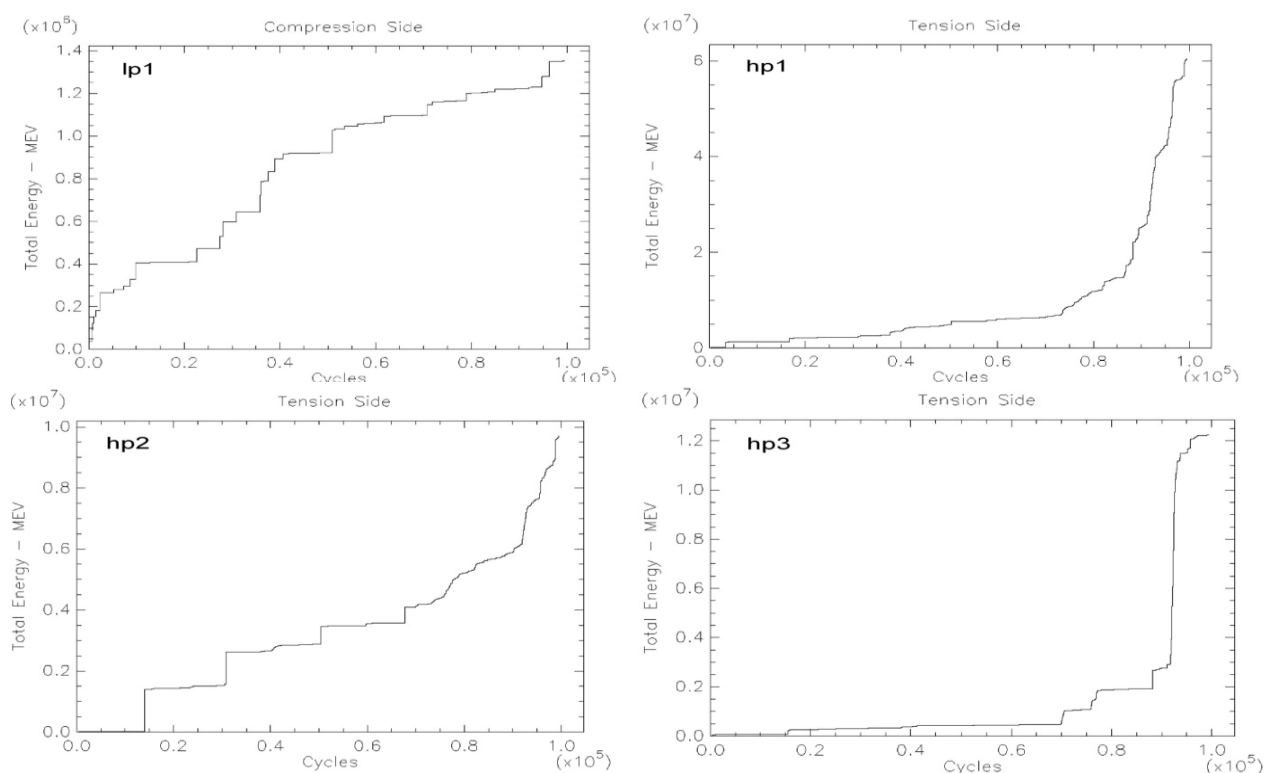


Σχήμα 27. Διάγραμμα τοποθεσίας της πλευράς τάσης του περυγίου κατά τη διάρκεια της τελευταίας φόρτωσης

Το Σχήμα 25 είναι πολύ παρόμοιο με το Σχήμα 17. Χρησιμοποιεί τα ίδια δεδομένα, αλλά καλύπτει πολλούς περισσότερους κύκλους του επόμενου μπλοκ φόρτωσης. Το Σχήμα δείχνει τέσσερις περιοχές που φαίνεται να έχουν συστάδες που ξεκινούν. Αυτά τα δεδομένα εμφανίζονται εδώ, έτσι ώστε να μπορούν να εντοπιστούν τα αρχικά συγκροτήματα. Το Σχήμα 25 δείχνει τα εντοπισμένα συμβάντα στην πλευρά τάνυσης του περυγίου κατά τη διάρκεια της τελευταίας

φόρτωσης της δοκιμής. Αυτό δημιουργήθηκε με πρόγραμμα FORTRAN και όπως μπορεί να διαπιστωθεί, υπάρχει τόσο έντονα εντοπισμένη εκπομπή σε σημείο να κρύβονται τα αρχικά σύνολα. Οι απόλυτες ενέργειες των γεγονότων μετρώνται στο MeV. Ο κώδικας είναι 1 <μπλε <10 <μαύρο <10²<πράσινο <10³<κυανό <10⁴<κόκκινο <10⁵<μαύρο. Οι συμβάσεις του γραφήματος είναι ότι η θέση διατμητικής μεμβράνης είναι μηδενική χορδή και στις δύο πλευρές του πτερυγίου. Οι θετικές τιμές είναι προς την εμπρόσθια ακμή και οι αρνητικές τιμές είναι προς την άκρη.

Το Σχήμα 27 δείχνει το γράφημα συνολικής ενέργειας έναντι κύκλου για τις τέσσερις ομάδες που φαίνονται στο Σχήμα 25. Η συστάδα στην πλευρά χαμηλής πίεσης (συμπίεσης) του πτερυγίου παρουσιάζει μειούμενη κλίση καθώς η δοκιμή κινείται προς αποτυχία. Μια μειούμενη κλίση υποδηλώνει ότι η ασταθής ανάπτυξη ελαττωμάτων έχει σταματήσει. Αυτή ήταν η κύρια συστάδα στην πλευρά χαμηλής πίεσης του πτερυγίου και δείχνει ότι η βλάβη περιοριζόταν στην πλευρά υψηλής πίεσης (τάσης) του. Το μεγαλύτερο μέρος της απελευθέρωσης ενέργειας ήταν στη συστάδα HP1. Η μεγάλη αποτυχία φαίνεται ότι ξεκίνησε σε περίπου 73.000 κύκλους. Η εκπομπή αυξήθηκε ταχύτατα μέχρι περίπου 90.000 κύκλους όπου γίνεται σχεδόν σταθερή μέχρι την αποτυχία.



Σχήμα 28. Συνολικά γραφήματα ενέργειας έναντι κύκλου

Στο Σχήμα 28 έχουμε τα συνολικά γραφήματα ενέργειας έναντι κύκλου για τέσσερις συστάδες για την τελευταία τιμή φορτίου της δοκιμής κόπωσης πτερυγίου BSDS.

Είναι ενδιαφέρον ότι αυτή η ταχεία αύξηση του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας παρατηρείται και στις τρεις συστάδες στην πλευρά υψηλής πίεσης. Επιπλέον, υπάρχουν ενδείξεις και στις τρεις συστάδες ότι ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας επιβραδύνθηκε λίγο πριν από την αποτυχία. Όταν εξετάστηκαν λεπτομερώς οι 12.000 κύκλοι, διαπιστώθηκε ότι ο ρυθμός απελευθέρωσης όπου συνέβη η αστοχία ήταν λίγο διαφορετικός από τον ρυθμό απελευθέρωσης της μπροστινής επιφάνειας υψηλής πίεσης του πτερυγίου από 500 έως 1500mm. Ως εκ τούτου, ολόκληρη η μπροστινή επιφάνεια του πτερυγίου μεταξύ 500mm και 1500mm αποτυγχάνει και την πραγματική μικροθραύση θα μπορούσε να συμβεί οπουδήποτε στην επιφάνεια αυτή. Αυτό του πτερυγίου φαινόταν να μην έχει σοβαρές ατέλειες, με το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του να έχει ομοιόμορφη δύναμη. Η πραγματική θέση αποτυχίας εμφανίστηκε σχεδόν τυχαία στο πτερύγιο.

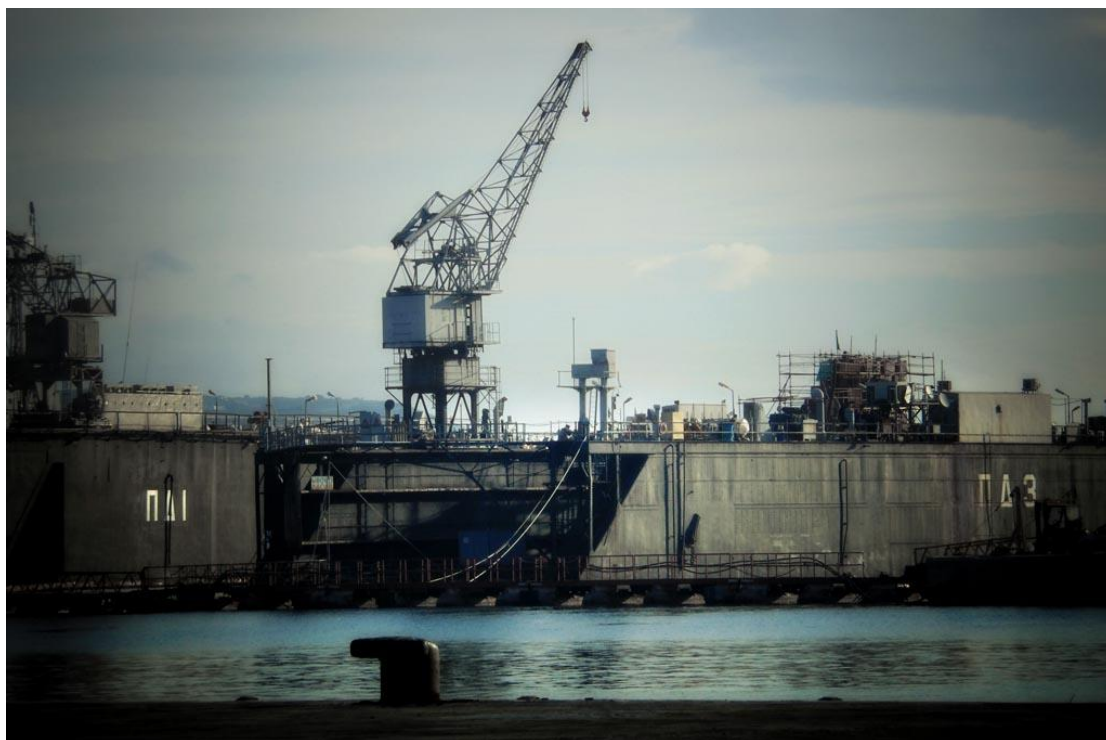
Συνοπτικά, οι αναλύσεις μετά την εξέταση είναι το πιο σημαντικό μέρος μιας δοκιμής ΑΕ. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο πελάτης δεν ενδιαφέρεται πολύ για τις λεπτομέρειες των δοκιμών και την ανάλυση, εφόσον οι μέθοδοι είναι πιστευτές. Αυτό που είναι σημαντικό είναι οι πληροφορίες που δίνει η ΑΕ για τη δοκιμή. Εάν μια δοκιμή δεν ληφθεί για την πραγματική αποτυχία, ποια είναι η θέση του χειρότερου ελαττώματος και ποια είναι η εκτίμηση του πόσο κοντά ήταν το δείγμα σε αποτυχία; Σε μια δοκιμασία απόδειξης, υπήρξαν ενδείξεις ραγδαίας ανάπτυξης καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής και ήταν η δοκιμή αρκετά ευαίσθητη για να παρατηρήσει μικρή ελάττωση; Δεν χρειάζονται συχνά οι ακριβείς λεπτομέρειες της ανάλυσης σε μια τελική έκθεση δοκιμής, αλλά είναι σημαντική η εκτίμηση της υγείας του δείγματος. [10]

5 | Εφαρμογές σε Δίκτυα και Αγωγούς Καυσίμων

Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με ελέγχους ΜΚΕ που εφαρμόζονται σε δίκτυα και αγωγούς καυσίμων και οι οποίοι διενεργούνται από την Τεχνική Διεύθυνση του Ναυστάθμου Κρήτης και συγκεκριμένα από το Τμήμα Ποιοτικού Ελέγχου.

5.1 | Εισαγωγή

Ο Ναύσταθμος Κρήτης – ΝΚ αποτελεί σήμερα, έναν από τους σημαντικότερους και αναντικατάστατους αμυντικούς σχηματισμούς της χώρας λόγω του υψηλού επιπέδου επισκευαστικών, εφοδιαστικών και διοικητικής μέριμνας υπηρεσιών που προσφέρει, όχι μόνο στις Ελληνικές ένοπλες δυνάμεις, αλλά και στις συμμαχικές, έχουν τύχει της ανάλογης αναγνώρισης. Αποτέλεσμα του έργου αυτού αποτελεί η αρμονική συνεργασία μεταξύ του πολιτικού και στρατιωτικού προσωπικού σε όλους τους τομείς της παραγωγικής και επισκευαστικής διαδικασίας.



Οι γενικές αρμοδιότητες της Τεχνικής Διεύθυνσης – ΔΤ του ΝΚ αφορούν τα ακόλουθα:

- α) Εξασφάλιση της εκτέλεσης επισκευών, μετασκευών και συντηρήσεων σκαφών, μηχανών, μηχανημάτων, ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών, πλην υλικού οπλικών συστημάτων και οχημάτων,
- β) Εξασφάλιση της διενέργειας μικρής έκτασης ναυτικών κατασκευών και ναυπηγικών εργασιών, προβαίνοντας στην εκπόνηση συναφών μελετών.

γ) Παροχή υποστήριξης ΔΜ (Διοικητικής Μέριμνας) σε πολεμικά πλοία που ορμούν ή επισκευάζονται στο ΝΚ, καθώς και εξασφάλιση της αποδοτικής λειτουργίας του Ναυτικού Συγκροτήματος, με τη διάθεση των κάτωθι ευκολιών:

- (1) Ηλεκτρικής ενέργειας.
- (2) Ατμού.
- (3) Πεπιεσμένου αέρα.
- (4) Αποσταγμένου ύδατος.

δ) Παροχή θεωρητικής και πρακτικής τεχνικής εκπαίδευσης, εκδίδοντας τα αντίστοιχα πιστοποιητικά/εξουσιοδοτήσεις εκτέλεσης τεχνικών εργασιών, σύμφωνα με τις ισχύουσες διαταγές.

Ζωτικό κομμάτι της Τεχνικής Διεύθυνσης αποτελεί το Τμήμα Ποιοτικού Ελέγχου.

5.2|Τμήμα Ποιοτικού Ελέγχου του Ναυστάθμου Κρήτης – ΤΠΕ/ΝΚ

Οι κύριες αρμοδιότητες του ΤΠΕ του ΝΚ μεταξύ άλλων είναι:

1. Ο προγραμματισμός δραστηριοτήτων που αφορούν καταστροφικούς και μη ελέγχους.
2. Η διερεύνηση δυνατότητας βελτίωσης των παλαιών μεθόδων και ενδεχόμενη υιοθέτηση νέων μεθόδων ελέγχου.
3. Η εισήγηση πιθανού εκσυγχρονισμό ή αναβάθμισης του εξοπλισμού που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών του ΝΚ.
4. Η κάλυψη ευθύνης ελέγχου πρωτογενών υλικών που προορίζονται για κατασκευές και επισκευές.
5. Η εκτέλεση προληπτικού ποιοτικού ελέγχου κατά την διάρκεια επισκευών/κατασκευών π.χ. συγκολλήσεις, επιστρώσεις, δυναμομετρήσεις καθώς και τελικού ελέγχου κατά την δοκιμαστική λειτουργία μετά την ολοκλήρωση των επισκευών/κατασκευών.
6. Η ευθύνη ποιοτικού ελέγχου μέσω φυσικών και μηχανικών δοκιμών σε μέταλλα και κράματα που προορίζονται για επισκευαστικές εργασίες.

Οι ΜΚΕ που εφαρμόζει το ΤΠΕ αναλύονται παρακάτω. Καθώς έγινε εκτενείς περιγραφή των βασικών μεθόδων ΜΚΕ στο 3Ο Κεφάλαιο, στο παρόν θα περιοριστούμε στην παρουσίαση κάθε κατηγορίας ως προς τον εξοπλισμό που χρησιμοποιεί το ΤΠΕ, τις δοκιμές των μεθόδων ΜΚΕ σε δοκίμια καθώς και χρήση τους για την διερεύνηση πιθανών αστοχιών σε πραγματικά υλικά.

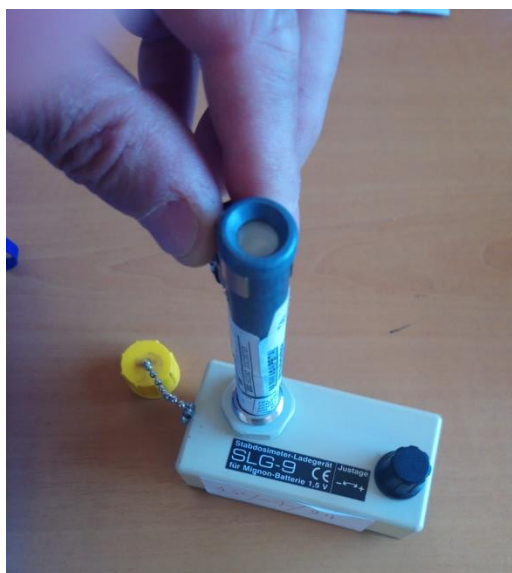
5.2.1|Ο εξοπλισμός του ΤΠΕ και οι ΜΚΕ που εκτελούνται

Καμία από τις ΜΚΕ δεν υστερεί σε σπουδαιότητα από τις υπόλοιπες διότι ανάλογα το προς εξέταση υλικό και βάσει της εμπειρίας του χειριστή, επιλέγεται και εκτελείται ο κατάλληλος ή συνδυασμός κατάλληλων ΜΚΕ για την επίτευξη του στόχου.



Φωτογραφία 7. Όργανα μέτρησης ακτινοβολίας

Στην παραπάνω Φωτογραφία 7 βλέπουμε αριστερά ένα Badget (δοσίμετρο) το οποίο φέρει ο χειριστής κατά τον ΜΚΕ με ακτινογραφία. Το Badget μετράει μηνιαία δόση ακτινοβολίας και μετά το πέρας του μήνα αποστέλλεται σε ειδικό εργαστήριο για να αναγνωστεί. Στην μέση βλέπουμε ένα στυλοδοσίμετρο το οποίο μετράει κατά την διάρκεια της εργασίας ή στο τέλος της ημέρας, την συσσωρευμένη ακτινοβολία. Στα δεξιά βλέπουμε ένα Geiger ή αλλιώς έναν ψηφιακό μετρητή χώρου μέτρησης ακτινοβολίας.



Φωτογραφία 8. Στυλοδοσίμετρο με συσκευή αποφόρτισης



Φωτογραφία 9. Φορητή πηγή ακτινογραφίας



Φωτογραφία 10. Χειριστήριο φορητής πηγής ακτινογραφίας



Φωτογραφία 11. Φορητή πηγή ακτινογραφίας



Φωτογραφία 12. Χειριστήριο φορητής πηγής ακτινογραφίας



Φωτογραφία 13. Τεμάχιο προς ραδιογραφικό έλεγχο

Για τον ραδιογραφικό έλεγχο αρχικά τοποθετείται μία πλάκα από μολύβι. Στην συνέχεια τοποθετούμε την αχτύπητη πλάκα φιλμ και έπειτα το τεμάχιο που θα ελεγχθεί εφαρμόζοντας το σημείο προς έλεγχο πάνω στην πλάκα του φιλμ. Στην προκειμένη περίπτωση, βλέπουμε στην Φωτογραφία 13 ότι ελέγχεται ένα τμήμα συγκόλλησης. Για την διευκόλυνση του χειριστή τοποθετείται εξτρά μία ταινία με στοιχεία τα οποία είναι μολυβογράμματα καθώς και κάποιοι δείκτες ποιότητας (ράβδοι διαφορετικού πάχους). Τα παραπάνω θα αποτυπωθούν στο φιλμ και θα αποτελούν προσδιοριστικά στοιχεία για το τεμάχιο που ελέγχεται. Στην φωτογραφία 14 φαίνεται η αποτύπωση των μολυβογραμμάτων και των δεικτών ποιότητας. Το ύψος της συσκευής πρέπει να είναι στα 70cm σε σχέση με το υπό δοκιμή τεμάχιο και κάθετη σε αυτό.



Φωτογραφία 14. Συσκευή ανάγνωσης ραδιογραφικού φιλμ



Φωτογραφία 15. Ραδιογραφικό φιλμ

Βλέπουμε στο παραπάνω φιλμ το προς έλεγχο τμήμα συγκόλλησης, τα μολυβογράμματα και ισχνά τους 5 δείκτες ελέγχου.



Φωτογραφία 16. Ανάγνωση ραδιογραφικού φιλμ με εμφανή την κατά μήκος αστοχία



Φωτογραφία 17. Όργανα οπτικού ελέγχου

Τα μετρητικά όργανα οπτικού ελέγχου επιτυγχάνουν επιθυμητές μετρήσεις ύψους, γωνίας, υποκοπές κλπ.

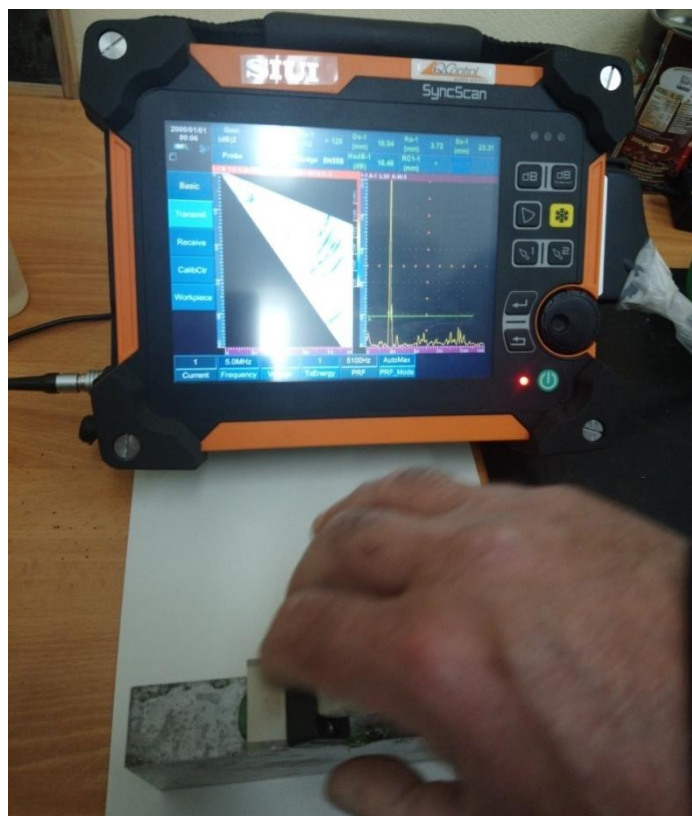


Φωτογραφία 18. Ψηφιακό όργανο υπερήχων, κεφαλή δέσμης, τεμάχιο υπό δοκιμή.



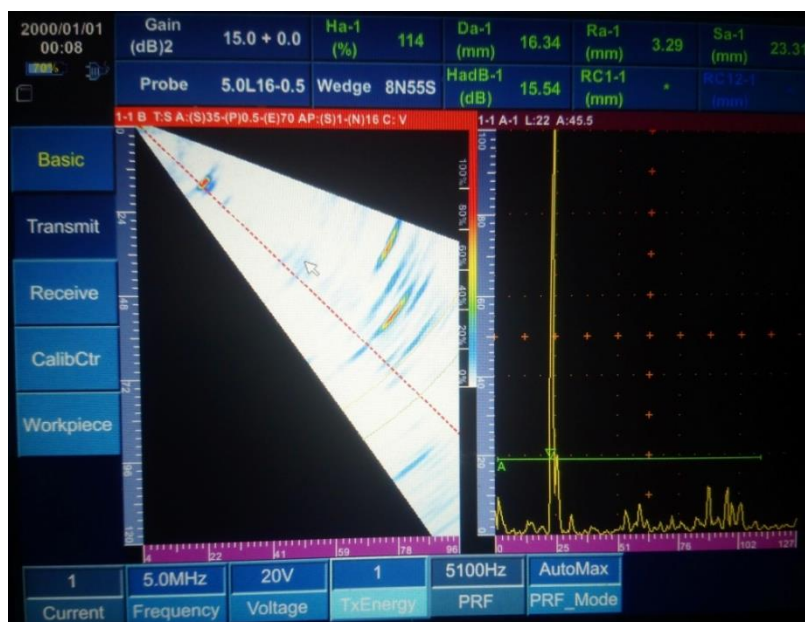
Φωτογραφία 19. Κεφαλές (probes) υπερήχων

Οι κεφαλές που βλέπουμε στην Φωτογραφία 19 έχουν διαφορετικές γωνίες εκπομπής 45°, 60° και 70° και διαφορετικές συχνότητες.



Φωτογραφία 20. Phased-array. Ψηφιακό όργανο υπερήχων, κεφαλή δέσμης, τεμάχιο υπό δοκιμή με ατέλεια

Το ψηφιακό όργανο υπερήχων Phased – array χρειάζεται ειδική πιστοποίηση χειριστή. Δίνει την δυνατότητα αποτελεσμάτων σε μορφή πίτας για τον πιο εύκολο και ευδιάκριτο προσδιορισμό της αστοχίας. Μπορεί να εκτελέσει πολλαπλό έλεγχο ενώ έχει τη δυνατότητα να εκπέμπει από 16 έως και 64 σήματα ταυτόχρονα.



Φωτογραφία 21. Phased – array. Ψηφιακό όργανο υπερήχων – Ένδειξη αστοχίας



Φωτογραφία 22. Φωτόμετρο - Μετράει τον φωτισμό στην περιοχή εξέτασης

Το ανώτατο όριο είναι $<20\text{lux}$ για έλεγχο με φθορίζοντα μαγνητικά υλικά ενώ το μαύρο φως (black light) θα πρέπει να είναι $>1000\mu\text{w}/\text{cm}^2$.



Φωτογραφία 23. Συσκευή μαγνητικού ελέγχου

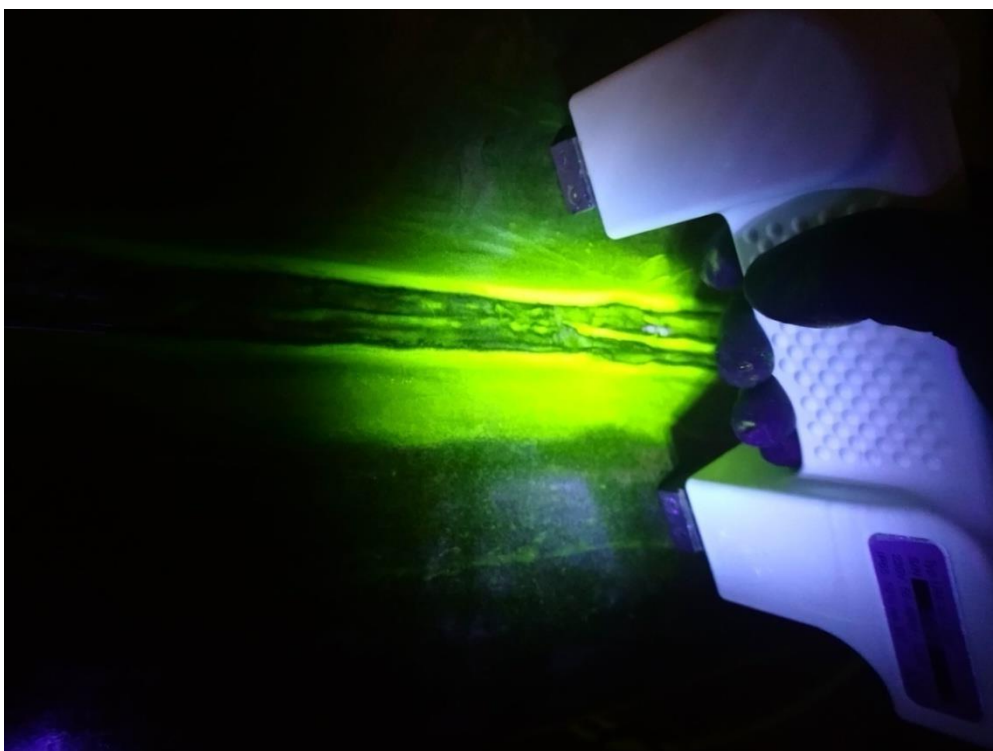
Ο παραπάνω μαγνήτης έχει τη δυναμική να μας αποδώσει το μαγνητικό φορτίο που χρειαζόμαστε για τον έλεγχο.



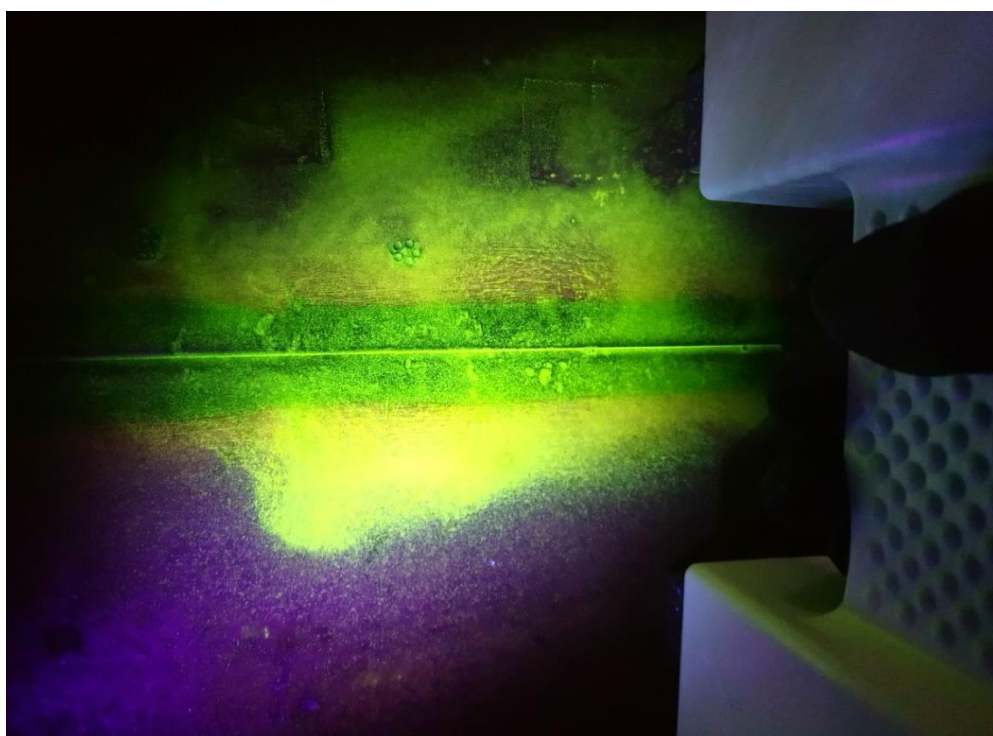
Φωτογραφία 24. Συσκευή μαγνητικού ελέγχου πάνω σε πρότυπο δοκίμιο 4Kgr



Φωτογραφία 25. Φθορίζοντα μαγνητικά υγρά με ψήγματα σιδήρου



Φωτογραφία 26. Εφαρμογή φθοριζόντων μαγνητικών υγρών σε δοκίμιο και δημιουργία μαγνητικού πεδίου

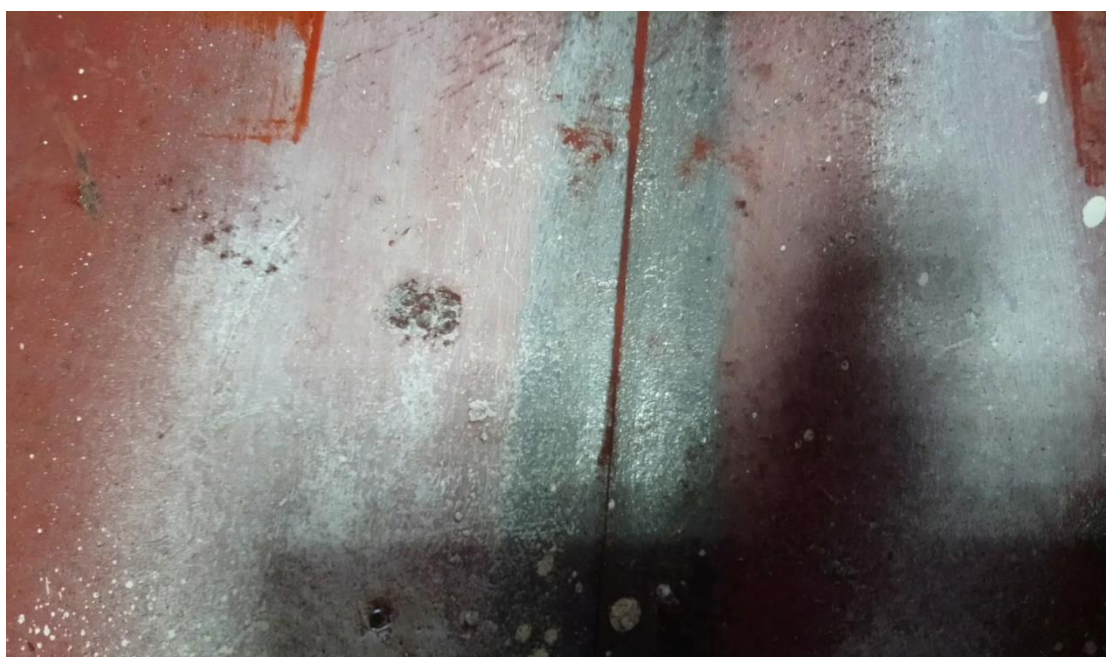


Φωτογραφία 27. Μαγνητικό πεδίο σε δοκίμιο με φθορίζοντα μαγνητικά υγρά

Στην Φωτογραφία 27 έχουμε τη δημιουργία κίτρινης γραμμής κατά μήκος της αστοχίας μετά την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου σε δοκίμιο με φθορίζοντα μαγνητικά υγρά.



Φωτογραφία 28. Εφαρμογή μαγνητικών πεδίου με χρήση σκόνης με ψήγματα σιδήρου κόκκινου χρώματος



Φωτογραφία 29. Εφαρμογή μαγνητικού πεδίου σε δοκίμιο με μαγνητική σκόνη

Στην Φωτογραφία 29 έχουμε τη δημιουργία κόκκινης γραμμής κατά μήκος της αστοχίας μετά την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου σε δοκίμιο με μαγνητική σκόνη.

Κατά τον έλεγχο με διεισδυτικά υγρά, όπως έχουμε προαναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο, έχουμε τον καθαρισμό της επιφάνειας στη συνέχεια την εφαρμογή του διεισδυτή κατά μήκος της ατέλειας καθώς και στην Θερμικά Επεξεργασμένη Ζώνη (ΘΕΖ). Αναμένουμε όσο ενδείκνυται (περίπου 15΄) και κατόπιν καθαρίζουμε με ειδικό καθαριστή (cleaner) και μέσο καθαρισμού (πανί χωρίς χνούδι) και εφαρμόζουμε τον εμφανιστή (developer).



Φωτογραφία 30. Εφαρμογή διεισδυτή κατά τον έλεγχο με διεισδυτικά υγρά



Φωτογραφία 31. Καθαρισμός επιφάνειας μετά την εφαρμογή του διεισδυτή



Φωτογραφία 32. Εφαρμογή του εμφανιστή (developer)

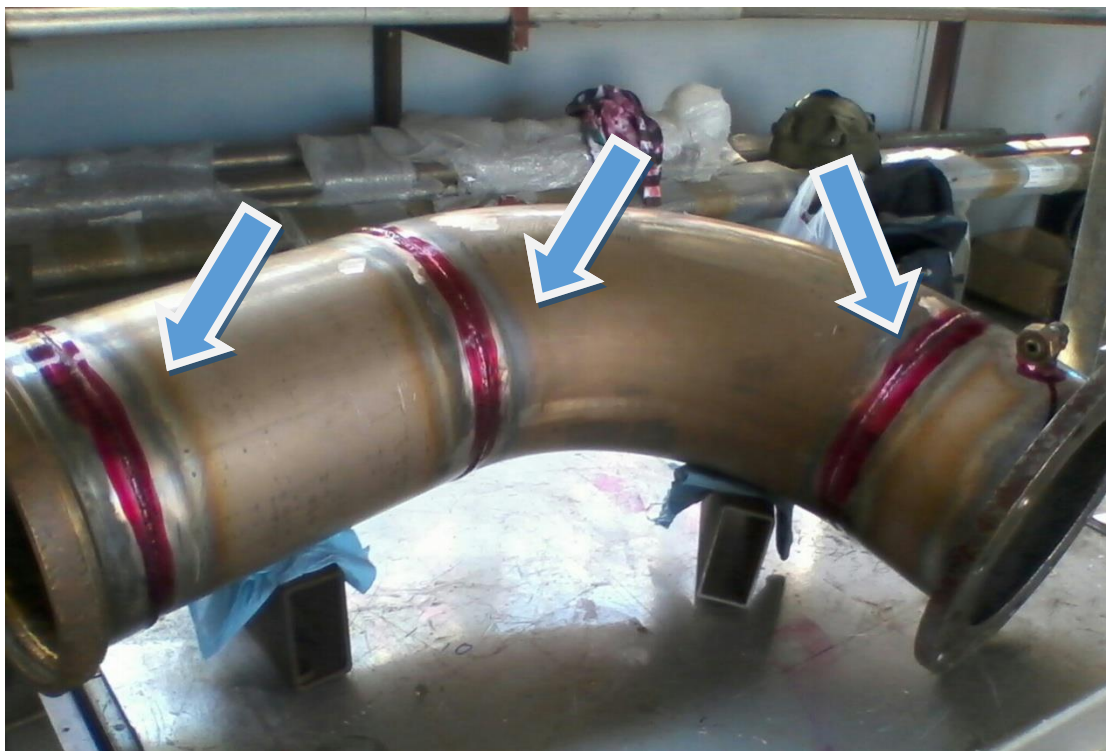
Στη συνέχεια θα δούμε κάποιες εφαρμογές ΜΚΕ από το Τμήμα Ποιοτικού Ελέγχου του Ναυστάθμου Κρήτης.





Φωτογραφία 33. ΜΚΕ με διεισδυτικά υγρά

Στην παραπάνω Φωτογραφία 33 βλέπουμε το αποτέλεσμα μετά την εφαρμογή ΜΚΕ με διεισδυτικά υγρά ορατού φωτός σε τμήμα ανθεκτικού υποβρυχίου (τύπος μετάλλου: ΗΥ – 80).



Φωτογραφία 34. ΜΚΕ με διεισδυτικά υγρά

ΜΚΕ Διεσδυτικά Υγρά. Στην παραπάνω Φωτογραφία 34 γίνεται προετοιμασία σωλήνα που έχει γίνει εφαρμογή διεσδυτή. Το κομμάτι αποτελεί σωλήνωμα ψύξης καραβιού και το υλικό του είναι κράμα χαλκού – νικελίου – σιδήρου γνωστό ως Cunifer (Copper – Nickel – Iron alloy)



Φωτογραφία 35. Οπτικός έλεγχος

Οπτικός έλεγχος σε συγκόλληση εγκατεστημένου συστήματος πυρόσβεσης ελικοδρομίου σκάφους.



Φωτογραφία 36. Ανάπτυγμα διεισδυτικών υγρών

Στην Φωτογραφία 36 βλέπουμε αλουμίνιο μετά την εφαρμογή διεισδυτικών υγρών. Διαπιστώθηκαν δυο σπασίματα (crack) ενώ παράλληλα έγινε και εντοπισμός των ορίων ρωγμής. Τα διεισδυτικά εφαρμόστηκαν σε λαμαρίνα άνω ισάλου πλοίου.



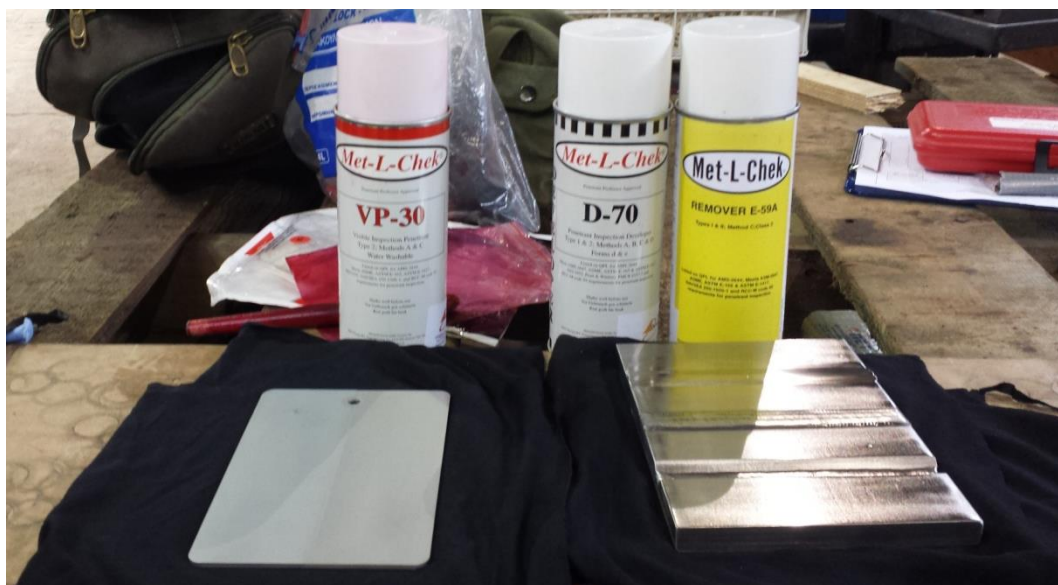
Φωτογραφία 37. Ανάπτυγμα διεισδυτικών υγρών

Η Φωτογραφία 36 είναι ίδια με την Φωτογραφία 37 απλώς το ανάπτυγμα είναι ακόμα στην αρχή του.



Φωτογραφία 38. Μαγνητικός έλεγχος

Φωτογραφία 38. Μαγνητικός έλεγχος αντιθετικού χρώματος (μαύρο – άσπρο) συγκόλλησης δύο τμημάτων ελάσματος – ενώσεις λαμαρινών (κοινός χάλυβας).



Φωτογραφία 39. Διάφορα διεισδυτικά υγρά

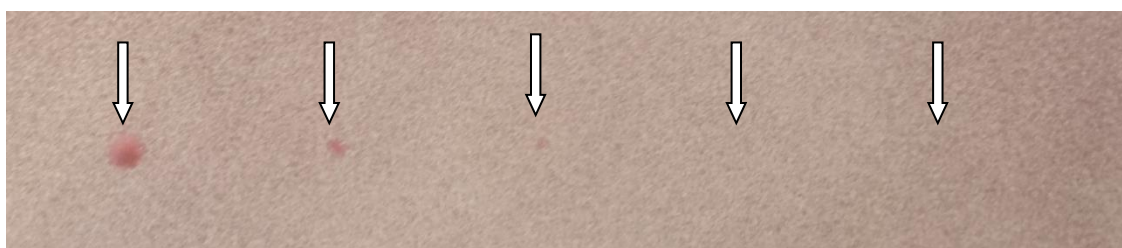
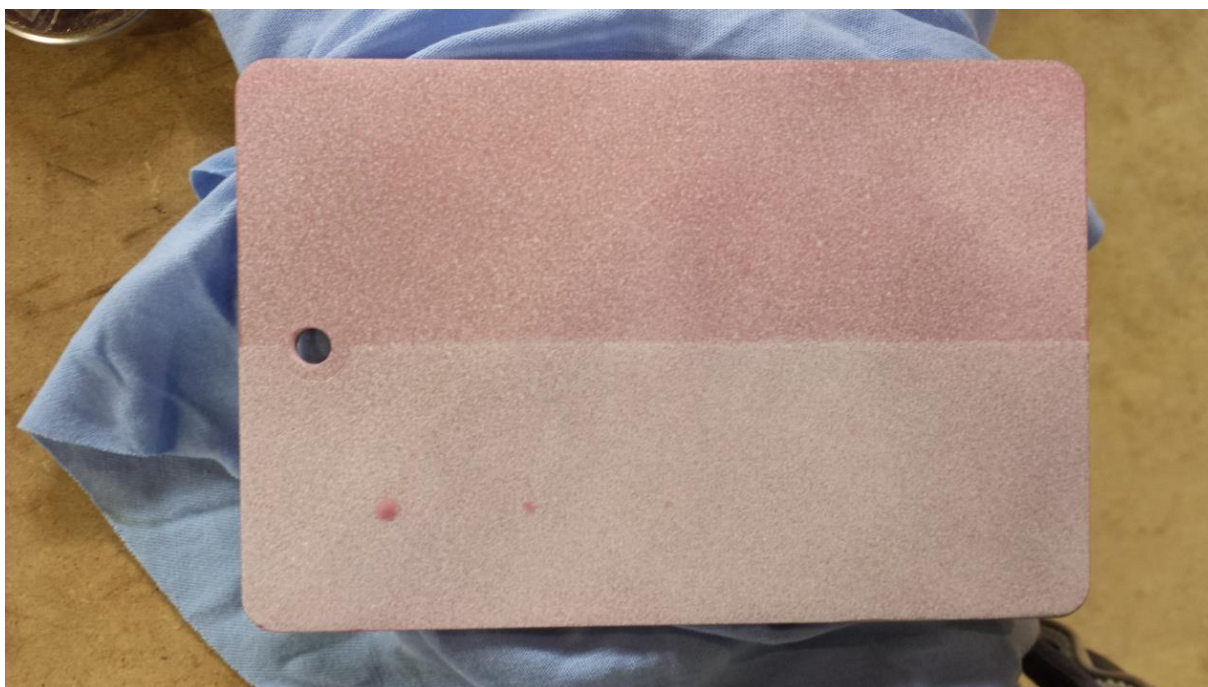
Στην παραπάνω Φωτογραφία 39, βλέπουμε μία σειρά διεισδυτικών υγρών καθώς και δύο δοκίμια. Με τη σειρά από αριστερά προς τα δεξιά έχουμε έναν διεισδυτή, στη μέση έναν εμφανιστή

και τέλος έναν καθαριστή. Κάτω στα δοκίμια έχουμε αριστερά ένα δοκίμιο που έχει σφάλματα και δείχνει την αντιθετικότητα των διεισδυτικών υγρών και δεξιά ένα άλλο δοκίμιο που έχει τεχνητά σφάλματα.

Τα δοκίμια χρησιμοποιούνται για δύο βασικούς λόγους:

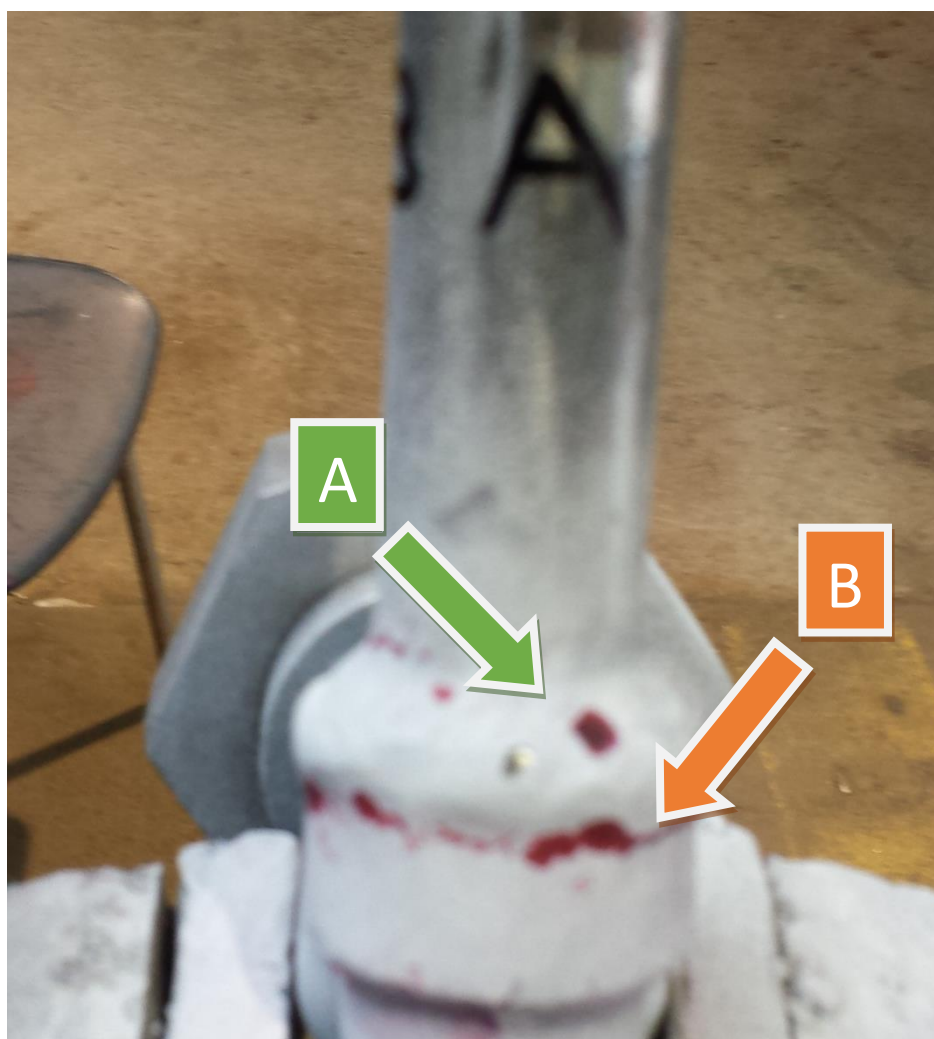
1ον για αξιολόγηση των διεισδυτικών υγρών και

2ον για αξιολόγηση του χειριστή κατά πόσο γνωρίζει να εφαρμόζει την μέθοδο και να βρίσκει τα αναμενόμενα σφάλματα.



Φωτογραφία 40. Εφαρμογή διεισδυτικών υγρών σε δοκίμιο

Συνολικά πέντε σημεία ελέγχου. Στην φωτογραφία φαίνονται μόνο τρία λόγω χαμηλής ανάλυσης της φωτογραφίας. Τα υπόλοιπα δύο διακρίνονται με γυμνό μάτι.

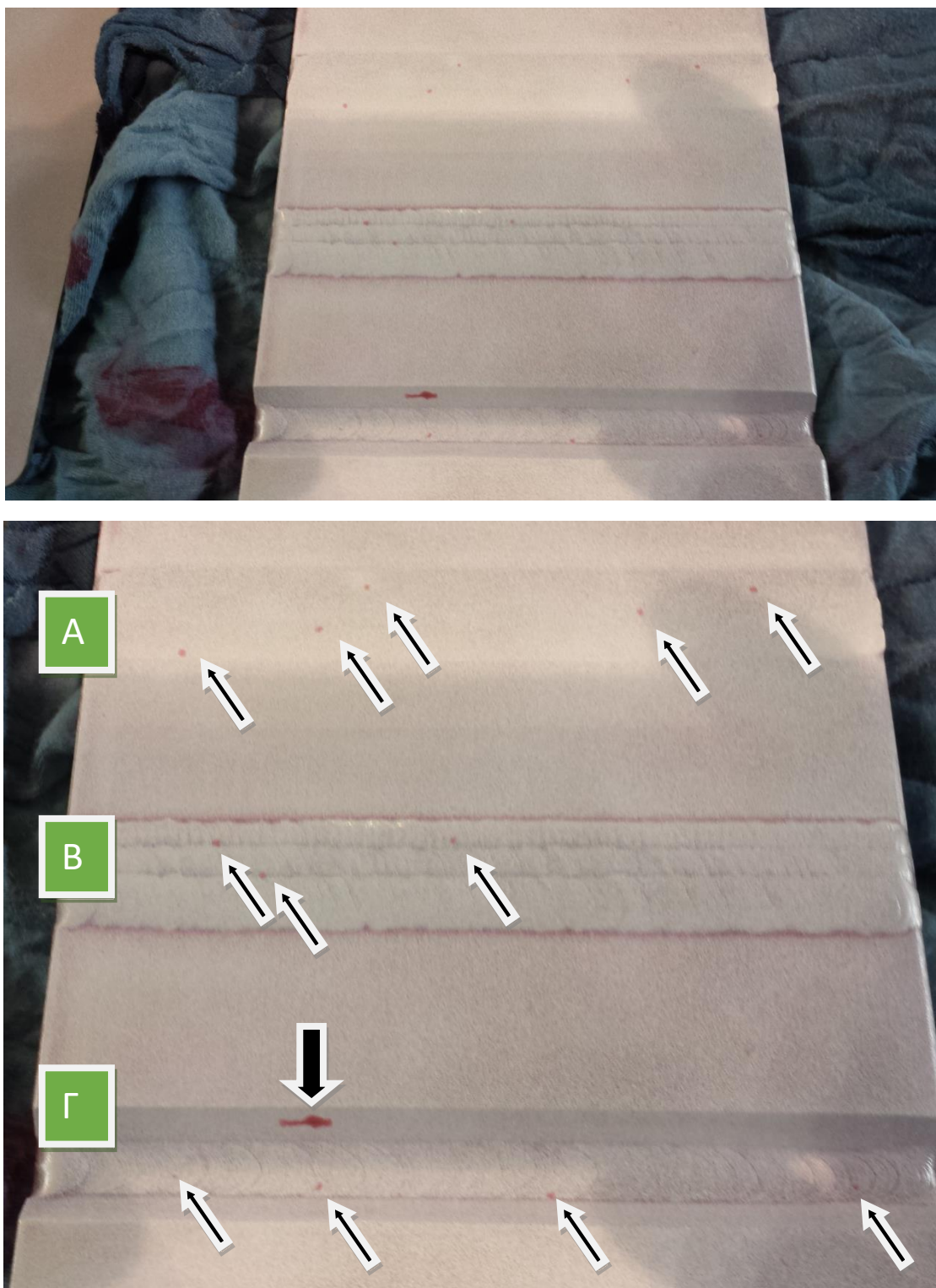


Φωτογραφία 41. Εφαρμογή διεισδυτικών υγρών

Στην Φωτογραφία 41 έχουμε τμήμα από δίκτυο ψύξης υψηλής πίεσης, υλικό κοινός σίδηρος. Έγινε εφαρμογή διεισδυτικών υγρών και στα αποτελέσματα έχουμε εμφανή τα σημεία αστοχιών.

Σφάλμα A: Porosity (σφάλμα στο πορώδες).

Σφάλμα B: Σπάσιμο κάτω δεξιά στην βάση.

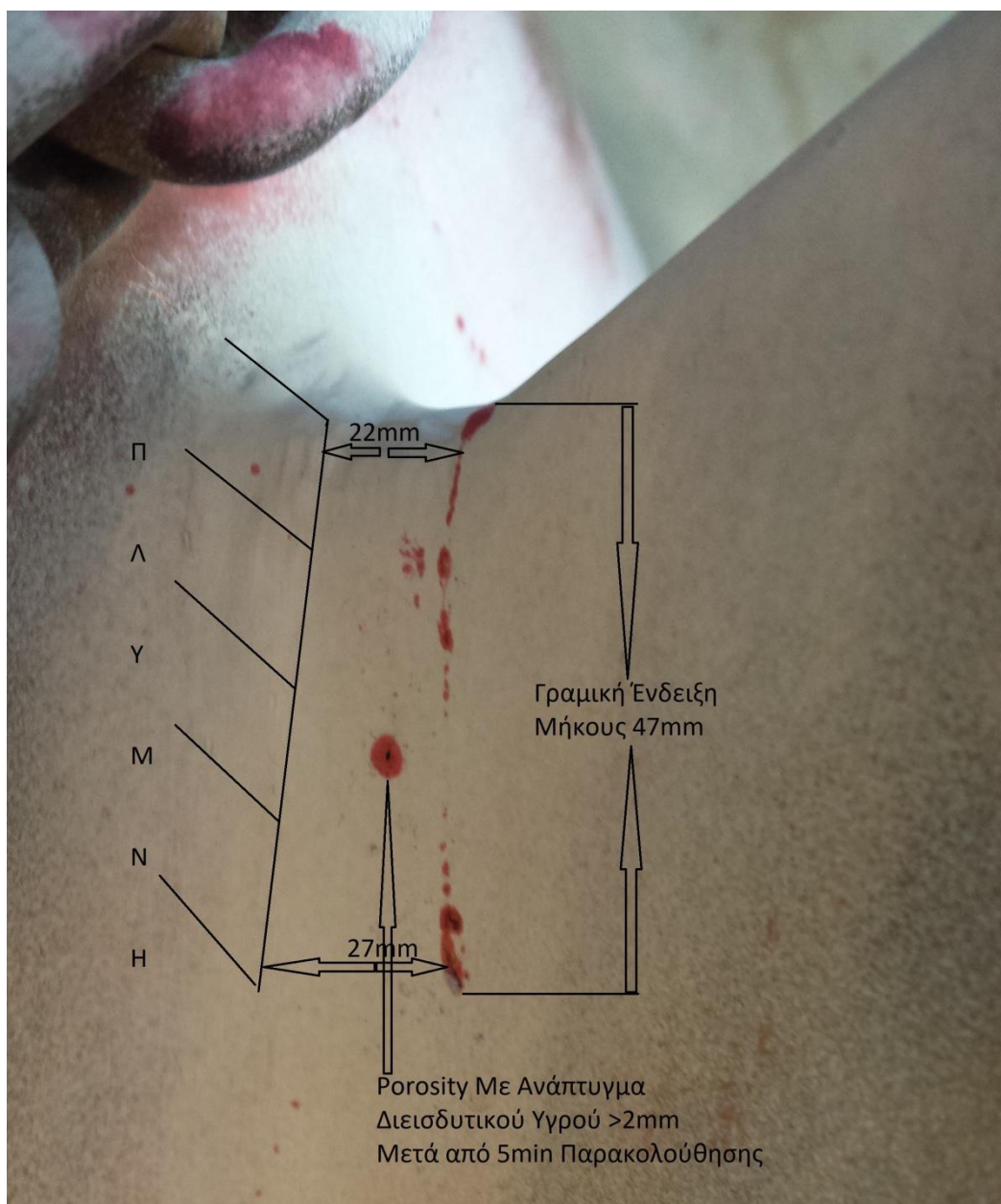


Φωτογραφία 42. Δοκίμιο με τεχνητά σφάλματα σε περιοχές συγκόλλησης. Τρεις ζώνες ελέγχου Α,Β και Γ.

Α ζώνη: Ημιτελές στάδιο συγκόλλησης με τεχνητά σφάλματα. Πέντε σφάλματα porosity.

Β ζώνη: Τελική συγκόλληση με τρία σφάλματα porosity.

Γ ζώνη: Ημιτελές στάδιο συγκόλλησης με τεχνητά σφάλματα. Τέσσερα σφάλματα porosity και ένα σπάσιμο (crack).



Φωτογραφία 43. Εφαρμογή διεσδυτικού υγρού

Στην Φωτογραφία 43 έχουμε εφαρμογή διεσδυτικού υγρού σε ένα πτερύγιο προπέλας. Porosity κοντά στη βάση στήριξης του πτερυγίου.



Φωτογραφία 44. Τμήματα συγκολλήσεων προς έλεγχο κατά την διαδικασία επισκευής πλοίου

Τα σημειωμένα τμήματα N° 1, 2, 3 και 4 υποδεικνύουν τμήματα συγκολλήσεων τα οποία έχουν ακτινογραφηθεί.

Όλες οι παραπάνω πληροφορίες και φωτογραφίες αποτελούν μη διαβαθμισμένο υλικό. [13]

5.2.2 | Πιστοποιήσεις χειριστή

Το προσωπικό που εκτελεί ΜΚΕ θα πρέπει βάσει νόμου να είναι πιστοποιημένο. Η αποτελεσματικότητα του ελέγχου εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τον χειριστή, γεγονός που τονίζεται σε όλα τα πρότυπα. Τα απαραίτητα στοιχεία για την πιστοποίηση είναι η εκπαίδευσή του, η εμπειρία, η ικανότητα να εκτελεί τους ΜΚΕ η οποία επιβεβαιώνεται μέσω εξετάσεων καθώς και η φυσική ικανότητα του ατόμου όπως για παράδειγμα η καλή όραση, η ορθή κρίση για την αξιολόγηση ενδείξεων κλπ. Οι πιθανοί χειριστές μπορούν να πιστοποιηθούν με τους εξής δύο τρόπους:

α) Πιστοποίηση από τον εργοδότη (Employer Based Certification) και

β) Πιστοποίηση από ανεξάρτητο φορέα (Central Certification Schemes)

Υπάρχουν 3 επίπεδα πιστοποίησης:

➤ **Επίπεδο 1**

- Βαθμονόμηση εξοπλισμού
- Εκτέλεση ελέγχου βάσει συγκεκριμένης γραπτής οδηγίας και υπό την επίβλεψη προσωπικού Επιπέδου 2

➤ **Επίπεδο 2**

- Βαθμονόμηση εξοπλισμού
- Εκτέλεση ελέγχου βάσει συγκεκριμένου προτύπου
- Αξιολόγηση αποτελεσμάτων βάσει προτύπου αποδοχής – απόρριψης
- Αναφορά αποτελεσμάτων (συμπεριλαμβανομένης της αποδοχής – απόρριψης)
- Επίβλεψη προσωπικού Επιπέδου 1
- Εκπαίδευση προσωπικού επιπέδου 1, στην πράξη (on the job)

➤ **Επίπεδο 3**

Όπως το Επίπεδο 2 και επιπλέον:

- Επιλογή/ανάπτυξη τεχνικής και επιλογή/ανάπτυξη διαδικασίας ελέγχου
- Ερμηνεία κωδίκων, προτύπων και προδιαγραφών
- Επίβλεψη εργαστηρίου ΜΚΔ
- Ανάπτυξη κριτηρίων αποδοχής – απόρριψης, όταν αυτά δεν υπάρχουν
- Εκπαίδευση και εξέταση (προς πιστοποίηση) προσωπικού Επιπέδου 1 και 2

Το Τμήμα Ποιοτικού Ελέγχου του Ναυστάθμου Κρήτης αποτελείται από έμπειρο ανθρώπινο δυναμικό, ειδικά καταρτισμένο και πιστοποιημένο, το οποίο επιμορφώνεται συνεχώς, εκτελεί ΜΚΕ, αξιολογεί και υπογράφει αναφορές ελέγχων.

Η διαδικασία ΜΚΕ που ακολουθείται είναι αρχικά να συμπληρώνεται από τον επιθεωρητή ένα φύλλο – έντυπο αξιολόγησης βάση της ΜΚΕ που έχει επιλεγεί και στο οποίο αναφέρεται, εκτός των στοιχείων του υλικού προς επιθεώρηση, η τεχνική εκτέλεσης της μεθόδου ΜΚΕ, τα κριτήρια αξιολόγησης, οι ενδείξεις που σημειώθηκαν και τα επιτρεπτά όρια για να χαρακτηριστεί μία ένδειξη ως ατέλεια δηλαδή ένδειξη που επιδέχεται αποκατάσταση ή ελάττωμα που σημαίνει ότι το υλικό/εξάρτημα χρήζει αντικατάστασης.

Η αξιολόγηση περιλαμβάνει και το κομμάτι της ερμηνείας, δηλαδή την εύρεση της αιτίας που δημιούργησε την ένδειξη και η οποία αποτελείται από δύο φάσης. Στην πρώτη φάση η ερμηνεία της ένδειξης την κατατάσσει σε ψευδή ή σχετική και στην δεύτερη φάση και εφόσον απαιτείται, εντοπίζεται η κατάσταση (ασυνέχεια) μέσα στο υλικό, που δημιούργησε την ένδειξη. Την ερμηνεία ακολουθεί η αξιολόγηση όπου ο επιθεωρητής υποβάλλει αναφορά ευρημάτων και προτάσεις επανεξέτασης ή αποκατάστασης ή αντικατάστασης.

5.2.3|Πρότυπα ΜΚΕ

Οι ΜΚΕ αποτελούν στις μέρες μας βασική προϋπόθεση ασφαλούς λειτουργίας και απόδοσης κάθε κατασκευής και συμβάλουν σημαντικά στην εξασφάλιση της ποιότητάς τους. Για τον λόγο αυτό έχει θεσπιστεί μεγάλος αριθμός εθνικών και διεθνών προτύπων, κανόνων και κωδίκων υψηλής επιστημονικής και τεχνολογικής στάθμης. Αυτά τα πρότυπα καλύπτουν όλο το φάσμα εφαρμογών ΜΚΕ στην βιομηχανία και τις κατασκευές που σημαίνει ότι αναφέρονται λεπτομερώς στις μεθόδους, στα μέσα, τις διαδικασίες, την εκπαίδευση, την διαπίστευση τόσο των εργασθηρίων όσο και του προσωπικού κλπ.

Το Τμήμα Ποιοτικού Ελέγχου ακολουθεί δύο πρότυπα:

- 1. Το Αμερικάνικο Πρότυπο Military Standard 2035(A)**
- 2. Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN ISO5817**

Η εφαρμογή προτύπων γίνεται βάσει των παραπάνω Αμερικάνικο ή Ευρωπαϊκό και κατά περίπτωση επιλέγεται όποιο ζητηθεί. [14]

INCH-POUND

MIL-STD-2035A (SH)
15 MAY 1995
SUPERSEDING
MIL-STD-2035 (SH)
4 JULY 1991

DEPARTMENT OF DEFENSE
TEST METHOD

NONDESTRUCTIVE TESTING
ACCEPTANCE CRITERIA



AMSC N/A

AREA NDTI

DISTRIBUTION STATEMENT A. Approved for public release; distribution is unlimited.

Εικόνα 42. Αμερικάνικο Πρότυπο Military Standard 2035(A)

EUROPEAN STANDARD
 NORME EUROPÉENNE
 EUROPÄISCHE NORM

EN ISO 5817

August 2007

ICS 25.160.40

Supersedes EN ISO 5817:2003

English Version

Welding - Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their
 alloys (beam welding excluded) - Quality levels for imperfections
 (ISO 5817:2003, corrected version:2005, including Technical
 Corrigendum 1:2006)

Soudage - Assemblages en acier, nickel, titane et leurs
 alliages soudés par fusion (soudage par faisceau exclu) -
 Niveaux de qualité par rapport aux défauts (ISO 5817:2003,
 version corrigée:2005, Corrigendum Technique 1:2006
 inclus)

Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl,
 Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne
 Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von
 Unregelmäßigkeiten (ISO 5817:2003, korrigierte
 Fassung:2005, einschließlich Technisches Corrigendum
 1:2006)

This European Standard was approved by CEN on 18 July 2007.

CEN members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration. Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the CEN Management Centre or to any CEN member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN member into its own language and notified to the CEN Management Centre has the same status as the official versions.

CEN members are the national standards bodies of Austria, Belgium, Bulgaria, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland and United Kingdom.



EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
 COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION
 EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG

Management Centre: rue de Stassart, 36 B-1050 Brussels

© 2007 CEN All rights of exploitation in any form and by any means reserved worldwide for CEN national Members.

Ref. No. EN ISO 5817:2007: E

Εικόνα 43. Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN ISO5817

6 | Μελέτες Εφαρμογής ΑΕ σε Δίκτυα Μεταφοράς και Δεξαμενές Αποθήκευσης Υγρών Καυσίμων

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν διάφορες μελέτες της Μεθόδου ΑΕ σε Δίκτυα Μεταφοράς και Δεξαμενές Αποθήκευσης Υγρών Καυσίμων. Πριν από αυτό όμως θα παρουσιάσουμε στην Εισαγωγή μία μελέτη σχετικά με τις προοπτικές χρησιμοποίησης της μεθόδου ΑΕ για τον έλεγχο δεξαμενών και στη συνέχεια τα ποσοτικά αποτελέσματα μιας μελέτης συσχέτισης σχετικά με την αξιοπιστία της Μεθόδου ΑΕ όταν αυτή εφαρμόζεται για τον έλεγχο δεξαμενών.

6.1 | Εισαγωγή

6.1.1 | Περίληψη

Η παρακάτω μελέτη αναλύει τις προοπτικές χρησιμοποίησης της μεθόδου ΑΕ σε δοκιμές πυθμένων κατακόρυφων συγκολλημένων δεξαμενών που χρησιμοποιούνται για αποθήκευση πετρελαίου και παραγώγων του. Απαιτούνται κατευθυντήριες οδηγίες για την περιγραφή μιας ενοποιημένης έκδοσης της τεχνικής για τη δοκιμή τέτοιων αντικειμένων και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων τέτοιων δοκιμών.

6.1.2 | Μελέτη

Προς το παρόν, η μείωση της συχνότητας των ατυχημάτων και η αύξηση της ασφάλειας λειτουργίας αποτελεί έναν από τους πρωταρχικούς στόχους των επιχειρήσεων που ασχολούνται με την παραγωγή, επεξεργασία και μεταφορά πετρελαίου και των παραγώγων του. Προκειμένου να επιλυθούν συναφή προβλήματα, πρέπει να διαγνωστεί η τεχνική κατάσταση του υλικού χρησιμοποιώντας σύγχρονες και αποδοτικές τεχνικές. Η προσοχή επικεντρώνεται σε τμήματα του εξοπλισμού των οποίων η αποτυχία προκαλεί διαρροές, οι οποίες βλάπτουν το περιβάλλον και παράλληλα προκαλούν ζημιογόνες απώλειες. Ένας τέτοιος τύπος εξοπλισμού είναι η κάθετη κυλινδρική δεξαμενή χάλυβα (Vertical Steel Tank – VST).

Η ταξινόμηση των ατελειών τέτοιων δεξαμενών περιλαμβάνει διάφορα ελαττώματα των δομικών στοιχείων VST και καθορίζει αποδεκτούς αριθμούς ελαττωμάτων διαφόρων τύπων ανά δεξαμενή. Οι έρευνες μας οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι το 100% των δεξαμενών έχει ελαττώματα. Οι μελέτες των εκθέσεων σχετικά με την τεχνική κατάσταση του εξοπλισμού υποδηλώνουν ότι παράγονται ελαττώματα στις διαδικασίες συναρμολόγησης και λειτουργίας. Οι βλάβες που προκαλούν διαρροές πετρελαίου είναι τα πιο συχνά ατυχήματα κατά τη λειτουργία δεξαμενών

πετρελαίου. Μπορούν να προκληθούν από ελαττώματα συγκόλλησης που παράγονται κατά τη διαδικασία συναρμολόγησης και από τη συσσώρευση ελαττωμάτων στο στάδιο της λειτουργίας. Όπως προκύπτει από την εμπειρία λειτουργίας μιας τέτοιας δεξαμενής, τέτοιες ατέλειες δεν ενέχουν κίνδυνο σπασίματος ή θραύσης, επειδή μπορούν να εντοπιστούν και να εξαλειφθούν. Οι ζημιές που οφείλονται σε βλάβες που οδηγούν σε διαρροές, οι οποίες υποδηλώνουν την υποβάθμιση της ποιότητας μιας εγκατάστασης, υπολογίζονται με βάση τις απώλειες πετρελαίου ή παραγώγων του και το κόστος των εργασιών επισκευής. Οι περιβαλλοντικές ζημιές που προκαλούνται από τις θραύσεις των δεξαμενών, ακόμη και χωρίς το κόστος των έργων αποκατάστασης, εκτιμώνται περίπου στο εικοσαπλάσιο κόστος μιας εγκατάστασης αποθήκευσης πετρελαίου. Εάν διαρρεύσει υγρό με ένα ρυθμό δύο σταγόνων ανά δευτερόλεπτο, η μηνιαία απώλεια είναι μέχρι 130 λίτρα και εάν μια διαρροή είναι υπό μορφή διακοπτόμενης αναρρόφησης, η απώλεια είναι περίπου 200 λίτρα. Μία διαρροή με πίεση 0,1 MPa μέσω οπής με διάμετρο 2,5 mm προκαλεί απώλεια 25.000 λίτρων/μήνα και σε διάμετρο 4,8 mm 40.000 λίτρα/μήνα.

Η συνολική επιφάνεια μιας δεξαμενής πρέπει να επιθεωρείται οπτικά εξωτερικά τουλάχιστον μία φορά κάθε πέντε χρόνια και από το εσωτερικό τουλάχιστον μία φορά ανά δέκα χρόνια. Πριν από την οπτική επιθεώρηση της εσωτερικής επιφάνειας μιας δεξαμενής, καθώς και την εξέταση του πυθμένα της δεξαμενής με ΜΚΕ, η δεξαμενή βγαίνει εκτός λειτουργίας, το περιεχόμενο αντλείται έξω, τα υπολείμματα της βάσης καθαρίζονται και εξαερώνεται η εσωτερική επιφάνεια. Οι διαρροές στα πλευρικά τοιχώματα εντοπίζονται εύκολα στη διαδικασία λειτουργίας και επισκευάζονται γρήγορα. Οι διαρροές στους πυθμένες, οι οποίες είναι πιο επικίνδυνες, είναι πιο δύσκολο να εντοπιστούν. Ενώ οι πληροφορίες σχετικά με το πάχος του χαλύβδινου φύλλου μπορούν να ληφθούν με υπερηχητικές μετρήσεις (αν και οι μετρήσεις πάχους φύλλων σε απομονωμένα σημεία δεν χαρακτηρίζουν πλήρως την ποιότητά του), οι πυθμένες των δεξαμενών VST χρησιμοποιούνται υπό συνθήκες έντονης διάβρωσης των εσωτερικών επιφανειών τους και κάτι που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι γίνεται χωρίς παρακολούθηση, δηλαδή, ελλείπει πληροφοριών σχετικά με τις τεχνικές τους συνθήκες, μέχρι να προγραμματιστούν επιθεωρήσεις των εσωτερικών επιφανειών τους. Εάν αποθηκεύονται παράγωγα πετρελαίου υψηλής ποιότητας, η θραύση των υλικών των δεξαμενών ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από τη δημιουργία ελαττωμάτων στα πυθμένα στη διαδικασία λειτουργίας. Η μόνη πηγή πληροφοριών σχετικά με τα πυθμένα δεξαμενών στις περιόδους μεταξύ επιθεωρήσεων εσωτερικών επιφανειών είναι η παρουσία ή απουσία ενός υγρού που περιέχεται στην δεξαμενή VST γύρω από τη βάση της, η οποία μπορεί να υποδηλώνει την παρουσία ή απουσία διαρροής.

6.1.3 | Τρόποι προσδιορισμού του τύπου διαρροής

Οι τύποι διαρροών στις δεξαμενές μπορούν να προσδιοριστούν με διάφορους τρόπους:

- με την προσθήκη συγκεκριμένων χημικών ενώσεων σε υγρά αποθηκευμένα σε VST και αργότερα διερεύνηση μολυσματικών υλικών γύρω από τις VST
- μετρώντας την ηλεκτρική αντίσταση ή την χωρητικότητα του εδάφους γύρω από τη βάση της δεξαμενής
- με την παρακολούθηση της στάθμης του υγρού σε μια δεξαμενή με όλες τις βαλβίδες κλειστές, υπό την προϋπόθεση ότι είναι στεγανές.

Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις, ωστόσο, οι χειριστές των εγκαταστάσεων αποθήκευσης προτιμούν την πιο οικονομικά αποδοτική τεχνική παρακολούθησης η οποία δεν είναι άλλη της οπτικής επιθεώρησης. Οι διαρροές που ανιχνεύονται με αυτήν τη μέθοδο είναι συνήθως αρκετά μεγάλες. Σε περίπτωση ανίχνευσης σημείων διαρροής στον πυθμένα, η VST τίθεται εκτός λειτουργίας για να καθαριστεί από ιζήματα πυθμένα και να προετοιμαστεί για ΜΚΕ αφού έχει ήδη γίνει ζημιά στο περιβάλλον.

Οι συχνότητες τέτοιων συμβάντων μπορούν να μειωθούν σημαντικά (να εξαιρεθούν, σε ιδανική κατάσταση) λαμβάνοντας τα ακόλουθα μέτρα:

- μείωση του χρόνου λειτουργίας μεταξύ δύο επιθεωρήσεων της εσωτερικής επιφάνειας, δηλ. αύξηση του αριθμού των επιθεωρήσεων κατά τη διάρκεια λειτουργίας της δεξαμενής, πράγμα που σημαίνει υψηλότερο λειτουργικό κόστος εξαιτίας των μεγαλύτερων χρόνων αδράνειας των εγκαταστάσεων, καθαρισμός των ιζημάτων πυθμένα και δοκιμές των δεξαμενών
- την πρόληψη της διάβρωσης, π.χ. με τη μείωση της ποσότητας οξυγόνου που απορροφάται από τον αέρα πλούσιο νερό ή λάδι, η οποία γίνεται με τη χρήση πλωτήρων ή ρεόντων καλυμμάτων.
- μείωση της δραστηριότητας διάβρωσης αποθηκευμένων προϊόντων
- μέτρηση του ηλεκτροχημικού δυναμικού του μεταλλικού δοχείου, προκειμένου να αποφευχθεί η αντίδραση ανόδου της διάλυσης μετάλλων (καθοδική προστασία)
- την εναπόθεση αποτελεσματικών επικαλύψεων εξαιρετικά ανθεκτικών στα επιθετικά υγρά στις εσωτερικές επιφάνειες των πυθμένων δεξαμενών
- χρήση σύγχρονων δομικών υλικών που είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στη διάβρωση.

Όλα αυτά τα μέτρα απαιτούν αξιοσημείωτα πρόσθετα έξοδα, αλλά σε κάθε περίπτωση, απαιτούνται διαγνωστικές διαδικασίες για να γνωρίσουμε την πραγματική κατάσταση των δομών με σκοπό την πρόληψη, ανίχνευση και εντοπισμό λανθασμένων ζωνών σε στοιχεία μιας δεξαμενής χάλυβα. Από την άποψη της αποδοτικότητας του κόστους για τους φορείς εκμετάλλευσης εγκαταστάσεων αποθήκευσης, η μέθοδος ακουστικής εκπομπής είναι πολλά υποσχόμενη για τις

συνθήκες παρακολούθησης των πυθμένων δεξαμενών που περιέχουν πετρέλαιο και τα παράγωγά του. Με τη μέθοδο ΑΕ, μπορεί κανείς να καθορίσει τη σειρά με την οποία διαγράφονται τα διαφορετικά VST για καθαρισμό των ιζημάτων πυθμένα και επιθεώρηση των εσωτερικών επιφανειών τους, οπότε ο χειριστής μπορεί να αποφύγει περιττά έξοδα για δεξαμενές καθαρισμού που βρίσκονται σε σχετικά καλή κατάσταση. Δεδομένου ότι η εσωτερική υδροστατική πίεση επηρεάζει τις καταστάσεις ελαττωμάτων στα πυθμένα, τα υπάρχοντα ελαττώματα ασυνέχειας μπορούν να ανοίξουν υπό πίεση και να διαρρεύσουν τα αποθηκευμένα υγρά. Όταν η δεξαμενή εκφορτώνεται, τέτοια ελαττώματα μπορούν να κλείσουν λόγω των ελαστικών ιδιοτήτων του μετάλλου και αρκετά συχνά τέτοια ελαττώματα δεν μπορούν να ανιχνευθούν οπτικά. Οι μετρήσεις ΑΕ επιτρέπουν την εκτίμηση της δραστηριότητας των ατελειών στα πυθμένα στο εύρος των λειτουργικών πιέσεων.

6.1.4 | Πλεονεκτήματα ΑΕ έναντι άλλων ΜΚΕ

Σε σύγκριση με άλλες τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ελαττωμάτων και μικροθραύσεων σε πυθμένα VST, η μέθοδος ΑΕ έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- διεξάγεται χωρίς να τεθεί εκτός λειτουργίας μια δεξαμενή, αντλώντας ένα υγρό και καθαρίζοντάς το από ιζήματα πυθμένα
- εξοικονομεί μεγάλη προσπάθεια (συμπεριλαμβανομένων των προπαρασκευαστικών εργασιών)
- τα δεδομένα του μεταφράζονται γρήγορα σε πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση ολόκληρου του πυθμένα και επιτρέπουν στον χειριστή να εντοπίζει πηγές ΑΕ
- επιτρέπει την ανίχνευση καταστάσεων πριν από τη διαρροή
- είναι πολύ αποδοτική από άποψη ανθρωποωρών
- δεν απαιτεί πολλά υλικά μίας χρήσης.

6.1.5 | Συχνές αστοχίες

Βασίζόμενοι στην πολυετή εμπειρία στη διάγνωση VST, μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι η μέθοδος ΑΕ μπορεί να ανιχνεύσει τις ακόλουθες λανθασμένες ή κατεστραμμένες θέσεις στον πυθμένα δεξαμενών, οι οποίες συναντώνται πιο συχνά:

- περιοχές που έχουν υποστεί βλάβη στη διάβρωση
- διεισδυτικά ελαττώματα λόγω διάβρωσης ή μηχανικής βλάβης (διατρήσεις, θραύσεις, περικοπές κ.λπ.)
- ρωγμές στις άκρες του πυθμένα της δεξαμενής (στις συγκολλήσεις τμημάτων που συνδέουν τον πυθμένα με τους πλευρικούς τοίχους)

- ρωγμές στις συγκολλημένες ραφές στα φύλλα πυθμένα, είτε με τη σύνδεση είτε όχι, με το βασικό μέταλλο
- περιοχές έντονου στρες, όπως εξογκώματα, κοιλότητες και πτυχές μεταλλικών φύλλων
- σπασίματα κεντρικών στηλών από τα πυθμένα (ή ραγισμένες συγκολλήσεις μεταξύ τους)
- παραμορφωμένες περιοχές στους πυθμένες κοντά στις περιφέρειές τους
- αξιολογούμενες μη ομοιόμορφες παραμορφώσεις βάσεων.

Δυστυχώς, δεν έχουν αναπτυχθεί ενοποιημένες προσεγγίσεις για την ερμηνεία των δεδομένων ΑΕ που λαμβάνονται σε δοκιμές πυθμένων δεξαμενών από εταιρείες που ασχολούνται σχετικά. Οι εξουσιοδοτημένες οδηγίες για δοκιμές ΑΕ δεξαμενών, συσκευών, λεβήτων και τεχνολογικών αγωγών δεν λαμβάνουν υπόψη τους συγκεκριμένους όρους προπαρασκευαστικών εργασιών και δοκιμών ΑΕ των πυθμένων δεξαμενών ούτε προτείνουν κριτήρια για τη διεξαγωγή μετρήσεων. Ο χρόνος για την κάλυψη αυτών των κενών έχει καθυστερήσει πολύ και απαιτείται να δοθούν επίσημες κατευθυντήριες γραμμές που θα λαμβάνουν υπόψη τις συγκεκριμένες συνθήκες και προσεγγίσεις για τη δοκιμή ΑΕ των πυθμένων VST.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος ακουστικής εκπομπής φαίνεται έγκυρη μέθοδος για τον έλεγχο των κάθετων δεξαμενών χάλυβα αποθήκευσης πετρελαίου και παραγώγων του. [15]

6.2| Μελέτη αξιοπιστίας ΑΕ σε δεξαμενές

Η ακουστική εκπομπή (ΑΕ) για τους πυθμένες των κατακόρυφων εξωτερικών δεξαμενών αποθήκευσης είναι μια μη παρεμβατική τεχνική που χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο. Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας και την επαλήθευση της τεχνικής της ΑΕ συγκεντρώθηκαν από την εταιρεία Physical Acoustics Ltd (PAL), πληροφορίες για έναν αντιπροσωπευτικό αριθμό δεξαμενών αποθήκευσης, από τον οποίο είχαν προσδιοριστεί οι μετρήσεις ΑΕ, καθώς και οι ενδείξεις της πραγματικής κατάστασης των δεξαμενών σε ένα πλήρες πρόγραμμα ελέγχου εκτός λειτουργίας. Αυτή η μελέτη συσχετισμού κατέληξε σε ποσοτικοποιημένους αριθμούς σχετικά με την αξιοπιστία των δοκιμών ΑΕ, οι οποίοι θα συζητηθούν λεπτομερέστερα παρακάτω.

6.2.1| Σύντομη περιγραφή της τεχνικής ΑΕ που εφαρμόστηκε

Το TANKPAC δεν είναι μια μέθοδος επιθεώρησης, αλλά ένα σύστημα διαχωρισμού που μπορεί να χωρίσει τις καλές από τις κακές δεξαμενές και έτσι να υποδείξει την άμεση συντήρηση εκεί όπου είναι αναγκαίο. Υψηλά ευαίσθητοι ακουστικοί αισθητήρες είναι συνδεδεμένοι στα τοιχώματα της δεξαμενής που ελέγχεται, μετά από μια περίοδο προετοιμασίας κατά την οποία οι βαλβίδες είναι κλειστές και οι θερμαντήρες/αναδευτήρες σβηστοί. Το σπάσιμο των παράγωγων διάβρωσης ανιχνεύεται μαζί με τυχόν διαρροές που είναι ενεργές κατά τη διάρκεια της πραγματικής περιόδου

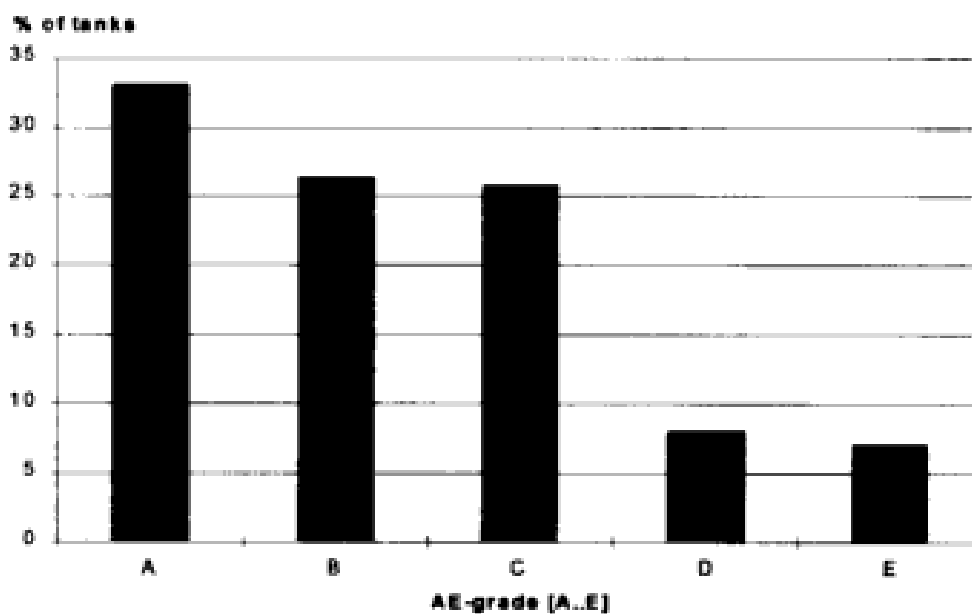
παρακολούθησης. Ένα ποσοστό αυτών των δεδομένων εντοπίζεται με τριγωνισμό αλλά οι σημαντικότερες πληροφορίες από τη σκοπιά της διαχείρισης συντήρησης είναι η συνολική κατάσταση των τοιχωμάτων η οποία ταξινομείται σε κλίμακα από Α έως Ε.

Οι αξιολογήσεις και οι ενδεικτικές συστάσεις αναγράφονται στον παρακάτω Πίνακα 6:

Βαθμίδες	Ερμηνεία	Ενδεικτική σύσταση
A Βαθμίδα	Πολύ χαμηλή	Δεν χρειάζεται συντήρηση
B Βαθμίδα	Χαμηλή	Δεν είναι απαραίτητη η συντήρηση
C Βαθμίδα	Ενδιάμεση	Είναι απαραίτητη κάποια συντήρηση
D Βαθμίδα	Ενεργοποίησης	Προτεραιότητα στο πρόγραμμα συντήρησης
E Βαθμίδα	Υψηλής ενεργοποίησης	Υψηλότερη προτεραιότητα στο πρόγραμμα συντήρησης

Πίνακας 6. Βαθμίδες ελέγχου και ενδεικτικές συστάσεις συντήρησης δεξαμενών

Όσον αφορά τις συστάσεις παρακολούθησης, αναφέρεται ότι οι πληροφορίες για την ΑΕ πρέπει πάντοτε να συνδυάζονται με τις άλλες (ιστορικές) διαθέσιμες πληροφορίες. Όταν δεν προγραμματίζεται πλήρης επιθεώρηση ή συντήρηση εκτός γραμμής, παρέχονται συστάσεις για διαστήματα επανεξέτασης ΑΕ, που κυμαίνονται από 5 έως 1 έτη για την αύξηση της βαθμίδας ΑΕ.



Διάγραμμα 3. Βαθμίδες ΑΕ δεξαμενών

Στο παραπάνω Διάγραμμα 3 δίνονται οι μετρήσεις ΑΕ για περίπου 600 δεξαμενές, δοκιμασμένες από την PAL παγκοσμίως. Σχεδόν όλες αυτές οι δεξαμενές είχαν προγραμματιστεί για

υποχρεωτική συντήρηση ή/και επιθεώρηση σύμφωνα με διάφορες απαιτήσεις(εσωτερικές, API, EEMUA ή τοπικές κλπ).

Παραπάνω βλέπουμε την κατανομή ποσοστού δεξαμενών ανά βαθμίδες ΑΕ. Συνολικός αριθμός 598 δεξαμενών, εκ των οποίων 129 δεξαμενές αργού πετρελαίου. Σημειώνουμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό αφορά δεξαμενές οι οποίες δεν είχαν προγραμματιστεί για περιοδική επιθεώρηση. Είναι διαθέσιμο μόνο ένα μέρος αυτών των δεδομένων ελέγχου παρακολούθησης.

Παρατηρούμε ότι πάνω από το 50% αυτών των δεξαμενών ανήκει στις Α και Β Βαθμίδες. Εάν αυτό επιβεβαιωθεί πράγματι από τα συμπεράσματα ότι δεν απαιτείται συντήρηση, θα μπορούσαμε να εξοικονομήσουμε πολλά χρήματα, τα οποία μπορούν να δαπανηθούν καλύτερα για την ιεράρχηση των ενδείξεων τύπου D και E, οι οποίες αντιπροσωπεύουν δεξαμενές υψηλότερου κινδύνου.

Με βάση την ανατροφοδότηση πληροφοριών των ιδιοκτητών των δεξαμενών στην PAL, η PAL κατάφερε να ταξινομήσει 80 δεξαμενές σε 4 κατηγορίες παρακολούθησης που φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 7:

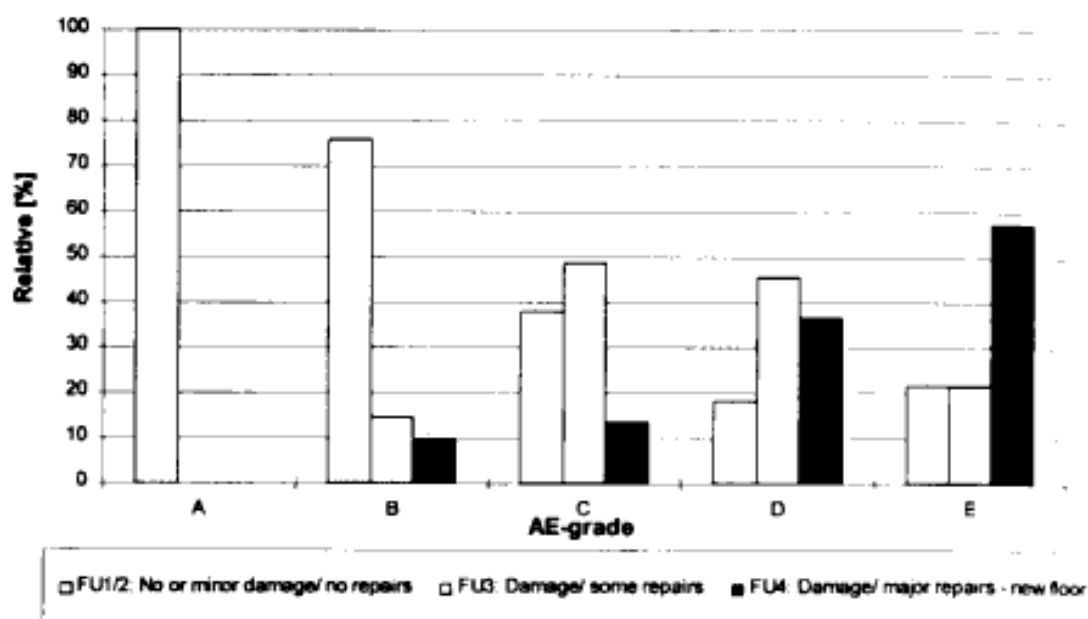
Κατηγορία	Ενδεικτική σύσταση
FU1	Καμία ζημιά/καμία επισκευή
FU2	Μικρές ζημιές/καμία επισκευή
FU3	Ζημιά/κάποια επισκευή
FU4	Ζημιά/μεγάλη επισκευή/νέο τοίχωμα

Πίνακας 7. Κατηγορίες παρακολούθησης δεξαμενών βάσει PAL

6.2.2|Περιγραφή/ταξινόμηση των δεξαμενών και παρακολούθηση της επιθεώρησης τους

Συνοδευόμενο από τις απαραίτητες βασικές πληροφορίες, στο πλαίσιο της ομάδας εργασίας, διανεμήθηκε ένα έντυπο έρευνας και ως αποτέλεσμα της έρευνας αυτήν ήταν να συγκεντρωθούν 70 συμπληρωμένα φύλλα δεδομένων. Από την ανάλυση φάνηκε να εξάγονται παρόμοια αποτελέσματα με αυτά που παρουσιάστηκαν νωρίτερα από την PAL.

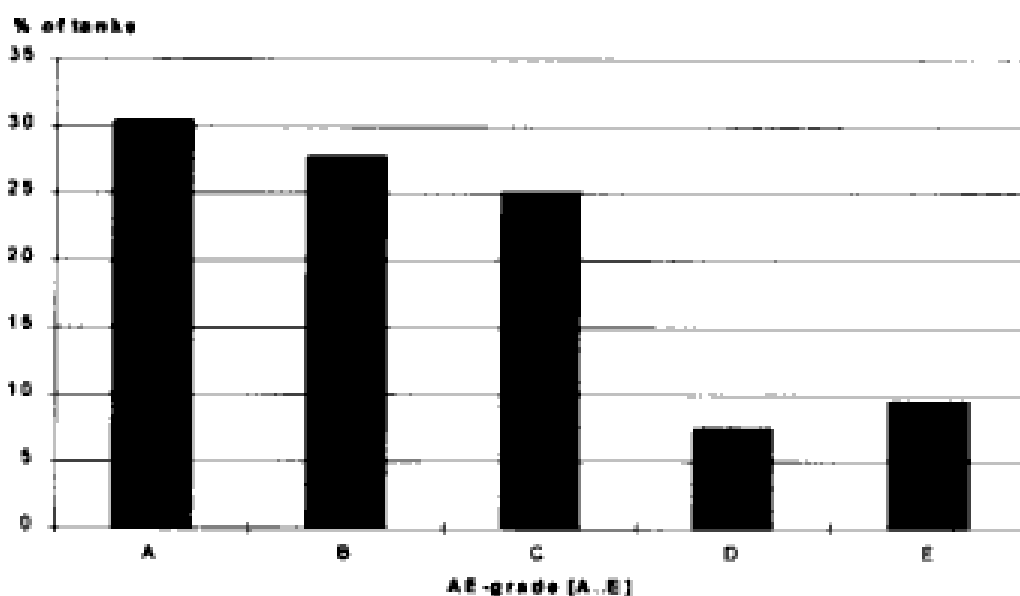
Με βάση αυτά τα αποτελέσματα κρίθηκε δικαιολογημένο να συνδυαστούν και τα δύο σύνολα δεδομένων και ενοποιηθούν σε μια μορφή. Αυτό επέτρεψε την πληρέστερη στατιστική ανάλυση, εκ των οποίων τα κύρια αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω Διάγραμμα 3.



Διάγραμμα 4. Συσχέτιση μεταξύ βαθμών AE και καθορισμένων βαθμών παρακολούθησης FU της PAL

Αποτελέσματα παρακολούθησης σε σχέση με βαθμούς AE, κανονικοποιημένα ανά Βαθμίδα AE. Δείγμα 148 δεξαμενών (Shell, Dow – Stade, DSM, Q8, Σύνολο και βάση δεδομένων PAL.

Στο Διάγραμμα 4 τα ποσοστά έχουν ομαλοποιηθεί σε 100% ανά βαθμίδα AE. Τα ποσοστά που παρουσιάζονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό του αριθμού των παραλήψεων και ψευδών ενδείξεων για μια στατιστική προσέγγιση. Χρησιμοποιώντας επιπλέον πληροφορίες (ιστορικά δεδομένα, δυνητικά δεδομένα διαρροών από εκλεπτυσμένη ανάλυση AE) ο συνολικός συσχετισμός μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά.



Διάγραμμα 5. Κατανομή δεξαμενών στο δείγμα μελέτης στατιστικής συσχέτισης του Διαγράμματος 4

Έτσι από όλα αυτά έχει προσδιοριστεί ο βαθμός παρακολούθησης. (Δείγμα: 33 δεξαμενές μαζούτ, 115 δεξαμενές προϊόντων). Σημειώστε ότι μέρος αυτού του δείγματος είναι επίσης μέρος του δείγματος όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.

Ορισμένες παρατηρήσεις που πρέπει να γίνουν είναι ότι:

(α) Για μια σωστή στατιστική συσχέτιση είναι εξαιρετικά σημαντικό το δείγμα δοκιμής να έχει παρόμοια κατανομή με τον συνολικό δείγμα των δεξαμενών που κανονικά υπόκεινται σε δοκιμή ΑΕ (Διάγραμμα 3). Το Διάγραμμα 5 δείχνει ότι συμβαίνει αυτό.

(β) Όσον αφορά τον προσδιορισμό του βαθμού παρακολούθησης, οι πληροφορίες είναι μάλλον υποκειμενικές: στο έντυπο έρευνας, παρόμοιο με την αρχική ταξινόμηση του PAL, έγινε διάκριση μεταξύ της κατηγορίας FU1 (Καμία ζημία/καμία επισκευή) και της κατηγορίας FU2 (Μικρές ζημιές/καμία επισκευή). Περαιτέρω έρευνες που έγιναν στο προσωπικό συντήρησης και εξακρίβωσης των διυλιστηρίων αποκάλυψαν ότι η διάκριση αυτή δεν μπορούσε να θεωρηθεί σχετική: ορισμένοι χαρακτήρισαν την λίγο καστανόχρωμη εμφάνιση διάβρωσης ως χωρίς ζημιές, ενώ άλλοι το αποκάλεσαν ως μικρές ζημιές. Το κύριο και μόνο σχετικό για τη συντήρηση κριτήριο, είναι αν κάποιος είχε αποφασίσει να ενεργοποιήσει τη δεξαμενή σε λειτουργία με ή χωρίς οποιαδήποτε ενέργεια επισκευής. Αυτό δημιούργησε το σκεπτικό να συνδυαστούν αυτές τις δύο κατηγορίες σε μία: FU 1/2: όπου δεν θα απαιτείται καμία επισκευή.

(γ) Όσον αφορά την κατηγορία FU3 (ζημιές/μερικές επισκευές) υπήρχαν επίσης κάποιες διαφορές στην ερμηνεία: ορισμένοι χειριστές ταξινόμησαν τη δεξαμενή τους ως FU3, όταν επισκεύασαν μερικές μικρές ατέλειες στις κοιλότητες, ενώ άλλοι ταξινόμησαν, μια πραγματικά αναγκαία επισκευή μιας ατέλειας κοιλότητας μέσα στο κέλυφος της δεξαμενής, επίσης ως μικρή επισκευή και την χαρακτήρισαν κατηγορίας FU3.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις εκτιμήσεις, κρίνουμε ότι δικαιολογείται η συνολική προσέγγιση μιας διαίρεσης σε τρεις κατηγορίες παρακολούθησης. Αυτές οι κλάσεις αντιπροσωπεύουν την ολική κατάσταση μιας δεξαμενής, με βάση την οποία το προσωπικό θα προγραμματίσει τις ενέργειές του. Στην πραγματικότητα, το να ανοιχτεί ή όχι μια δεξαμενή, είναι η πιο σημαντική παράμετρος που πρέπει να συσχετιστεί με τις βαθμίδες ΑΕ, ο επείγων χαρακτήρας του ανοίγματος μπορεί να προσδιοριστεί από τη σοβαρότητα: D ή E. Όταν ανοίξει μια δεξαμενή, ο βαθμός επισκευής θα αποφασιστεί με βάση την επακόλουθη επιθεώρηση ούτως ή άλλως.

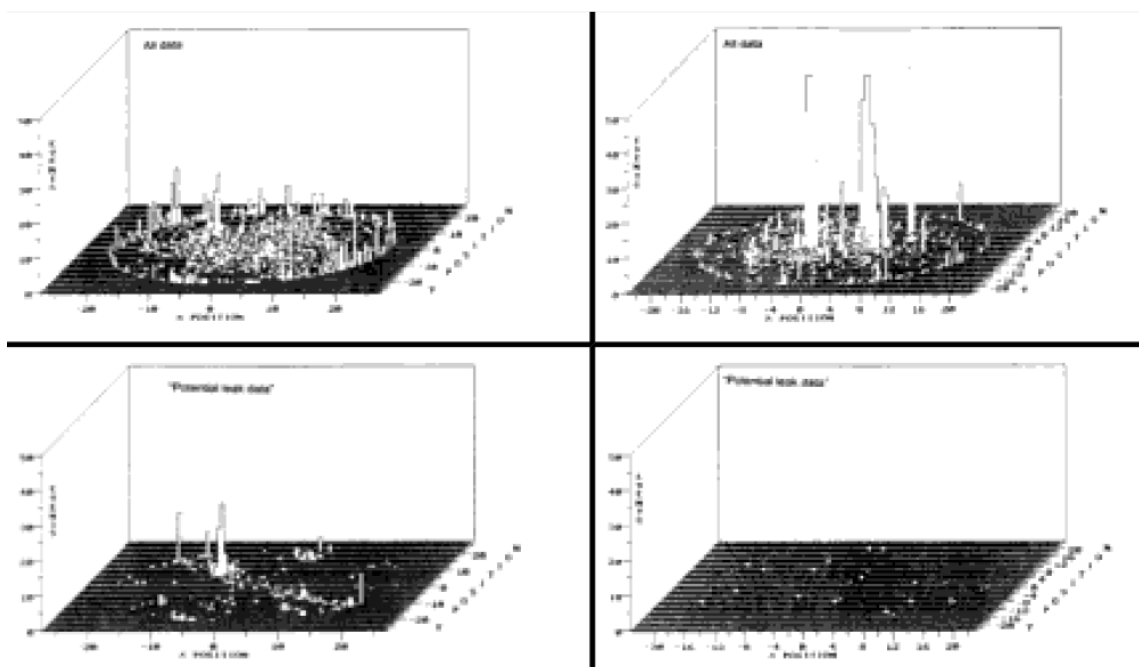
6.2.3 | Πρόσθετες πληροφορίες

Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι οι αποφάσεις για θέματα συντήρησης και επιθεώρησης δεν θα ληφθούν ποτέ για τις περιορισμένες πληροφορίες που παρουσιάζονται στα δελτία δεδομένων που προαναφέρθηκαν, ή στα δεδομένα ΑΕ ή στις ιστορικές πληροφορίες.

Στον στατιστικό συσχετισμό όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4, χρησιμοποιήθηκε μόνο η συνολική ταξινόμηση, ενώ στη συνήθη διαδικασία δοκιμής ΑΕ του PAL, διατίθενται πάντοτε πρόσθετες πληροφορίες, όπως δεδομένα δυνητικής διαρροής. Τα δεδομένα δυνητικής διαρροής είναι ενδεικτικά για βαριά σημεία διάβρωσης ή/και πιθανές διαρροές. Η αξία αυτής της πρόσθετης πληροφορίας μπορεί καλύτερα να απεικονισθεί στο Διάγραμμα 6.

Το Διάγραμμα 6 δείχνει ένα παράδειγμα 2 δεξαμενών με παρόμοιες συνολικές ποιότητες C, αλλά διακριτικά διαφορετικές ενδείξεις διαρροών. Κατά την επακόλουθη επιθεώρηση διαπιστώθηκε ότι η δεξαμενή H είχε μέτρια συνολική διάβρωση, ενώ η δεξαμενή P είχε κάποιες σοβαρές διαστρωμένες επικαθήσεις άνθρακα στην κάτω πλευρά της πλάκας πυθμένα στη θέση που υποδεικνύεται από τις πιθανές διαρροές. Υπάρχουν επίσης παραδείγματα δεξαμενών στις οποίες εντοπίστηκαν μικρές διαρροές, οι οποίες δεν ήταν δυνατό ή σχεδόν αδύνατον ανιχνεύσιμες με επιθεώρηση εκτός λειτουργίας, όταν ο πυθμένας δεν είναι φορτωμένος με υγρό.

Στο Διάγραμμα 6 βλέπουμε σχεδιαγράμματα δύο διαφορετικών δεξαμενών, τα οποία βαθμολογούνται με μία συνολική βαθμολογία C (ανώτερα σχήματα), αλλά η δεξαμενή P παρουσιάζει εντοπισμένες C – και D – βαθμίδες στο Σχέδιο δεδομένων δυνητικών διαρροών (κάτω αριστερά εικόνα), ενώ η δεξαμενή H δεν είχε πιθανές διαρροές. Οι ενδείξεις επιβεβαιώθηκαν από την επιθεώρηση που ακολούθησε.



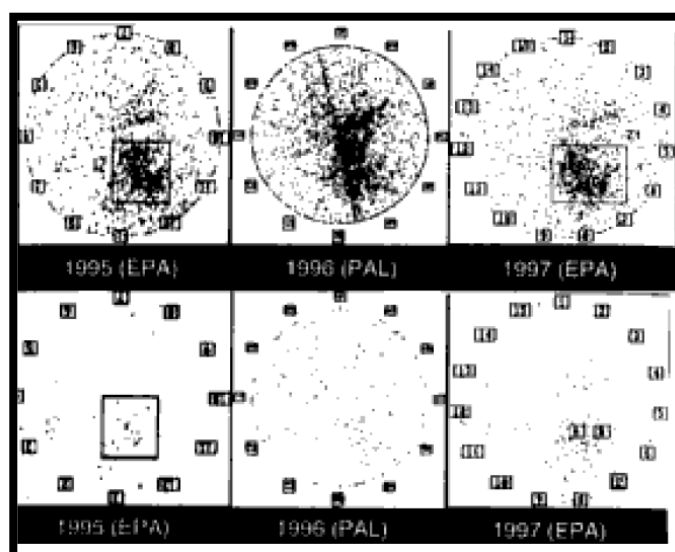
Διάγραμμα 6. Σχεδιαγράμματα δύο διαφορετικών δεξαμενών

6.2.4 | Η υποκείμενη βάση δεδομένων

Όλα τα 150 φύλλα δεδομένων είχαν ταξινομηθεί σε ξεχωριστή αναφορά. Επειδή οι πληροφορίες της δεξαμενής είναι ιδιοκτησία των πετρελαϊκών και χημικών επιχειρήσεων, οι πληροφορίες κωδικοποιούνται. Η βάση δεδομένων έχει ως στόχο να γνωστοποιήσει στους ιδιοκτήτες των δεξαμενών και στις αρχές δεδομένα για τις πληροφορίες που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη συσχέτισης. Επιθυμητό αποτέλεσμα θα είναι η βάση δεδομένων να δείξει ότι οι δεξαμενές που χρησιμοποιήθηκαν και που κανονικά προγραμματίζονται για περιοδική επιθεώρηση, να είναι αντιπροσωπευτικές όσον αφορά την ηλικία, το περιεχόμενο του προϊόντος, το μέγεθος κλπ.

6.2.5 | Παραδείγματα και παρατηρήσεις

Η βάση δεδομένων όπως παρουσιάζεται εδώ πρέπει να θεωρηθεί ως στιγμιότυπο. Η ομάδα εργασίας αποτελούνταν από έναν περιορισμένο αριθμό χρηστών, δεν συγκεντρώθηκαν όλες οι υπάρχουσες πληροφορίες και από τη στιγμή που δημιουργήθηκε η μελέτη συσχέτισης έχουν καταστεί διαθέσιμα περισσότερα χρήσιμα δεδομένα. Δεν υπάρχουν ενδείξεις ότι τα μεταγενέστερα ευρήματα αποκλίνουν από τη γενική τάση όπως παρουσιάζεται εδώ. Παρόλο που κάποιος μπορεί να αισθάνεται πολύ χρήσιμο να ενημερώνει τακτικά αυτή τη βάση δεδομένων, η οποία μπορεί να γίνει με την παροχή πληροφοριών σχετικά με τις επόμενες επιθεωρήσεις στο PAL, συμπεραίνει κανείς ότι μπορούν να είναι πιο χρήσιμο να δοθεί προσοχή σε πιο εξειδικευμένη ανάλυση δεδομένων αλγόριθμων, παρά να επεκτείνει τη συνολική συσχέτιση. Επειδή σαφώς έχει αποδειχθεί ότι π.χ. η εφαρμογή του αλγορίθμου φιλτραρίσματος για τα δεδομένα δυνητικής διαρροής οδηγεί σε πιο λεπτομερείς πληροφορίες που υποστηρίζουν τη λήψη αποφάσεων σε μεμονωμένες δεξαμενές (Διάγραμμα 7).



Διάγραμμα 7. Επαναληψιμότητα των δοκιμών ΑΕ, δεξαμενή για τα έτη 1995, 1996 και 1997

Στο Διάγραμμα 7 βλέπουμε την επαναληψιμότητα των δοκιμών ΑΕ, που εκτελούνται σε μία δεξαμενή το 1995, το 1996 και το 1997. Πάνω: τα συνολικά δεδομένα, είναι βαθμοί C -, D - και C - αντίστοιχα. Κάτω: τα δεδομένα "δυνητικής διαρροής", τα οποία δεν έχουν βαθμολογία C- και D - καθώς και A - και B - βαθμίδες αντίστοιχα.



Διάγραμμα 8. Αποτέλεσμα της επακόλουθης επιθεώρησης της δεξαμενής του Διαγράμματος 6

Ένα σημαντικό κριτήριο για την κρίση της αξιοπιστίας μιας μεθόδου δοκιμής είναι οι πληροφορίες σχετικά με την επαναληψιμότητα της μεθόδου. Το Διάγραμμα 8 δείχνει τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε μία δεξαμενή σε 3 διαδοχικά έτη. Τα γενικά σχέδια ζημιών φαίνεται να επαναλαμβάνονται καλά, οι συνολικές βαθμίδες ήταν C, D και C αντίστοιχα, επομένως δεν ήταν πλήρως συνεπείς. Το ίδιο ισχύει και για τα δεδομένα δυνητικής διαρροής.

Στο Διάγραμμα 8 έχουμε τα αποτελέσματα της επακόλουθης επιθεώρησης της δεξαμενής του Διαγράμματος 5 μέσω ελέγχου με σαρωτή βάσης TBIT Μαγνητικής Ροής για εντοπισμό διαρροών της εταιρείας Rosen. Αναφέρονται όλα τα ελαττώματα με μείωση πάχους τοιχώματος πάνω από 40%.

Τέλος, θέλουμε να δείξουμε ένα εντυπωσιακό παράδειγμα της συσχέτισης μεταξύ των δεδομένων ΑΕ, που λαμβάνονται σε μια ενιαία δεξαμενή αργού πετρελαίου και των δεδομένων επιθεώρησης παρακολούθησης όπως αποκτήθηκε από τη σάρωση κάτω από τη μαγνητική ροή. Το λογισμικό TBIT μας επιτρέπει να θέτουμε οποιοδήποτε όριο στην παρουσίαση των καταχωρημένων

ελαττωμάτων. Στο Διάγραμμα 8 παρουσιάζονται μόνο ελαττώματα με μειωμένο πάχος τοιχώματος άνω του 40% του ονομαστικού πάχους πλάκας 8mm. Παρατηρούμε μια αξιοσημείωτη ομοιότητα στη διαμόρφωση των ελαττωμάτων.

Οι πληροφορίες που παρουσιάζονται παραπάνω δείχνουν ότι η δοκιμή ΑΕ πρέπει πάντα να θεωρείται ως συνολική δοκιμή και ότι η λήψη αποφάσεων δεν είναι μαύρο και άσπρο, ναι ή όχι. Σε περίπτωση αμφιβολίας όπως κυρίως με τις βαθμίδες Β – , C – και D, μπορεί κανείς να αποφασίσει να αναβάλει τη συντήρηση, αλλά να ορίσει ένα διάστημα επανεξέτασης ΑΕ π.χ. 5, 3 ή 1 έτη. Στη συνέχεια, οι αποφάσεις μπορούν να λαμβάνονται με βάση την τάση, ενώ είναι επίσης εφικτό να υπάρχει καλύτερος προγραμματισμός συντήρησης εντός των επιχειρησιακών περιορισμών.

6.2.6| Συμπεράσματα

1. Η εκπόνηση της μελέτης συσχέτισης οδήγησε τα μέλη της ομάδας ΑΕ στην επιβεβαιωμένη/αυξημένη εμπιστοσύνη στην τεχνική δοκιμής ΑΕ για τις δεξαμενές ατμοσφαιρικής αποθήκευσης.
2. Η στατιστική συσχέτιση μεταξύ βαθμών ΑΕ και βαθμών παρακολούθησης των επιθεωρήσεων έχει αποκαλύψει ποσοτικά στοιχεία σχετικά με την αξιοπιστία των δοκιμών ΑΕ.
3. Το πιο εντυπωσιακό είναι η αποδεδειγμένη 100% συσχέτιση μεταξύ των βαθμών Α και η επιβεβαίωση με την επακόλουθη επιθεώρηση ότι δεν απαιτείται επισκευή.
4. Η αύξηση των ενδείξεων σοβαρότητας ΑΕ συσχετίζεται καλά με περισσότερες ζημιές και μεγαλύτερες απαιτήσεις επισκευής.
5. Χρησιμοποιώντας πληροφορίες, πέραν της συνολικής βαθμίδας ΑΕ, όπως η ιστορία της δεξαμενής, τα δεδομένα δυνητικής διαρροής από την εκλεπτυσμένη ανάλυση ΑΕ, η συνολική συσχέτιση θα βελτιωθεί σημαντικά.
6. Οι αποτυχίες στις ενδείξεις της βαθμίδας ΑΕ μπορεί να αντιμετωπιστούν με σωστή εξέταση των διαστημάτων επανάληψης. [16]

6.3| Μελέτη παρακολούθηση υγείας των δαπέδων υπόγειων δεξαμενών αποθήκευσης: μία νέα μεθοδολογία βασισμένη στην πρακτική εμπειρία

Η τεχνική ακουστικών εκπομπών αναπτύσσεται ως μια μη παθητική μέθοδος και κατάλληλο εργαλείο προγραμματισμού συντήρησης για την επιθεώρηση των δαπέδων των δεξαμενών αποθήκευσης, προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη διάρκεια περιόδου συντήρησης. Στην μελέτη που ακολουθεί παρουσιάζονται μεθοδολογίες και εμπειρίες που έχουν συγκεντρωθεί από τις επιτόπιες δοκιμές των επιφανειακών δεξαμενών αποθήκευσης μέσω της τεχνικής ΑΕ που διεξάγεται στα

διυλιστήρια μέχρι σήμερα. Τα αποτελέσματα των επιτόπιων δοκιμών που διεξήχθησαν μέχρι σήμερα οδήγησαν στη δημιουργία ενός συστήματος ταξινόμησης για τη συντήρηση των δαπέδων των δεξαμενών. Εξετάζεται η θέση των πηγών διαρροής και διάβρωσης βασισμένη στην διαφορά χρόνου άφιξης στην μέτρηση ακουστικών εκπομπών και τα ευρήματα συγκεντρώνονται μέσω του αλγορίθμου πηγής – θέσης – τοποθεσίας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως ένας δισδιάστατος χάρτης των πηγών δαπέδου δεξαμενής.

6.3.1|Εισαγωγή

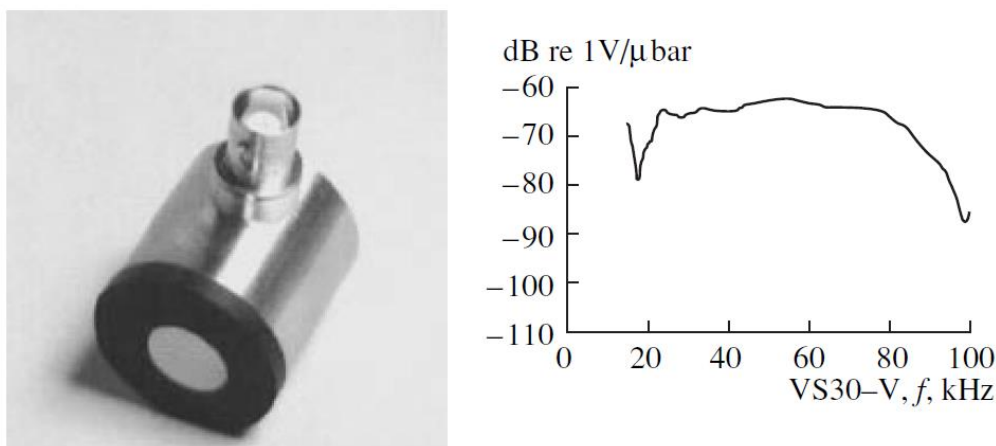
Όπως έχει προαναφερθεί, η μέθοδος ακουστικής εκπομπής (AE) πλησιάζει μισό αιώνα ύπαρξης, έχοντας ξεκινήσει το 1950 με το έργο του Joseph Kaiser και έχει αναπτυχθεί τόσο σε εργαστηριακές όσο και σε επιτόπιες δοκιμές σε διάφορες σειρές χρήσιμων εφαρμογών μη καταστρεπτικών δοκιμές όπως μεταλλικά δοχεία, συστήματα σωληνώσεων, αντιδραστήρες, εναλλάκτες θερμότητας, δεξαμενές αποθήκευσης και γέφυρες. Η ακουστική εκπομπή εξελίσσεται ως μια μη ευαίσθητη μέθοδος και κατάλληλο εργαλείο σχεδιασμού συντήρησης για την επιθεώρηση των δαπέδων των δεξαμενών αποθήκευσης.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1980, η ιδέα της χρήσης της AE για την εκτίμηση της διαρροής που προκλήθηκε από τη διάβρωση των δαπέδων των δεξαμενών παρουσιάστηκε από μια ομάδα αποτελούμενη από περισσότερες από 20 εταιρείες του Ηνωμένου Βασιλείου και των Κάτω Χωρών που μαζί ανέπτυξαν τη μέθοδο ως ένα αποτελεσματικό εργαλείο αξιολόγησης. Από τότε, πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από 5000 δοκιμές και η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε παγκοσμίως ως εργαλείο σχεδιασμού συντήρησης. Επιπλέον, το 1994, το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου διενήργησε αρκετές δοκιμές πεδίου συνδεδεμένες με το ίδιο θέμα. Τα ευρήματα δημοσιεύτηκαν ως τεχνικές εκθέσεις. Τα ακουστικά σήματα διαρροής που παράγονται από διαρροές στο δάπεδο μιας δεξαμενής αποθήκευσης πάνω από το έδαφος (Aboveground Storage Tank – AST) αναγνωρίστηκαν ως το αποτέλεσμα μιας δοκιμής πεδίου που διεξήχθη σε μια δεξαμενή AST διαμέτρου περίπου 12 μέτρων. Να σημειωθεί επίσης ότι ο περιβάλλον θόρυβος του υπήρχε στον χώρο χαρακτηρίστηκε και παρουσιάστηκε. Πρόσφατα, συγκροτήθηκε μια ομάδα εργασίας στην Ευρώπη αποτελούμενη από αρκετές εταιρείες που έλαβαν μέρος σε εργαστηριακές δοκιμές για την ανάπτυξη αυτής της μεθόδου. Το 2000 δημοσιεύθηκε μια τεχνική έκθεση σχετικά με την επιθεώρηση των δεξαμενών αποθήκευσης επίπεδης βάσης με την μέθοδο AE μετά από ορισμένες εργασίες όπου ο συντονιστής ήταν η TÜV Österreich. Η ομάδα του έργου αποτελούνταν από: την TÜV (συντονισμός και δοκιμή), την CESI (δοκιμές), την Vallen – Systeme (κατασκευαστής συστήματος AE) και τους βιομηχανικούς εταίρους της Shell (Κάτω Χώρες) και Dow (Γερμανία), οι οποίοι υποστήριξαν το έργο με τη διεξαγωγή δοκιμών στις εγκαταστάσεις τους και την παροχή πληροφοριών παρακολούθησης μετά από

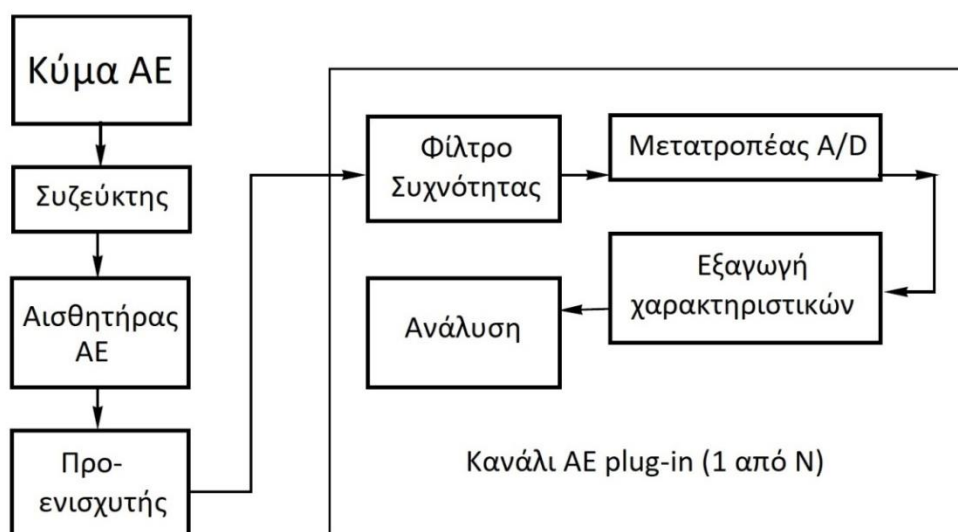
επιθεωρήσεις εκτός λειτουργίας. Οι δοκιμές ακουστικών εκπομπών για το έλεγχο των δαπέδων των δεξαμενών μπορούν να θεωρηθούν πολύτιμες δεδομένου ότι είναι μια μη επεμβατική τεχνική και δεν χρειάζεται να τεθούν εκτός λειτουργίας οι δεξαμενές. Αυτή η κατάσταση διαφέρει από τη δοκιμή ΑΕ από άλλες παραδοσιακές μεθόδους δοκιμών, όπως οπτική επιθεώρηση, διαρροή μαγνητικής ροής και μέτρηση πάχους υπερήχων. Επιπλέον, είναι πολύ οικονομική και μπορεί να προσφέρει τεράστιες αποταμιεύσεις, δεδομένου ότι μια δεξαμενή δεν απαιτεί καθαρισμό σε περιοχές όπου δεν απαιτήθηκαν επισκευές μετά την επιθεώρηση.

6.3.2 | Μεθοδολογία

Πριν από την έναρξη της πραγματικής διαδικασίας παρακολούθησης ακουστικών εκπομπών των δεξαμενών επιφανείας, πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες απαιτήσεις.



Εικόνα 44. Αισθητήρας ΑΕ με ενσωματωμένο προενισχυτή και η καμπύλη ευαισθησίας



Διάγραμμα 9. Πρακτική αλυσίδα μέτρησης ΑΕ

Η εκτίμηση των επιπτώσεων εξασθένησης, δηλαδή η μεταβολή του πλάτους του σήματος με την απόσταση διάδοσης του ήχου, μας οδηγεί στον καθορισμό της κατάλληλης θέσης των αισθητήρων γύρω από την περιφέρεια της δεξαμενής. Στις δοκιμές πεδίου, είναι απαραίτητο να στοιχηθούν 8 έως 15 αισθητήρες σε σχέση με τη διάμετρο της δεξαμενής και να χρησιμοποιηθούν δύο σειρές αισθητήρων, επειδή η δεύτερη ανώτερη σειρά αισθητήρων μπορεί να εξαλείψει τους θορύβους που λαμβάνονται από την κορυφή της δεξαμενής.

Μια άλλη σημαντική παράμετρος που πρέπει να εξεταστεί πριν από τη δοκιμή, είναι οι πηγές θορύβου περιβάλλοντος. Εάν το επίπεδο θορύβου είναι υψηλότερο από 15dB (σύμφωνα με έναν μετρητή ήχου), η δοκιμή δεν μπορεί να γίνει εκείνη τη στιγμή και είναι υποχρεωτική η εξάλειψη της πηγής θορύβου πριν από την δοκιμή. Πιθανές πηγές εξωτερικών ακουστικών θορύβων περιλαμβάνουν τη μετακίνηση του βύσματος ακροφυσίου, τη δόνηση της αντλίας, το κτύπημα των βαλβίδων, την κίνηση ανθρώπων κοντά στη δεξαμενή, τη ροή υγρών και την αναταραχή. Η ανεξέλεγκτη δημιουργία ακουστικών παρεμβολών από συνθήκες όπως η βροχή, το χιόνι, το χαλάζι, η άμμος, ο άνεμος κλπ., που επηρεάζουν τη δοκιμή, μπορούν να ελαχιστοποιηθούν μέσω της ρύθμισης του κατάλληλου χρόνου δοκιμής. Για παράδειγμα, προτείνονται δοκιμές τα μεσάνυχτα για να αποφευχθούν οι επιπτώσεις της θερμότητας από τον ήλιο κατά τη διάρκεια της ημέρας.

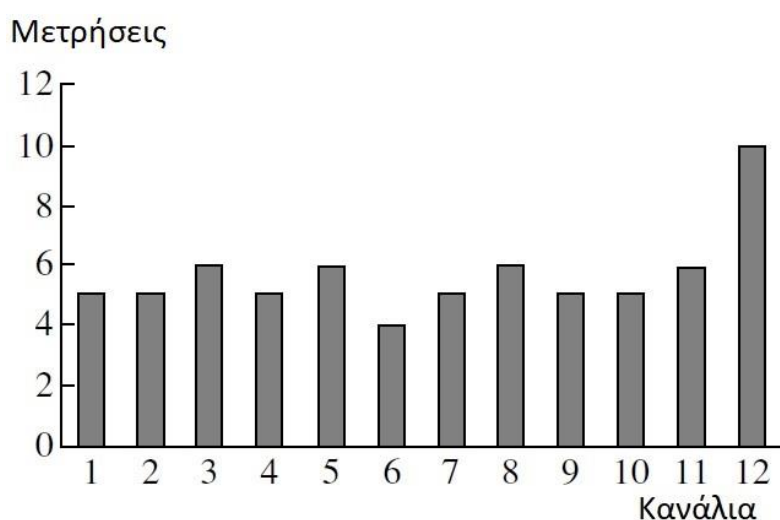
Οι χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες είναι κατασκευασμένοι από πιεζοηλεκτρικά υλικά που είναι εύρωστοι και πιο ευαίσθητοι από άλλους τύπους αισθητήρων, π.χ. ηλεκτροδυναμικούς αισθητήρες οπτικού λείζερ. Στο Διάγραμμα 9, που απεικονίζει τον αισθητήρα δοκιμής δεξαμενής, θα πρέπει να επιλεγούν αισθητήρες υψηλής ευαισθησίας ($\pm 2\text{dB}$ για όλους τους αισθητήρες) στην περιοχή των 40 kHz, διότι τα σήματα πρέπει να ταξιδεύουν σε σημαντική απόσταση: Σε υψηλότερες συχνότητες, αυτά τα σήματα εξασθενούν ταχύτερα και κατά συνέπεια, έχουν μικρότερη απόσταση ανίχνευσης. Στην περίπτωση αυτή, οι χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες περιέχουν ήδη έναν προενισχυτή και συνδέονται με τα αντικείμενα με τη χρήση μαγνητικών συσκευών συγκράτησης. Οι διατάξεις συγκράτησης παρέχουν καλύτερη ακουστική επαφή μεταξύ του αισθητήρα και της επιφάνειας του τοίχου της δεξαμενής.

Υπάρχει μια αλυσίδα ακολουθίας μέτρησης για δοκιμές πεδίου πάνω από δεξαμενές αποθήκευσης μέσω της μεθόδου ΑΕ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 44. Σε αυτή την αλυσίδα μέτρησης, τα σήματα λαμβάνονται από τους αισθητήρες και κατόπιν ενισχύονται από έναν προενισχυτή ΑΕ με μια εσωτερική ενίσχυση με ένα ελάχιστο κέρδος 46dB. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται φίλτρο συχνότητας για την εξάλειψη των ανεπιθύμητων περιοχών συχνοτήτων (πηγές θορύβου) και ταιριάζει με την αλυσίδα μέτρησης στις απαιτήσεις της εφαρμογής. Για τη δοκιμή πυθμένα δεξαμενής, επιλέγεται ένα φίλτρο με συχνότητες στην περιοχή 20 – 50kHz. Αυτό το φίλτρο παρέχει

ελάχιστη εξασθένηση σήματος 48db/octave. Για κάθε πρακτικό σκοπό, οι επιλεγμένοι αισθητήρες διαθέτουν ενσωματωμένο προενισχυτή και συνδέονται στο φίλτρο συχνότητας μέσω ειδικού καλωδίου με τις ακόλουθες προδιαγραφές:

- ένα ομοαξονικό καλώδιο RG 58 C/U,
- 50 – Ohm βύσματα BNC και στα δύο άκρα και μέχρι ένα μήκος αρκετών εκατοντάδων μέτρων.

Ένας μετατροπέας από αναλογικό σε ψηφιακό χρησιμοποιείται για την ψηφιοποίηση των σημάτων ΑΕ που έχουν περάσει από το φίλτρο συχνότητας. Απαιτείται ένας πολύ μεγάλος δυναμισμός μέτρησης επειδή πολύ ισχυρές εκρήξεις από κοντινές αποστάσεις παράγουν πολύ μεγαλύτερα πλάτη από τις ασθενέστερες εκρήξεις από μια περαιτέρω απόσταση. Ο μετατροπέας από αναλογικό σε ψηφιακό που χρησιμοποιήθηκε έχει εύρος 16bit.



Διάγραμμα 10. Ρύθμιση ευαισθησίας αισθητήρα

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, υπάρχουν δύο είδη σημάτων (διαρροή και διάβρωση) που μπορούν να ληφθούν από αισθητήρες από διάφορες αναμενόμενες πηγές ήχου, όπως ο σχηματισμός φυσαλίδων, η ροή υγρού, ο στροβιλισμός του ρευστού και από διάφορες ανεπιθύμητες πηγές ήχων, όπως ο θόρυβος που πρέπει να εξαλειφθεί από τον αλγόριθμο. Είναι απαραίτητο να εντοπιστούν και να συγκεντρωθούν οι πηγές διαρροών και διάβρωσης ως αποτέλεσμα της διεξαχθείσας δοκιμής.

Η βαθμονόμηση του αισθητήρα είναι πολύ σημαντική μετά τη δημιουργία του πειραματικού σχεδιασμού. Το πρώτο βήμα στον έλεγχο πυθμένα δεξαμενής είναι η βαθμονόμηση ευαισθησίας των αισθητήρων, η οποία γίνεται σε δύο στάδια. Πρώτον, είναι απαραίτητο να βαθμονομηθεί κάθε αισθητήρας ξεχωριστά και να επιλεγεί ο καλύτερα λειτουργικός αισθητήρας για τη δοκιμή. Το μολύβι Hsu (το οποίο ονομάστηκε από τον κατασκευαστή της τεχνικής) και το αξεσουάρ υποδημάτων Nielson (accessory Nielson shoe) είναι βολικά, φθηνά βοηθήματα που είναι εξαιρετικά πολύτιμα στην πρακτική δοκιμή ΑΕ. Η θραύση του μολύβδου δημιουργεί μια πολύ σύντομη τοπική ώθηση που είναι αρκετά παρόμοια με μια πηγή ακουστικών εκπομπών. Το επίπεδο κατωφλίου για

τη δοκιμή βαθμονόμησης είναι 80dB και λαμβάνεται ένας κατάλογος των καναλιών σύμφωνα με εύρος ≥ 90 . Η αξιοποίηση των πληροφοριών που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 10 βοηθά στην επανεπιλογή ενός κατάλληλου αισθητήρα και στον έλεγχο της στερέωσης του αισθητήρα στο τοίχωμα της δεξαμενής. Η συνολική βαθμονόμηση πραγματοποιείται με τη χρήση μιας διάτρησης που χτυπά στο τοίχωμα της δεξαμενής. Όλοι οι αισθητήρες που είναι διατεταγμένοι στο εξωτερικό τοίχωμα θα πρέπει να λαμβάνουν περίπου το ίδιο ASL (ASL Above Sea Level) επίπεδο. (Το επίπεδο θορύβου υποβάθρου των σημάτων μπορεί να μειωθεί κατά τη διάρκεια της 20λεπτης περιόδου δοκιμής). Η εξάλειψη του θορύβου υποβάθρου είναι σημαντική και επιτρέπει αξιόπιστη δοκιμή. Το επίπεδο κατωφλίου θα πρέπει να ρυθμιστεί σε 47dB παρόλο που ορισμένα δεδομένα που μπορεί να παραλειφθούν με τη χρήση αυτού του κατωφλίου. Για κάθε δοκιμή πεδίου σχετικά με τον περιβαλλοντικό θόρυβο, επιλέγεται ένα κατάλληλο επίπεδο κατωφλίου με βάση το μετρημένο αποδεκτό επίπεδο σήματος.

Τέλος, η τυποποιημένη διάταξη απαιτεί έναν αισθητήρα ΑΕ τουλάχιστον κάθε 16 μέτρα κατά μήκος της περιφέρειας σε ύψος περίπου 1 μέτρου. Μετά από τη συνολική βαθμονόμηση των αισθητήρων, επιλέγονται και τοποθετούνται 16 αισθητήρες γύρω από το εξωτερικό τοίχωμα της δεξαμενής σε δύο σειρές, όπου η πρώτη σειρά βρίσκεται σε ύψος 1 μέτρου και η δεύτερη σειρά είναι 1 μέτρου πάνω από την πρώτη σειρά. Η κάτω σειρά των αισθητήρων καθιστά δυνατή τη λήψη των σημάτων διάβρωσης και διαρροής και την εύρεση ενός αλγορίθμου για τον εντοπισμό των σημάτων πηγής. Η επάνω σειρά βοηθά στην εξάλειψη του θορύβου και ακατάλληλων σημάτων, όπως η πτώση του συμπυκνωμένου υγρού από την κορυφή της δεξαμενής. Η περίοδος δοκιμής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατάσταση λειτουργίας και τις περιστάσεις που υπάρχουν κατά τη στιγμή της δοκιμής. Εντούτοις, διάρκεια μίας ώρας είναι κατάλληλη ως μέγιστη διάρκεια δοκιμής πεδίου ακουστικών εκπομπών.

6.3.3 | Ανάλυση και συναφή εργασία

Η ανάλυση ΑΕ βασίζεται σε μια δυναμική τεχνική. Η ενεργός διάβρωση ή διαρροή στους πυθμένες των δεξαμενών πετρελαίου παράγει εκρήξεις ΑΕ που διαδίδονται σε όλο το υγρό έλαιο στο τοίχωμα της δεξαμενής, όπου μπορεί να ανιχνευθεί η ΑΕ. Τα λεπτομερή χαρακτηριστικά των σημάτων κατά τη διάρκεια της δοκιμής είναι το εύρος, ο χρόνος ανόδου και ο αριθμός και η διάρκεια των σημάτων που είναι υψηλότερα από το επίπεδο κατωφλίου. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι επαρκή για την επεξεργασία του αλγορίθμου και για την τελική αναφορά των δοκιμών πεδίου.

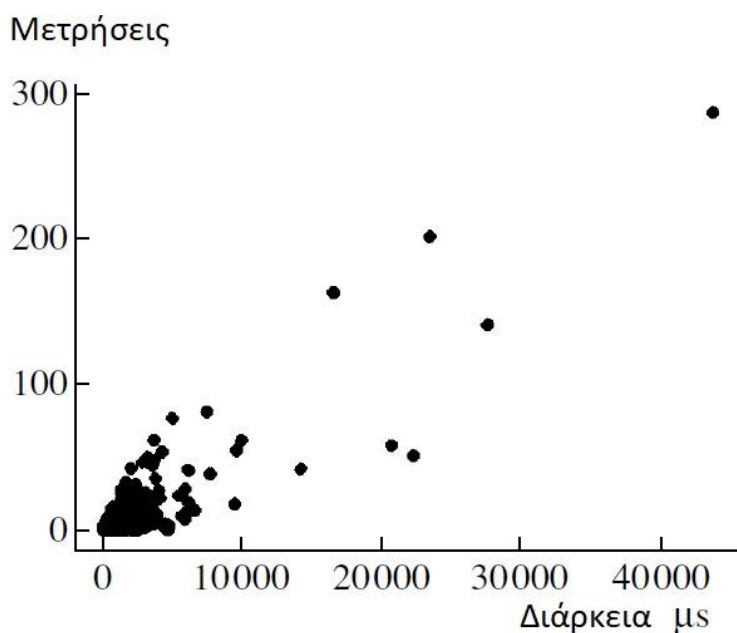
Είτε διαμήκης είτε εγκάρσιο, ένα ακουστικό κύμα μπορεί να χαρακτηριστεί από , τα οποία την ταχύτητα του c , τη συχνότητα f και το μήκος κύματος λ , τα οποία σχετίζονται μεταξύ τους από την παρακάτω σχέση:

$$C = \lambda f \quad (1)$$

Η ταχύτητα φάσης ενός ακουστικού κύματος είναι χαρακτηριστική ιδιότητα ενός υλικού και σχετίζεται με το μέτρο (ελαστικότητα) του υλικού (B) και την πυκνότητα του υλικού (ρ) ως:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (2)$$

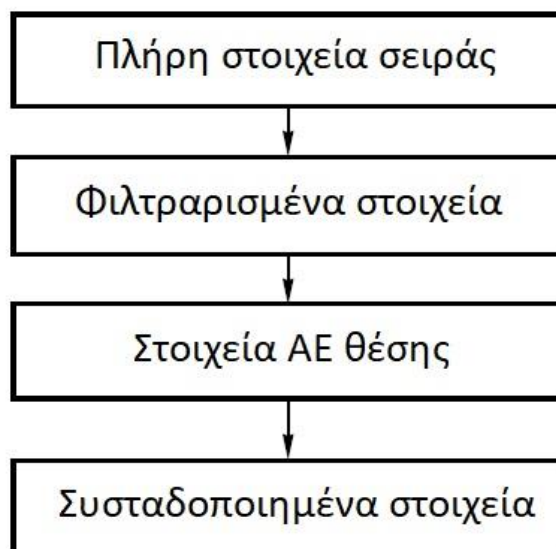
Σε αυτή την εξίσωση, ως (B) είναι το αδιαβατικό μέτρο του όγκου του υγρού. Σε ένα στερεό, το B αντικαθίσταται με το συντελεστή ελαστικότητας του υλικού E, Young. Τα αποτελέσματα των δοκιμών για δοκιμές AE στις δεξαμενές αποθήκευσης επιφανείας υποδηλώνουν ότι επιτυγχάνονται ταχύτητες ήχου μεταξύ 750 και 1650ms^{-1} και τα διαφορετικά προϊόντα υδρογονανθράκων έχουν μοναδικές, εξαιρετικά σταθερές ταχύτητες. Για παράδειγμα, η κηροζίνη έχει ταχύτητα ήχου 750ms^{-1} και ένα μείγμα ιλύος υδρογονανθράκων με νερό έχει ταχύτητα ήχου 1650ms^{-1} . Σε άλλα προϊόντα υδρογονανθράκων, η ταχύτητα του ήχου μπορεί να είναι τόσο χαμηλή όσο 110ms^{-1} . Η ταχύτητα των σημάτων στον αλγόριθμό μας υποτίθεται ότι είναι 1100ms^{-1} .



Διάγραμμα 11. Συσχέτιση αριθμού μετρήσεων και διάρκειας των πρώτων δεδομένων του καναλιού 1

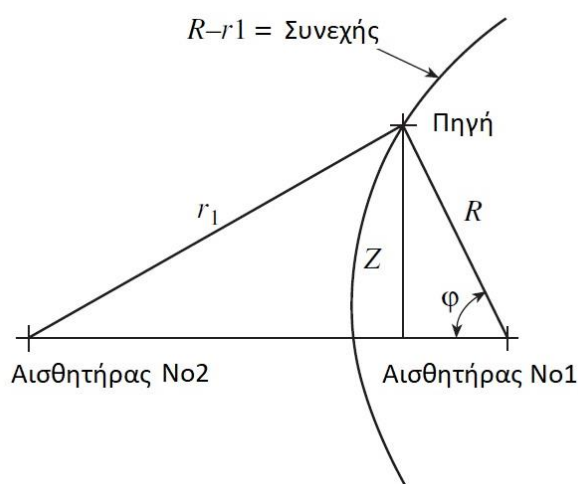
Τα δεδομένα κλήσης από τις δοκιμές πεδίου ήταν πολύ θορυβώδη και έπρεπε να φιλτραριστούν πριν εντοπιστεί ο αλγόριθμος. Το Διάγραμμα 11 παρουσιάζει το διάγραμμα συσχέτισης των ακατέργαστων δεδομένων μεταξύ του αριθμού των μετρήσεων και της διάρκειας των σημάτων που καταγράφηκαν κατά τη δοκιμή για το κανάλι 1. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι τα αποτελέσματα

εργαστηριακών δοκιμών των χαρακτηριστικών των ακουστικών σημάτων σε συνδυασμό με τη διάβρωση μας βοηθούν να επικυρώσουμε την εργασία που έγινε στο πεδίο των ελέγχων.



Διάγραμμα 12. Διάγραμμα ροής για επεξεργασία δεδομένων και ανάλυση

Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ανάλυσης και ο τρόπος διεξαγωγής του παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 12. Η θέση της πηγής βασίζεται στον χρόνο άφιξης των κυμάτων που μεταδίδονται από την πηγή στους αισθητήρες. Ο χρόνος της πρώτης διέλευσης κατωφλίου ονομάζεται χρόνος άφιξης της έκρηξης και απαιτείται για τον υπολογισμό της θέσης. Οι χρόνοι άφιξης εξαρτώνται από την ταχύτητα με την οποία τα κύματα μετακινούνται από την πηγή στους αισθητήρες. Η κατανόηση και η πρόβλεψη των κυματομορφών είναι η σημαντική πτυχή.



Σχήμα 29. Θέση πηγής με δύο αισθητήρες

Η θέση της πηγής ελήφθη από τη διατομή της εξίσωσης υπερβολής σύμφωνα με τον εκτιμώμενο χρόνο άφιξης των σημάτων. Μέσω της μελέτης δύο αισθητήρων και υπό την παραδοχή των ιδανικών

συνθηκών, μπορούν να ληφθούν οι ακόλουθες εξισώσεις σύμφωνα με το Σχήμα 29:

$$Z = R \sin \Phi \Delta t V = r_1 - R \quad (3)$$

$$\text{και } Z = R \sin \varphi \quad (4)$$

$$Z^2 = r_1^2 - (D - R \cos \varphi) \quad (5)$$

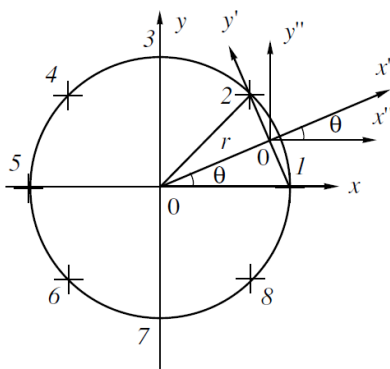
$$\text{Συνεπώς } R^2 \sin^2 \varphi = r_1^2 - (D - R \cos \varphi)^2 \quad (6)$$

$$R^2 = r_1^2 - D^2 + 2DR \cos \varphi \quad (7)$$

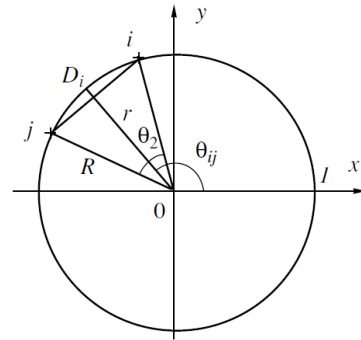
Αντικατάσταση του $r_1 = \Delta t V + R$ στην εξίσωση (3) δίνει:

$$R = \frac{1}{2} \frac{D^2 - \Delta t^2 V^2}{\Delta t^2 V^2 + D \cos(\varphi)} \quad (8)$$

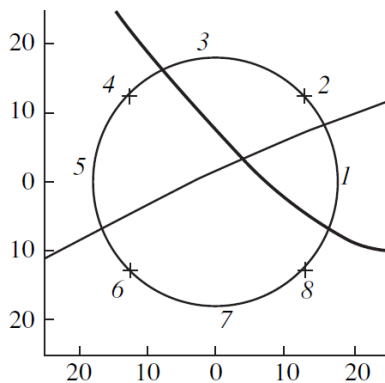
Η εξίσωση (8) είναι η εξίσωση μιας υπερβολής που διέρχεται από τη θέση της πηγής σε πολικές συντεταγμένες. Οποιοδήποτε σημείο στην υπερβολή πληροί τα δεδομένα εισόδου (την αλληλουχία επιτυχίας και τη χρονική διαφορά).



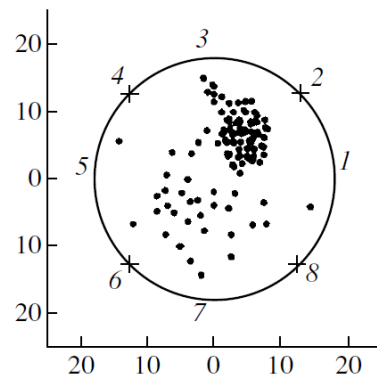
Σχήμα 30. Θέση πηγής με δύο αισθητήρες (στον τοίχο μιας δεξαμενής)



Σχήμα 31. Θέση πηγής με δύο αισθητήρες στον τοίχο μιας δεξαμενής (αλγόριθμος εντοπισμού που ισχύει για n αισθητήρες)



Σχήμα 32. Διατομή δύο καμπύλων υπερβολών καναλιών 1 – 2 και 1 – 8 προκειμένου να εντοπιστεί η θέση



Σχήμα 33. Δισδιάστατος χάρτης των πηγών σήματος σε ένα κάτω μέρος της δεξαμενής

Μετά την εφαρμογή της εξίσωσης για κάθε ζεύγος αισθητήρων γύρω από το τοίχωμα της δεξαμενής, όπως φαίνεται στα Σχήματα 30 και 31, προκύπτει η εξίσωση:

$$\frac{4(-x\sin\theta+y\cos\theta)^2}{V^2\Delta t^2} - \frac{(x\cos\theta-y\sin\theta-r)^2}{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \frac{1}{4}V^2\Delta t^2} = 1 \quad (9)$$

$$\frac{4(-x\sin\theta_{ij}+y\cos\theta_{ij})^2}{V^2\Delta t_{ij}^2} - \frac{(x\cos\theta_{ij}-y\sin\theta_{ij}-r)^2}{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \frac{1}{4}(V\Delta t_{ij})^2} = 1$$

$$\theta_{ij} = \frac{\pi}{n}(i-j-2)$$

$$r = \left| R \cos\left(\frac{\pi}{n}(j-i)\right) \right| \quad (10)$$

$$D_{ij} = R \sqrt{2 \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi}{n}(j-i)\right) \right)}$$

Εδώ το R είναι η ακτίνα δεξαμενής, το D_{ij} είναι η απόσταση μεταξύ των i – στού και j – στού αισθητήρων, όπου ο i – στός αισθητήρας πρέπει να τοποθετηθεί πριν από τον j – στο αισθητήρα, n είναι ο αριθμός των αισθητήρων, V είναι η ταχύτητα του ήχου στο υγρό και Δt_{ij} είναι η διαφορά άφιξης – χρόνου μεταξύ των i – στού και j – στού αισθητήρων.

Στις εξισώσεις (9) και (10), η υπόθεση είναι για τη γεωμετρική υπερβολή που διέρχεται από την πηγή σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Η εξίσωση (9) ισχύει για δύο αισθητήρες ακολουθίας τοποθετημένους στον τοίχο και η εξίσωση (10) ισχύει για n αισθητήρες. Για παράδειγμα, η τομή δύο υπερβολικών καμπυλών που σχετίζονται με τα κανάλια 1 – 2 και τα κανάλια 1 – 8 με σκοπό την εύρεση της θέσης, υποδεικνύεται στο Σχήμα 32.

Για την εκτίμηση της χρονικής διαφοράς των σημάτων από μία πηγή, πρέπει να βρεθεί ένας αλγόριθμος για κάθε ζεύγος καναλιών.

Το Σχήμα 33 δείχνει τα αποτελέσματα (2D χάρτη πηγών σημάτων) των σημάτων διαρροής και διάβρωσης που έχουν ληφθεί από τους αισθητήρες.

Παράμετροι	Τιμές
Πλάτος dB	35–60
Χρόνος ανόδου μs	1–30
Διάρκεια μs	1–200
Μετρήσεις	1–40

Πίνακας 8. Χαρακτηριστικά ακουστικών σημάτων που συνδέονται με τη διάβρωση

Βαθμίδα	Περιγραφή	Διάρκεια συντήρησης
A	Πολύ μικρή	5 έτη
B	Μικρή	3 έτη
C	Ενεργή	1 έτος
D	Πολύ ενεργή	-

Πίνακας 9. Βαθμίδες για έλεγχο ΑΕ

6.3.4|Συμπεράσματα

Η δοκιμή ΑΕ των δεξαμενών επιφανείας είναι μια κατάλληλη μέθοδος για σκοπούς συντήρησης. Η διαδικασία βασίζεται στη χρήση των πληροφοριών σήματος από το κάτω μέρος της δεξαμενής για να βρεθεί η βέλτιστη διάρκεια συντήρησης, η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας τη στιγμή της δοκιμής. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 9, ο βαθμός A δηλώνει την καλή κατάσταση του πυθμένα της δεξαμενής, ότι δηλαδή δεν υπάρχει ανάγκη εσωτερικής επιθεώρησης της δεξαμενής μέσω άλλης μεθόδου. Ο βαθμός D, από την άλλη πλευρά, δείχνει πολύ ενεργά σήματα από το κάτω μέρος της δεξαμενής. Συνεπώς, η δεξαμενή θα θεωρηθεί εκτός λειτουργίας και θα χρειαστεί μια φυσική εξέταση μέσα για να επαληθεύσει τις ενδείξεις που πραγματοποιήθηκαν με τη δοκιμή ΑΕ.

Μπορεί να υπάρχουν κάποια σφάλματα εντοπισμού θέσης που μπορούν να επηρεάσουν τον αλγόριθμο εντοπισμού και συνεπώς, το αποτέλεσμα των σημάτων εκτίμησης χρόνου άφιξης. Πρέπει να καταβληθούν προσπάθειες για την ελαχιστοποίηση και εάν είναι δυνατόν, την εξάλειψη κάθε λάθους. Αυτά τα σφάλματα περιλαμβάνουν τα εξής: αβεβαιότητα στην εκτίμηση χρόνου των σημάτων πολλαπλών διαδρομών, εξασθένηση σημάτων, αλληλοεπικάλυψη πολλαπλών κυμάτων στους αισθητήρες, άγνωστη συμπεριφορά σήματος και η επίδραση θορύβου. [17]

6.4|Διαφοροποίηση σημάτων διαρροής και διάβρωσης σε δοκιμές ΑΕ δαπέδων επιφανειακών δεξαμενών αποθήκευσης με Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ)

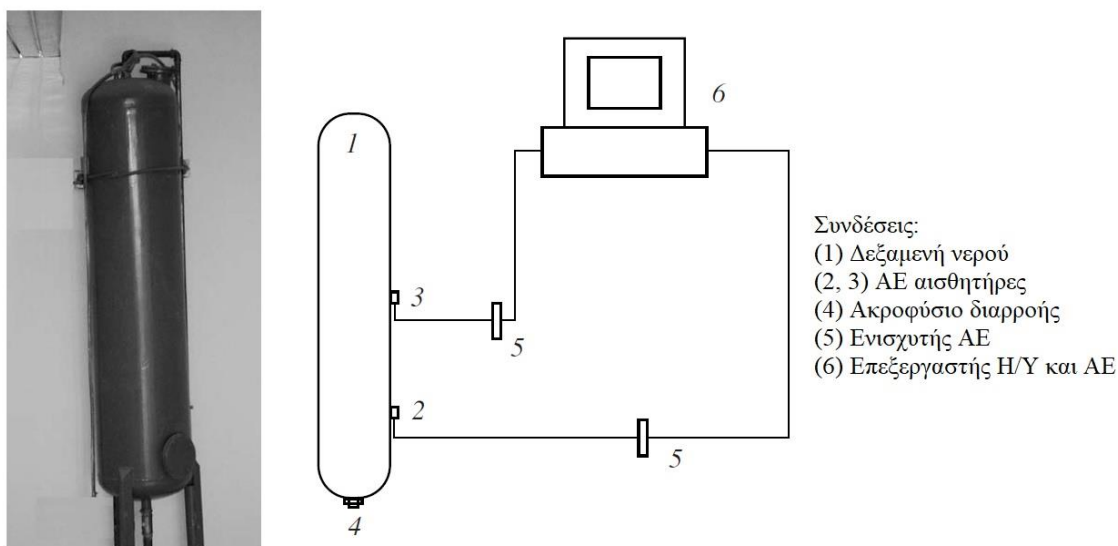
Στην μελέτη που θα αναλύσουμε στη συνέχεια θα δούμε ένα ακόμα παράδειγμα ελέγχου δαπέδου επιφανειακών δεξαμενών αποθήκευσης με τη χρήση συστήματος τεχνητών νευρωνικών δικτύων αυτή τη φορά. Η διαφοροποίηση του σε σχέση με το προηγούμενο παράδειγμα είναι ότι χρησιμοποιεί και δεδομένα από προσομοίωση μιας εργαστηριακής βάσης μικρότερης κλίμακας.

Όπως έχει προαναφερθεί η μέθοδος ακουστικής εκπομπής είναι μια καλά αναγνωρισμένη διαδικασία επιθεώρησης δαπέδων για δεξαμενές επιφανειακής αποθήκευσης καθώς και ένα προληπτικό εργαλείο για τη βελτίωση του χρόνου συντήρησης. Η μεγάλη σημασία αυτής της μεθόδου επιτυγχάνεται καλύτερα όταν χρησιμοποιείται σε ευαίσθητες κατασκευές ενώ βρίσκονται

σε λειτουργία. Στην παρούσα μελέτη παρασκευάστηκε μια εργαστηριακή βάση μικρότερης κλίμακας και έγινε προσομοίωση όλων των συνθηκών λειτουργίας. Αυτό παρείχε μια τράπεζα δεδομένων για την αναγνώριση των ακουστικών κυμάτων. Πραγματοποιήθηκαν περισσότερα πειράματα για την απλή διάβρωση σε μια δεξαμενή. Στη συνέχεια συλλέχθηκαν δεδομένα από μετρήσεις ακουστικών εκπομπών για αρκετές επιφανειακές δεξαμενές αποθήκευσης (AST) σε ένα διυλιστήριο. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τις εργαστηριακές δοκιμές και τα πραγματικά δεδομένα συνδυάστηκαν προκειμένου να γίνει διάκριση μεταξύ σημάτων διαρροής και διάβρωσης. Χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου – ΤΝΔ (Artificial Neural Network – ANN) για να ταξινομήσει τις δοκιμασμένες επιφανειακές δεξαμενές αποθήκευσης.

6.4.1|Εισαγωγή

Μεγάλος όγκος ερευνών έχει αφιερωθεί στην ανάπτυξη ΑΕ για βιομηχανικές εφαρμογές. Μιλώντας για σύγχρονες διαδικασίες μία από αυτές είναι η αναγνώριση προτύπων η οποία χρησιμοποιείται από τους ειδικούς για τη διάκριση διαφορετικών σημάτων. Ο πρωταρχικός στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η ταξινόμηση σημάτων για διαφορετικούς σκοπούς. Η βάση της διαδικασίας αναγνώρισης προτύπων αναλύθηκε και διατυπώθηκε λεπτομερώς από τον Μάο στην έρευνα που διεξήγαγε. [19] Ο στόχος της έρευνας του Μάο ήταν μια συνολική σύγκριση των αναγνωρισμένων θεωρητικών και πρακτικών εφαρμογών αυτής της διαδικασίας. Το πλήθος των αναφερόμενων μεθόδων αξιοποίησης αυτής της διαδικασίας τόσο στη θεωρία όσο και στην πράξη είναι ενδεικτικό της σημασίας της. Ορισμένες διαδικασίες διεξάγονται με ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, από το οποίο χρησιμοποιείται ειδικά η μέθοδος feed forward δηλαδή η προώθηση της ροής δεδομένων προς τα εμπρός για τη διαφοροποίηση των σημάτων.



Σχήμα 34. Εργαστηριακά τμήματα συσκευής δοκιμής ΑΕ και οι συνδέσεις τους

Τα τελευταία χρόνια, τα ΤΝΔ έχουν αποκτήσει μεγάλη σημασία και έχουν αναγνωριστεί ως ένα ισχυρό εργαλείο επεξεργασίας και ταξινόμησης σημάτων. Οι Baily και Mathew ανέπτυξαν ένα μοντέλο για τη διάγνωση ελαττωμάτων ρουλεμάν με ένα ΤΝΔ [19]. Ο Tadej Kosel έχει αναπτύξει έναν ευφυή εντοπιστή πηγής ΑΕ με βάση ένα ΤΝΔ. Το έργο του βασίστηκε σε εργαστηριακά εκπαιδευμένα δεδομένα. Στα πειράματά του, ο Kosel ασχολήθηκε με διάφορους τύπους σημάτων. Ένα αξιοσημείωτο εύρημα αυτής της έρευνας ήταν η αναγνώριση των χαρακτηριστικών του σήματος. Στην έρευνα του Kosel φαίνεται ότι όταν τα σήματα δημιουργούνται από διαφορετικές πηγές, διασταυρώνονται διαφορετικοί τρόποι σημάτων. Μια προκαθορισμένη μέθοδος για ανάλυση με τον κώδικα BSS13 παρουσιάστηκε από τον Kosel. [20]

6.4.2|Μεθοδολογία

Με βάση τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν σχετικά με προηγούμενες μελέτες, η έρευνα χωρίστηκε σε δύο μέρη: η πρώτη σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε σε ένα εργαστήριο με αναφορά στην εργαστηριακή βάση AEDSP32/15. Το δεύτερο σύνολο δεδομένων συλλέχθηκε από πραγματικές μετρήσεις σε δεξαμενές AST του διυλιστηρίου της Τεχεράνης μέσω εξοπλισμού και συσκευών που διατίθενται στο εμπόριο.

Ο πρώτος κύκλος των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε σε ένα εργαστηριακό περιβάλλον που ήταν σε θέση να παρέχει τα εξής:

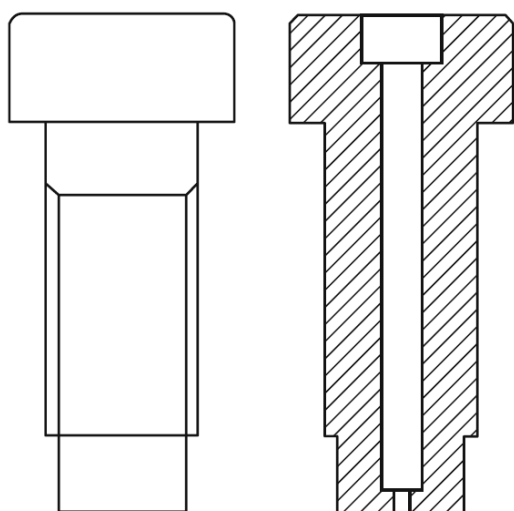
- Δυνατότητα διεξαγωγής πειραμάτων σε περιβάλλον χωρίς την παρουσία οποιασδήποτε διαρροής στη δεξαμενή για τη μέτρηση θορύβων υποβάθρου υπό παρόμοιες συνθήκες.
- Δυνατότητα διεξαγωγής πειραμάτων με διαρροές διαφορετικού μεγέθους.
- Δυνατότητα πραγματοποίησης μετρήσεων για διαφορετικές θέσεις αισθητήρων.
- Δυνατότητα χρήσης ακροφυσίων με διαφορετικές διαμέτρους. Αυτό επιτρέπει τη σύγκριση και ανάλυση διαφόρων διαρροών υπό το πρίσμα διαφόρων διαμέτρων ακροφυσίων.

Ένα σύστημα που περιλαμβάνει δεξαμενή υγρού (νερό) ικανό να έχει διαρροή, αισθητήρες και συσκευές μέτρησης ΑΕ χρησιμοποιήθηκε για το εργαστηριακό τμήμα μέτρησης αυτής της μελέτης. Το Σχήμα 34 δείχνει τα μέρη από τα οποία αποτελείται και πώς αυτά συνδέονται.

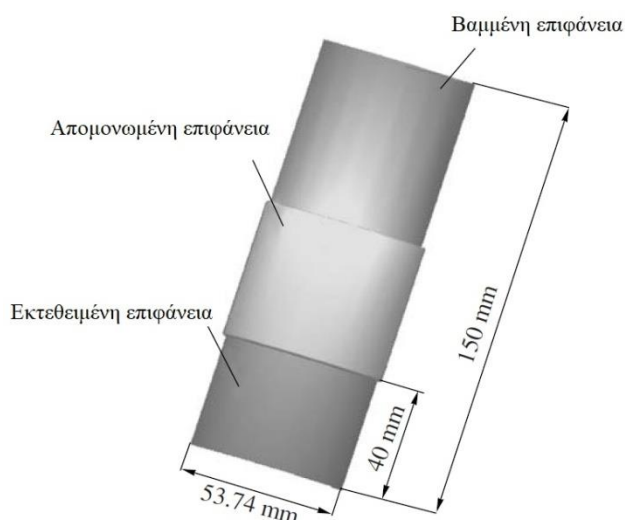
Οι διαστάσεις του δοχείου ήταν 1,6m σε ύψος και 4m σε διάμετρο, με πάχος τοιχώματος 6,5mm. Το γεωμετρικό σχήμα της δεξαμενής ήταν κυλινδρικό και κατασκευάστηκε από χάλυβα 3304 (πρότυπο AISI/SAE) σύμφωνα με το πρότυπο no.DIN2391/C, ικανή να έχει διαρροή στο δάπεδο της, αν αυτό ήταν επιθυμητό. Αυτό που έχει μεγαλύτερη σημασία στην κατασκευή αυτού του τύπου δεξαμενής είναι ότι δημιουργεί κατάλληλη διαρροή στο πάτωμά της τοποθετώντας τρύπες αρκετά μικρών διαμέτρων. Για να επιτευχθεί αυτό το χαρακτηριστικό, χρησιμοποιήθηκαν βίδες από

χάλυβα μήκους 2cm. Σε αυτές τις βίδες έγιναν τρύπες διαφόρων μεγεθών, οι οποίες ήταν βολικά αντικαταστάσιμες. Στο Σχήμα 35 βλέπουμε ένα σχηματικό διάγραμμα αυτών.

Κατά τη σύνδεση των βιδών στη δεξαμενή από το εξωτερικό του δαπέδου, δεν χρησιμοποιήθηκαν ροδέλες. Αυτό έγινε για την αποφυγή επίδρασης στα ληφθέντα σήματα. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, συγκολλήθηκε ένα περικόχλιοστο πάτωμα της δεξαμενής και το άκρο του το οποίο ήταν τοποθετημένο στο δάπεδο της δεξαμενής που εκκενώθηκε επίσης για την πρόσβαση στο υγρό. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν βίδες με διαμήκεις οπές στο παξιμάδι οι οποίες βιδώθηκαν σφιχτά. Για την κατασκευή οπών στα ακροφύσια χρησιμοποιήθηκε λείζερ.



Σχήμα 35. Σχεδιασμός ακροφυσίων για δοκιμή ΑΕ



Σχήμα 36. Δείγμα δοκιμίων

Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα ακροφύσια για το εργαστηριακό τμήμα της μέτρησης διαρροών. Οι διαστάσεις των ακροφυσίων ήταν 1, 1,5, 2 και 3mm. Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε όπου δεν υπήρχε διαρροή. Συνεπώς, κάθε ληφθέν σήμα οφειλόταν σε θορύβους (μηχανικό, ηλεκτρικό, κ.λπ.). Αυτό το στάδιο μέτρησης παρείχε πιο ζωντανή και διακριτή διαφοροποίηση των υφιστάμενων θορύβων. Με τη βαθμονόμηση και την αναπροσαρμογή των διαφόρων παραμέτρων που διέπουν τη συσκευή μέτρησης, θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν τρόποι αποκλεισμού των θορύβων σε πραγματικές μετρήσεις διαρροής.

Μετά τη διασφάλιση της σωστής σύνδεσης αισθητήρων, ξεκίνησε η διαδικασία δοκιμής. Τα πρώτα 20s κάθε κύκλου μετρήθηκαν χωρίς διαρροή. Στο 21ο δευτερόλεπτο, ένας χειριστής ενεργοποιεί το ακροφύσιο και επιτρέπει μια στιγμιαία διαρροή, οπότε αρχίζει η διαδικασία λήψης και καταγραφής δεδομένων.

Η διάρκεια κάθε δοκιμής για μια δεδομένη διάμετρο ακροφυσίου ήταν περίπου 2 λεπτά. Ωστόσο, υπό το πρίσμα της εξήγησης για τα πρώτα 20s κάθε διαδρομής, μόνο τα τελευταία 100s καταγεγραμμένων δεδομένων παρουσιάζονται στα ευρήματα. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τέσσερα ακροφύσια και για κάθε απόσταση 20, 60 και 100cm από τη θέση διαρροής, διεξήχθη η δοκιμή ΑΕ δύο φορές.

Η συλλογή δεδομένων και η τράπεζα δεδομένων σχετικά με τη μέτρηση της διάβρωσης ολοκληρώθηκαν επίσης σύμφωνα με τη διαδικασία AEDSP32/15. Χρησιμοποιήθηκαν δείγματα διαβρωτικών μετάλλων όπως χάλυβας και χαλκός με καθαρότητα άνω του 99,6%. Κάθε δείγμα είχε μέγεθος 15x15cm, με πάχος 2mm.

Αυτά τα δείγματα στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν ως ηλεκτρόδια σε διαβρωτικό ηλεκτροχημικό δίπολο για τη διάγνωση των ακουστικών σημάτων διάβρωσης. Όλα τα δείγματα αποκολλήθηκαν και καθαρίστηκαν με ακετόνη για να αποφευχθούν τυχόν ελαττώματα στη διαδικασία διάβρωσης. Ως διαβρωτικό μέσο σε όλες τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε υδροχλωρικό οξύ (HCl). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρικό ρεύμα μέσω των καθοδικών και ανοδικών πόλων για την εντατικοποίηση της διαδικασίας διάβρωσης.

Όλα τα δείγματα ζυγίστηκαν επακριβώς με υπερευαίσθητη κλίμακα (έως 0.00001g) πριν και μετά την τοποθέτησή τους στον διαλύτη για τον προσδιορισμό της ποσότητας απώλειας βάρους κατά τη διάρκεια της διεργασίας διάβρωσης. Σε αυτές τις δοκιμές, δεδομένου ότι η πυκνότητα του διαλύτη ήταν μια αποτελεσματική παράμετρος της ποσότητας διάβρωσης, έπρεπε να προσδιοριστεί η διατομή των περιοχών υπό διάβρωση. Από την άποψη αυτή, όλες οι επιφάνειες που εκτέθηκαν στη διαλυτική ύλη καθορίστηκαν και οι υπόλοιπες επιφάνειες εκτεθειμένες στον αέρα καλύφθηκαν με πολυμερή αφρό για να σωθούν από τη διάβρωση (Σχήμα 36). Η υπόλοιπη επιφάνεια του μετάλλου έξω από το διαλύτη ήταν προσβάσιμη από τον αισθητήρα ΑΕ. Ηλεκτρόδια χάλυβα και χαλκού κρατήθηκαν στο διαλύτη με μη μεταλλικά κλιπ. Δεν υπήρχε καμία μεταλλική σύνδεση μεταξύ των ηλεκτροδίων και της συσκευής και δεν παρατηρήθηκε καμία δόνηση ή ταλάντωση οποιουδήποτε είδους κατά τον χρόνο των μετρήσεων.

Το ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του συστήματος διοχετεύτηκε έτσι ώστε να λαμβάνει χώρα ομοιογενής κατανομή. Για το λόγο αυτό, τοποθετήθηκε ένας συνδετήρας για να συνδεθεί καλά με την επιφάνεια του δείγματος και τα καλώδια που οδηγούσαν το ηλεκτρικό ρεύμα ήταν συγκολλημένα σε αυτόν. Για τη σύνδεση των αισθητήρων με τα δείγματα, χρησιμοποιήθηκε γράσο για την παροχή αξιόπιστης σύνδεσης και για την αποτροπή εγκλωβισμού αέρα μεταξύ του δείγματος και του αισθητήρα. Χρησιμοποιήθηκε ένας μόνο αισθητήρας για τη σύνδεση των δειγμάτων με το υλικό. Αυτό συμβαίνει παρόλο που υπήρχαν δύο είσοδοι στην κάρτα επεξεργαστή για τους αισθητήρες.

Προσδιορισμένη έξοδος δικτύου	Ταξινόμηση σημάτων
00	Μικρή διάβρωση
01	Ενεργή διάβρωση
10	Πολύ ενεργή διάβρωση
11	Διαρροή

Πίνακας 10. Ταξινόμηση σημάτων με βάση την έξοδο του δικτύου

Λόγω του ηλεκτρικού ρεύματος στα δείγματα και της πιθανότητας βλάβης του υλικού, χρησιμοποιήθηκε μόνο ένας αισθητήρας.

Όλες οι δραστηριότητες σχετικά με τη συλλογή δεδομένων σε αυτό το στάδιο ήταν σύμφωνες με την προβλεπόμενη διαδικασία AEDSP32/15. Οι προσαρμογές του λογισμικού και του υλικού που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη διαδικασία ήταν οι εξής:

- Προενισχυτής = 60dB
- Κατώτατο όριο διάγνωσης θορύβου = 30dB
- Ενισχυτής = 60dB
- Συχνότητα δειγματοληψίας = 4MHz
- Φίλτρο χαμηλής διέλευσης = 100kHz
- Φίλτρο υψηλής διέλευσης = 400kHz

Οι μετρήσεις πεδίου για την έρευνα αυτή διεξήχθησαν σε ένα διυλιστήριο σε πραγματικές δεξαμενές αποθήκευσης πάνω από το έδαφος που περιέχουν αργό πετρέλαιο. Χρησιμοποιήθηκε μια συσκευή μέτρησης AE 36 καναλιών σε δεξαμενές με διάμετρο 36, 38 και 45m. Τα τρία βασικά βήματα αυτής της διαδικασίας ήταν τα εξής:

1. Προετοιμασία της δεξαμενής για έλεγχο και βαθμονόμηση αισθητήρων
2. Διεξαγωγή δοκιμών AE στη δεξαμενή
3. Συλλογή και ανάλυση δεδομένων και σύνταξη έκθεσης

Όλα τα μέτρα που ελήφθησαν για την παρακολούθηση της δεξαμενής βασίστηκαν στα πρότυπα ASTM E – 121. Η επιλογή του αριθμού των αισθητήρων ήταν σύμφωνη με τη διάμετρο της δεξαμενής καθώς και την ικανότητα κάλυψης κάθε αισθητήρα για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Κατά συνέπεια, τοποθετήθηκε ένας αισθητήρας στη δεξαμενή καλύπτοντας περιοχές ανά 15 μέτρα. Για παράδειγμα, για τη δεξαμενή των 38 μέτρων τοποθετήθηκαν οκτώ αισθητήρες στην περιοχή κάλυψης ($38 \times 3.14 = 119.34$ αυτή η τιμή διαιρείται με το 15 ισούται με 8). Πριν από την τοποθέτηση των αισθητήρων κλήθηκαν στο διυλιστήριο της Τεχεράνης συνεργεία συντήρησης καθώς και ορισμένες εμπορικές εταιρείες.

Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους (15m) και 1m πάνω από την επιφάνεια για να ληφθούν τα κατάλληλα αποτελέσματα για ανάλυση. Η διαβούλευση με τους εμπειρογνώμονες πρότεινε επίσης να εγκατασταθεί μια πρόσθετη σειρά αισθητήρων 1,5m πάνω από τους ήδη τοποθετημένους αισθητήρες. Η δεύτερη σειρά αισθητήρων ήταν για να λαμβάνουν σήματα από την επιφάνεια του υγρού μέσα στη δεξαμενή. Οι συμπυκνωμένες σταγόνες του υγρού από το εσωτερικό της δεξαμενής δημιουργούσαν επίσης θόρυβο που μπορεί να επηρέαζε τις μετρήσεις. Με την εγκατάσταση μιας δεύτερης σειράς αισθητήρων, θα μπορούσαν να αποκλειστούν οι πληροφορίες και τα σήματα που συλλέγονται από την επιφάνεια του υγρού μέσα στη δεξαμενή έτσι ώστε να εξασφαλιστούν ακριβέστερες μετρήσεις.

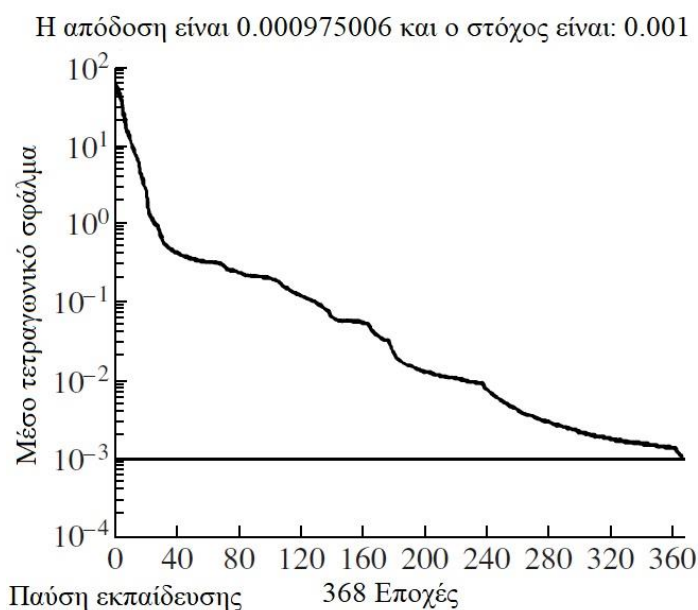
Εξετάστηκαν επίσης και άλλες σημαντικές παράμετροι πριν από τη διεξαγωγή αυτής της μελέτης. Ο αποκλεισμός των περιστροφικών μηχανών εργασίας στο φάσμα μέτρησης ήταν μια από αυτές. Είκοσι τέσσερις ώρες πριν από την έναρξη των πραγματικών μετρήσεων, όλες οι εισόδους και οι έξοδοι της δεξαμενής έκλεισαν για να παράσχουν τις απαιτούμενες ήρεμες και σταθερές συνθήκες για τη δοκιμή. Επιπλέον, απενεργοποιήθηκαν όλες οι αντλίες και τα μηχανήματα γύρω από τη δεξαμενή. Ως τελικός έλεγχος, χρησιμοποιήθηκε συσκευή μέτρησης ήχου διαρροής για την ανίχνευση πιθανού υπάρχοντος θορύβου γύρω από τη δεξαμενή. Αυτή η συσκευή είναι ένα φορητό σύστημα παρακολούθησης εξοπλισμένο με οθόνη και ακουστικά ικανά να ανιχνεύουν συνεχή και/ή μη συνεχή ακουστικά σήματα εντός της περιοχής 20 – 100kHz. Από αυτόν τον εξοπλισμό μπορεί να ανιχνευθούν σήματα από διαρροή ή ακόμα και διάβρωση.

6.4.3|Ανάλυση δεδομένων

Χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος αναγνώρισης δείγματος για τη διαφοροποίηση των ανιχνευόμενων σημάτων. Αυτός ο αλγόριθμος βασίζεται στην εφαρμογή ΤΝΔ. Ο κύριος λόγος για την επιλογή ενός ΤΝΔ σε αυτή την έρευνα που υπερισχύει έναντι άλλων μεθόδων είναι η υψηλή ικανότητα μάθησης σε μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ εισόδων και εξόδων. Επιπλέον, αυτά τα δίκτυα μπορούν να προσαρμοστούν στα εισερχόμενα δεδομένα. Δεδομένου ότι το MATLAB ήταν το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση και τον προγραμματισμό σε αυτή τη μελέτη, το πρόβλημα καθορίστηκε έτσι ώστε να έχει τέσσερις εισόδους. Αυτές οι εισοδοί, σχηματίζουν έναν πίνακα 1×4 , προσδιορίστηκαν από τις δοκιμές, των οποίων τα χαρακτηριστικά ήταν το εύρος, η διάρκεια, ο χρόνος ανόδου και ο αριθμός των παλμών.

Η προσδιορισμένη έξοδος για το δίκτυο είναι ένας πίνακας 2×1 , ένας δυαδικός αριθμός με δύο δυαδικά ψηφία για τον οποίο εξετάστηκαν τέσσερις συνθήκες 01, 10, 11 και 00. Αυτές οι τέσσερις συνθήκες εμφανίζουν διαφορετικές ταξινομήσεις σημάτων. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από εργαστηριακές δοκιμασίες ταξινομήθηκαν και διαβαθμίστηκαν αρχικά και στη συνέχεια

εκπαιδεύτηκε το δίκτυο σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα. Οι κατηγορίες και η ταξινόμηση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 10. Οι τιμές των σειρών 1 – 3 συλλέχθηκαν από εργαστηριακές μετρήσεις που σχετίζονται με τη διάβρωση και οι τιμές της σειράς 4 (συνθήκη 11) από αυτές που συλλέγονται για διαρροή. Η εκπαίδευση του δικτύου για τις τέσσερις κατηγορίες που συζητήθηκαν ανταποκρίνεται στο αναμενόμενο αποτέλεσμα.



Διάγραμμα 13. Μέσο τετραγωνικό σφάλμα για τη διαδικασία εκπαίδευσης ΤΝΔ

Το χρησιμοποιούμενο δίκτυο ήταν 4 – 15 – 15 – 2 και επίσης χρησιμοποιήθηκαν δύο κρυφά επίπεδα. Ο λόγος για τη χρήση ενός τετραπλού δικτύου με δύο κρυφά επίπεδα εισόδου και εξόδου είναι ότι ανταποκρίνεται περισσότερο η εφαρμογή ενός νευρωνικού δικτύου τεσσάρων επιπέδων (μαζί με την είσοδο και την έξοδο) για την ανάλυση των ταξινομήσεων. Το κρυφό στρώμα στην κατάσταση 15 παρέχει καλύτερη εκπαίδευση και απαντήσεις, όπως υποδεικνύεται στα αποτελέσματα. Αυτό το επίπεδο μπορεί να εκπαιδευτεί στο συντομότερο δυνατό χρονικό διάστημα.

Για την εκπαίδευση του δικτύου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος *tr*. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως για ταξινόμηση. Όλες οι κωδικοποιήσεις που έγιναν για αυτή τη μελέτη έγιναν χρησιμοποιώντας το λογισμικό MATLAB και το Toolbox του Neural Network. Η αναγνώριση του καλύτερου αλγορίθμου εκπαίδευσης για την απόκτηση της ταχύτερης απόκρισης στο συγκεκριμένο πρόβλημα ήταν μάλλον δύσκολη. Ένας αριθμός διαφορετικών παραμέτρων, όπως η πολυπλοκότητα του καθορισμένου προβλήματος, ο αριθμός των δεδομένων εκπαίδευσης, ο αριθμός των βαρών στο δίκτυο και το αποδεκτό σφάλμα, έπαιξαν ρόλο στο αποτέλεσμα. Το αποδεκτό σφάλμα σε αυτό το στάδιο ορίστηκε να είναι 0.001% (Διάγραμμα 13). Όσο μικρότερο είναι το υποτιθέμενο σφάλμα, τόσο καλύτερη και ακριβέστερη θα είναι η απόδοση του δικτύου. Ένα

προκαθορισμένο αποδεκτό σφάλμα σημαίνει ότι, κατά την επίτευξη αυτής της τιμής, το δίκτυο θα σταματήσει την εκπαίδευση. Για παράδειγμα, στην εκπαίδευση για ένα τμήμα δεδομένων, μετά από 380 επαναλήψεις, επιτεύχθηκε το ελάχιστο σφάλμα 0.001 στο σύστημα. Το Σχήμα 35 είναι ενδεικτικό του παραδείγματος αυτού.

6.4.4 | Συμπεράσματα

Η έξοδος του δικτύου για τα δεδομένα των δεξαμενών παρουσιάζεται στον Πίνακα 11. Δεδομένου ότι ο κύριος στόχος αυτής της έρευνας ήταν να διαφοροποιηθούν τα σήματα των πηγών διαρροής και διάβρωσης, αυτός ο στόχος ολοκληρώθηκε. Η μέθοδος TNA εφαρμόστηκε ως ισχυρό μέσο για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων. Η εκπαίδευση των συγκεντρωμένων δεδομένων σε αυτό το έργο πραγματοποιήθηκε από ένα νευρωνικό δίκτυο με χαρακτηριστικά 4 – 15 – 15 – 2. Χρησιμοποιήθηκε το μαθηματικό λογισμικό MATLAB για την ανάπτυξη της μεθόδου του νευρικού δικτύου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών που διενεργήθηκαν σε μια πραγματική δεξαμενή σε ένα διυλιστήριο έδειξαν ότι μόνο το 1% των λαμβανομένων σημάτων ήταν ενδεικτικά της διαρροής και επομένως η δεξαμενή ήταν σε κατάλληλη κατάσταση όσον αφορά το δάπεδο της που είχε διαρροή.

Έξοδος δικτύου (%)	Ταξινόμηση
85	Μικρή διάβρωση
10	Ενεργή διάβρωση
4	Πολύ ενεργή διάβρωση
1	Διαρροή

Πίνακας 11. Ποσοστά των αποτελεσμάτων TNA βάσει της ταξινόμησης

Οι δοκιμές ΑΕ επηρεάζονται σημαντικά από την ύπαρξη θορύβων. Η βροχή, το χιόνι, ο άνεμος, η πτώση των συμπυκνωμένων σταγόνων στο εσωτερικό της δεξαμενής και οι ήχοι του περιβάλλοντος, καθώς και οι δονήσεις από την εργασία μηχανημάτων κοντά στην δοκιμή, μπορούν να συμβάλουν στη δημιουργία θορύβου σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις όπου πραγματοποιούνται δοκιμές ΑΕ. Εξετάστηκαν όλες οι πιθανές διορθωτικές ενέργειες κατά την διεξαγωγή της έρευνας και κατά συνέπεια, στην εργαστηριακή δοκιμή δεν μετρήθηκε σημαντικός θόρυβος. Όσον αφορά τις δοκιμές πεδίου, ελήφθησαν οι ακόλουθες ενέργειες για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων του θορύβου στις μετρήσεις ΑΕ. Η δοκιμή διεξήχθη τη νύχτα για να αποκλειστούν οι ακτίνες του ήλιου και η θερμική διαστολή.

Είκοσι τέσσερις ώρες πριν από την έναρξη της δοκιμής, όλες οι είσοδοι/έξοδοι ήταν κλειστές και όλες οι αντλίες, καθώς και άλλες μηχανές, έκλεισαν για να εξασφαλίσουν ένα ήσυχο περιβάλλον τη στιγμή της δοκιμής.

Δεδομένου ότι, σύμφωνα με την διαθέσιμη βιβλιογραφία για το θέμα αυτό, η επίπτωση του θορύβου στις μετρήσεις ΑΕ είναι ελάχιστη σε χαμηλότερες συχνότητες, η περιοχή συχνοτήτων που επιλέχθηκε σε αυτή τη μελέτη ήταν μεταξύ 20 και 50kHz.

Η διάρκεια της συλλογής δεδομένων κάθε φορά ήταν περίπου 1 ώρα, έτσι ώστε, σε περίπτωση που υπήρχαν διάσπαρτοι ή/και ειδικοί θόρυβοι, να μπορούσαν να ανιχνευθούν.

Δεδομένου ότι τα σήματα θορύβου είναι συνήθως ασθενέστερα από τα σήματα ΑΕ, επιλέγοντας ένα κατάλληλο κατώφλι για την αναγνώριση σήματος, η επίδραση των θορύβων στα χαρακτηριστικά σήματος μειώθηκε δραστικά. [21]

6.5| Εφαρμογή της μεθόδου Ακουστικής Εκπομπής για ανίχνευση διαρροών σε μεταλλικές σωληνώσεις τοποθετημένες σε αμμώδες έδαφος

6.5.1|Περίληψη

Στην μελέτη που ακολουθεί χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος ακουστικής εκπομπής (ΑΕ) για την ανίχνευση διαρροών και τη διάκριση της θέσης τους υπό συνθήκες ροής σε ένα θαμμένο χαλυβδοσωλήνα μήκους 304,8m, διαμέτρου 305mm, στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο του New Jersey/U.S. του Οργανισμού Προστασίας Περιβάλλοντος (New Jersey Institute of Technology/U.S. Environmental Protection Agency – NJIT/USEPA), σε εγκατάσταση ελέγχου θαμμένων αγωγών στο Edison, New Jersey. Ανιχνεύθηκε επιτυχώς μία διαρροή 16,2mL/s και υποδείχθηκε η ευδιάκριτη θέση της σε απόσταση 0,3m, με απόσταση αισθητήρα 65,5m και με νερό στον αγωγό που ρέει στα 11,4L/s. Λήφθηκαν επίσης ενθαρρυντικά αποτελέσματα για μια διαρροή 1,3ml/s που ήταν διακριτή σε μια απόσταση αισθητήρα 21,3m κάτω από τις ίδιες συνθήκες ροής. Η προηγούμενη δοκιμή διαρροής στατικής πίεσης σε αυτόν τον αγωγό ανίχνευσε διαρροή 12,6mL/s σε απόσταση αισθητήρα μέχρι 192,9m και αναμένεται ότι η άμβλυνση των επιπτώσεων, τόσο του εξωτερικά παραγόμενου όσο και του προκαλούμενου από τη ροή, θορύβου υποβάθρου θα επιτρέψει την ανίχνευση μικρότερης διαρροής σε υψηλότερες συνθήκες ροής. Αυτά τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η αποτελεσματική ανίχνευση της διαρροής ΑΕ θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί υπό συνθήκες ροής σε γεμάτους με νερό μεταλλικούς αγωγούς θαμμένους σε αμμώδη εδάφη.

6.5.2|Εισαγωγή

Ιστορικά, η ανίχνευση και η θέση των διαρροών σε θαμμένους αγωγούς υπό συνθήκες ροής αποτέλεσε πρόκληση πρωταρχικής σημασίας για την κοινότητα των μεταφορέων επικίνδυνων υλικών. Ωστόσο, πιο πρόσφατα, οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας για το πόσιμο νερό και τα λύματα έδειξαν αυξημένο ενδιαφέρον για την παρακολούθηση των επιδόσεων των θαμμένων αγωγών τους σε πραγματικό χρόνο. Σκοπός αυτής της μελέτης ήταν η διερεύνηση της ανίχνευσης διαρροών υπό συνθήκες ροής με εφαρμογή τεχνικών ανίχνευσης διαρροών ακουστικής εκπομπής (ΑΕ) και εντοπισμού αυτών για τον προσδιορισμό της ικανότητας της τεχνολογίας να παρακολουθήσει αγωγούς υπό διάφορες συνθήκες ροής.

Έχει αποδειχθεί τα τελευταία χρόνια ότι οι μέθοδοι ανίχνευσης διαρροών ΑΕ είναι κατάλληλες για τον εντοπισμό διαρροών σε μεταλλικούς σωλήνες γεμισμένους με υγρό και ο εντοπισμός είναι συχνά πολύ πιο γρήγορος από άλλες συμβατικές μεθόδους, όπως αερίου ιχνηθέτη, υπέρυθρης θερμογραφίας, υπερηχητική και ηλεκτρομαγνητική σάρωση, μοντέλο ροής και πίεσης και ραντάρ που διεισδύει στο έδαφος. Ένα αξιόπιστο, πραγματικό χρόνο και ακριβές σύστημα παρακολούθησης και αναφοράς για τους θαμμένους αγωγούς και ένα συνοδευτικό ενεργητικό σχέδιο συντήρησης θα ωφελούσε τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας για πόσιμο νερό και λύματα, μειώνοντας το μακροπρόθεσμο κόστος συντήρησης. Επιπλέον, η συνεπακόλουθη μείωση των καταστροφικών αποτυχιών και των συναφών κινδύνων για την υγεία τους θα ωφελούσε το περιβάλλον και την κοινωνία στο σύνολό τους .

6.5.3|Μέθοδος ακουστικής εκπομπής για διαρροές

Οι θόρυβοι διαρροής είναι συγκεντρωμένοι σε χαμηλές συχνότητες όπου το ρευστο – διαδιδόμενα αξονο – συμμετρικά κύματα μεταφέρουν την ακουστική ενέργεια που παράγεται από διαρροές. Οι εκπεμπόμενοι ήχοι στη συνέχεια επεξεργάζονται με τη χρήση αλγορίθμων επεξεργασίας σήματος και λογισμικό ηλεκτρονικών υπολογιστών. Άλλες αξιοσημείωτες θεωρητικές συνεισφορές περιλαμβάνουν την ανάπτυξη ενός συστήματος εμπειρογνομόνων για την ανίχνευση διαρροών, την προσέγγιση των νευρωνικών δικτύων, όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη μελέτη παραπάνω, για την παρακολούθηση της ακουστικής διαρροής και την ανίχνευση διαρροών σε πετρελαϊκούς αγωγούς χρησιμοποιώντας ένα ασαφές σύστημα.

Στις εφαρμογές ανίχνευσης διαρροών, ο θόρυβος που παράγεται από τη διαφυγή ρευστού μέσω ενός μικρού ανοίγματος σε αγωγό ή δεξαμενή είναι η πηγή της ακουστικής ενέργειας. Ο εκπεμπόμενος ήχος κατά τη διάρκεια τέτοιων εκδηλώσεων εξαρτάται από τη φύση της πηγής και το μέγεθος της. Στην περίπτωση του θαμμένου σωλήνα, η αλληλεπίδραση του διαφυγόντος ρευστού με

το περιβάλλον αμμώδες έδαφος παράγει εντοπισμένες επιπτώσεις που μιμούνται σήματα ακουστικής έκρηξης και όχι τυπικό σήμα συνεχούς διαρροής. Ο προσανατολισμός της διαρροής σε σχέση με την διατομή του σωλήνα (προσανατολισμός διαρροής) και η αλληλεπίδραση του εδάφους με την ροή της διαρροής βρέθηκε να επηρεάζει το σήμα. Οι διαρροές προσανατολισμένες κάθετα προς τα επάνω ή προς τα κάτω δημιούργησαν τα ισχυρότερα σήματα ΑΕ λόγω της συνεχιζόμενης αλληλεπίδρασής τους με το έδαφος. Οι οριζόντιες διαρροές είχαν ως αποτέλεσμα τη διασπορά του εδάφους και την απώλεια εντοπισμένων επιπτώσεων μεταξύ των κόκκων και της εξωτερικής επιφάνειας του σωλήνα. Οι διαρροές μπορούν να εντοπιστούν είτε μέσω της επικάλυψης μιας αναμενόμενης προβληματικής περιοχής με δύο αισθητήρες και χρησιμοποιώντας μια ανάλυση χρόνου πτήσης² των δεδομένων που προκύπτουν είτε σχεδιάζοντας το εύρος του σήματος σε διακεκριμένες θέσεις κατά μήκος του αγωγού. Επιπλέον, αναπτύχθηκαν καινοτόμες αναλυτικές μέθοδοι για την αντιστάθμιση των επιπτώσεων του πολλαπλού τρόπου διασποράς του σήματος διαρροής σε σωλήνες με υγρό και επίσης επεκτάθηκαν σε πλάκες χρησιμοποιώντας δεδομένα που αποκτήθηκαν από τρεις αισθητήρες που χρησιμοποιούν τριγωνισμό. Το 2002 παρουσιάστηκε μια πειραματική έρευνα που εξέταζε τη σκοπιμότητα και το δυναμικό των ακουστικών μετρήσεων εντός σωλήνων για την ανίχνευση διαρροών, ενώ το 2005 χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες ακουστικών κραδασμών για την ανίχνευση διαρροών σε πλαστικούς σωλήνες νερού.

6.5.4| Προηγούμενες Μελέτες ΑΕ για ανίχνευση διαρροών σε μεταλλικές σωληνώσεις τοποθετημένες σε αμμώδες έδαφος

Η δοκιμή ανίχνευσης διαρροών ΑΕ και θέσης σε συνθήκες μηδενικής ροής πραγματοποιήθηκαν προηγουμένως στους υπόγειους αγωγούς στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας του New Jersey/U.S. και στη συνέχεια με την Carlyle Consulting. Τα κύρια ευρήματα αυτών των μελετών ήταν τα εξής:

- Κατά τη διάρκεια της αρχικής στατικής δοκιμής εντοπίστηκε η θέση μιας διαρροής 18,3mL/s σε μέγιστη απόσταση αισθητήρα μέχρι 61m στον ίδιο αγωγό διαμέτρου 305mm και ανιχνεύθηκε διαρροή 0,015mL/s σε απόσταση 7,62m με την απόσταση ενίσχυση της έγχυσης αδρανούς αερίου στη σωλήνωση για την ενίσχυση του σήματος.
- Κατά τη διάρκεια μεταγενέστερων στατικών δοκιμών στον ίδιο αγωγό με μειωμένα επίπεδα θορύβου στο έδαφος, ανιχνεύθηκαν διαρροές 12,6mL/s σε μέγιστη απόσταση αισθητήρων 193m και ανιχνεύθηκε διαρροή 0,789mL/s σε απόσταση μεταξύ 15,24m.

² Ο χρόνος πτήσης Time of Flight – TOF είναι ιδιότητα αντικειμένου, σωματιδίου ή ακουστικού, ηλεκτρομαγνητικού ή άλλου κύματος. Είναι η στιγμή που ένα τέτοιο αντικείμενο πρέπει να ταξιδέψει σε μια απόσταση μέσω ενός μέσου.

- Για τους δοκιμασμένους ρυθμούς διαρροών, τα σήματα ΑΕ δεν ήταν ανιχνεύσιμα χωρίς κάλυμμα εδάφους για οποιονδήποτε προσανατολισμό διαρροής. Το τοπικό έδαφος στη θέση δοκιμής αποτελούνταν κυρίως από άμμο.
- Οι γωνίες και τα άκρα του αγωγού βρέθηκαν να προκαλούν παρεμβολή κύματος και συνεπώς να παρεμβαίνουν στην ανίχνευση διαρροών. Για να ξεπεραστεί αυτό, οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν πάνω στα εξαρτήματα και στη συνέχεια ελέγχθηκαν σε ευθείες διαδρομές μεταξύ τους.
- Αν και οι επιστρώσεις σε σωλήνες είναι πρωταρχικής σημασίας για τη μη καταστροφική δοκιμή, η λιθανθρακόπισσα, μία από τις πιο χαρακτηριστικές επιστρώσεις, δεν έδειξε καμία παρέμβαση στο επεξεργασμένο σήμα σε αυτή την κατάσταση.

6.5.5 | Στόχοι και Μεθοδολογία

Σκοπός αυτής της έρευνας ήταν να μελετηθούν οι επιπτώσεις του θορύβου που παράγεται από το νερό που ρέει στον αγωγό, δηλαδή προσομοιωμένες συνθήκες λειτουργίας, στην ανίχνευση διαρροής ΑΕ σε μια θαμμένη μεταλλική σωλήνωση. Ο έλεγχος διεξήχθη σε έναν αγωγό συγκολλημένου χάλυβα μήκους 304,8m, διαμέτρου 305mm, Τύπου Schedule 40,, που αναφέρεται εδώ ως αγωγός δοκιμής. Αν και η αρχική πρόθεση του αγωγού δοκιμής ήταν να αντιπροσωπεύει μια υπόγεια γραμμή καυσίμου που μπορεί να βρεθεί σε στρατιωτικά και πολιτικά αεροδρόμια, το μέγεθός του και το υλικό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο μεταλλικών αγωγών που μεταφέρουν πόσιμο νερό ή απόβλητα στις Ηνωμένες Πολιτείες. Δεδομένου ότι ο όλκιμος σίδηρος, που είναι το συνηθισμένο υλικό για συστήματα πόσιμου νερού στις Ηνωμένες Πολιτείες, έχει φυσικές και ακουστικές ιδιότητες που σχετίζονται με τις δοκιμές διαρροής ΑΕ οι οποίες είναι παρόμοιες με αυτές του χάλυβα, τα ευρήματα αυτής της μελέτης είναι χρήσιμα για την ανίχνευση διαρροών και την έρευνα θέσης σε θαμμένους μεταλλικούς αγωγούς που μεταφέρουν καύσιμα, πόσιμο νερό ή λύματα. Επίσης, παρόλο που ο αγωγός αυτός αναφέρεται ως συγκολλημένου χάλυβα, περιέχει επίσης τέσσερα τεμάχια καρουλιών με οκτώ βιδωτές αρθρώσεις. Η βαθμονόμηση, η δοκιμή, η ανάκτηση δεδομένων και η ανάλυση πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται στις επόμενες ενότητες για την ανίχνευση και τον εντοπισμό διαρροών σε γεμάτους με υγρό, αγωγούς. Οι διαρροές προκλήθηκαν σε μια γνωστή θέση εισάγοντας μια σειρά στατικά βαθμονομημένων βυσμάτων διαρροής σε μια οπή με σπείρωμα μέσω του τοιχώματος της δοκιμαστικής σωλήνωσης. Ο στατικός βαθμονομημένος ρυθμός διαρροής χρησιμοποιήθηκε μόνο ως οδηγός για την επιλογή βύσματος διαρροής για κάθε δοκιμή. Χρησιμοποιήθηκε ένας διαβαθμισμένος κύλινδρος και χρονόμετρο για τη μέτρηση του ρυθμού διαρροής που έχει εγκατασταθεί για κάθε συγκεκριμένο σύνολο συνθηκών δοκιμής.

6.5.6| Πρωτόκολλα δοκιμής και ορολογία

Τα πρωτόκολλα δοκιμής και μέτρησης αυτής της μελέτης προσδιορίζονται ως εξής:

1. Δοκιμές διαρροής ακουστικής εκπομπής
2. Μέτρηση της ταχύτητας διαρροής με το χέρι και
3. Μέτρηση των συνθηκών ύδατος

Η μεθοδολογία ΑΕ έχει τη δική της ορολογία, η οποία θα χρησιμοποιηθεί σε αυτό το εγχειρίδιο [ASTM E1316 – 11b (ASTM 2012b)]. Ένα χτύπημα ΑΕ δείχνει ότι ένας δεδομένος αισθητήρας ΑΕ έχει ανιχνευτεί και ότι το λογισμικό καναλιών που τον συνοδεύει, έχει επεξεργαστεί, ένα μεταβατικό σήμα ΑΕ. Ένα χτύπημα είναι οποιοδήποτε σήμα ΑΕ που υπερβαίνει τη ρύθμιση κατωφλίου και προκαλεί τη συσσώρευση δεδομένων στο κανάλι του συστήματος. Ένα συμβάν ΑΕ είναι μια ομάδα χτυπημάτων που ανιχνεύθηκε σε ένα ή περισσότερα κανάλια και παρουσιάστηκε μαθηματικά με βάση την ταχύτητα του ήχου στα μέσα που περιέχονται στον σωλήνα και τη διαφορά των χρόνων άφιξης μεταξύ των αισθητήρων ΑΕ, το οποίο έχει ξεκινήσει από μια μόνο πηγή, στην περίπτωση αυτή από την υπολογισμένη διαρροή.

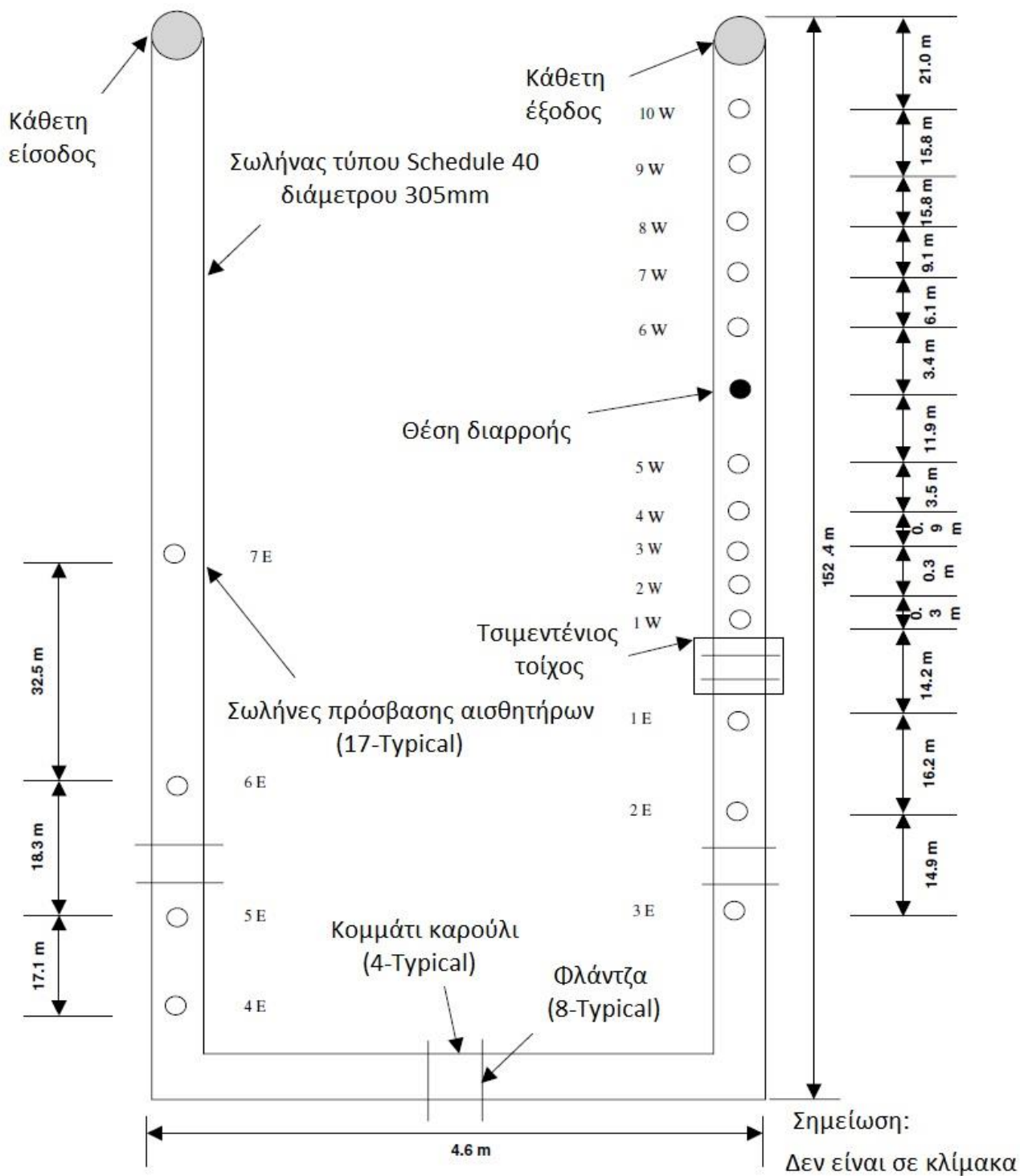
Χρησιμοποιήθηκε η ταχύτητα του ήχου στο νερό 1.480 m/s, ως ταχύτητα αναφοράς επειδή σε μεγαλύτερους αγωγούς, τα τρισδιάστατα αποτελέσματα διασπούν το σήμα στο τοίχωμα του σωλήνα. Επίσης, οι σωλήνες αλουμινίου δεν χρησιμοποιούνται ως κυματοδηγοί, καθώς κρατούν τους αισθητήρες σε επαφή με τον χαλύβδινο αγωγό. Πρέπει να συμβεί ένα περιστατικό για τον υπολογισμό της θέσης της πηγής με ανάλυση χρόνου πτήσης ή μέσω γραμμικής θέσης (Physical Acoustics Corporation 2001). Άλλες χρήσιμες αναφορές περιλαμβάνουν την έκδοση 346 (API) του Αμερικανικού Ινστιτούτου Πετρελαίου (American Petroleum Institute – API 1998), το οποίο ασχολείται με τα αποτελέσματα δοκιμών ανίχνευσης διαρροών και τεχνολογιών εντοπισμού διαρροών για υπόγειους αγωγούς. Επιπλέον, το ASTM E1211/E1211M – 12 (ASTM 2012a) περιγράφει μια παθητική μέθοδο για την ανίχνευση και τον εντοπισμό της σταθερής κατάστασης πηγής αερίου και υγρού που διαρρέουν από ένα σύστημα υπό πίεση. Η μέθοδος χρησιμοποιεί αισθητήρες ακουστικής εκπομπής ή άλλους, τοποθετημένους στην επιφάνεια, οι οποίοι είναι προσαρτημένοι στο σύστημα μέσω ακουστικών κυματοδηγών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συνεχή παρακολούθηση κατά τη λειτουργία και την διάρκεια υδραυλικών δοκιμών των σωληνώσεων και των συστημάτων δοχείων πίεσης. Μπορούν να επιτευχθεί υψηλή ευαισθησία, αν και οι τιμές που λαμβάνονται εξαρτώνται από την απόσταση των αισθητήρων, το επίπεδο θορύβου υποβάθρου, την πίεση του συστήματος και τον τύπο διαρροής. Επίσης, η έκθεση της Αμερικανικής Ένωσης Υδατικών Έργων No. 90770 (American Water Works Association) αναφέρεται στην ανίχνευση διαρροών σε πλαστικούς σωλήνες διανομής νερού.

6.5.7| ΑΕ Δοκιμές διαρροής

Σε κάθε δοκιμή χρησιμοποιήθηκε ένα ζεύγος πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων μέγιστης ευαισθησίας 15kHz για την απόκτηση του σήματος ΑΕ. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με τα εμπορικά διαθέσιμα όργανα και αισθητήρες. Συγκεκριμένα, τα όργανα αποτελούνται από ένα σύστημα δύο καναλιών PAC MISTRAS ενώ οι αισθητήρες ήταν μεταγωγείς συντονισμού PAC Model PLS – 1 (15 kHz). Οι ακουστικοί αισθητήρες τοποθετήθηκαν κατά μήκος της δοκιμαστικής σωληνώσεως έτσι ώστε να διασχίζουν τη γνωστή θέση διαρροής. Η πρόσβαση στον θαμμένο αγωγό επιτεύχθηκε μέσω σωλήνων κατακόρυφης πρόσβασης τοποθετημένων σε διακριτές θέσεις κατά μήκος του αγωγού. Το Σχήμα 37 απεικονίζει τη διάταξη δοκιμής πεδίου. Οι 17 σωλήνες κάθετης πρόσβασης σωλήνων PVC αναγνωρίζονται με αριθμητική σειρά ξεκινώντας από το δυτικό τοίχωμα του μεγάλου ανοιχτού δοκιμαστικού κοιλώματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 37.

Τα σημεία πρόσβασης επισημαίνονται σε σχέση με τον τοίχο προς την ανατολική και τη δυτική κατεύθυνση, 1E, 2E, ... και 1W, 2W, Οι σωλήνες πρόσβασης 10W και 7E, οι οποίοι είναι οι πιο απομακρυσμένοι, παρέχουν μέγιστη απόσταση διαχωρισμού των αισθητήρων 204,2m. Οι ακουστικοί αισθητήρες διαμέτρου 28,7mm τοποθετήθηκαν στον πυθμένα των σωλήνων αλουμινίου διαμέτρου 38,2mm, μήκους 1,82m. Αφού καθαρίστηκαν οι επιφάνειες, εφαρμόστηκε λιπαντικό κενού ως παράγοντας σύζευξης και κατέβηκαν οι αισθητήρες στους σωλήνες πρόσβασης PVC μέχρις ότου γίνει επαφή με την κορυφή του θωρακισμένου αγωγού χάλυβα 305mm. Το βάρος 30.0N του συγκροτήματος σωλήνα παρείχε τη δύναμη επαφής.

Κατά τη διάρκεια της ανίχνευσης διαρροών σε συνθήκες μη ροής, βγήκε το συμπέρασμα ότι η μέγιστη απόσταση διαχωρισμού για εντοπισμό διαρροής 12,6mL/s ήταν μεταξύ 174,7 και 193m. Από την άποψη αυτή, η κατανομή των σωλήνων πρόσβασης παρείχε επαρκές εύρος αποστάσεως διαχωρισμού αισθητήρων για την τρέχουσα δοκιμή. Κατά τη διάρκεια αυτής της σειράς δοκιμών, η απόσταση διαχωρισμού αισθητήρα ΑΕ μεταβαλλόταν με κάθε δοκιμή μέχρις ότου ένα συγκεκριμένο σήμα διαρροής δεν ήταν πλέον σε θέση να παράγει μια ευδιάκριτη θέση. Αυτό θα μπορούσε να παρατηρηθεί σε μια γραφική παράσταση γεγονότων έναντι θέσης. Αναγνωρίστηκε μία επιτυχημένη δοκιμή διαρροής όταν παρήγαγε μια καταφανή κάθετη ακίδα, δηλαδή ενδεικτική της θέσης διαρροής όπως προσδιορίζεται από τη δραστικότητα ΑΕ που ανιχνεύεται από τους αισθητήρες, σε μια γραφική παράσταση γεγονότων έναντι θέσης για ένα συγκεκριμένο διαχωρισμό αισθητήρων.



Σχήμα 37. Σχηματική απεικόνιση αγωγού

Αυτές οι απεικονίσεις παράχθηκαν χρησιμοποιώντας δεδομένα που αποκτήθηκαν μέσω του συστήματος λήψης δεδομένων PAC DISP – 24 και αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό AEWin. Ένα διακριτό σήμα διαρροής ορίζεται ότι έχει υπερβεί το ελάχιστο πλάτος κατωφλίου ανίχνευσης 25dB πάνω από το επίπεδο θορύβου του υπογείου, με το όργανο να βαθμονομείται σε κορυφή 90dB (Physical Acoustics Corporation 2001).

6.5.8| Μέτρηση ταχύτητας διαρροής

Τα επόμενα βήματα ακολουθήθηκαν για να μετρηθεί ο ρυθμός διαρροής. Εκτέθηκε η τοπική περιοχή του θαμμένου δοκιμαστικού αγωγού στη θέση της υπάρχουσας ταπωμένης οπής. Η ταπωμένη οπή με βύσμα διαρροής βρίσκεται περίπου 17,7m δυτικά από το τοίχωμα δοκιμαστικού σκυροδέματος και στην κορυφή, δηλαδή σχηματικά 12 η ώρα, ως θέση στον αγωγό. Τοποθετήθηκε ένα βύσμα διαρροής στη σωλήνωση δοκιμής και συνδέθηκε ένας πλαστικός σωλήνας για να μετρηθεί η παροχή. Οι διάμετροι των οπών διαρροής στις βαλβίδες διαρροής ήταν 0,25mm για το βύσμα L2 και 1,00mm για το βύσμα L1. Οι οπές διαρροής και στα δύο βύσματα είχαν μήκος 0,38mm. Παρέχεται πίεση στην σωλήνωση (είτε στατικά είτε δυναμικά) και μετριέται ο ρυθμός διαρροής με πλαστικό σωλήνα χρησιμοποιώντας έναν βαθμονομημένο κύλινδρο και χρονόμετρο. Αφαιρούνται οι πλαστικές σωληνώσεις και γίνεται αποκατάσταση της περιοχής με χώμα εμπλουτισμού. Απαιτείται χειροκίνητη μέτρηση του ρυθμού διαρροής, μετά την αλλαγή του βύσματος διαρροής ή των υδάτινων συνθηκών, συμπεριλαμβανομένης της πίεσης και της παροχής.

6.5.9| Μέτρηση των συνθηκών ύδατος

Χρησιμοποιήθηκε αναλογικός μετρητή πίεσης για τη μέτρηση της πίεσης του αγωγού και μετρητής νερού και χρονόμετρο για τον προσδιορισμό του ρυθμού ροής στο σύστημα. Επιπλέον, τα κανάλια παραμετρικών δεδομένων του συστήματος DiSP – 24 κατέγραψαν μετρήσεις θερμοκρασίας και πίεσης νερού. Τα θερμίστορ και οι αισθητήρες πίεσης τοποθετήθηκαν σε υπάρχουσες ταπωμένες οπές που παρέχονται σε περιοχές κοιλοτήτων οργάνων σωληνώσεων που βρίσκονται ακριβώς δίπλα στους κάθετους αγωγούς εισόδου και εξόδου όπως φαίνεται στο Σχήμα 37. Η δεξαμενή υπερχειλίσας και η αντλία κυκλοφορίας βρίσκονταν επίσης σε αυτή τη γενική περιοχή.

Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε ρυθμούς ροής κυμαινόμενο από 0 έως 11,4L/s, με πιέσεις γραμμής που κυμαίνονται από 269 έως 538kPa. Οι θερμοκρασίες νερού κυμαίνονταν από 18,9 έως 20,0° C. Οι επιβαλλόμενοι ρυθμοί διαρροής κυμαίνονταν από 1,3 έως 20,8mL/s, οι οποίοι είναι ενδεικτικοί των ποσοστών διαρροών που συνήθως παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τις επικίνδυνες ουσίες, το πόσιμο νερό και τα απόβλητα.

6.5.10| Εξοπλισμός ΑΕ

- Αισθητήρες ΑΕ

Ένα σημαντικό στοιχείο στη δοκιμή ΑΕ είναι η επιλογή ενός αισθητήρα ΑΕ (μορφοτροπέας). Οι αισθητήρες ακούν δομές και υλικά για την ανίχνευση της δραστηριότητας ΑΕ. Τα δοχεία πίεσης, οι δεξαμενές αποθήκευσης, οι εναλλάκτες θερμότητας, οι σωληνώσεις, οι αντιδραστήρες, οι εναέριες

συσκευές ανύψωσης και οι πυρηνικοί σταθμοί είναι από τους πιο συνηθισμένους τύπους δομών που παρακολουθούνται.

- Απόκτηση και επεξεργασία δεδομένων

Ο επεξεργαστής ψηφιακού σήματος (Digital Signal Processor – DiSP) για λειτουργίες ΑΕ και σταθμό εργασίας κυματομορφών παρέχει τέσσερα κανάλια για ψηφιακά σήματα ΑΕ, οκτώ κανάλια για παραμετρικά δεδομένα και έως 56 κανάλια χαρακτηριστικών και κυματομορφών. Κατά τη διάρκεια αυτών των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δύο ψηφιακά κανάλια ΑΕ και δύο παραμετρικά κανάλια. Αυτό το όργανο εντοπίζει διαρροές χρησιμοποιώντας ανίχνευση σύμπτωσης. Καθορίζει τον ακριβή χρόνο (με ακρίβεια 0,25μs) όταν ένα σήμα διαρροής διασχίζει ένα συγκεκριμένο κατώφλι τάσης στον αισθητήρα 1 και στον αισθητήρα 2. Το PAC έχει κάνει μία λειτουργική τροποποίηση για χρήση στην ανίχνευση διαρροών, την οποία ονομάζουν γραμμική θέση συντονισμού. Ο συντονισμός μειώνει αυτόματα την ευαισθησία αυξάνοντας το κατώφλι ενεργοποίησης τάσης του αισθητήρα που βρίσκεται πλησιέστερα στη διαρροή, δηλαδή ένα κατώφλι πλεύσης. Η ανίχνευση σύμπτωσης είναι πολύ ισχυρή στο πεδίο, επειδή είναι σχετικά μη ευαίσθητη στη διασπορά (όπου το σήμα αυξάνει τη διάρκεια και μειώνει το πλάτος με τρόπο που εξαρτάται από τη συχνότητα καθώς διαδίδεται). Θεωρητικά, η ανίχνευση σύμπτωσης λειτουργεί καλύτερα με παλμούς και δεν λειτουργεί καλά όταν το σήμα διαρροής είναι συνεχές και δεν έχει διακριτά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, η τυχαία επίδραση των κόκκων άμμου με την επιφάνεια του σωλήνα στη θέση διαρροής παράγει ένα ψευδο – παλλόμενο σήμα, το οποίο επέτρεψε την επιτυχή δοκιμή.

6.5.11| Αποτελέσματα δοκιμών

Ο Πίνακας 12 παρέχει μια λίστα με όλες τις δοκιμές διαρροών που πραγματοποιήθηκαν, εξαιρουμένων των διαγνωστικών δοκιμών και εκείνων με ανωμαλίες στον εξοπλισμό. Οι δοκιμές στατικής πίεσης, δηλαδή οι δοκιμές μηδενικής ροής, σχεδιάστηκαν για να επιτύχουν αποτελέσματα που ήταν παρόμοια με αυτά που παρήχθησαν κατά το προηγούμενο πρόγραμμα δοκιμής NJIT. Ήταν επιτυχείς δύο από τις τρεις στατικές δοκιμές. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών EPAFLOW8 και EPAFLOW10, το βύσμα διαρροής L1 προκάλεσε διαρροές περίπου 20,8 και 20,9mL/s αντίστοιχα. Αυτές οι διαρροές ανιχνεύθηκαν με μια ευδιάκριτη θέση με απόσταση διαχωρισμού αισθητήρα 46,3m.

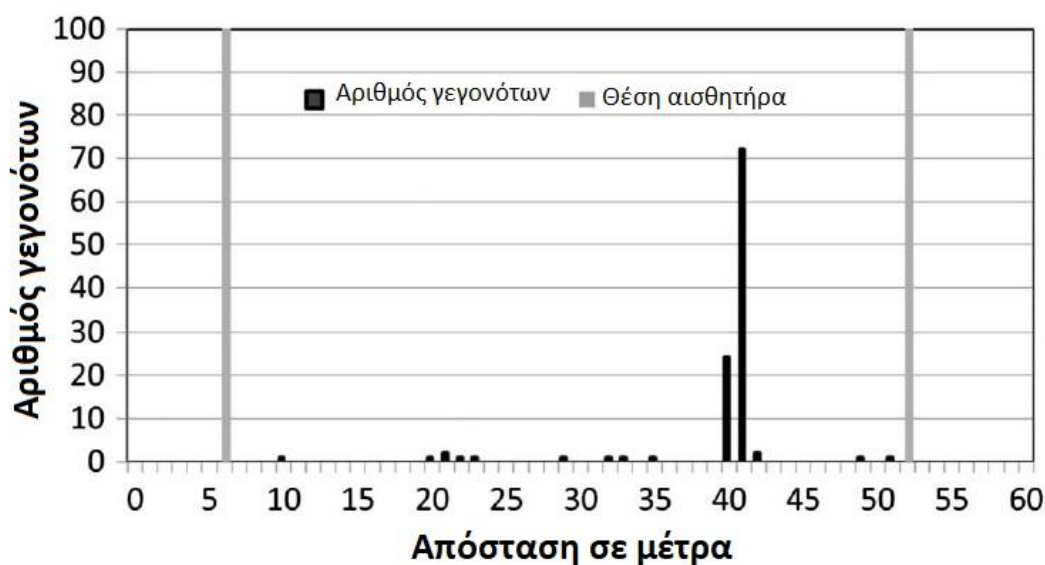
Αρχείο δεδομένων	Ρυθμός διαρροής (mL/s)	Αναγνωριστικό βύσματος	Θέση Καναλιού 1	Θέση Καναλιού 2	Απόσταση αισθητήρων (m)	Τοποθεσία της υπαγορευμένης διαρροής έναντι αισθητήρα 1 (m)	Εντοπισμένη τοποθεσία διαρροής έναντι αισθητήρα 1 (m)	Ρυθμός ροής (L/s)	Πίεση νερού (kPa)	Παρατηρήσεις
EPAFLOW8	20.8	L1	9W	5W	46.3	34.4	34.7	0.0	538	Επιτυχής (Στατικός έλεγχος)
EPAFLOW9	20.8	L1	9W	5W	46.3	34.4	—	0.0	538	Ανεπιτυχής (Στατικός έλεγχος)
EPAFLOW10	20.9	L1	9W	5W	46.3	34.4	34.1	0.0	538	Επιτυχής (Στατικός έλεγχος)
EPAFLOW13	16.2	L1	9W	5W	46.3	34.4	33.6	11.4	276	Επιτυχής
EPAFLOW15	16.2	L1	9W	1E	65.5	34.4	—	11.4	269	Ανεπιτυχής
EPAFLOW16	16.2	L1	9W	1E	65.5	34.4	34.1	11.4	269	Επιτυχής
EPAFLOW24	15.2	L1	9W	1E	65.5	34.4	n/a	11.4	269	Ανεπιτυχής
EPAFLOW30	15.2	L1	9W	1E	65.5	34.4	34.3	11.4	269	Επιτυχής
EPAFLOW31	16.6	L1	9W	1E	65.5	34.4	33.9	11.4	269	Επιτυχής
EPAFLOW32	16.6	L1	9W	1E	65.5	34.4	33.9	11.4	269	Επιτυχής
EPAFLOW17	16.2	L1	9W	2E	78	34.4	—	11.4	269	Ανεπιτυχής
EPAFLOW18	16.2	L1	9W	2E	78	34.4	—	11.4	269	Ανεπιτυχής
EPAFLOW22	13.7	L1	9W	2E	78	34.4	—	10.1	414	Ανεπιτυχής
EPAFLOW37	1.3	L2	7W	5W	21.3	9.4	—	11.4	269	Ανεπιτυχής
EPAFLOW38	1.3	L2	7W	5W	21.3	9.4	10.3	11.4	269	Επιτυχής (Οριακά)
EPAFLOW40	1.3	L2	7W	5W	21.3	9.4	8.5	11.4	269	Επιτυχής (Οριακά)
EPAFLOW39	1.3	L2	8W	5W	100	61	—	11.4	269	Ανεπιτυχής
EPAFLOW35	1.3	L2	9W	5W	46.3	34.4	—	11.4	269	Ανεπιτυχής
EPAFLOW36	1.3	L2	9W	5W	46.3	34.4	—	11.4	269	Ανεπιτυχής
EPAFLOW33	1.3	L2	9W	1E	65.5	34.4	—	11.4	269	Ανεπιτυχής
EPAFLOW34	1.3	L2	9W	1E	65.5	34.4	—	11.4	269	Ανεπιτυχής
Postprocessed—EPAFLOW38	1.3	L2	7W	5W	21.3	9.4	9.38	11.4	269	Επιτυχής (Οριακά)

όπου L1: Διάμετρος οπής διαρροής = 1.00mm και L2: Διάμετρος οπής διαρροής = 0.25 mm

Πίνακας 12. Σύνοψη των βασικών αποτελεσμάτων

Ο πρωταρχικός στόχος αυτής της μελέτης ήταν να δοκιμαστεί ο ίδιος αγωγός υπό συνθήκες ροής που δοκιμάστηκε υπό στατική πίεση κατά τη διάρκεια των δύο προηγούμενων δοκιμαστικών προγραμμάτων. Από την άποψη αυτή, το ίδιο βύσμα διαρροής L1 παρήγαγε ρυθμό διαρροής 16,2mL/s υπό συνθήκες ροής 11,4L/s, η οποία ανιχνεύθηκε επιτυχώς με μια διακριτή θέση με το ίδιο αισθητήρα σε απόσταση 46,3m στον έλεγχο EPAFLOW13. Αυτός ο ρυθμός διαρροής επίσης ανιχνεύθηκε επιτυχώς με μια ευδιάκριτη θέση κατά τη διάρκεια των τεσσάρων εκ των έξι δοκιμών με την απόσταση των αισθητήρων να αυξάνεται στα 65,5m στις δοκιμές EPAFLOW15 έως EPAFLOW32. Δεν ανιχνεύθηκε η ίδια διαρροή κατά τη διάρκεια δύο δοκιμών με απόσταση αισθητήρων 78m. Η 65,5m απόσταση αισθητήρων είναι σημαντικά μικρότερη από τη μέγιστη απόσταση των 193m που επιτεύχθηκε κατά τη διάρκεια των προηγούμενων στατικών δοκιμών στις οποίες εντοπίστηκαν διαρροές έως και 13,0mL/s.

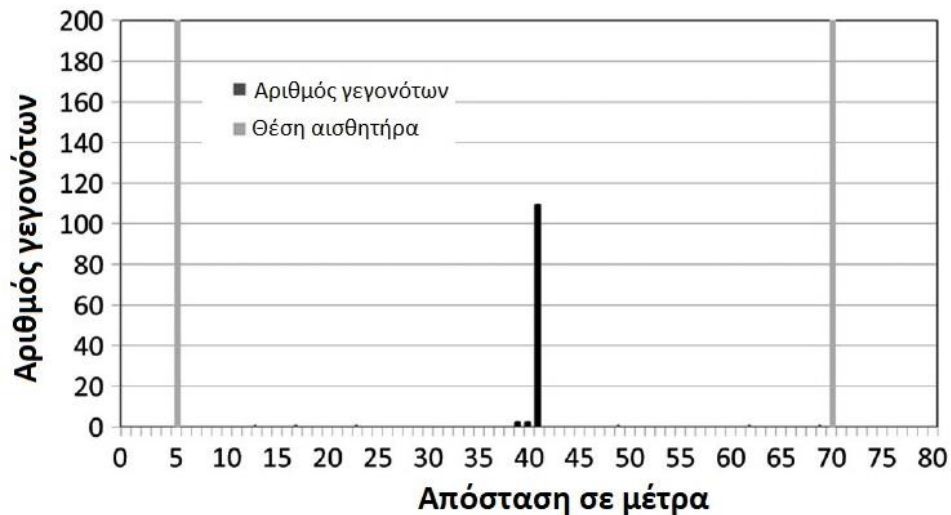
Χρησιμοποιώντας το βύσμα διαρροής L2 προκαλείται μια ταχύτητα διαρροής 1,34mL/s, η οποία ανιχνεύθηκε με επιτυχία, αλλά η θέση ήταν διακριτή μόνο κατά τη διάρκεια δύο εκ των τριών δοκιμών με μέγιστη απόσταση αισθητήρα 21,3m. Αυτή η διαρροή δεν εντοπίστηκε με επιτυχία κατά τη διάρκεια δοκιμών με απόσταση αισθητήρα 30,5m, 46,3m και 65,5m. Κατά τη διάρκεια αυτών των δοκιμών το νερό στη σωλήνωση έρρεε επίσης σε ρυθμό 11,4L/s. Η 21,3m απόσταση αισθητήρων είναι συγκρίσιμη με εκείνη που επιτεύχθηκε κατά τις προηγούμενες στατικές δοκιμές, όπου ανιχνεύθηκε ένας ρυθμός διαρροής 0,8mL/s με μέγιστη απόσταση αισθητήρα 15,2m.



Διάγραμμα 14. Αποτελέσματα της στατικής δοκιμής

Στο παραπάνω Διάγραμμα 14 έχουμε τα αποτελέσματα της στατικής δοκιμής όπου ο ρυθμός ροής=0ml/s, η πίεση=538kPa, ο ρυθμός διαρροής= 20,8ml/ s, η απόσταση αισθητήρα=46,3m και η επιβολή διαρροής=34,4m από τον αισθητήρα 1

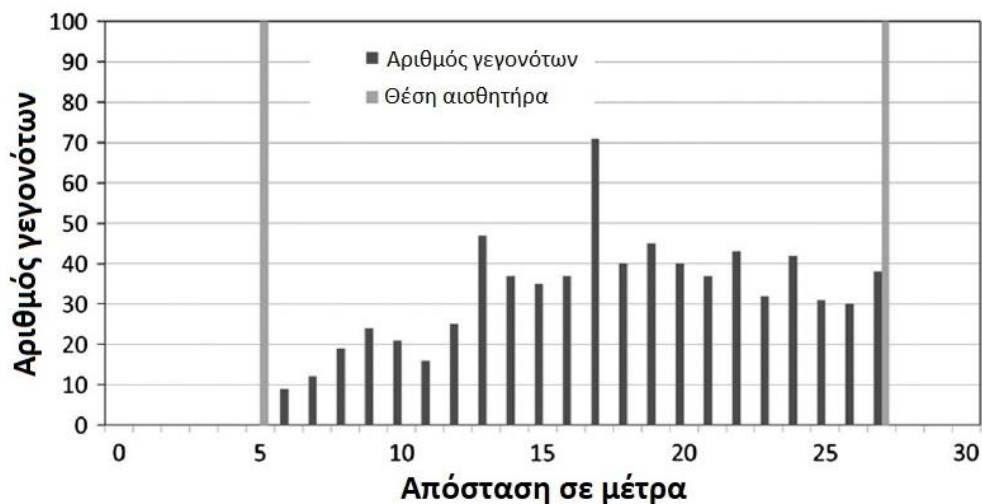
Η επιτυχής ανίχνευση διαρροών απεικονίζεται παρατηρώντας μια διακριτή κατακόρυφη ακίδα στην γραφική παράσταση γεγονότων έναντι θέσης για την συγκεκριμένη απόσταση αισθητήρων. Τα αποτελέσματα για τη στατική δοκιμή, δηλαδή EPAFLOW8, φαίνονται στο Διάγραμμα 12. Οι γκρι ράβδοι στο διάγραμμα εντοπίζουν τις θέσεις των αισθητήρων και οριοθετούν τον διαχωρισμό μεταξύ των αισθητήρων καναλιού 1 και καναλιού 2 ως 46,3m. Η κατακόρυφη ακίδα δείχνει ότι η διαρροή 20,8mL/s βρίσκεται περίπου 34,4m από τον αισθητήρα στο κανάλι 1, το οποίο είναι σφάλμα +0,3m από την πραγματική θέση της επιβληθείσας διαρροής στα 34,4m από τον αισθητήρα 1. Τα αποτελέσματα για η δειγματοληπτική δοκιμή διαρροής 16,4mL/s, δηλαδή η EPAFLOW16, παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 15. Ο διαχωρισμός μεταξύ των αισθητήρων καναλιού 1 και καναλιού 2 είναι 46,3m και η κατακόρυφη ακίδα δείχνει ότι βρίσκεται η διαρροή 16,4mL/s περίπου σε 34,4μ. από τον αισθητήρα στο κανάλι 1, το οποίο είναι σφάλμα -0,3m. Η συνολική ακρίβεια των υπολογιζόμενων θέσεων των ανιχνευόμενων διαρροών με διακριτές αιχμές για τις δοκιμές βύθισης L1 κυμάνθηκε από -0,5m έως +0,8m ή περίπου συν ή μείον 2%.



Διάγραμμα 15. Αποτελέσματα της δυναμικής δοκιμής

Στο παραπάνω Διάγραμμα 15 έχουμε τα αποτελέσματα της δυναμικής δοκιμής όπου η παροχή είναι=1,4l/s, η πίεση=269kPa, η ταχύτητα διαρροής=16,2ml/s, η απόσταση μεταξύ των αισθητήρων=65,5m και η επιβολή διαρροής=34,4m από τον αισθητήρα 1.

Τα αποτελέσματα για τη δυναμική δοκιμή διαρροής των 1,3mL/s, δηλαδή EPA – FLOW38, φαίνονται στο Διάγραμμα 16. Ο διαχωρισμός μεταξύ των αισθητήρων καναλιού 1 και 2 είναι 21,3m. Αυτή η γραφική παράσταση δείχνει ότι η θέση με τον μέγιστο αριθμό χτυπημάτων δείχνει ανιχνευμένη διαρροή που αντιστοιχεί σε μια διακριτή θέση της διαρροής 1,3mL/s στα 10,3m από τον αισθητήρα καναλιού 1, το οποίο είναι σφάλμα +0,9m. Παρόλο που πραγματοποιήθηκε επιτυχής ανίχνευση, η δοκιμή αυτή δεν είχε σαφώς καθορισμένη ακίδα και επισημάνθηκε ως πέρασμα (όριο). Η ακρίβεια των εντοπισμένων θέσεων διαρροών για τις δοκιμές βύθισης L2 κυμάνθηκε από -0,9m έως +0,9m ή περίπου συν ή μείον 10% συνολικά. Αυτά τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά και πρότειναν ότι η μεταγενέστερη ανάλυση των δεδομένων των δοκιμών θα μπορούσε να δώσει ένα πιο οριστικό αποτέλεσμα.

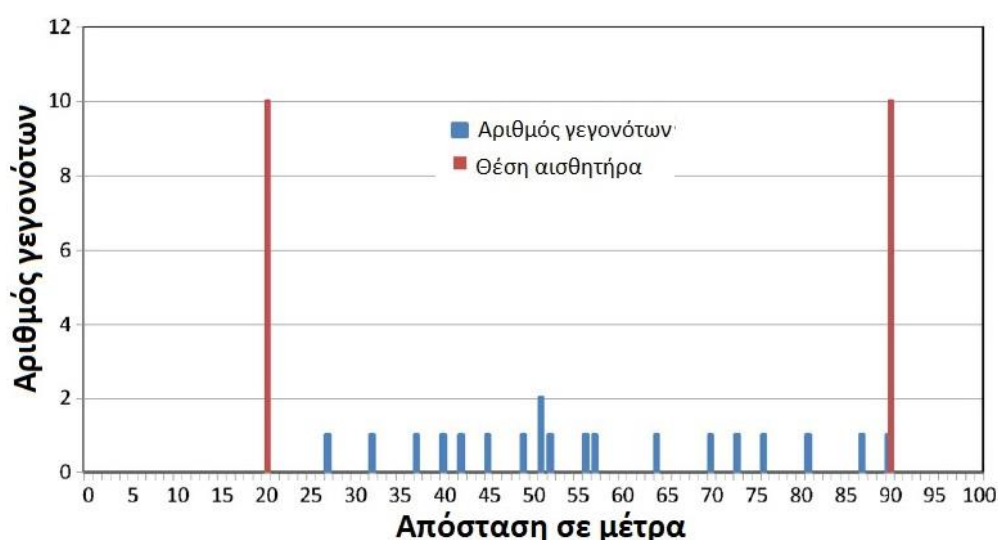


Διάγραμμα 16. Αποτελέσματα της δυναμικής δοκιμής

Στο παραπάνω Διάγραμμα 16 έχουμε τα αποτελέσματα της δυναμικής δοκιμής όπου ο ρυθμός ροής=11,4l/s, η πίεση=269kPa, ο ρυθμός διαρροής=1,34ml/s, ο χώρος του αισθητήρα=21,3 m και επιβλήθηκε διαρροή=9,4m από τον αισθητήρα 1.

6.5.12|Μεταγενέστερη επεξεργασία δεδομένων μικρής διαρροής

Το σύστημα AEWin PCI – 2 χρησιμοποιήθηκε για την περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων δοκιμής. Αυτό το σύστημα είναι μια μικρότερη έκδοση του DiSP – 24, η οποία έρχεται με μια ελάχιστη δυνατότητα δύο καναλιών. Το AEWin PCI – 2 διαθέτει επίσης μια μεγάλη ποικιλία μετα – επεξεργαστών που έχουν πρόσβαση στα προ – εγγεγραμμένα δεδομένα και επεξεργάζονται μέσω δυνατότητας επανάληψης. Η ικανότητα φιλτραρίσματος του συστήματος AEWin PCI – 2 χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση των αποτελεσμάτων της δοκιμής μικρής διαρροής. Χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα για την επανάληψη των δεδομένων δοκιμής, έτσι ώστε μόνο οι επισκέψεις των οποίων τα πλάτη κυμαίνονταν από 25dB έως 100dB και των οποίων η χρονική διάρκεια κυμαίνονταν από 30 έως 60μs διατηρήθηκαν για την ανάλυση θέσης.



Διάγραμμα 17. Φιλτραρισμένα δεδομένα για δυναμική δοκιμή EPAFLW38

Στο Διάγραμμα 17 έχουμε τα φιλτραρισμένα δεδομένα για δυναμική δοκιμή EPAFLW38 όπου ο ρυθμός ροής=11,4l/s, η πίεση=269kPa, η ταχύτητα διαρροής=1,34ml/s, η απόσταση αισθητήρα=21,3m και η επιβολή διαρροής=9,4m από τον αισθητήρα 1.

Όπως προαναφέρθηκε το Διάγραμμα 17 απεικονίζει τα προκύπτοντα γεγονότα τα οποία παρήχθησαν με την ανάλυση θέσης των δεδομένων φιλτραρισμένων αποτελεσμάτων από την δοκιμή EPAFLOW38. Η υποδεικνυόμενη θέση της μοναδικής κάθετης ακίδας που φαίνεται στο Διάγραμμα 17 αντιστοιχεί σε μια διακριτή θέση της διαρροής των 1,3mL/s σε απόσταση περίπου 9,38m από τον αισθητήρα καναλιού 1, το οποίο αποτελεί ένα σφάλμα −0,02m από την πραγματική θέση της επιβληθείσας διαρροής. Δεδομένου ότι πολλά γεγονότα εξαλείφθηκαν από το φιλτράρισμα, οι

δοκιμές για μικρό ποσοστό διαρροών θα έπρεπε να έχουν πολύ μεγαλύτερους χρόνους απόκτησης δεδομένων από τα κάποια λεπτά που χρησιμοποιήθηκαν για να επιτευχθούν παρόμοια επίπεδα εμπιστοσύνης όπως και για τις μεγαλύτερες δοκιμές διαρροών.

6.5.13 | Συμπεράσματα

Τα βασικά αποτελέσματα αυτού του προγράμματος δοκιμών απέδειξαν ότι η αποτελεσματική δοκιμή ανίχνευσης διαρροών ΑΕ θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί υπό συνθήκες ροής μέχρι 11,4L/s σε θαμμένο αγωγό νερού διαμέτρου 305 mm:

- Τα ποσοστά διαρροών που κυμαίνονται από 15,2 έως 16,6mL/s ανιχνεύθηκαν επιτυχώς και οι θέσεις εντοπίστηκαν σε περίπου 2% της θέσης της επιβληθείσας διαρροής σε πέντε από τις επτά δοκιμές με αποστάσεις αισθητήρων που κυμαίνονταν από 46,3 έως 65,5m. Ωστόσο και οι τρεις δοκιμές στα 78 μέτρα ήταν ανεπιτυχείς.
- Ενθαρρυντικά αποτελέσματα λήφθηκαν επίσης για μικρότερους ρυθμούς διαρροών. Ένας ρυθμός διαρροής 1,3mL/s ήταν διακριτός αλλά μόνο εντοπισμένος σε περίπου 10% της επιβαλλόμενης διαρροής, κατά τη διάρκεια δύο εκ των τριών δοκιμών με διαχωρισμό αισθητήρων στα 21,3m. Αυτός ο ρυθμός διαρροής δεν ήταν ευδιάκριτος κατά τη διάρκεια πέντε δοκιμών σε μεγαλύτερους διαχωρισμούς αισθητήρων, π.χ. 30,5m, 46,3m και 65,5m.
- Χρησιμοποιήθηκε φιλτράρισμα μετά την επεξεργασία για τη βελτίωση των δεδομένων δοκιμής διαρροής 1,3mL/s και εντοπίστηκε η διαρροή σε απόσταση 0,02m από την επιβληθείσα διαρροή. Ωστόσο, αυτά τα συγκεκριμένα αποτελέσματα δεν είναι εύρωστα και αναδεικνύουν ανεκδοτικά ότι πολύ μεγαλύτεροι χρόνοι απόκτησης δεδομένων θα ήταν επιθυμητοί για να επιτευχθεί ένα παρόμοιο επίπεδο εμπιστοσύνης για τον εντοπισμό μικρών διαρροών.
- Οι βελτιώσεις στο υλικό και η ανάπτυξη βελτιωμένων αλγορίθμων θα πρέπει να μετριάζουν τις επιδράσεις τόσο του εξωτερικά παραγόμενου όσο και του προκαλούμενου από τη ροή θορύβου υποβάθρου, που θα επιτρέψει τη θέση μικρότερων ποσοστών διαρροών κάτω από μεγαλύτερες συνθήκες ροής. Η προηγούμενη δοκιμή στατικής πίεσης αυτού του αγωγού, δηλαδή η κατάσταση μηδενικής ροής, ανέδειξε ανεπιστρεπτί ότι η μείωση του θορύβου υποβάθρου είχε ως αποτέλεσμα αυξημένη ευαισθησία και τη θέση μικρότερων διαρροών σε μεγαλύτερες αποστάσεις διαχωρισμού αισθητήρων, π.χ. από την αρχική ανίχνευση 18.3mL/s διαρροή σε μέγιστη απόσταση αισθητήρα 61m για την ανίχνευση διαρροής 12,6mL/s σε διαχωρισμούς αισθητήρων μέχρι 192,9m. [22]

6.6 | Ανίχνευση με ΑΕ διαρροής υγρών σε αγωγό εδάφους

6.6.1 | Περίληψη

Υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί και δυσκολίες στην επιθεώρηση και τη συντήρηση υπόγειων αγωγών που δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν rigs (συσκευές επιθεώρησης αγωγών). Η διαρροή είναι αναπόφευκτη σε τέτοιους αγωγούς και προκαλεί σοβαρό πρόβλημα στο περιβάλλον καθώς και στους ιδιοκτήτες των αγωγών. Οι διαρροές των σωλήνων είναι συνήθως εμφανείς είτε όταν η πίεση πέφτει χωρίς άλλη προφανή αιτία είτε όταν χαθεί πολύτιμο προϊόν. Εντούτοις, ακόμη και στο βέλτιστο σενάριο, όπου οι χειριστές μπορούν να απομονώσουν συγκεκριμένα τμήματα αγωγών που υποπτεύονται ότι θα προκληθούν διαρροές, συχνά οι χειριστές δεν μπορούν να εντοπίσουν με ακρίβεια την θέση της διαρροής έτσι ώστε να λάβουν διορθωτικά μέτρα. Η ακουστική εκπομπή (ΑΕ) είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο για την ανίχνευση και τον εντοπισμό διαρροών σε θαμμένους αγωγούς. Η πρόσβαση στον αγωγό απαιτείται μόνο τοπικά για τη συναρμολόγηση αισθητήρων ΑΕ. Ο αγωγός είναι πεπιεσμένος και ο ΑΕ δοκιμάζεται σε τμήματα μήκους 600 έως 1000m κάθε φορά. Οι αισθητήρες ΑΕ ανιχνεύουν την τυρβώδη ροή στο στόμιο διαρροής και με τη χρήση ψηφιακών συστημάτων ΑΕ και εξειδικευμένου λογισμικού, παρέχεται η ακριβής θέση της διαρροής.

Η μελέτη που θα αναλυθεί παρακάτω, ασχολείται με την τεχνική περιγραφή και τη φυσική της τεχνικής ανίχνευσης διαρροών ΑΕ, παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα, τους περιορισμούς και τις απαιτήσεις της μεθόδου, περιγράφει τις απαραίτητες λειτουργίες του εξοπλισμού ΑΕ για την εκτέλεση ενός τέτοιου έργου και τέλος, αναφέρει αρκετές μελέτες περιπτώσεων για την επιτυχή ανίχνευση διαρροών και τη θέση των θαμμένων αγωγών. Οι περιπτώσιολογικές μελέτες καλύπτουν τόσο τους νέους όσο και τους ήδη υπάρχοντες αγωγούς διαφόρων μεγεθών.

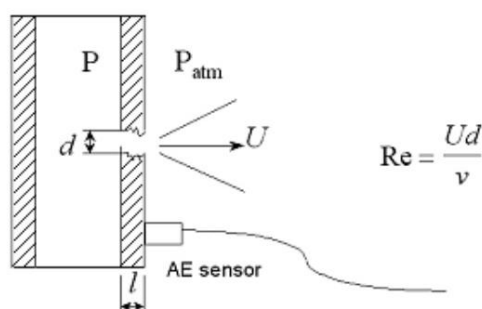
6.6.2 | Εισαγωγή

Οι ανεπιθύμητες απώλειες υγρών που οφείλονται σε διαρροές αποτελούν ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, διωλιστήρια, σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και γενικά, οπουδήποτε κινούνται ή αποθηκεύονται υγρά ή υγρά, με περιστασιακές τεράστιες περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις. Οι μη αποσυνδεδεμένες δοκιμές διαρροών αντιμετωπίζουν τη διαρροή υγρών ή συμπιεσμένα αέρια ή εκκενωμένα συστατικά ή συστήματα ως αποτέλεσμα της διαφοράς πίεσης.

Η ακουστική εκπομπή (ΑΕ) χρησιμοποιείται ευρέως για τον εντοπισμό τέτοιων διαρροών. Η αναταραχή που προκαλείται από τη ροή ενός πεπιεσμένου ρευστού διαμέσου ενός στομίου παράγει κύματα ενέργειας τόσο των ηχητικών όσο και των υπερηχητικών συχνοτήτων. Το Σχήμα 38 παρουσιάζει ορισμένα φυσικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται και επηρεάζουν τη ροή της διαρροής.

Οι Pollock και Hsu [23] παρείχαν μια βασική κατανόηση του μηχανισμού διαρροών και της δοκιμής AE. Ο Miller και άλλοι [24] διεξήγαγαν εργαστηριακές δοκιμές και πειράματα για την αξιολόγηση των υφιστάμενων μεθόδων ανίχνευσης διαρροών και εντοπισμού. Πρότυπα όπως η ASTM³ ή η ASME⁴ περιγράφουν τη μέθοδο ανίχνευσης και εντοπισμού της σταθερής κατάστασης πηγής αερίων και υγρών που διαρρέουν από ένα σύστημα υπό πίεση.

Είναι κοινή αντίληψη σε όλα τα παραπάνω έργα ότι η AE μπορεί να παραχθεί από το εξαιρετικά ασταθές πεδίο τυρβώδους πίεσης στο στόμιο και η κατάσταση ανίχνευσης είναι ότι ο αριθμός Reynolds $Re > 1000$ στο στόμιο, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται τυρβώδης ροή. Τα αντίστοιχα σήματα AE που παράγονται είναι συνεχούς φύσης. Πρόσθετες πηγές που μπορεί να παράγουν AE σε περίπτωση διαρροής είναι τοπική ανάπτυξη ρωγμών/στόκων, σπηλαίωση λόγω τοπικής υποπίεσης στο στόμιο, προσωρινές παγίδες και επιπτώσεις στερεών σωματιδίων στο στόμιο, κινήσεις εδάφους ή ακόμη και εξωτερικές πηγές όπως οι προσκρούσεις κλπ., οι οποίες είναι κυρίως πηγές τύπου έκρηξης. Τα παραγόμενα κύματα AE από τέτοιες πηγές διαδίδονται μέσω του υγρού ή μέσω του ίδιου του αγωγού. Οι αισθητήρες ακουστικών εκπομπών που λειτουργούν μεταξύ 20 και 100kHz συναρμολογούνται στον αγωγό, παρακολουθώντας τόσο τις συνεχείς εκπομπές όσο και τις εκπομπές ριπών, μέσω της ταυτόχρονης παρακολούθησης των δεδομένων που βασίζονται στο χρόνο (δειγματοληψία ανεξάρτητα από το κατώφλι) και δεδομένων που εξαρτώνται από το χτύπημα. Επιπλέον, χρησιμοποιείται συχνά η απόκτηση κυματομορφών AE ή ροής κυματομορφών.



U	= Μέση ταχύτητα ρευστού μέσω του στομίου
d	= Μέση διάμετρος στομίου
l	= Μήκος οπών
v	= Κινηματικό ιξώδες ρευστού
P	= Πίεση εντός του αγωγού
P_{atm}	= Ατμοσφαιρική πίεση
Re	= Αριθμός Reynolds

Συνθήκη τυρβώδους ροής: $Re > 1000$

Σχήμα 38. Χαρακτηριστικά ροής διαρροής

Απλοϊκή εκτίμηση της θέσης διαρροής μπορεί να γίνει μετρώντας τις μεταβολές πλάτους του συνεχούς σήματος σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του σωλήνα. Με βάση την εξασθένιση του σήματος (γνωστή ή μετρούμενη ανεξαρτήτως σωλήνα) και τη μείωση πλάτους σήματος σε σχέση με την απόσταση από την πηγή (διαρροή), όπως μετράται σε διάφορες θέσεις, καταγράφεται ένας λόγος μεταβολής εύρους. Με βάση αυτή την αναλογία, μπορεί να υπολογιστεί χονδρικά η απόσταση στην

³ASTM E1211-02, Standard Practice for Leak Detection and Location Using Surface – Mounted Acoustic Emission Sensors, 2002

⁴ ASME Section V, Article 10, Leak testing, Appendix X, Ultrasonic leak detector test

πηγή. Ωστόσο, μια πιο αποτελεσματική και ακριβής μέθοδος εντοπισμού μιας διαρροής σε έναν θαμμένο αγωγό είναι η γραμμική θέση. Για αυτή τη μέθοδο απαιτούνται δύο (2) αισθητήρες ΑΕ τοποθετημένοι σε κάθε πλευρά της διαρροής. Αν ένα συμβάν ΑΕ εμφανίζεται σε απόσταση x από τον πρώτο αισθητήρα, τότε $x = (L - V\Delta t) / 2$, όπου L είναι η γνωστή απόσταση μεταξύ των δύο αισθητήρων V είναι η (γνωστή ή μετρηθείσα) ταχύτητα κύματος και Δt χρονική διαφορά της άφιξης κύματος στους δύο αισθητήρες που μετρήθηκαν από το σύστημα απόκτησης. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μετα – επεξεργασία κυματομορφών ροής (συνεχείς κυματομορφές μεγάλου μήκους) για την ενίσχυση της ανιχνευσιμότητας και της ακρίβειας της θέσης.

6.6.3 | Απαιτήσεις, πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Οι οπές πρόσβασης στην επιφάνεια του αγωγού ανασκάπτονται σε προκαθορισμένες αποστάσεις αισθητήρων (συνήθως κάθε 100m) κατά μήκος του αγωγού, προκειμένου να εκτίθεται ένα μικρό μέρος του σωλήνα (απαιτείται μια μικρή εκτεθειμένη επιφάνεια περίπου $15 \times 15 \text{ cm}^2$ στο άνω μέρος του αγωγού). Για την τοποθέτηση του αισθητήρα πρέπει να αφαιρεθεί οποιαδήποτε προστατευτική θήκη, μόνωση ή επίστρωση από υαλοβάμβακα. Το τμήμα του αγωγού που πρόκειται να υποβληθεί σε δοκιμή πρέπει να απομονωθεί (προκειμένου να εφαρμοστεί στατική πίεση) και να μην υπάρχει καμία ροή μέσου (για να αποφευχθεί ο σχετικός θόρυβος).

Για τον έλεγχο, η πίεση στο υπό δοκιμή τμήμα αυξάνεται και διατηρείται σταθερή. Παρόλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα φορητό όργανο ανίχνευσης διαρροών ενός καναλιού, για να αποκτήσει το μέσο επίπεδο σήματος ΑΕ του σωλήνα στα εκτεθειμένα σημεία και να προσδιορίσει την περιοχή που υπάρχει υποψία για τη διαρροή, χρειάζεται ένα πολυκαναλικό σύστημα για την αξιόπιστη θέση προέλευσης. Επομένως, πολλαπλοί αισθητήρες ΑΕ τοποθετούνται στα εκτεθειμένα σημεία κατά μήκος του υπό δοκιμή τμήματος του αγωγού και χρησιμοποιείται ένα σύστημα ανίχνευσης διαρροών πολλαπλών καναλιών ΑΕ για την απόκτηση των σημάτων διαρροής. Ειδικό λογισμικό χρησιμοποιείται για την απόκτηση των σημάτων, την αξιολόγηση και τον υπολογισμό της γραμμικής θέσης των σχετικών πηγών τύπου διαρροής. Μόλις εντοπιστεί, η θέση της διαρροής μπορεί να υπολογιστεί μέσα σε λίγα λεπτά. Η χρήση μιας σταθερής σειράς αισθητήρων και η παρακολούθηση κατά τη διάρκεια της συμπίεσης και/ή της αποσύνθεσης δίνει την καλύτερη διαθέσιμη ευαισθησία ανίχνευσης, καθώς μπορούν να ανιχνευθούν πολύ μικρές μεταβολές του σήματος ΑΕ (με τη χρήση μέσου όρου και/ή προηγμένης μετα – επεξεργασίας) για παράδειγμα, σε σύγκριση με περιοδικές μετρήσεις, χρησιμοποιώντας ένα φορητό όργανο όπου ο ανιχνευτής επανατοποθετείται επανειλημμένα.

Η επιτυχής ανίχνευση διαρροών με ΑΕ εξαρτάται από την απόσταση της διαρροής από τους αισθητήρες ΑΕ, τα χαρακτηριστικά εξασθένησης του υλικού του σωλήνα (πάχος, υλικό κ.λπ.) και

τον τύπο ρευστού (αέριο, υγρό) μέσα στον αγωγό. Εξαρτάται επίσης από το περιβάλλον (αέρας, χώμα) και την κατάσταση (αριθμός Reynolds) στο στόμιο διαρροής, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από τον ρυθμό ροής, τη διαφορική πίεση, το μέγεθος του στομίου και τον τύπο του υγρού. Η κατάσταση ανίχνευσης είναι η ύπαρξη αναταράξεων στο στόμιο διαρροής, εξασφαλισμένη με επαρκή διαφορική πίεση. Η ανιχνευσιμότητα ενισχύεται σε περίπτωση ροής δύο φάσεων. Γενικά, όσο υψηλότερος ο αριθμός Re (δηλαδή υψηλότερη διαφορά πίεσης), τόσο πιο ανιχνεύσιμη είναι η διαρροή.

Η ανίχνευση διαρροών μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διάφορους τύπους αγωγών με ΑΕ, συμπεριλαμβανομένων των κύριων αγωγών, των αγωγών πυροσβεστικού αέρα, των εναέριων, των οδικών ή σιδηροδρομικών σταθμών, των σωλήνων αντλιοστασίων και σταθμών συμπίεστών, των σταθμών διανομής αερίου και των αγωγών εντός διυλιστηρίων και βιομηχανιών.

Ανάλογα με τις ανάγκες δοκιμών και την απαιτούμενη ευαισθησία, απαιτείται για την τοποθέτηση και τις μετρήσεις του αισθητήρα, τοπική πρόσβαση στην επιφάνεια του σωλήνα περίπου κάθε 60 έως 200 μέτρα ή και μεγαλύτερη. Είναι απαραίτητη η προσαρμογή της πίεσης, ανάλογα με τον τύπο δοκιμής και τις απαιτήσεις, συνήθως 7 – 8bar και υψηλότερη, ενώ ο αγωγός είναι απομονωμένος, δηλαδή χωρίς ροή ρευστού (για να αποφευχθεί επιπλέον θόρυβος).

Μια δοκιμή ανίχνευσης διαρροών μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια ελεγχόμενης συμπίεσης με νερό (π.χ. δοκιμή υδρογόνου) ή με το κανονικό προϊόν του αγωγού. Εκτός από τις δοκιμές αγωγών για τις οποίες υπάρχει υποψία ότι διαρρέουν, είναι δυνατή η περιοδική δοκιμή ή ακόμη και οι μόνιμες επιθεωρήσεις για κρίσιμα τμήματα αγωγών, ακόμη και χωρίς ενδείξεις διαρροής. Με την προϋπόθεση ότι πληρούνται οι συνθήκες δοκιμής (τοπική πρόσβαση, πίεση, κ.λπ.), κάθε θαμμένος αγωγός μπορεί να δοκιμαστεί στο σύνολό του, ακόμη και περιοχές που δεν είναι δυνατόν να δοκιμαστούν με άλλες τεχνικές ΜΚΕ. Στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι διαρροές μπορούν να εντοπιστούν με καλή ακρίβεια, γρήγορα και αποτελεσματικά.

6.6.4| Περιπτώσεις ελέγχου

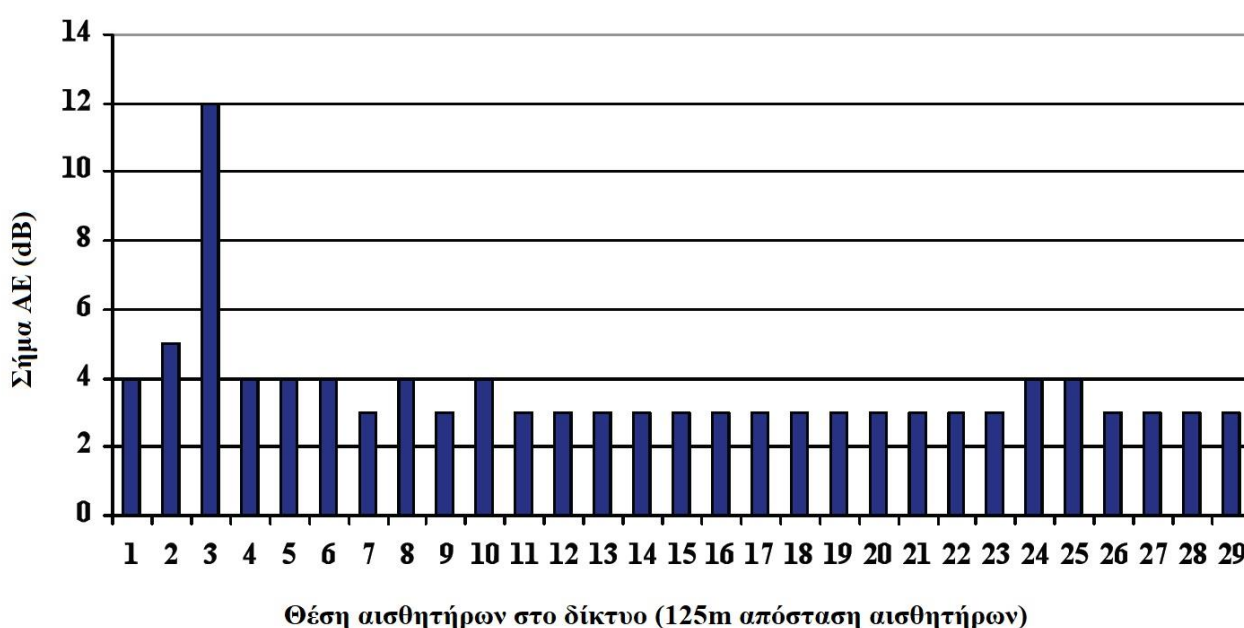
- *1^η Περίπτωση ελέγχου: Ανίχνευση διαρροών σε νέο δίκτυο αγωγού 4.3 – χλμ., 16,5’’ διαμέτρου, υπό του εδάφους*

Κατά τη διάρκεια της υδροστατικής δοκιμής ενός νέου αγωγού στα 80bar, η πίεση έπεφτε συνεχώς και ο χειριστής εκτίμησε ότι υπάρχει διαρροή περίπου 120 l/hr. Δεν υπήρχαν απολύτως ορατές ενδείξεις για τη θέση διαρροής και η οποία θα μπορούσε να είναι οπουδήποτε εντός του μήκους του αγωγού 4,3χλμ. Έχουν αποτύχει οι δοκιμές για τον εντοπισμό της διαρροής με ακουστικές συχνότητες ή/και τη συνδυαστική συσχέτιση σημάτων πίεσης.

Είκοσι εννέα (29) μικρές κοιλότητες ανασκάφθηκαν για την τοποθέτηση των αισθητήρων ΑΕ,

κάθε 125m. Αρχικές μετρήσεις του μέσου επιπέδου σήματος (Average Signal Level – ASL) έγιναν κατά τη διάρκεια πίεσης στα 8,5bar χρησιμοποιώντας μια φορητή συσκευή AE (PAC 5120). Τα αποτελέσματα ASL (Διάγραμμα 18) περιορίζουν τη θέση διαρροής σε μήκος 375m (στα σημεία 1 έως 4). Έγινε περαιτέρω δοκιμή AE στο εν λόγω τμήμα κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, με πολυκαναλικό σύστημα AE (PAC Mistras – 2001) χρησιμοποιώντας τη γραμμική θέση που βρίσκεται η διαρροή. Μετά από τοπικές ανασκαφές στο σημείο που υποδείχθηκε από την AE, επιβεβαιώθηκε η θέση διαρροής.

Βρέθηκε με ακρίβεια ο μετρούμενος ρυθμός διαρροής 80 λίτρα/ώρα σε εσωτερική πίεση αγωγού 20,0bar. Η συνολική διάρκεια της δοκιμής ήταν 4 ημέρες.



Διάγραμμα 18. Μέσο επίπεδο σήματος (ASL) σε ολόκληρο τον αγωγό

- **2^η Περίπτωση ελέγχου: Ανίχνευση διαρροών σε δίκτυο αγωγού 400μ., 12’’ διαμέτρου, υπό του εδάφους**

Η ένδειξη διαρροής εμφανίστηκε ως πτώση πίεσης κατά τη διάρκεια της επιθεώρησης με την μέθοδο pigging. Κατά τη διάρκεια της επόμενης υδροστατικής δοκιμής του σωλήνα, η πίεση μειώθηκε από 12bar σε 3bar σε 1 ώρα. Δεδομένου ότι δεν υπήρχαν απολύτως ορατές ενδείξεις για τη θέση διαρροής, αποφασίστηκε η εφαρμογή του AE προκειμένου να εντοπιστεί η θέση διαρροής.

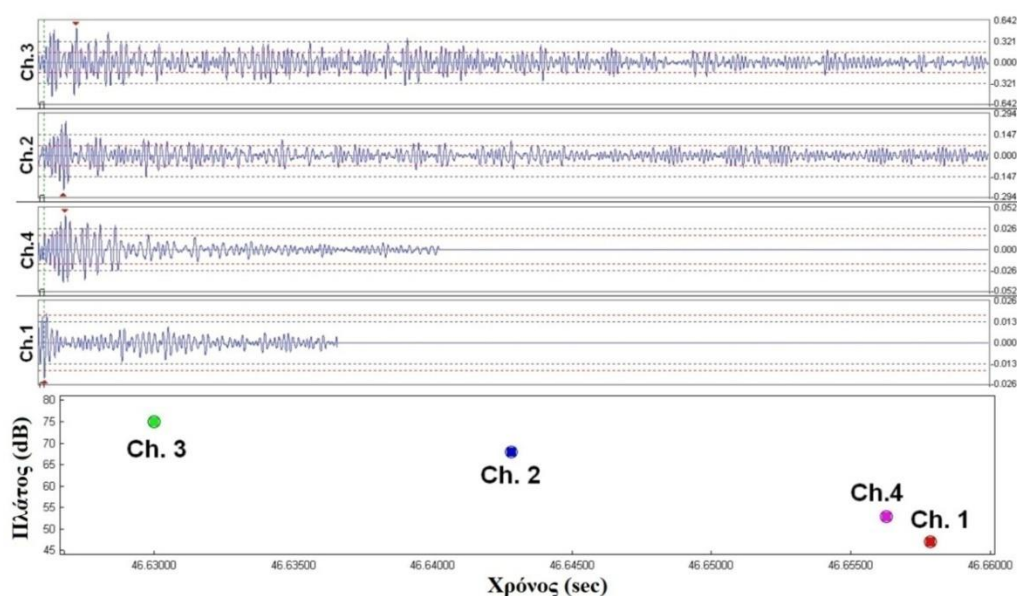
Οι αρχικές μετρήσεις ASL εκτελέστηκαν με τη χρήση φορητής συσκευής AE (PAC 5110) σε τμήματα του σωλήνα που είχαν ήδη εκτεθεί κατά τη διάρκεια δοκιμών, για να εντοπιστεί η διαρροή με βάση τις προσδοκίες των επιθεωρητών και το ιστορικό ελέγχων, ενώ η πίεση διατηρήθηκε σταθερή στα περίπου 9bar. Αυτές οι αρχικές μετρήσεις μείωσαν την πιθανή θέση διαρροής σε μήκος

περίπου 110m, εκ των οποίων τα 70m καλύφθηκαν από σκυρόδεμα. Μόνο δύο θέσεις εκτέθηκαν (ο ιδιοκτήτης άνοιξε τρύπες και καθαρίστηκε η μόνωση) και πραγματοποιήθηκε περαιτέρω δοκιμή ΑΕ στο εν λόγω τμήμα κατά τη διάρκεια της πίεσης, χρησιμοποιώντας 4 αισθητήρες ΑΕ και ένα πολυκαναλικό σύστημα ΑΕ (σύστημα PAC 16 καναλιών PCI – DiSP4).

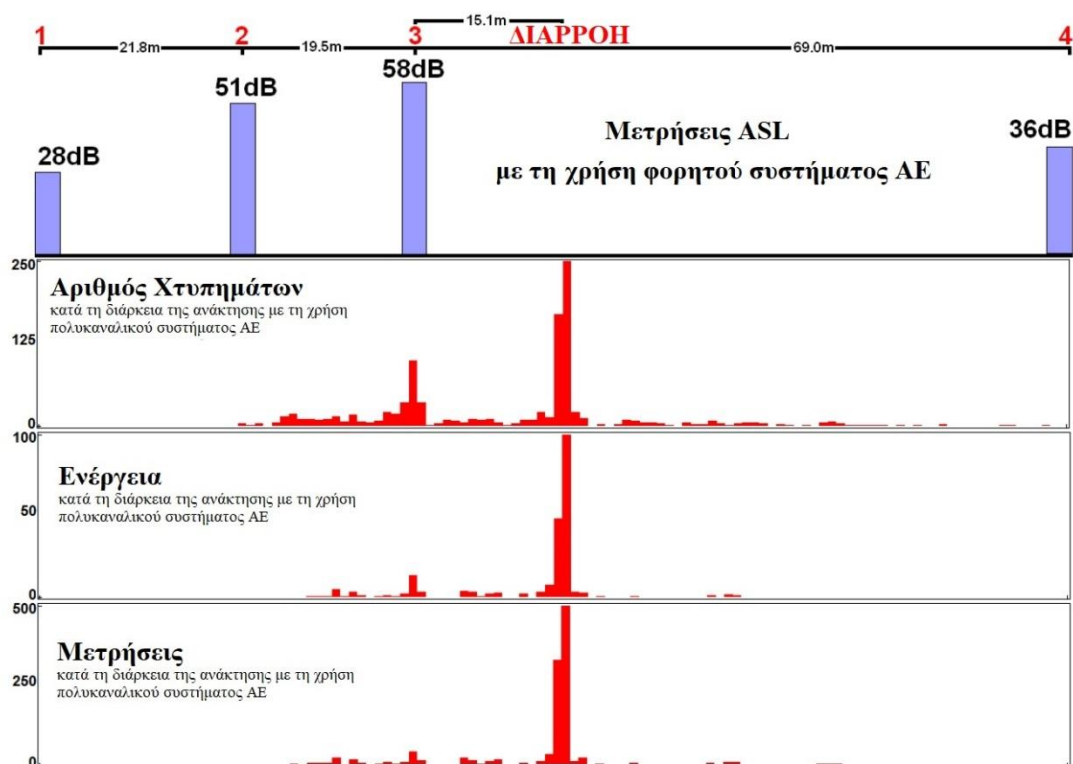
Το Σχήμα 39 δείχνει ένα παράδειγμα ενός σήματος διαρροής που φτάνει στους 4 αισθητήρες. Οι αποκτώμενες κυματομορφές εμφανίζουν σαφώς την εξασθένιση του σήματος, εμφανής ως πτώση εύρους σήματος (παρατηρούμε διαφορά στον άξονα y). Σύμφωνα με το γράφημα εύρους σε σχέση με το χρόνο (Σχήμα 39 κάτω), το σήμα εμφανίζεται αρχικά στο κανάλι 3, πράγμα που σημαίνει ότι η πηγή είναι πιο κοντά στο κανάλι 3. Οι χρόνοι άφιξης στα κανάλια 1 και 4 είναι περίπου ίδιοι, η πηγή έχει περίπου την ίδια απόσταση από τα κανάλια 1 και 4 ή, με άλλα λόγια, η πηγή είναι πολύ κοντά στη μέση μεταξύ των 2 καναλιών.

Το Σχήμα 40 δείχνει τις μετρήσεις ASL σε κάθε διάγραμμα καναλιού και τοποθεσίας που υποδεικνύει την ύποπτη θέση, με βάση δεδομένα που αποκτήθηκαν για περίοδο 240 δευτερολέπτων. Το σύστημα έδωσε ένδειξη πιθανού σημείου διαρροής (σε περίπου 15 μέτρα από τον αισθητήρα 3, κάτω από την απρόσιτη περιοχή του σκυροδέματος).

Περαιτέρω ανάλυση πραγματοποιήθηκε επί τόπου χρησιμοποιώντας διαφορετικές ρυθμίσεις θέσης. Η ίδια θέση εμφανίστηκε επίσης κατά τη διάρκεια της μετα – επεξεργασίας, όταν χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα κανάλια 1 και 4 (με απόσταση περίπου 110m) για τον εντοπισμό της πηγής ΑΕ. Ο αγωγός εκτέθηκε στη τοποθεσία που υποδείκνυε το αποτέλεσμα των ΑΕ και βρέθηκε μια οπή 7mm ως αιτία της διαρροής. Η συνολική διάρκεια της δοκιμής διήρκεσε λιγότερο από 1 ημέρα.



Σχήμα 39. Κυματομορφές (πάνω) και πλάτη/χρόνο άφιξης ενός σήματος ΑΕ διαρροής σε 4 διαφορετικά κανάλια



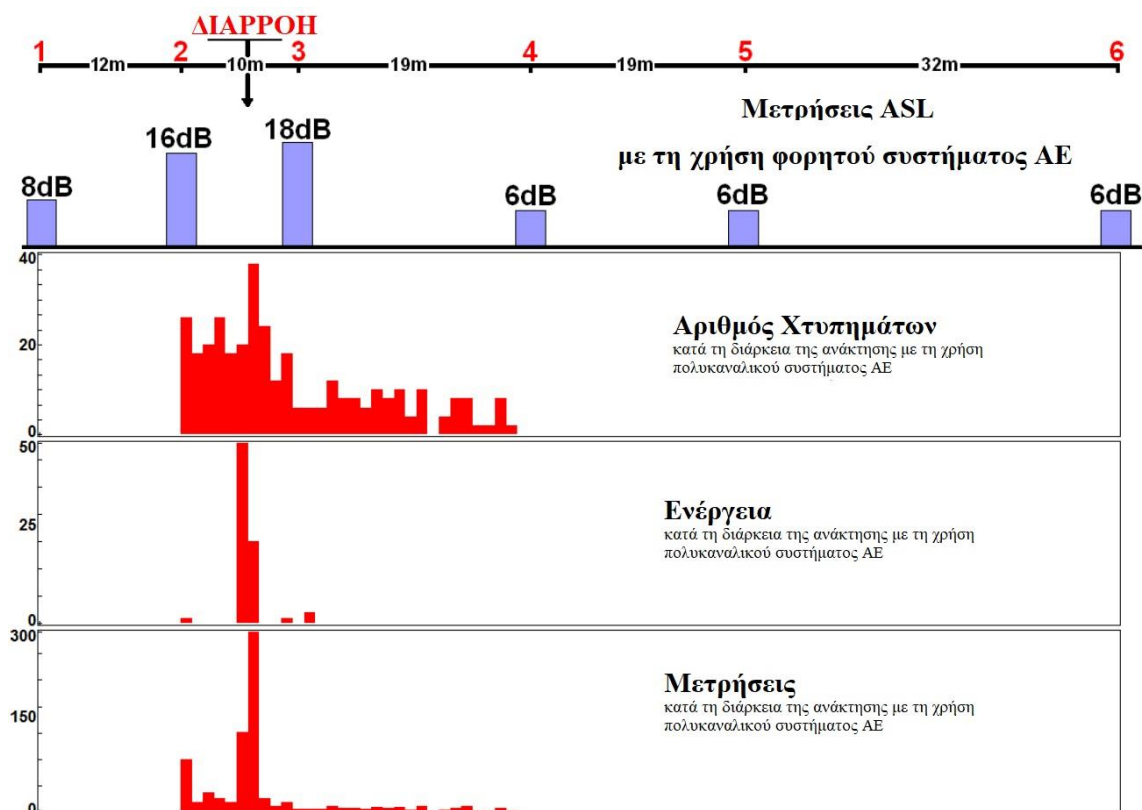
Σχήμα 40. Μετρήσεις ASL με τη χρήση φορητού συστήματος AE

Στο Σχήμα 40 έχουμε ASL ως προ το κανάλι (πάνω) και γραμμική θέση που υποδεικνύει το σημείο διαρροής με βάση τον αριθμό των χτυπημάτων, της ενέργειας και των μετρήσεων (κάτω) των αποκτώμενων σημάτων, μετά από μόλις 240 δευτερόλεπτα απόκτησης.

- **3^η Περίπτωση ελέγχου:** Ανίχνευση διαρροών σε δίκτυο αγωγού 1,5 χλμ., 4’’ διαμέτρου, υπό τον εδάφους

Όταν υποβλήθηκε σε πίεση έως 34 bar η πίεση έπεφτε σε 0bar σε μια μέση ταχύτητα 2 bar/hr, πράγμα που υποδηλώνει μικρή, ενεργή διαρροή. Για τη δοκιμή, ο σωλήνας είχε γεμίσει με νερό και η πίεση διατηρήθηκε σχεδόν σταθερή στα περίπου 9bar. Μια φορητή συσκευή AE (PAC 5110) παρείχε αρχικές πληροφορίες (μετρήσεις ASL) για την ύπαρξη διαρροής στο σωλήνα. Μετά από αυτή την ένδειξη η έρευνα επικεντρώθηκε σε τμήμα οδικής διέλευσης, περίπου 92m του συνολικού σωλήνα.

Για την εύρεση της πραγματικής θέσης διαρροής χρησιμοποιήθηκε ένα επιτραπέζιο, πολυκαναλικό σύστημα ακουστικών εκπομπών (MISTRAS 2001). Η γραμμική θέση σε πραγματικό χρόνο έδειξε πιθανή διαρροή στα περίπου 4,6μέτρα από τη θέση του αισθητήρα αριθ.3. Το Σχήμα 41 παρουσιάζει τα γραφήματα θέσης που παρείχαν ενδείξεις σχετικά με τη θέση διαρροής. Ένα μήκος 3m του σωλήνα εκτέθηκε στη θέση που πρότεινε η AE και βρέθηκε μικρή διαρροή.



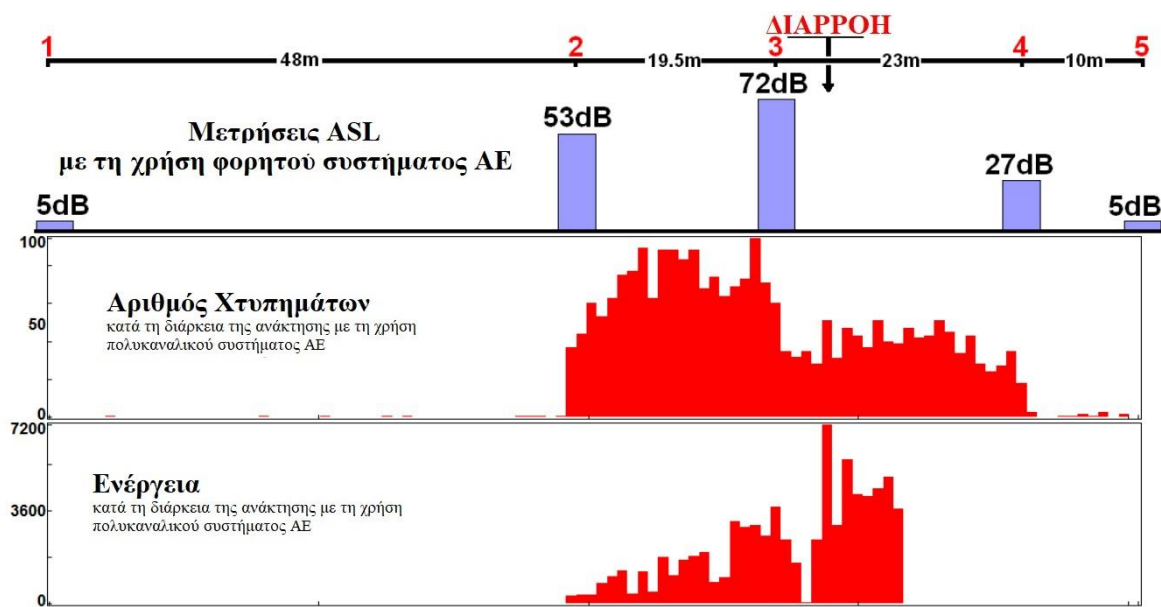
Σχήμα 41. Μετρήσεις ASL για εντοπισμό ύποπτης περιοχής διαρροής μεταξύ των καναλιών 2 και 3

Στο Σχήμα 41 βλέπουμε ότι οι μετρήσεις ASL έδειξαν την ύποπτη περιοχή διαρροής μεταξύ των καναλιών 2 και 3. Οι γραφικές παραστάσεις του συστήματος AE εντοπίζουν την ακριβή θέση διαρροής μετά από 27 λεπτά απόκτησης.

▪ 4^η Περίπτωση ελέγχου: Ανίχνευση διαρροών σε δίκτυο αγωγού 100 μ., 5'' διαμέτρου

Ο σωλήνας αναφέρθηκε ότι χάνει πίεση από 30bar σε 3bar μετά από 10 λεπτά όταν πιέζεται. Για τη δοκιμή AE, ο σωλήνας είχε γεμίσει με νερό και η πίεση διατηρήθηκε σχεδόν σταθερή στα περίπου 25bar. Για την εύρεση της ακριβούς θέσης της διαρροής χρησιμοποιήθηκε ένα επιτραπέζιο σύστημα (PAC 24ch. – DiSP). Η γραμμική θέση σε πραγματικό χρόνο έδειξε μια πιθανή διαρροή που βρίσκεται κοντά στον αισθητήρα αριθ. 3. Στο Σχήμα 42 παρουσιάζονται οι μετρήσεις ASL (επάνω γράφημα) και η γραμμική θέση (δύο γραφήματα στο κάτω μέρος) κατά την απόκτηση AE όπου εφαρμόστηκαν και οι χειροκίνητες και οι αυτόματες προσαρμογές (έξυπνο κατώφλι). Σημειώνουμε ότι η γραφική παράσταση γραμμικής θέσης που βασίζεται στον αριθμό των χτυπημάτων (2ο γράφημα) δείχνει μεγαλύτερη δραστηριότητα μεταξύ των καναλιών 2 και 3, ενώ το γράφημα γραμμικής θέσης που βασίζεται στην ενέργεια των σημάτων δείχνει μεγαλύτερη δραστηριότητα μεταξύ των καναλιών 3 και 4. Το τμήμα του σωλήνα μεταξύ των καναλιών 2 και 3 θάφτηκε σε μικρό βάθος (περίπου 40cm) ενώ το τμήμα μεταξύ των καναλιών 3 και 4 θάφτηκε βαθύτερα στο έδαφος

(περίπου 1,5m). Αυτό πιθανώς οδηγεί σε σημαντική διαφορά εξασθένησης μεταξύ των δύο τμημάτων. Αυτό το γεγονός και η μεταβλητότητα του κατώτατου ορίου σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές ASL που υποδηλώνουν μια ισχυρή πηγή μπορεί να είχαν ως αποτέλεσμα η γραμμική θέση να μην είναι ακριβής.



Σχήμα 42. Μετρήσεις ASL που υποδεικνύουν την ύποπτη περιοχή

Απόκτηση γραμμικής θέσης AE, καθένα από τα οποία παρουσιάζει διαφορετικές θέσεις κοντά στο κανάλι 3, μετά από 25 λεπτά απόκτησης.



Φωτογραφία 45. Η διαρροή που εντοπίστηκε από την AE

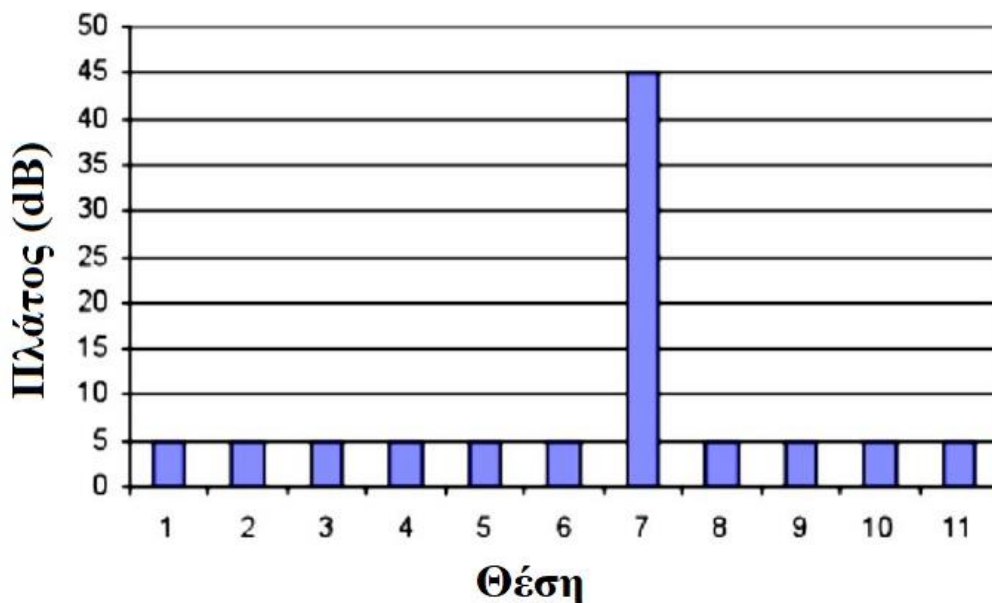
Αρχικά, ένα τμήμα μήκους 5 μέτρων του σωλήνα εκτέθηκε ξεκινώντας από το κανάλι 3 έως το κανάλι 2. Το ASL γινόταν χαμηλότερο καθώς μετριόταν προς το κανάλι 2 κατά μήκος του σωλήνα.

Έτσι, αποφασίστηκε να εκτεθεί το τμήμα που υποδεικνύεται από το ενεργειακό γράφημα και βρέθηκε μια μεγάλη διαρροή (Φωτογραφία 45).

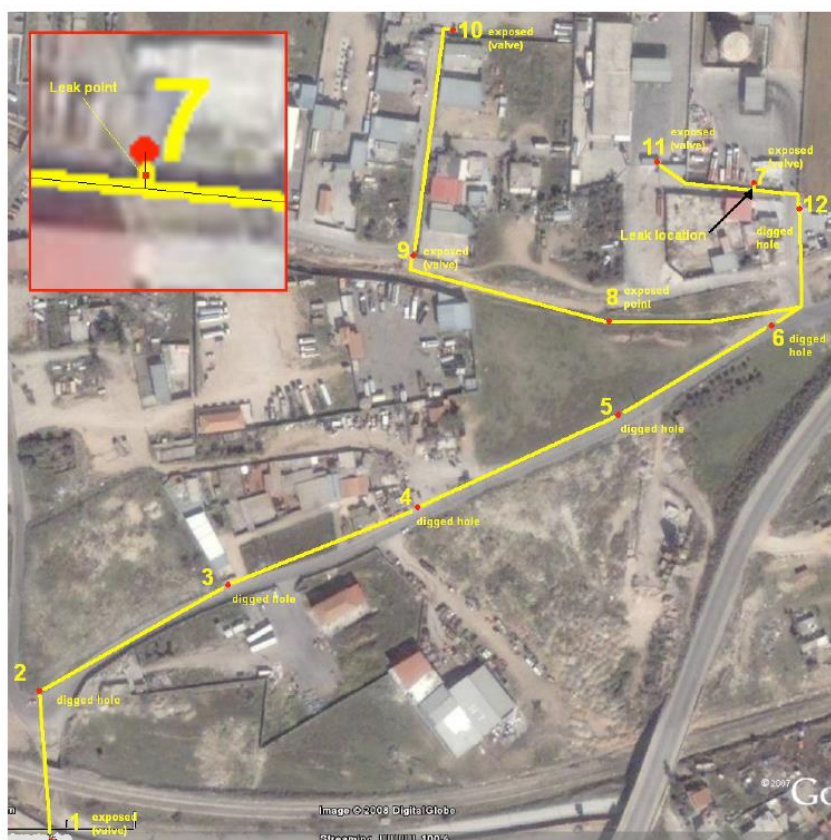
▪ **5^η Περίπτωση ελέγχου: Σύνθετη ανίχνευση διαρροών σε δίκτυο αγωγών 100 μ., 4’’ διαμέτρου**

Πολύ σύνθετο δίκτυο σωλήνων, το οποίο μεταφέρει προϊόν από διυλιστήριο σε γειτονικές δεξαμενές και σταθμούς ανεφοδιασμού και στο οποίο υπήρχε υποψία για διαρροή. Οι πολυάριθμοι κλάδοι των γραμμών που συνδέονται με την κύρια γραμμή καθιστούν δύσκολη την ανίχνευση. Ως εκ τούτου, ο πρωταρχικός στόχος αυτής της δοκιμής ήταν να προσδιοριστεί η ύποπτη γραμμή και να περιοριστεί ο τομέας της επιθεώρησης πριν από λεπτομερή έρευνα.

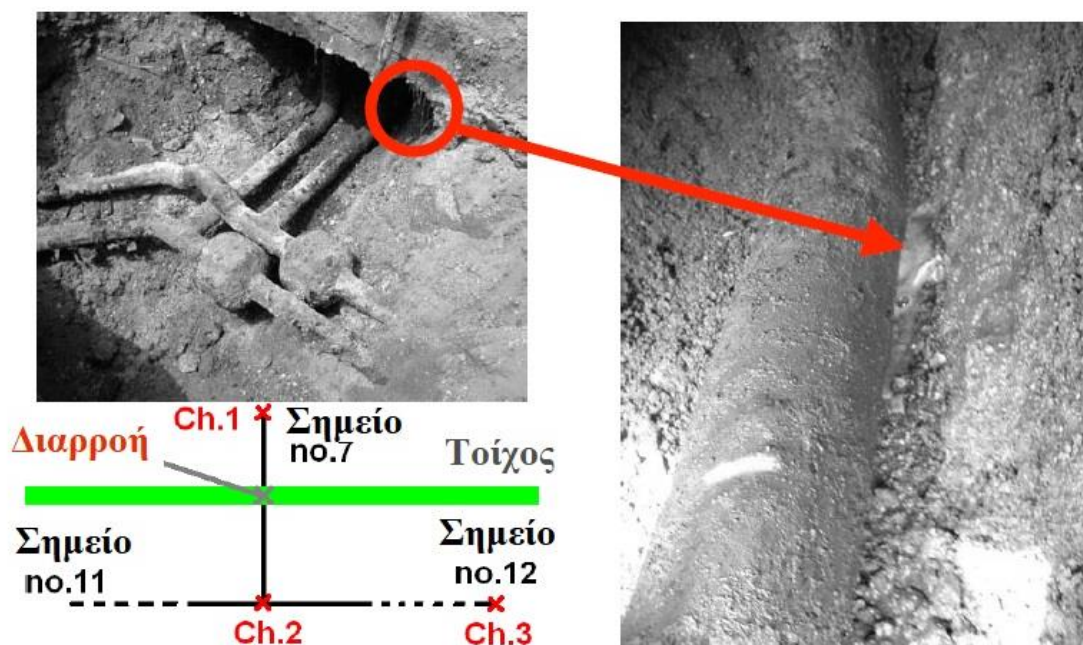
Όταν υποβλήθηκε σε πίεση περίπου στα 25bar, ο σωλήνας αναφέρθηκε ότι έχανε πίεση (κάτω από 0bar) μετά από 5 – 6 ώρες. Πέντε (5) εκσκαφές έδωσαν πρόσβαση στην επιφάνεια του αγωγού κάθε 10m. Μαζί με τα 6 προϋπάρχοντα σημεία πρόσβασης του σωλήνα, τα ASLs σε συνολικά 11 σημεία μετρήθηκαν αρχικά χρησιμοποιώντας φορητό εξοπλισμό AE (PAC 5110) ενώ η πίεση διατηρήθηκε σχεδόν σταθερή σε περίπου 25bar. Οι μετρήσεις παρείχαν μια γενική ένδειξη (Διάγραμμα 19). Η δοκιμή επικεντρώθηκε στην περιοχή κοντά στο σημείο αρ. 7 και ανασκάφηκε ένα ακόμη σημείο προσφέροντας πρόσθετη πρόσβαση (σημείο αρ. 12). Η ύποπτη περιοχή διαρροής περιορίστηκε μεταξύ των σημείων 11, 7 και 12 (Φωτογραφία 46). Μια ακόμη τρύπα ανοίχτηκε κοντά στο σημείο Νο. 7 και ένας T σύνδεσμος του σωλήνα εκτέθηκε (Φωτογραφία 47). Οι υψηλές μετρήσεις ASL στον σύνδεσμο T επιβεβαίωσαν άλλη μια φορά την αρχική ένδειξη της διαρροής.



Διάγραμμα 19. Μετρήσεις ASL/καναλιών. Πρώτη ένδειξη της υποτιθέμενης περιοχής διαρροής (κοντά στο κανάλι 7)



Φωτογραφία 46. Αεροφωτογραφία του σύνθετου δικτύου σωλήνων και των σημείων μέτρησης

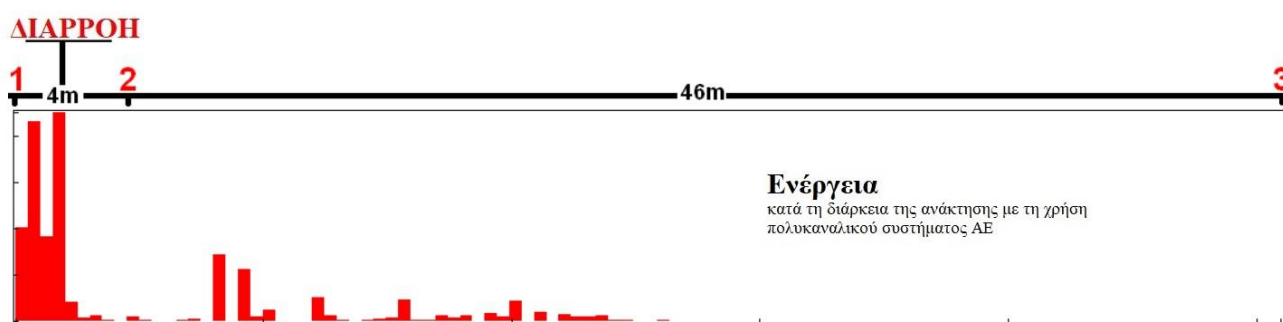


Φωτογραφία 47. Συνδέσμος T με μεγεθυμένη εικόνα της μικρής διαρροής που βρέθηκε

Στην Φωτογραφία 47 έχουμε την εικόνα του συνδέσμου T (πάνω αριστερά), με μεγεθυμένη εικόνα της μικρής διαρροής που βρέθηκε (δεξιά). Σχηματική της σύνθετης τοπολογίας του σωλήνα πλησίον του σημείου διαρροής και των θέσεων αισθητήρα στην ύποπτη περιοχή (κάτω αριστερά), με

τον αισθητήρα 2 στον σύνδεσμο T.

Η απόσταση μεταξύ του συνδέσμου T και του σημείου αριθ. 7 ήταν 4 μέτρα και ο σωλήνας διέσχιζε έναν τοίχο. Παρόλο που ήταν προφανές ότι η διαρροή ήταν λίγα μέτρα δίπλα στην περιοχή αυτή, ακόμη και μετά το άνοιγμα των οπών δεν υπήρχαν οπτικά στοιχεία για οποιαδήποτε διαρροή (π.χ. οσμή, λάσπη ή υγρό έδαφος). Επομένως, οι αισθητήρες ΑΕ τοποθετήθηκαν στα σημεία που φαίνονται στην Φωτογραφία 47 για περαιτέρω λεπτομερή έρευνα. Ένα επιτραπέζιο σύστημα (PAC – DiSP 24 ch.) χρησιμοποιήθηκε για να εντοπίσει η πραγματική θέση της διαρροής. Σύμφωνα με το σύστημα (Σχήμα 43), η διαρροή εντοπίστηκε μεταξύ των αισθητήρων 1 και 2 (μεταξύ του σημείου αρ. 7 και του συνδέσμου T). Η περιοχή ανασκάφηκε και προεκτάθηκε ακριβώς κάτω από τον τοίχο όπου βρέθηκε μια μικρή διαρροή.



Σχήμα 43. Γραμμική θέση πραγματικού χρόνου βάσει των ενεργειών του σήματος

- **6^η Περίπτωση ελέγχου: Ανίχνευση διαρροών σε νέο – τοποθετημένο αγωγό νερού μήκους 1000 μ., και διαμέτρου 80εκ. που διασχίζει μικρό ποτάμι**

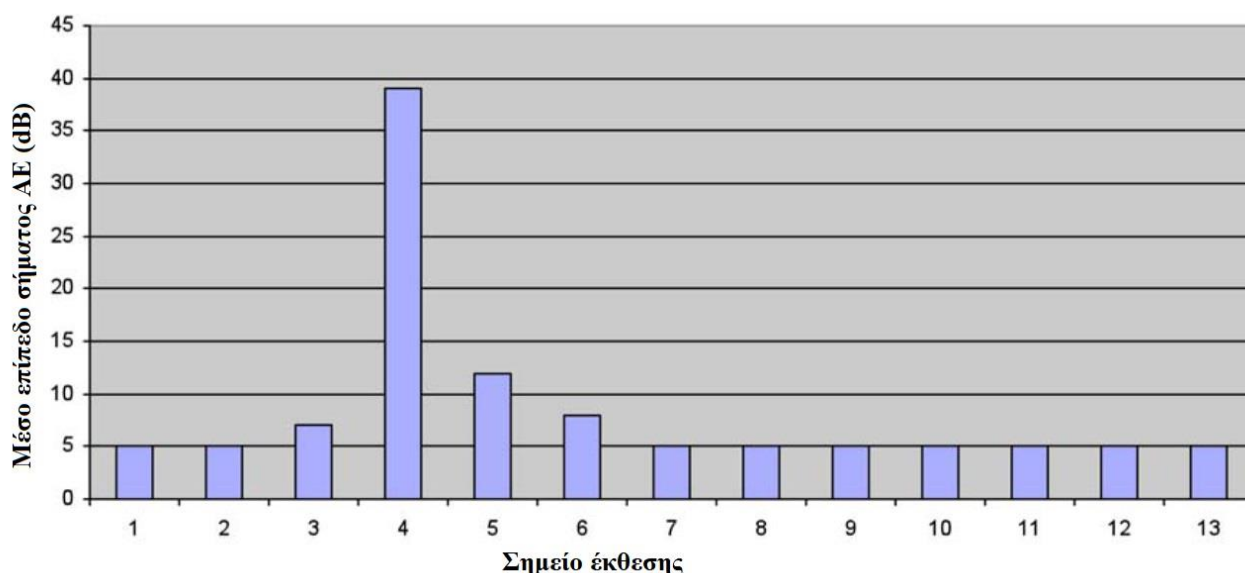
Ο αγωγός ήταν μέρος ενός νέο – τοποθετούμενου δικτύου αγωγών 20 χιλιομέτρων που εγκαταστάθηκε κατά μήκος μιας όχθης μικρού ποταμού. Σε ορισμένα σημεία, ο αγωγός διασχίζει τον ποταμό υποβρύχια. Διεξήχθησαν υδρομετρήσεις σε κάθε χιλιόμετρο του αγωγού. Η πίεση στο εσωτερικό του υπό εξέταση τμήματος δεν μπορεί να αυξηθεί περισσότερο από 8,5bar δίνοντας την πρώτη ένδειξη διαρροής. Η πίεση μειώθηκε από 8,5bar σε 5,5bar μέσα σε 30 λεπτά.

Ο κατασκευαστής διοχέτευσε πράσινο χρώμα μέσα στο σωλήνα για να εντοπίσει τη διαρροή χωρίς επιτυχία. Ως αποτέλεσμα, εφαρμόστηκε παρακολούθηση ΑΕ. Συνολικά 13 θέσεις ανασκάφηκαν σε αποστάσεις που κυμαίνονταν μεταξύ 70 και 100m, όπως φαίνεται στο Σχήμα 44. Οι εκτεθειμένες περιοχές του σωλήνα δοκιμάστηκαν χρησιμοποιώντας φορητό εξοπλισμό ΑΕ. Τα σημεία 1 και 13 ήταν τα τυφλά άκρα του σωλήνα όπου δύο αντλίες νερού συνδέονταν για να αυξάνουν την πίεση μέσα στο σωλήνα.



Σχήμα 44. Σχέδιο αγωγού με θέσεις αισθητήρων

Ο σωλήνας είχε γεμίσει με νερό και η πίεση αυξήθηκε σταδιακά. Κατά τη διάρκεια της αύξησης της πίεσης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις AE ASL κατά μήκος του σωλήνα. Η πρώτη ένδειξη εμφανίστηκε σε περίπου 8,3bar, όπου το σημείο 5 έδειξε 12 – dB ASL για πρώτη φορά. Το σημείο 4 εκτοξεύθηκε σε αυτό το στάδιο (δεν εκτέθηκε από την αρχή της δοκιμής) μετά από πρόταση του επιθεωρητή και οι μετρήσεις ASL έδειξαν 39dB (Σχήμα 45), υποδεικνύοντας πιθανή διαρροή μεταξύ των θέσεων 3 και 5.

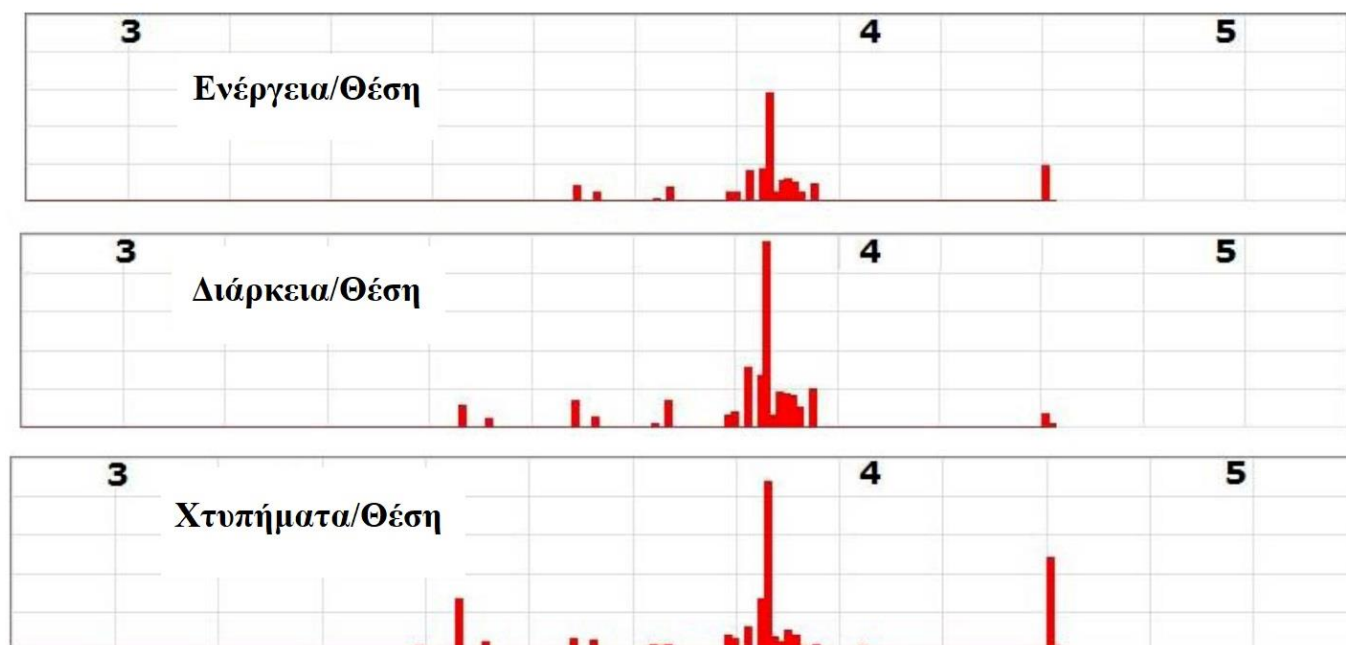


Σχήμα 45. Μετρήσεις ASL στα 8.3 bar

Για να εντοπιστεί η διαρροή, τρεις συντονιστές PAC R3I συζευγνύονται στις θέσεις 3, 4 και 5 και παρακολουθήθηκε η AE χρησιμοποιώντας ψηφιακό πολυκαναλικό σύστημα AE (PAC DiSP). Μια ομάδα θέσης ήταν ρυθμισμένη και τα γραφήματα γραμμικής θέσης έδειξαν την ύποπτη περιοχή σε περίπου 9 μέτρα από τη θέση 4, μεταξύ των θέσεων 3 και 4 (Σχήμα 46). Αν και για αυτή τη συγκεκριμένη περίπτωση περαιτέρω off – line μετα – επεξεργασία δεν ήταν απαραίτητη, η προηγμένη επεξεργασία εφαρμόστηκε ως μέσο επικύρωσης της μεθοδολογίας και αύξησης της εμπιστοσύνης στα αποτελέσματα της τοποθεσίας σε πραγματικό χρόνο.

Ο χειριστής άρχισε να εκθέτει το άνω μέρος του σωλήνα από το σημείο 4 στο σημείο 3 για περίπου 11 μέτρα. Σε αυτό το σημείο, το πράσινο χρώμα που εγχύθηκε από τον χειριστή στο παρελθόν, εμφανίστηκε μαζί με το νερό από τον ποταμό μέσα στην ανασκαμμένη περιοχή

(Φωτογραφία 48), καθιστώντας τις δραστηριότητες παρακολούθησης δύσκολες. Δεδομένου ότι η επιβεβαίωση της διαρροής δεν ήταν εύκολη υπόθεση, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ξανά το φορητό όργανο ως μέσο για να περιοριστεί η αναζήτηση και να αναγνωριστεί η περιοχή διαρροής κοντά στον αισθητήρα 4.



Σχήμα 46. Γραφήματα τοποθεσίας όπως καταγράφονται από το πολυκαναλικό σύστημα στα 8,3 bar

Οι μετρήσεις ASL χρησιμοποιώντας ανιχνευτή διαρροής PAC – 5110 πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος του εκτεθειμένου σωλήνα των 11 μέτρων, αλλά όλες οι μετρήσεις έδειξαν την ίδια ASL (περίπου 39 έως 42dB) και τίποτα δεν έδειξε την ακριβή θέση της διαρροής. Στην περίπτωση αυτή, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ο φορητός ανιχνευτής διαρροής PAC – 5131 (VPAC). Το όργανο παρουσιάζει το υψηλότερο ASL (42dB) στο υποδεικνυόμενο σημείο (9 m από το σημείο 4), ενώ οι τιμές ASL αριστερά και δεξιά αυτού του σημείου ήταν χαμηλότερες (18 – 39dB).

Λόγω της μεγάλης ποσότητας εδάφους πάνω από το ύποπτο σημείο και λόγω της ύπαρξης του μικρού ποταμού δίπλα του, το νερό κάλυπτε τις εκσκαμμένες περιοχές του σωλήνα, ενώ το υγρό χώμα καθιστούσε τη διαδικασία επικίνδυνη για να προχωρήσει στην πλήρη ανάκτηση των υπόπτων σημείων. Ο κατασκευαστής αποφάσισε να διακόψει την εκσκαφή μέχρι να στεγνώσει η περιοχή. Η δοκιμή ολοκληρώθηκε εντός μιας ημέρας.



Φωτογραφία 48. Εικόνα του εκτεθειμένου σωλήνα που υπερχειλίζει το νερό του ποταμού

6.6.5| Συζήτηση και συμπεράσματα

Έχει παρουσιαστεί η χρήση της ΑΕ για την ανίχνευση διαρροών αγωγών και τη θέση διαρροής. Μια σημαντική απαίτηση για την εκτέλεση της δοκιμής είναι ότι ο σωλήνας ή το ύποπτο τμήμα μπορεί να απομονωθεί και να υποστεί προετοιμασία τουλάχιστον σε μια ελάχιστη πίεση η οποία ξεκινά από 4 έως 9bar, ενώ η επιθυμητή ελάχιστη πίεση είναι μεγαλύτερη από 10bar. Με βάση την εμπειρία, οι ανασκαφές και οι μετρήσεις πραγματοποιούνται χρησιμοποιώντας αισθητήρες συντονισμού χαμηλής συχνότητας περίπου κάθε 100 μέτρα. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν ενδείξεις διαρροής, είτε με τη χρήση φορητού ή πολυκαναλικού συστήματος ΑΕ, εξετάζονται νέες περιοχές σε μικρότερες αποστάσεις και εκτελούνται νέες μετρήσεις. Η γραμμική θέση σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια της απόκτησης παρέχει περισσότερες φορές μια ακριβή θέση διαρροής μέσα σε λίγα λεπτά, χωρίς περαιτέρω ανάλυση και η διαρροή επιβεβαιώνεται αμέσως.

Η εξασθένηση του σήματος ΑΕ φαίνεται να είναι υψηλότερη σε σωλήνες μικρής διαμέτρου (4 – 6’’). Σε αυτή την περίπτωση οι αισθητήρες πρέπει να τοποθετηθούν σε μικρότερες αποστάσεις. Επιπλέον, σε σωλήνες μικρής διαμέτρου, τα γραφήματα θέσης ΑΕ είναι ευρύτερα, δίνοντας ενδείξεις θέσης σε μεγάλο μέρος του σωλήνα (μπορεί να είναι μέχρι και 7m) αντί για ένα μόνο σημείο. Οι πηγές θορύβου, όπως το φορητό που διέρχεται από τον θαμμένο αγωγό, κτυπήματα που προέρχονται από αντλιοστάσια ή εγκαταστάσεις διυλιστηρίων, κινήσεις εδάφους στους αισθητήρες λόγω των ανοιγμένων οπών, άμμος που πέφτει στον αγωγό εξαιτίας του ανέμου κλπ., συνήθως εμφανίζονται και πρέπει να φιλτράρονται. Σε περίπτωση που ο σωλήνας διέρχεται από

διαφορετικούς τύπους εδάφους ή βάθους, αλλάζει η εξασθένηση του σήματος και μπορεί να περιπλέξει τη θέση της πηγής.

Τα σημερινά σύγχρονα συστήματα ΑΕ προσφέρουν αυξημένο δυναμικό εύρος (π.χ., χρησιμοποιώντας ανάλυση 18bit) και χαμηλό θόρυβο σε συνδυασμό με την επιλογή ροής κυματομορφής (π.χ., συστήματα PCI – 2 του PAC). Η ροή των κυματομορφών επιτρέπει την καταγραφή συνεχόμενων κυματομορφών της δραστηριότητας ΑΕ ανεξάρτητα από την προσαρμογή κατωφλίου σε υψηλή ευαισθησία και προσφέρει βελτιωμένες δυνατότητες αξιολόγησης και εντοπισμού στον χειριστή. Σε περίπτωση μικρών μήκων σωλήνων, η δοκιμή μπορεί να εκτελεστεί πλήρως με τη χρήση ενός φορητού οργάνου 2 καναλιών, όπως το Pocket's Pocket AE, το οποίο μπορεί να παράσχει ASL και ενδείξεις θέσης. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί προηγμένη επεξεργασία με τη χρήση ειδικού λογισμικού αναγνώρισης προτύπων προκειμένου να διακρίνεται ο θόρυβος από σήματα διαρροών και να προσδιοριστεί αξιόπιστη θέση διαρροής και/ή να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία αξιολόγησης, ιδιαίτερα στην περίπτωση της απομακρυσμένης παρακολούθησης αγωγών.

Δεδομένης της επιτυχούς εφαρμογής του ΑΕ για την ανίχνευση διαρροών σωληνώσεων γεμισμένων με υγρό, η απομακρυσμένη παρακολούθηση αγωγών είναι εφικτή και μπορεί να εφαρμοστεί ειδικά για τοπική και συνεχή παρακολούθηση γνωστών τομέων ανησυχίας σε υπόγειους αγωγούς. Τα σύγχρονα συστήματα ΑΕ, ηλιακά τροφοδοτούμενα, με ασύρματες συνδέσεις στο διαδίκτυο, είναι κατάλληλα για την απομακρυσμένη παρακολούθηση και τον έλεγχο των αγωγών. [25]

6.7 | Μελέτη εύρεσης της θέσης πηγής χρησιμοποιώντας ένα σύστημα ΑΕ για διάφορους τύπους διάβρωσης

Στην παρούσα εργασία, τέσσερις κύριοι τύποι διάβρωσης: οι ομοιόμορφοι, οι σκουριές, οι ρωγμές και οι σχισμές λόγω διάβρωσης (Stress Corrosion Cracking – SCC), χαρακτηρίστηκαν και προσδιορίστηκαν με ανάλυση ακουστικών εκπομπών (ΑΕ) χρησιμοποιώντας τις θέσεις τους και τις εξαγόμενες παραμέτρους από την ΑΕ. Οι τέσσερις αυτοί τύποι διάβρωσης συναντώνται στη βιομηχανία πετροχημικών. Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε ένα νέο σύστημα εντοπισμού με χρήση ΑΕ, χαμηλού κόστους βασισμένο σε έναν H/Y με Field Programmable Gate Array (FPGA – PC) και σε έναν αναλυτή LOCAN 320 AE. Δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα ήταν ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας SS304. Το σχέδιο των σημάτων ΑΕ από κάθε τύπο διάβρωσης σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας τη θέση και τη συσχέτιση τους. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν την ικανότητα του συστήματος FPGA – PC να καθορίζει τις θέσεις διάβρωσης. Οι

συσχετισμοί των παραμέτρων ΑΕ, συμπεριλαμβανομένων του εύρους, των μετρήσεων, των χτυπημάτων και του χρόνου, χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό διαφόρων τύπων διάβρωσης. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά της διαδικασίας διάβρωσης για κάθε τύπο εξηγούνται χρησιμοποιώντας τα σήματα ΑΕ που λαμβάνονται αντίστοιχα στις θέσεις πηγής, μαζί με την πειραματική παρατήρηση.

6.7.1| Εισαγωγή

Σε αρκετές βιομηχανίες, ιδιαίτερα πετροχημικές, η διάβρωση είναι μία από τις κύριες αιτίες καταστροφών στις κατασκευές και στα εξαρτήματα. Αυτές εντοπίζονται συχνά σε επικίνδυνες ζώνες όπου οι δομές ή τα εξαρτήματα σε μη αεριζόμενη περιοχή φέρουν βαριά φορτία. Οι δεξαμενές αποθήκευσης, τα δοχεία πίεσης και οι σωλήνες διαβρώνονται βαθμιαία με χημικές ή ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στο περιβάλλον τους. Οι κύριοι τύποι διάβρωσης που υπάρχουν συχνά είναι η σκουριά και η ομοιόμορφη διάβρωση. Ωστόσο, προκαλούν ανησυχία και οι ρωγμές διάβρωσης και σχισίματος (SCC). Ως εκ τούτου, απαιτούνται περιοδικές επιθεωρήσεις για την πρόληψη της καταστροφής από αυτές. Έχουν εφαρμοστεί για τον εντοπισμό και τον προσδιορισμό της σοβαρότητάς τους, αρκετές συμβατικές τεχνικές ΜΚΕ όπως οι ηλεκτρομαγνητικές δοκιμές. Ωστόσο, αυτές οι τεχνικές απαιτούν μεγάλη διακοπή της διαδικασίας και προετοιμασία, για παράδειγμα, αποστράγγιση υλικού από τα σημεία προς επιθεώρηση.

Η επιθεώρηση ΑΕ έχει εισαχθεί στο πρόβλημα και έχει αποκτήσει δημοτικότητα χάρη στην απόκριση της σε πραγματικό χρόνο. Η ΑΕ επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της περιοχής επιθεώρησης χωρίς διακοπή της διαδικασίας. Δεδομένου ότι τα ελαστικά κύματα χαμηλής στάθμης παράγονται μέσα στα υλικά μέσω της διαδικασίας διάβρωσης, μπορεί να εφαρμοστεί ΑΕ για την ανίχνευση και την παρακολούθηση της διάβρωσης. Η δραστηριότητα της ΑΕ από την πηγή διάβρωσης μπορεί να εξηγηθεί από διάφορες δυνατότητες, όπως πυρήνωση φυσαλίδων υδρογόνου, εξέλιξη φυσαλίδων υδρογόνου κοντά στα κοιλώματα και βλάβη των δειγμάτων στην διάβρωση σκουριάς.

Για να εντοπιστεί η διάβρωση, αναλύονται τα σήματα ΑΕ, που λαμβάνονται από μια κατάλληλη συστοιχία ανιχνευτών χρησιμοποιώντας εξοπλισμό και τεχνικές, για να εντοπιστεί η πηγή της. Τυπικά, οι τεχνικές για τη λειτουργία του εξοπλισμού και η σειρά των αισθητήρων ΑΕ αποτελούν κομμάτι ιδιοκτησίας των χειριστών. Για να προσδιοριστεί η σχετική σοβαρότητα της διάβρωσης, έχει χρησιμοποιηθεί ένας αριθμός δεδομένων θέσης από ανιχνευόμενες δραστηριότητες ΑΕ.

Ωστόσο, ο μηχανισμός διάβρωσης και η ανίχνευση διαφόρων τύπων διάβρωσης δεν έχουν προσδιοριστεί με σαφήνεια. Επί του παρόντος, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες στον τομέα της ανίχνευσης και ταξινόμησης των επιπέδων σοβαρότητας της διάβρωσης που ανιχνεύονται από

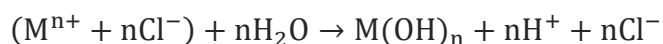
την επιθεώρηση ΑΕ. Οι κύριοι στόχοι αυτών των έργων είναι οι ομοιόμορφοι τύποι διάβρωσης. Ωστόσο, δεν λαμβάνονται συχνά υπόψη άλλοι τύποι επικίνδυνων διάβρωσης, όπως η ρωγμή και το SCC. Ο λόγος είναι πιθανώς επειδή τα χαρακτηριστικά αυτών των τύπων διάβρωσης που ανιχνεύονται από τις τεχνικές ΜΚΕ εξακολουθούν να είναι ασαφή.

Συνεπώς, η μελέτη που ακολουθεί αφορά τον προσδιορισμό της θέσης και του τύπου διάσπασης διάβρωσης μέσω ΑΕ. Το υλικό που επιλέχθηκε ήταν ο ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας AISI304. Χρησιμοποιήθηκε διαβρωτικό διάλυμα και ηλεκτροχημική μέθοδος για τον έλεγχο των διεργασιών διάβρωσης. Όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε το FPGA-PC ως σύστημα εντοπισμού πηγής ΑΕ, το οποίο έχει κατασκευαστεί και χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ασθενών σημάτων ΑΕ που παράγονται από πηγές διάβρωσης. Ένα FPGA σχεδιάστηκε για να καθορίσει τη διαφορά χρόνου άφιξης με έναν μετρητή υψηλής ταχύτητας. Χρησιμοποιήθηκε επίσης το εργαλείο ΑΕ LOCAN320 για την ανάλυση και αποθήκευση των παραμέτρων ΑΕ. Και τέλος έγινε χρήση μιας δισδιάστατης τεχνικής διαφοράς χρόνου άφιξης για την ανάλυση των θέσεων πηγής διάβρωσης και των συμπτώσεων ΑΕ χρησιμοποιώντας το υπάρχον σύστημα. Οι συσχετίσεις των παραμέτρων ΑΕ που αναλύθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν για να περιγράψουν τα χαρακτηριστικά διάβρωσης και τα πρότυπα των μηχανισμών τους. Τα δεδομένα μέτρησης μεταφέρθηκαν σε Η/Υ για ανάλυση των θέσεων πηγής διάβρωσης και του αριθμού των χτυπημάτων.

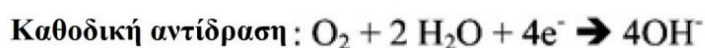
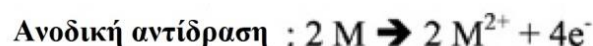
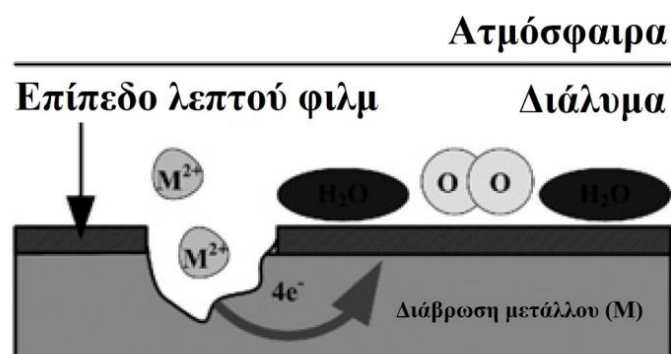
6.7.2| Θεωρία

Η διάβρωση επιστρέφει το μέταλλο στη κατάσταση σύνθεσής του σε χημικές ενώσεις. Αυτές οι ενώσεις είναι παρόμοιες με τα ορυκτά που παράγουν τα εξαγόμενα μέταλλα. Γι' αυτό τον λόγο, η διάβρωση έχει ονομαστεί εξορυκτική μεταλλουργία σε αντίστροφη κατάσταση και όλες οι αντιδράσεις υδατικής διάβρωσης θεωρούνται ηλεκτροχημικές. Οι περισσότερες αντιδράσεις περιλαμβάνουν νερό σε υγρές ή συμπυκνωμένες μορφές ατμού. Η αντίδραση που παράγει η διάβρωση απεικονίζεται στο Σχήμα 47.

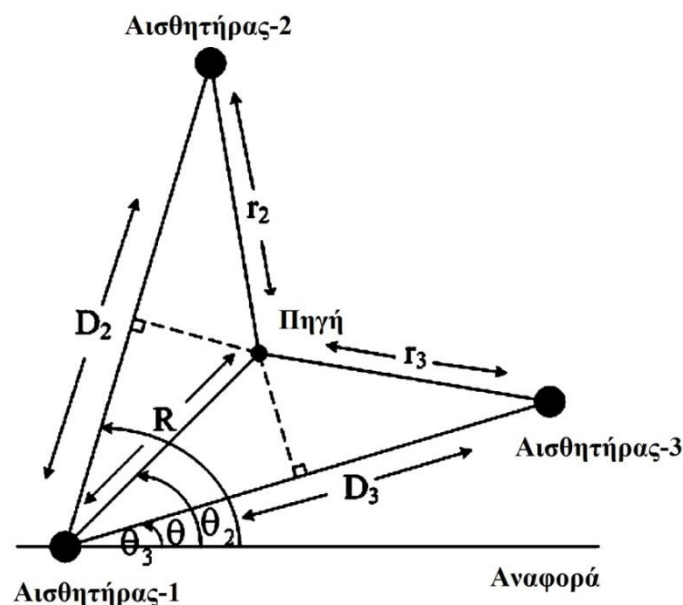
Από το Σχήμα 47, η ανοδική αντίδραση είναι η διάλυση μεταλλικών ιόντων (όπου το Μ υποδεικνύει το μέταλλο) διαμέσου του παθητικού φιλμ και η καθοδική αντίδραση περιλαμβάνει διαλυμένο οξυγόνο. Σε ένα μέσο που περιέχει χλωρίδιο, η αντίδραση μεταλλικού ιόντος παριστάνεται με



όπου n είναι το σθένος των διαλελυμένων ιόντων. Τα ιόντα χρωμίου υπάρχουν στον ανοξείδωτο χάλυβα ($M^{n+} = Cr^{3+}$).



Σχήμα 47. Μηχανισμός διάβρωσης



Σχήμα 48. Τρεις αισθητήρες τεχνικής εντοπισμού πηγής

Δεδομένου ότι παράγονται διάφορα σήματα ΑΕ καθ' όλη τη διαδικασία διάβρωσης, αναφέρθηκε δραστηριότητα ΑΕ από πηγές διάβρωσης με πολλές παραδοχές όπως πυρήνωση φυσαλίδων υδρογόνου, εξέλιξη υδρογόνου πλησίον κοιλοτήτων, βλάβη υλικού σε μηχανισμό διάβρωσης κλπ. Οι παράμετροι ΑΕ διάβρωσης που ανιχνεύτηκαν, αναλύονται χρησιμοποιώντας διάφορες σχέσεις, ενώ τα σήματα ΑΕ μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες: σήματα που παράγονται από τη διάβρωση και από τη μη διάβρωση. Παραδείγματα των τελευταίων είναι η κίνηση των φυσαλίδων υδρογόνου και η τάση που εφαρμόζεται στο δείγμα στην περίπτωση του SCC.

Παρατηρήθηκαν δισδιάστατα δεδομένα των γεγονότων ΑΕ, που αναλήφθηκαν εκτενώς σε

εργασίες σε μη γεωλογικές δομές. Σε αυτό το μοντέλο, χρησιμοποιούνται τρεις αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι σε ένα ανεπαίσθητο επίπεδο για την απλούστευση της κατάστασης. Η ταχύτητα του κύματος στο υλικό, V , θεωρείται σταθερή. Η γενική διάταξη απεικονίζεται στο Σχήμα 48.

Στην Σχήμα 48, η απόσταση και η γωνία της πηγής ΑΕ από τον αισθητήρα 1 μπορεί να προσδιοριστεί με επίλυση της ακόλουθης σειράς εξισώσεων:

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_2^2 - Dt_1^2 V^2}{Dt_1 V + D_2 \cos(\theta_2 - \theta)}$$

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_3^2 Dt_2^2 V^2}{Dt_2 V + D_3 \cos(\theta - \theta_3)},$$

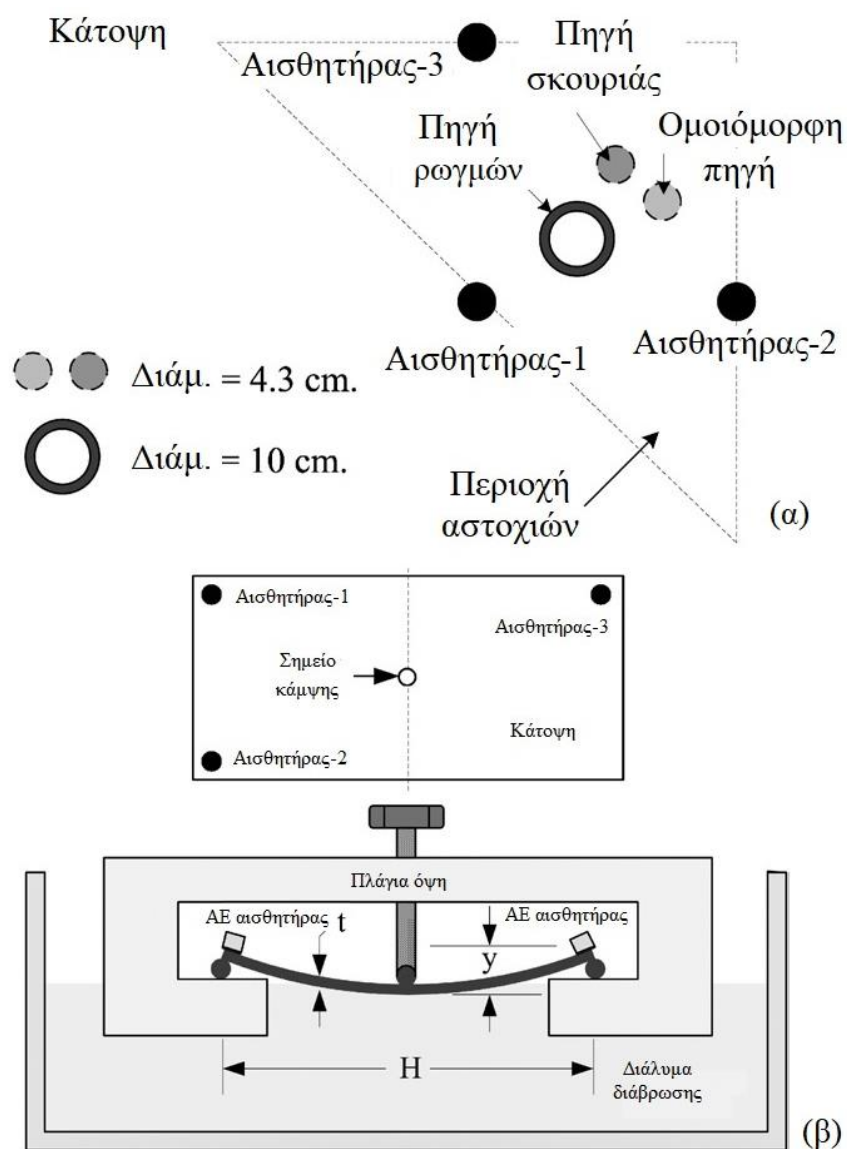
όπου οι Dt_1 και Dt_2 είναι οι χρονικές διαφορές μεταξύ των αισθητήρων 1 και 2 και 1 και 3 αντίστοιχα.

Οι παράμετροι χρονικής διαφοράς μπορούν να ληφθούν με απλές τεχνικές κατωφλίου ή διασταυρούμενης συσχέτισης. Η λύση της σειράς εξισώσεων δίνει τη θέση της πηγής σε πολική μορφή (R, θ) όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 48.

6.7.3| Υλικά και μέθοδοι

Στη παρούσα μελέτη, οι θέσεις ομοιόμορφης διάβρωσης, διάτρησης και SCC στον AISI304 ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα (SS304) εκτιμήθηκαν από ένα σύστημα ΑΕ. Το πάχος του δείγματος ήταν 1mm παρασκευασμένο με υγρή άλεση χρησιμοποιώντας μία σειρά φύλλων καρβιδίου του πυριτίου έως 1.200grit, κατόπιν ξεπλύθηκαν με αποσταγμένο νερό και ξηράθηκαν σε ψυχρό αέρα. Η ομοιόμορφη διάσπαση και η σχισμή δημιουργήθηκαν σε 500x500mm² και η SCC παρήχθη σε δείγματα 12x450mm² SS304, αντίστοιχα.

Η θέση και η διάσταση κάθε πηγής διάβρωσης απεικονίζονται στο Σχήμα 49. Το πείραμα για την παραγωγή κάθε τύπου διάβρωσης που αναφέρθηκε παραπάνω εκτελέστηκε ξεχωριστά. Οι αισθητήρες ΑΕ που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη σημάτων ΑΕ ήταν μορφοτροπείς τύπου R15 με συχνότητα συντονισμού 150kHz. Τα σήματα ΑΕ που λήφθηκαν από αισθητήρες ενισχύθηκαν με προ – ενισχυτή κέρδους 60dB. Οι θέσεις υπολογίστηκαν με FPGA – PC και οι παράμετροι ΑΕ προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας το όργανο LOCAN 320 με το όριο πλάτους 45dB.



Σχήμα 49. Εγκατάσταση για την παραγωγή (α) ομοιόμορφης διάβρωσης, σκουριάς & ρωγμών (β) πυρόλυση διάβρωσης λόγω τάσης

6.7.4| Δημιουργία διάβρωσης

▪ Ομοιόμορφη διάβρωση

Χρησιμοποιήθηκε υψηλή συγκέντρωση χλωριδίου και ισχυρά όξινα διαλύματα ως διαβρωτικά περιβάλλοντα για την παραγωγή ομοιόμορφης διάβρωσης. Το διαβρωτικό περιβάλλον ήταν ένα διάλυμα 30% NaCl ελεγχόμενο σε pH 1. Χρησιμοποιήθηκε HCl για τον έλεγχο του pH και την επιτάχυνση της πυρήνωσης φυσαλίδων υδρογόνου στην σταθερή κατάσταση των καταστραμμένων παθητικών φλογών και του διαλύματος. Το διάλυμα τοποθετήθηκε σε έναν κυλινδρικό πλαστικό σωλήνα διαμέτρου 4,3cm επί της ενεργού ζώνης συστοιχίας αισθητήρα AE όπως φαίνεται στο Σχήμα 50 (α).

▪ Διάβρωση σκουριάς και ρωγμών

Για την διάβρωση σκουριάς και ρωγμών που παρουσιάζεται στο Σχήμα 49 (α), το ηλεκτροχημικό περιβάλλον ήταν ένα διάλυμα NaCl 3% με pH 2 για να διευκολυνθεί ο μηχανισμός διάβρωσης. Το δυναμικό διάσπασης (E_{pit}) ελέγχθηκε ηλεκτροχημικά με ένα ποτενσιοστάτη (Solartron 1284) για να επιταχύνει τη διάβρωση.

Για τη διάβρωση ρωγμών, χρησιμοποιήθηκε ένα ειδικό δοχείο για τη μεταφορά του διαλύματος που περιείχε τα στοιχεία διάβρωσης στην άκρη του δοχείου. Ένα μικρό κενό δημιουργήθηκε μέσα στην άκρη του δοχείου για να δημιουργηθεί μια μη αεριζόμενη περιοχή. Η διαφορά μεταξύ της διάβρωσης σκουριάς και της διάβρωσης ρωγμών είναι ότι η τελευταία παρουσιάζεται ιδιαίτερα στην μη αεριζόμενη περιοχή του δείγματος.

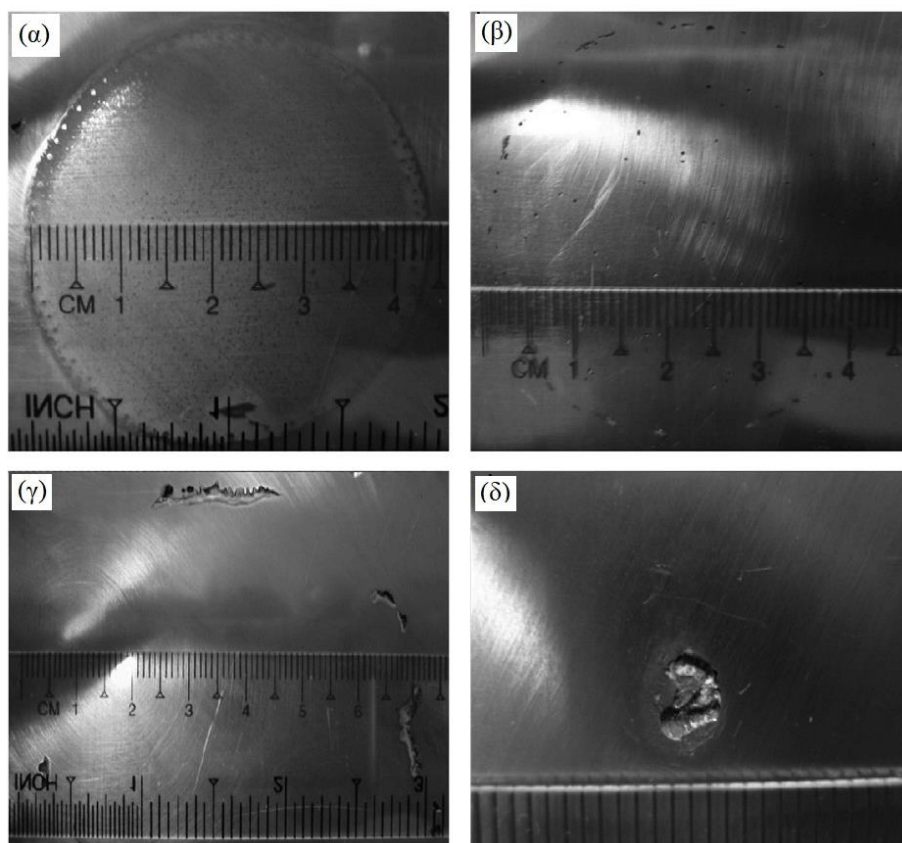
▪ Σπασίματα διάβρωσης λόγω πίεσης (Stress Corrosion Cracking – SCC)

Για τα SCC, η διάβρωση λόγω τάσης σε τεντωμένη δέσμη φορτώσεως τριών – σημείων χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή τάσεως εφελκυσμού επί του δείγματος σύμφωνα με το πρότυπο ASTM G39 – 90. Η ελαστική τάση στο μέσο του δείγματος μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

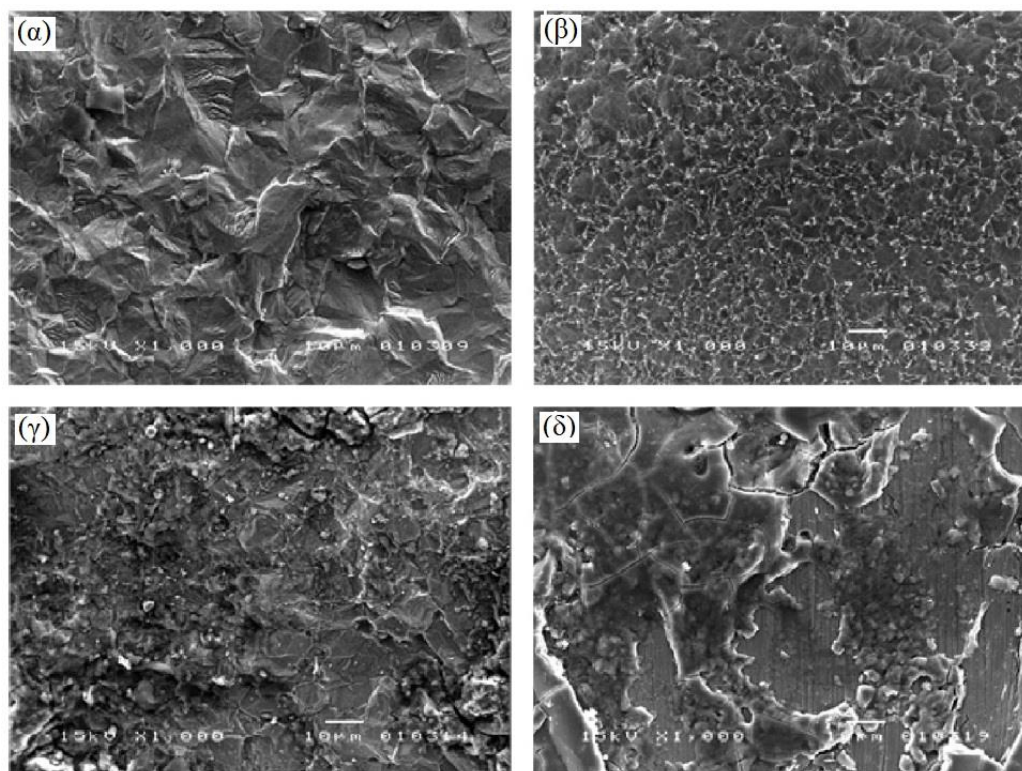
$$\sigma = \frac{6Ety}{H^2}$$

όπου το σ είναι η μέγιστη εφελκυστική τάση, το E το μέτρο ελαστικότητας, το t το πάχος του δείγματος, το y το μέγιστο πάχος και H απόσταση μεταξύ των εξωτερικών στηριγμάτων. Το δείγμα βυθίστηκε στο ηλεκτροχημικό διάλυμα 3% NaCl με pH 2. Χρησιμοποιήθηκε ένας ποτενσιοστάτης για την επιτάχυνση της διεργασίας διάβρωσης. Η μέθοδος παραγωγής SCC και η πειραματική τοποθέτησή της φαίνονται στο Σχήμα 49 (β).

Η παραγόμενη διάβρωση στο πείραμα που περιλαμβάνει ομοιόμορφη διάβρωση, σκουριάς, ρωγμών και SCC, σε δείγμα SS304 πάχους 1mm παρουσιάστηκε για τα μακρογραφικά αποτελέσματα στη Φωτογραφία 43 και x1000 μικρογραφικές πληροφορίες στη Φωτογραφία 44.



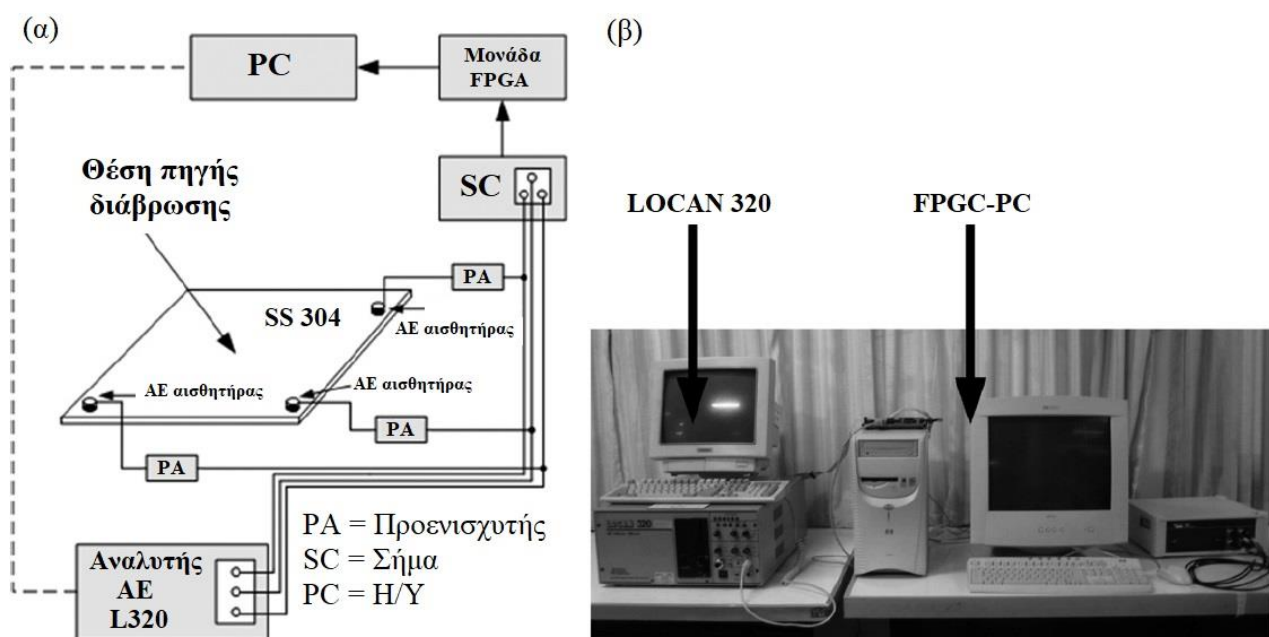
Φωτογραφία 49. Διάβρωση στο δείγμα SS304 (α) ομοιόμορφη, (β) σκουριάς, (γ) ρωγμών και (δ) SCC



Φωτογραφία 50. Μικρογραφικό: (α) ομοιόμορφο, (β) σκουριάς, (γ) ρωγμών και (δ) SCC

6.7.5| Συστήματα ΑΕ

Για το σύστημα εντοπισμού πηγής ΑΕ χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα FPGA – PC για τον υπολογισμό της διαφοράς χρόνου άφιξης από σήματα που λήφθηκαν από μια σειρά τριών αισθητήρων ΑΕ στο δείγμα. Το FPGA – PC σχεδιάστηκε για να λειτουργεί ως μετρητές 16 – bit και η ανάλυση χρόνου για την ανίχνευση πηγών διάβρωσης ήταν 1ms (παλμοί ρολογιού 1MHz). Σημειώνεται ότι η μέγιστη συχνότητα ρολογιού που μπορεί να επιτευχθεί με τον τρέχοντα σχεδιασμό είναι περίπου 30MHz. Τα σήματα ΑΕ που λήφθηκαν από τους αισθητήρες ρυθμίστηκαν για να υποστηρίξουν την ανίχνευση του χτυπήματος ΑΕ χρησιμοποιώντας το ίδιο κατώφλι εύρους με εκείνο του αναλυτή LOCAN320 ΑΕ.



Σχήμα 50. Οι τρεις διατάξεις αισθητήρων ΑΕ και το σύστημα για τον εντοπισμό πηγής

Το συνολικό σύστημα αποτελείται από τους αισθητήρες ΑΕ, τους προενισχυτές, τη μονάδα επεξεργασίας σήματος, την μονάδα FPGA, τον υπολογιστή και τον αναλυτή LOCAN320 ΑΕ. Αναλύθηκε μια δισδιάστατη ή επίπεδη αναπαράσταση για να αποδείξει τα αποτελέσματα της θέσης διάβρωσης. Η ακρίβεια και η ταχύτητα του ήχου των δειγμάτων ελέγχθηκαν μέσω ενός προτύπου θραύσης μολυβιού – μολύβδου ASTM E976. Το Σχήμα 50 δείχνει ένα διάγραμμα της πειραματικής ρύθμισης για εντοπισμό πηγής διάβρωσης. Το FPGA σχεδιάστηκε ως μετρητής πολλών καναλιών υψηλής ταχύτητας με σειριακή επικοινωνία χρησιμοποιώντας τη γλώσσα VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language). Όταν ενεργοποιηθούν όλοι οι αισθητήρες ΑΕ, τα δεδομένα καταμέτρησης από το ηλεκτρονικό σύστημα με βάση το FPGA αποστέλλονται στον υπολογιστή μέσω θύρας RS – 232. Το FPGA λειτουργεί σε περίπου 30ms ανά

κύκλο. Ο Η/Υ χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των διαφορών του χρόνου άφιξης των αισθητήρων ώστε τελικά να μπορούν να εκτιμηθούν οι συντεταγμένες της διάβρωσης.

6.7.6| Αποτελέσματα και συζήτηση

Τα πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης για διάφορους τύπους διάβρωσης δείχνουν συσχετισμό των παραμέτρων ΑΕ με τις θέσεις πηγής τους. Οι θέσεις, οι μετρήσεις έναντι του πλάτους, τα χτυπήματα σε σχέση με το πλάτος και έναντι του χρόνου και οι σωρευτικές μετρήσεις έναντι του χρόνου κλπ, είναι τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για να εξηγήσουν τους διάφορους τύπους διάβρωσης και τους μηχανισμούς τους.

▪ Θέση

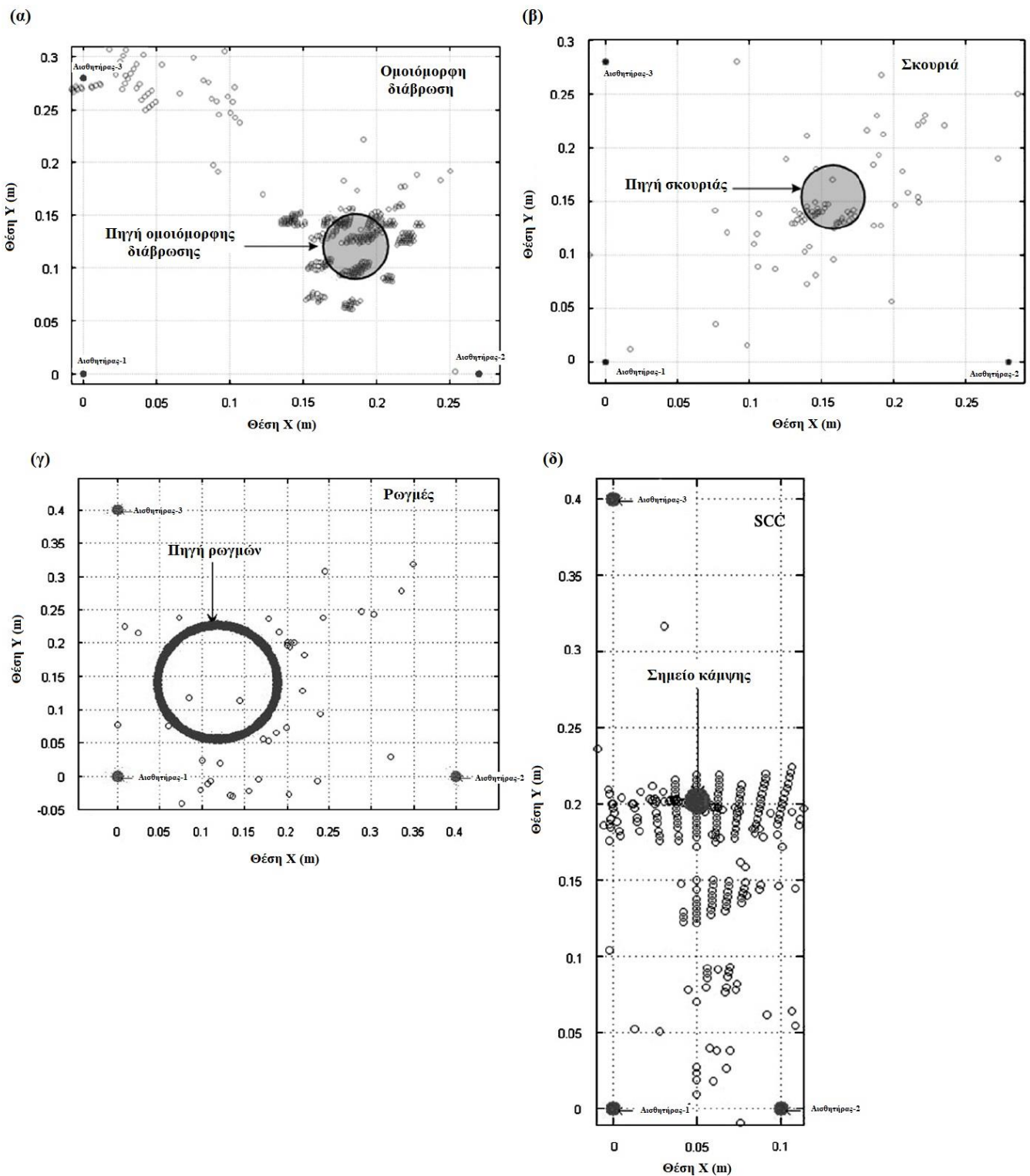
Οι θέσεις κάθε τύπου διάβρωσης απεικονίζονται στο Σχήμα 51. Μια μεγάλη ποσότητα ομοιόμορφης διάβρωσης (93,7%) που ανιχνεύτηκε από το σύστημα, ομαδοποιήθηκε στην πραγματική περιοχή της ομοιόμορφης πηγής. Οι θέσεις διάβρωσης δεν είναι τέλεια τοποθετημένες μέσα στην περιοχή της ομοιόμορφης πηγής, αλλά δείχνουν ορισμένα συσσωματώματα που διαδίδονται γύρω από την περιοχή πηγής. Ο λόγος πίσω από αυτό είναι ίσως από την εξασθένηση του ήχου και την αβεβαιότητα της διαδρομής διάδοσης κυμάτων, η οποία προκαλεί σφάλματα στον υπολογισμό των χρονικών διαφορών της ρύθμισης Χρόνου κλειδώματος χτυπήματος (Hit Lockout Time – HLT), χρόνος για την αποφυγή ψευδούς χτυπήματος κατά τη διάρκεια της αποσύνθεσης σήματος του συστήματος εντοπισμού ΑΕ. Κατά συνέπεια, δημιουργήθηκαν ορισμένα συστηματικής – θέσης σφάλματα εντοπισμού λόγω του πολύπλοκου υπολογισμού της πηγής.

Οι θέσεις σκουριάς και ρωγμών εξαπλώθηκαν γύρω από την περιοχή των πηγών διάβρωσης. Σε αυτή την περίπτωση, μπορούν να ανιχνευθούν λιγότερα σήματα σε σύγκριση με αυτά της ομοιόμορφης διάβρωσης. Στα πειράματα που χρησιμοποιούσαν ποτενσιοστάτη, επεκτάθηκε η ηλεκτροχημική πηγή για την παραγωγή διάβρωσης για την εξάλειψη του θορύβου από τις φυσαλίδες γύρω από το ηλεκτρόδιο δυναμοστατικού. Επιπλέον, η εξασθένηση σύνθετων διαδρομών πολλαπλασιασμού κύματος, που παράγεται από τις διαβρωμένες κοιλότητες, προκάλεσε κάποια αλλοίωση της θέσης της ανιχνευόμενης διάβρωσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ποσότητα των δεδομένων που λαμβάνονται από τη διάβρωση ρωγμών ήταν πολύ μικρότερη από εκείνη από τη δημιουργία σκουριάς, λόγω της περιορισμένης περιοχής διάβρωσης γύρω από την άκρη του δοχείου.

Για την περίπτωση διάβρωσης SCC, το αποτέλεσμα δείχνει ακριβείς θέσεις των περιστατικών διάβρωσης στο μέσο του δείγματος όπου εφαρμόστηκε η τάση. Κάποια σημεία διάβρωσης εντοπίστηκαν στην περιοχή κάτω από τους αισθητήρες 2 και 3. Μπορεί να οφείλονται σε ασύμμετρη κάμψη κατά τη διάρκεια της εφαρμογής του τάσης και σφάλμα HLT στο σύστημα.

■ Ανάλυση παραμέτρων ΑΕ

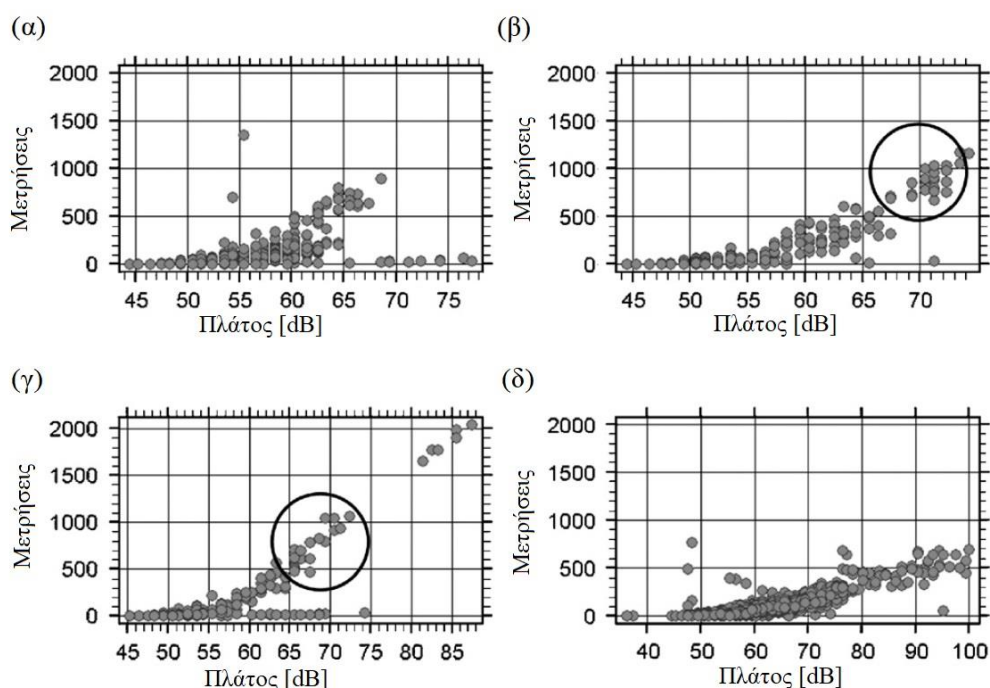
Μετρήσεις έναντι πλάτους



Σχήμα 51. Αποτελέσματα θέσης και τα χαρακτηριστικά τους για ομοιόμορφη διάβρωση, σκουριάς, ρωγμών και SCC αντίστοιχα

Η συσχέτιση των παραμέτρων ΑΕ μεταξύ μετρήσεων και πλάτους απεικονίζεται στο Σχήμα 52

με διαφορετικές κλίμακες. Τα σήματα ΑΕ που παράγονται από ομοιόμορφη διάβρωση στο Σχήμα 52 (α) ομαδοποιούνται γύρω από την πραγματική θέση της πηγής διάβρωσης. Τα σήματα αποκάλυψαν ένα μεγάλο όγκο δεδομένων με υψηλό πλάτος (μεταξύ 45 και 63dB) και αριθμό των μετρήσεων που δεν υπερβαίνει τις 500. Ορισμένες μετρήσεις ήταν πάνω από 500 με πλάτος μεγαλύτερο από 63dB, αλλά μερικές είχαν υψηλά πλάτη (μέχρι 75dB) με λιγότερες μετρήσεις. Από τις παρατηρήσεις και από τις θεωρίες του μηχανισμού διάβρωσης, δημιουργήθηκαν σήματα ΑΕ από πολυάριθμες φούσκες φυσαλίδων υδρογόνου που προκλήθηκαν από τα συνεχώς κατεστραμμένα παθητικά φιλμ της επιφάνειας υλικού.



Σχήμα 52. Συσχετισμοί μετρήσεων – πλάτους

Στο Σχήμα 52 βλέπουμε τους συσχετισμούς μετρήσεων – πλάτους για τύπους διάβρωσης (α) ομοιόμορφη, (β) σκουριάς, (γ) ρωγμών και (δ) SCC σε διαφορετικές κλίμακες.

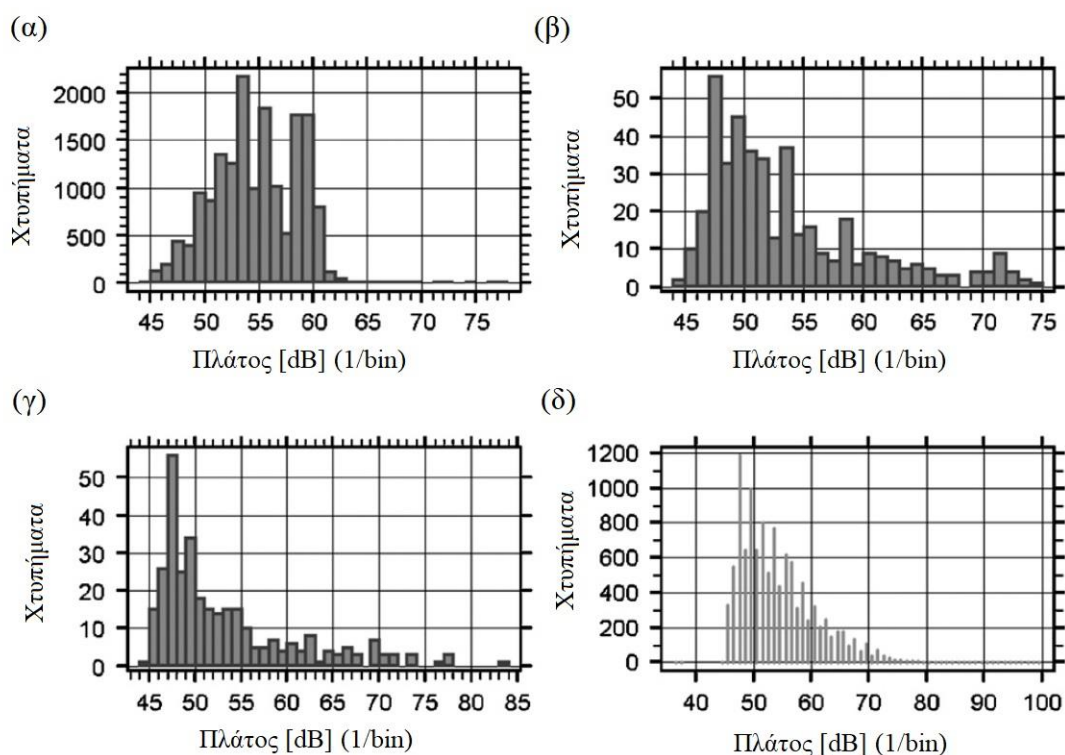
Οι σχέσεις μέτρησης – πλάτους της σκουριάς και των ρωγμών που απεικονίζονται στο Σχήμα 52 (β) και (γ) έχουν κάποιες ομοιότητες. Η ποσότητα των δεδομένων ήταν μικρότερη από εκείνη που προέκυψε από ομοιόμορφη διάβρωση. Ωστόσο, τόσο η αύξηση όσο και οι μετρήσεις ήταν υψηλότερες. Επιπλέον, η συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων και των μεγεθών ήταν κοντά σε μια ευθεία γραμμή. Τα δεδομένα υψηλού πλάτους και μέτρησης ΑΕ προήλθαν πιθανώς από την παθητική θραύση του φιλμ στην αρχή και των δύο τύπων διεργασιών διάβρωσης. Ο μηχανισμός διάδοσης για τη σκουριά είναι ο ίδιος και στις ρωγμές, όπου τα συμπυκνωμένα ιόντα χλωρίου (Cl^-) προκαλούν τοπική οξείδωση μέσα σε πειράματα σκουριάς και ρωγμών. Επομένως, οι συσχετισμοί

των παραμέτρων ΑΕ και των δύο τύπων διάβρωσης ήταν παρόμοιοι σε αυτή τη μελέτη. Ωστόσο, η έναρξη της σκουριάς είναι διαφορετική από εκείνη των ρωγμών. Απαιτείται ένα κενό μεταξύ των δύο επιφανειών του υλικού για να προκαλέσει τη διάβρωση της ρωγμών, ενώ η σκουριά δεν έχει γεωμετρικές απαιτήσεις.

Για το SCC στο Σχήμα 52 (δ), μεγάλη ποσότητα δεδομένων δείχνει επίσης μία γραμμική σχέση μεταξύ μετρήσεων και πλάτους. Ο μεγαλύτερος αριθμός μετρήσεων έφτασε τους 700 και τα πλάτη ήταν μέχρι 100dB. Η ποσότητα του υψηλού πλάτους ΑΕ μπορεί να προκληθεί από ερπυσμούς ρωγμών και εφαρμοζόμενες τάσεις.

Χτυπήματα έναντι πλάτους

Τα χτυπήματα ΑΕ και οι σχέσεις πλάτους των τεσσάρων τύπων διάβρωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 52 με διαφορετικές κλίμακες.



Σχήμα 53. Συσχέτιση πλάτους – χτυπημάτων

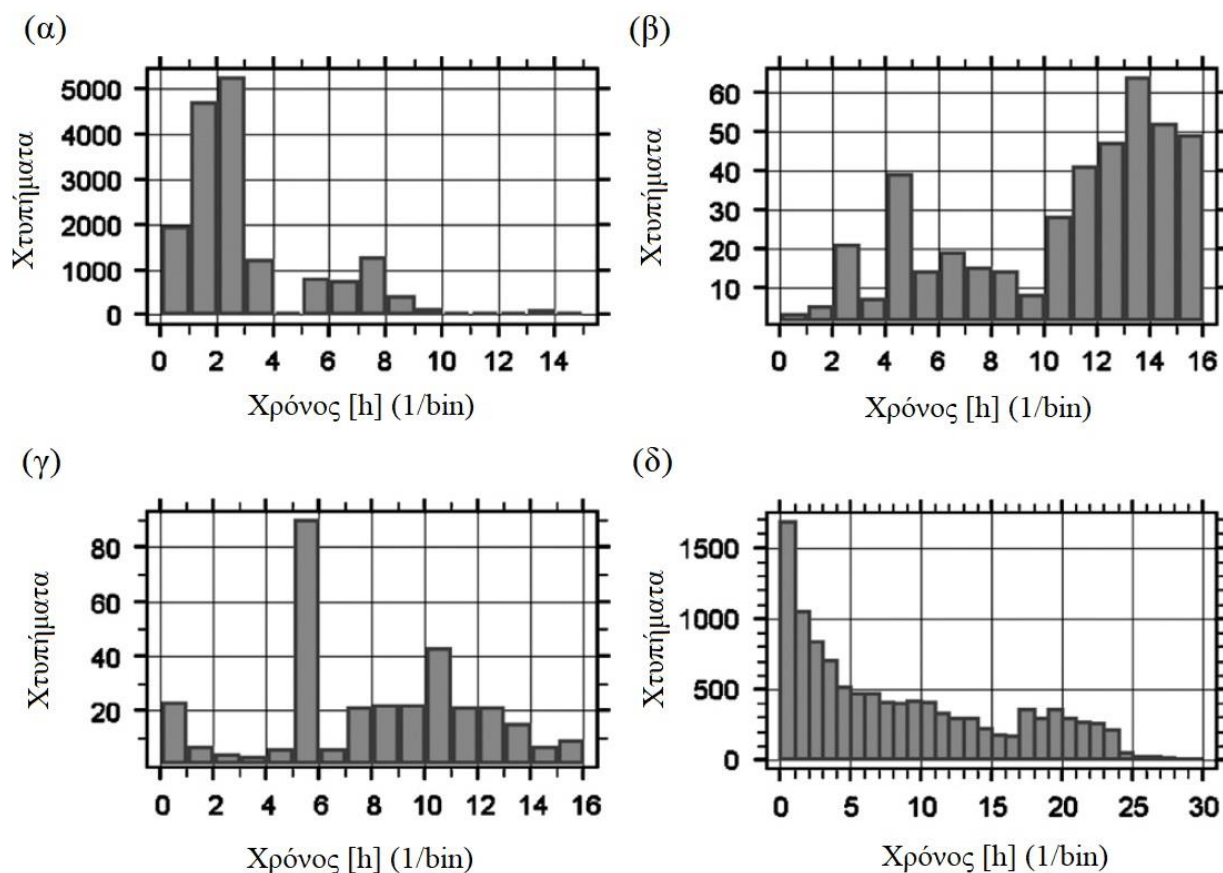
Στο Σχήμα 52 βλέπουμε τους συσχετισμούς πλάτους – χτυπημάτων για τύπους διάβρωσης (α) ομοιόμορφη, (β) σκουριάς, (γ) ρωγμών και (δ) SCC σε διαφορετικές κλίμακες.

Η συσχέτιση για την ομοιόμορφη διάβρωση στο Σχήμα 53 (α) δείχνει ένα μεγάλο ποσοστό επιδράσεων εντός εύρους που κυμαίνονται από 45 έως 65dB. Η κατανομή πλάτους ήταν παρόμοια με την κανονική κατανομή με τα υψηλότερα χτυπήματα σε πλάτος 53dB. Οι κατανομές για τη σκουριά και τις ρωγμές είναι παρόμοιες με μικρή ποσότητα πλήθους και διευρυμένο εύρος πλάτους όπως φαίνεται στο Σχήμα 53 (β) και (γ). Τα χτυπήματα δεν υπερβαίνουν το 60 για όλες τις τιμές

εύρους με τις υψηλότερες εμφανίσεις στα 48dB και για τους δύο τύπους διάβρωσης. Οι διανομές τους εξαπλώθηκαν στην κλίμακα 45 – 75 dB για σκουριά και 45 – 85dB για ρωγμές. Στο Σχήμα 53 (δ), ο τύπος SCC παρουσιάζει ένα χαρακτηριστικό πολύ υψηλών χτυπημάτων σε εύρος περίπου 48dB και εκθετική μείωση σε υψηλότερα πλάτη.

Χτυπήματα εναντίον χρόνου

Η ανάλυση των δεδομένων δείχνει έναν μεγάλο αριθμό χτυπημάτων από ομοιόμορφη διάβρωση στις πρώτες 4 ώρες και στη συνέχεια μειώνεται σημαντικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 54 (α). Επειδή η ομοιόμορφη διάβρωση εμφανίζεται σε όλη την επιφάνεια του υλικού από την υψηλή συγκέντρωση χλωριδίου και το ισχυρό όξινο διάλυμα, η μείωση στο τέλος μπορεί να οφείλεται στη μείωση της συγκέντρωσης του διαλύματος. Για τα αποτελέσματα της διάβρωσης σκουριάς όπως φαίνεται στο Σχήμα 54 (β), η ποσότητα χτυπήματος ήταν κοντά σε εκείνη της διάβρωσης ρωγμών όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 54 (γ).



Σχήμα 54. Συσχέτιση χτυπήματος – χρόνου

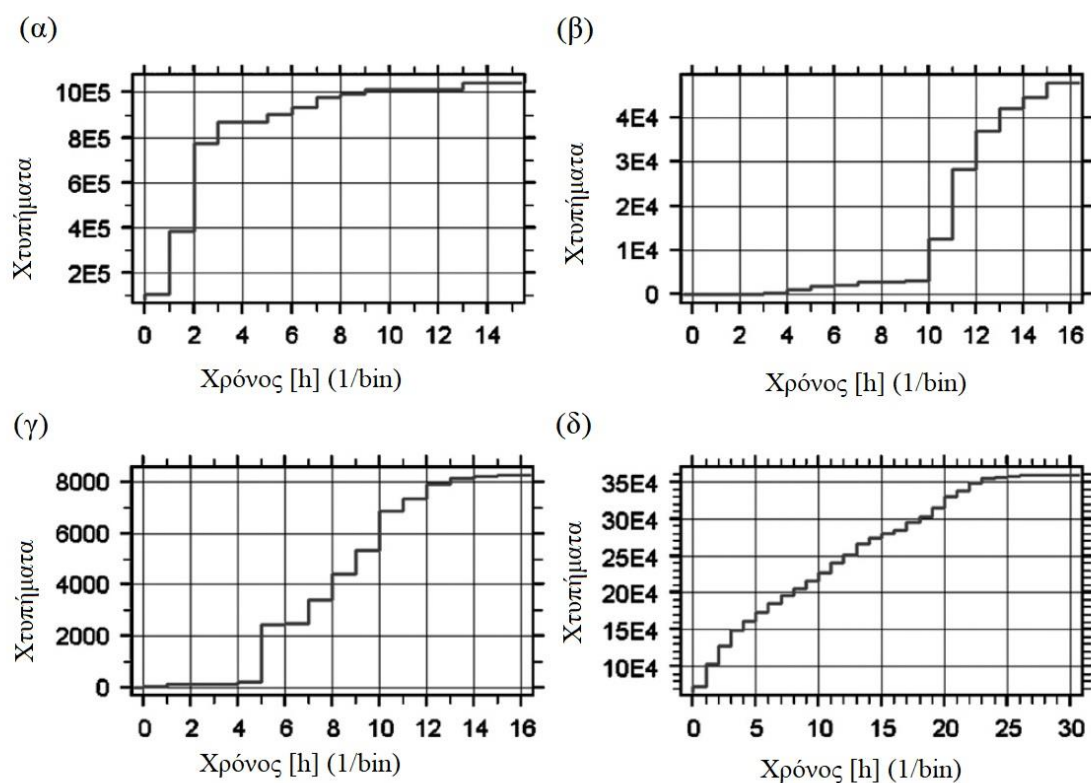
Στο Σχήμα 54 βλέπουμε τη συσχέτιση χτυπήματος – χρόνου για τύπους διάβρωσης (α) ομοιόμορφη, (β) σκουριάς, (γ) ρωγμών και (δ) SCC σε διαφορετικές κλίμακες.

Τα χτυπήματα εφαρμόστηκαν οποιαδήποτε στιγμή, ωστόσο, ορισμένα ήταν εμφανή περίπου από την 8η ώρα μέχρι το τέλος της διαδικασίας με τη διάδοση σκουριάς και ρωγμών. Οι υψηλές

κορυφές των ΑΕ χτυπημάτων κατά την 5η και 6η ώρα σκουριάς και ρωγμών ήταν πιθανώς τα σημεία της θραύσης του φιλμ στην αρχή της διαδικασίας διάβρωσης. Σημειώνουμε ότι το μέγεθος της περιοχής δοκιμής είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει την ηλεκτροχημική αντίδραση και τον έλεγχο της ταχύτητας διάβρωσης. Για τη σκουριά και τις ρωγμές, η αρχική διάβρωση είναι μεγαλύτερη και ταχύτερη σε μια μικρή περιοχή δοκιμών από μια μεγαλύτερη περιοχή. Έτσι, το παθητικό φιλμ, όπως αναμενόταν, καταστράφηκε αργά σε αυτή την εργασία. Οι επιδράσεις ΑΕ της SCC που απεικονίζονται στο Σχήμα 54 (δ) ήταν πολύ υψηλές στην αρχή της διαδικασίας και στη συνέχεια μειώθηκαν εκθετικά με το χρόνο.

▪ Αθροιστικές μετρήσεις

Η ανάλυση των αθροιστικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει τα πρότυπα διαφόρων τύπων διάβρωσης. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν διαφορετικές τάσεις διακρίσεως του τύπου διάβρωσης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 54 με διαφορετικές κλίμακες.



Σχήμα 55. Ποσοστά αρίθμησης για διάφορους τύπους διάβρωσης

Στο Σχήμα 55 βλέπουμε ποσοστά αρίθμησης για τύπους διάβρωσης (α) ομοιόμορφη, (β) σκουριάς, (γ) ρωγμών και (δ) SCC σε διαφορετικές κλίμακες.

Οι μετρήσεις για ομοιόμορφη διάβρωση (Σχήμα 55 (α)) δείχνουν πολύ υψηλό ρυθμό μετρήσεως

(περίπου 220.000 μετρήσεις ανά ώρα) από την αρχή έως την 4η ώρα του πειράματος και ρυθμό ταχέως μειούμενο σε περίπου 20.000 μετρήσεις ανά ώρα μετά από αυτό μέχρι το τέλος της 15ης ώρας.

Αυτό μπορεί να οφείλεται στη μείωση της συγκέντρωσης του διαλύματος όπως περιγράφεται στην προηγούμενη υποενότητα. Τα αποτελέσματα της διάβρωσης σκουριάς και ρωγμών έχουν παρόμοια σχέδια όπως αυτά που φαίνονται στο Σχήμα 55 (β) και (γ). Διαπιστώνεται ότι οι μετρήσεις ΑΕ για τους δύο τύπους είναι αρχικά πολύ χαμηλές, κατόπιν όμως αυξάνονται γρήγορα μέχρι το τέλος της διαδικασίας. Στην αρχή του πειράματος, το παθητικό φιλμ καταστράφηκε χωρίς εμφάνιση φυσαλίδων υδρογόνου.

Οι αθροιστικές μετρήσεις αποκαλύφθηκαν κοντά στο έδαφος και από τους δύο τύπους. Μετά από την 5η ώρα, σχηματίστηκαν τρύπες πυθμένα με συνεχή δραστηριότητα σκουριάς και δημιουργήθηκαν σήματα ΑΕ. Οι μετρήσεις από τη σκουριά έδειξαν εκτεταμένο σωρευτικό ρυθμό σε σχέση με αυτές από ρωγή μετά την 10η ώρα λόγω της μεγαλύτερης δημιουργούμενης περιοχής διάβρωσης. Για το SCC που φαίνεται στο Σχήμα 55 (δ), ο ρυθμός των μετρήσεων ήταν μάλλον σταθερός σε 16.500 μετρήσεις ανά ώρα από την αρχή έως τη 20η ώρα, ως αποτέλεσμα της σταθερής εφαρμοζόμενης τάσης. Στη συνέχεια, ο ρυθμός μέτρησης έπεσε γρήγορα μέχρι το τέλος του πειράματος.

6.7.7| Συμπεράσματα

Ένα νέο και χαμηλού κόστους σύστημα ΑΕ βασισμένο σε FPGA – PC προτείνεται για την ανίχνευση και τον εντοπισμό της δραστηριότητας διάβρωσης. Η πλειονότητα της ομοιόμορφης δραστηριότητας διάβρωσης ομαδοποιήθηκε στις πραγματικές θέσεις διάβρωσης. Τα πρότυπα των συσχετίσεων των παραμέτρων ΑΕ που ανιχνεύθηκαν από τη διάβρωση χρησιμοποιήθηκαν για να διακρίνουν και να περιγράψουν τον μηχανισμό διάβρωσης.

Από τα αποτελέσματα της ομοιόμορφης διάβρωσης, μεγάλη ποσότητα μετρήσεων ΑΕ που ανιχνεύτηκε στις πρώτες 4 ώρες σχετιζόταν με την ποσότητα των φυσαλίδων που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας από την παρατήρηση. Αυτή η δραστηριότητα ΑΕ μπορεί να προέρχεται από τη διαδικασία πυρήνωσης υδρογόνου που προκύπτει από την καταστροφή και την παραγωγή παθητικών φιλμ στην επιφάνεια του υλικού. Σε αυτή την περίοδο, ο ρυθμός καταστροφής ξεπερνά εκείνο της δημιουργίας παθητικού φιλμ. Ένα άλλο σημείο υποστήριξης είναι ότι τα πλάτη του σπασίματος των φυσαλίδων είναι σχετικά υψηλά μέσα σε ένα στενό εύρος. Μετά από αυτή την περίοδο, τα χτυπήματα μειώθηκαν ταχύτατα, δεδομένου ότι ο ρυθμός της παθητικής καταστροφής και παραγωγής είναι παρόμοιος σε αυτό το στάδιο.

Για την σκουριά και τη διάβρωση ρωγμών, οι μετρήσεις ΑΕ ήταν υψηλές με ευρύ φάσμα

πλάτους. Ο ρυθμός μέτρησης ήταν χαμηλός στην αρχική περίοδο αλλά αυξήθηκε γρήγορα στα μεταγενέστερα στάδια. Αρχικά, η διάβρωση κατέστρεψε σταδιακά το παθητικό φιλμ του υλικού και στη συνέχεια σχηματίστηκε κρούστα και εμπόδισε την επαναδημιουργία του φιλμ λόγω του ελεγχόμενου περιβάλλοντος. Συνεπώς, η σκουριά συνεχίστηκε στις οπές σκισίματος και παρήγαγε συνεχώς τη δραστηριότητα.

Για το SCC, ο ρυθμός μέτρησης ήταν υψηλός, επεκτάθηκε σε ένα ευρύ φάσμα πλάτους και έπεσε εκθετικά στα τελικά στάδια. Το SCC παράχθηκε στο μέσο του δείγματος και βυθίστηκε στο ηλεκτροχημικό περιβάλλον. Στα αρχικά στάδια, παρατηρήθηκε μεγάλη τάση στο δείγμα μετά την έναρξη της διάβρωσης, κατόπιν μειώθηκε κατά μήκος της περιόδου διάβρωσης. Όλες οι δραστηριότητες διάβρωσης παράχθηκαν από την εφαρμοσμένη καταπόνηση και το σπάσιμο λόγω διάβρωσης ήταν εμφανές στις αναμενόμενες θέσεις και τα πρότυπα διάβρωσης. Το Σχήμα 54 απεικονίζει τα αποτελέσματα ομοιόμορφης διάβρωσης, σκουριάς, ρωγμών και SCC σε δείγμα SS304 πάχους 1mm. [25]

6.8| Έλεγχος διάβρωσης σε πετρελαιοφόρα πλοία με χρήση ΑΕ

Η μεταφορά πετρελαίου στη θάλασσα με πετρελαιοφόρα μπορεί να γίνει πολύ επικίνδυνη για το περιβάλλον λόγω πετρελαιοκηλίδας σε περίπτωση ατυχήματος, με θανατηφόρες συνέπειες για τη χλωρίδα και την πανίδα, π.χ. τα ατυχήματα του Prestige και του Erika. Τα ατυχήματα προκαλούνται συχνά από την υποβάθμιση της δομικής ακεραιότητας (διάβρωση). Ένα πρόγραμμα που χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή είχε την πρόθεση να αναπτύξει ασυνεχή και μόνιμα εγκατεστημένα συστήματα δοκιμών ΑΕ για την έγκαιρη ανίχνευση επιθέσεων διάβρωσης σε πετρελαιοφόρα πλοία.

Μετά από εκτεταμένες ερευνητικές εργασίες σχετικά με τη διαδικασία διάβρωσης και την επίδρασή της στην εκπεμπόμενη ακουστική εκπομπή, η τεχνολογία ήταν σε θέση να διακρίνει το σημαντικό θόρυβο διάβρωσης από τον θόρυβο διαταραχών. Μετά την ανάπτυξη εγγενώς ασφαλών (Ex – proof) αισθητήρων και τα δύο συστήματα ελέγχθηκαν για την επικύρωσή τους σε πραγματικά πλοία (ναυτικό και εμπορικά πετρελαιοφόρα). Οι δοκιμές αυτές αποδεικνύουν ότι τα μόνιμα συστήματα είναι σε θέση να ελέγχουν κατά τη διάρκεια των περισσότερων συνθηκών λειτουργίας και ο έλεγχος σημείων έχει την ικανότητα να ελέγχει και να επιβεβαιώνει την διάβρωση της δομής όταν το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι ή σε αγκυροβόλιο.

6.8.1| Εισαγωγή

Για τη χημική και πετροχημική βιομηχανία, η πιο σημαντική πηγή ενέργειας και η βάση για περαιτέρω προϊόντα είναι το αργό πετρέλαιο. Αυτό το αργό πετρέλαιο πρέπει να μεταφερθεί από την

προέλευσή του (πετρελαϊκά πεδία) σε περαιτέρω επεξεργασία (διυλιστήριο, χημικό εργοστάσιο) σε μεγάλες αποστάσεις. Εκτός από τις υπεράκτιες μεταφορές, αυτή η αλυσίδα μεταφοράς περιλαμβάνει συχνά θαλάσσιες διαβάσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται κυρίως από πετρελαιοφόρα.

Όπως αποδείχθηκε συχνά κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η θαλάσσια μεταφορά μπορεί να καταστεί επικίνδυνη για το περιβάλλον. Ακόμη και η κανονική ναυτιλιακή λειτουργία έχει ως αποτέλεσμα ένα συγκεκριμένο ποσό διαρροής, αλλά πολύ πιο σημαντικοί κίνδυνοι συμβαίνουν κατά τη μεταφορά του πλοίου, εάν ένα από τα εν ενεργεία δεξαμενόπλοια έχει υποστεί ατύχημα, όπως συνέβη τα τελευταία χρόνια.

Στο παρελθόν, πολλά μεγάλης έκτασης θαλάσσια ατυχήματα με τεράστια ποσότητα πετρελαίου στη θάλασσα, ζημιογόνα για το οικολογικό σύστημα και τη χλωρίδα και την πανίδα της θάλασσας και των ακτών για πολλά χρόνια. Ιδιαίτερα για τις ευρωπαϊκές ακτές, όπου το 90% του πετρελαίου φτάνει δια θαλάσσης και όταν περίπου 3.000 δεξαμενόπλοια μεταφέρουν πετρέλαιο και πετρελαϊκά προϊόντα προς και από τα ευρωπαϊκά λιμάνια, ο κίνδυνος πετρελαιοφόρων είναι αρκετά υψηλός, όπως αποδείχθηκε από τις πιο πρόσφατες καταστροφές.

Εκτός από πολλά ατυχήματα που προκλήθηκαν από ανθρώπινα λάθη, όπως το Amoco Cadiz ή το Exxon Valdez, πολλές καταστροφές κατά την τελευταία δεκαετία προκλήθηκαν από την υποβάθμιση της δομής του πλοίου. Τα πιο αξιοσημείωτα όπως παρουσιάζονται στις Φωτογραφίες 45 και 46 ήταν:

- το Erika, το οποίο το 1999 έριξε περισσότερο από 20.000 τόνους πετρελαίου και μόλυνε 400χλμ. την ακτή της Βρετάνης και κατέστρεψε όχι μόνο τη χλωρίδα και την πανίδα (π.χ. διάσημες καλλιέργειες στρειδιών) αλλά και την τουριστική κίνηση για χρόνια
- το Prestige, το οποίο το 2002 έριξε περισσότερο από 35.000 τόνους βαρύ μαζούτ με παρόμοια ποσότητα που παρέμεινε στο εσωτερικό του και μολύνει από τότε μέχρι και σήμερα εκατοντάδες χιλιόμετρα στις ακτές της Ισπανίας και της Γαλλίας

Τα ατυχήματα αυτά προκλήθηκαν από υλική υποβάθμιση που δημιουργήθηκε και/ή επηρεάστηκε από μη ανιχνευμένη διάβρωση.

Παρόλο που η κανονική επιθεώρηση πλοίων θα διεξάγεται από τις νηογνώμονες πλοίων σε καθορισμένες χρονικές περιόδους, είναι προφανές ότι οι επιθεωρήσεις πλοίων που βασίζονται σε τυχαία επιλεγμένα σημεία δοκιμής είναι χρονοβόρες και δαπανηρές. Εν τω μεταξύ, το πλοίο διαβρώνεται υπό κανονικές συνθήκες θαλάσσης, το οποίο είναι αποδεκτό για συγκεκριμένη ποσότητα και λαμβάνεται υπόψη κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού. Η εξωτερική διάβρωση επιλύεται επαρκώς, τα νέα δεξαμενόπλοια επιπλέον επικαλύπτονται και κατασκευάζονται ως δεξαμενόπλοια διπλού κελύφους, όπου το κέλυφος του πλοίου χωρίζεται από το τοίχωμα της δεξαμενής. Όμως, όλες οι δοκιμές για επιθεώρηση πλοίων βασίζονται σε τυχαία και στατιστική

βάση και επομένως το έσχατο αποτέλεσμα δεν θα είναι ποτέ 1%. Ομοίως, οι περίοδοι δοκιμής είναι μερικές φορές πολύ μακρές για την ανίχνευση της εξέλιξης ελαττωμάτων, π.χ. για τη διάβρωση, η οποία μπορεί να σπάσει το τοίχωμα σε σύντομο χρονικό διάστημα.



Φωτογραφία 51. Βύθιση πετρελαιοφόρων Erika (πρώτη) και Prestige (δεύτερη)



Φωτογραφία 52. Ατυχήματα και περιβαλλοντικές συνέπειες Erika (αριστερά) & Prestige (δεξιά)

6.8.2| Στόχοι του έργου

Όλα αυτά τα γεγονότα, κυρίως τα καταστροφικά ατυχήματα, οδήγησαν στη δημιουργία κοινοπραξίας για ένα έργο έρευνας και ανάπτυξης για την ανίχνευση όλων αυτών των μορφών διάβρωσης και την επικύρωσή τους για την επίδρασή τους στην ασφάλεια των πλοίων μέσω ΑΕ. Η βάση για αυτό το έργο ήταν ο εμπορικά διαθέσιμος έλεγχος διάβρωσης με ΑΕ επίπεδων πυθμένων των δεξαμενών αποθήκευσης στη βιομηχανία πετρελαίου. Κατά τη διάρκεια αυτού του τύπου δοκιμής ανιχνεύθηκε η διάβρωση των πλακών πυθμένα με εξωτερικούς εφαρμοζόμενους αισθητήρες. Με βάση την ταχεία εξέλιξη της επεξεργασίας των δεδομένων, η κοινοπραξία ήταν πεπεισμένη ότι αυτό το είδος δοκιμών θα μπορούσε επίσης να εφαρμοστεί σε πλοία με το όριο που προκλήθηκε από το τραχύ περιβάλλον.

Η σύνθεση αυτής της κοινοπραξίας, η οποία ζήτησε τη χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (ΕΚ), παρατίθεται στον ακόλουθο Πίνακα 13.

Η αίτηση για το έργο έγινε δεκτή από την ΕΚ και το έργο άρχισε την 1η Νοεμβρίου 2002 με αριθ. σύμβασης EVG1 – CT – 2002 – 00067.

Ο κύριος στόχος του έργου ήταν η διεξαγωγή της απαραίτητης βασικής έρευνας, η ανάπτυξη δύο διαφορετικών τύπων εξοπλισμού δοκιμών ΑΕ και ο έλεγχος του εξοπλισμού δοκιμών μαζί με τους κανόνες εφαρμογής στα πετρελαιοφόρα για τη διάβρωση μέσω της εφαρμογής ΑΕ.

Εταιρεία	Ρόλος	Ειδίκευση
TÜV Austria(A)	Συντονιστής, Οργανισμός Ελέγχου ΑΕ	Διαπιστευμένος οργανισμός δοκιμών, επιθεώρησης, πιστοποίησης και βαθμονόμησης
Vallen Syst. (D)	Προγραμματιστής εξοπλισμού	Κατασκευαστής εξοπλισμού ΑΕ
Gdansk University of Techn. (PL)	Πραγματογνώμονες πλοίων, οργανισμός ελέγχου	Πανεπιστήμιο, τμήμα υπεράκτιων και υλικών κατασκευής πλοίων
Polski Rejestr Statkow(PL)	Ικανότητα ταξινόμησης πλοίων	Οργανισμός ταξινόμησης πλοίων
Institute for Applied Research (PL)	Πρακτορείο δοκιμών ΑΕ	Οργανισμός δοκιμών ΑΕ
Maritime Institute Gdansk (PL)	Τεχνογνωσία διάβρωσης	Ναυτική έρευνα, εμπειρογνωμοσύνη διάβρωσης θαλάσσιου περιβάλλοντος

Πίνακας 13. Δομή της κοινοπραξίας

▪ Σύστημα μόνιμης εγκατάστασης (on – line παρακολούθησης)

Αυτό το εξαιρετικά εξελιγμένο σύστημα είναι σε θέση να κάνει ανάκτηση δεδομένων κατά τη μεταφορά του πετρελαιοφόρου και να επιλέγει τον ιδανικό χρόνο δοκιμής, ανάλογα με τον περιβαλλοντικό θόρυβο (π.χ τρικυμιώδης θάλασσα, κινητήρες, έλικες, διέλευση άλλων πλοίων). Τα αποτελέσματα αποστέλλονται στο λογισμικό ελέγχου και επίβλεψης του πλοίου και να παρέχουν στο πλήρωμα του πλοίου on – line πληροφορίες σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση της δομής του. Αυτό το σύστημα έχει το μεγάλο πλεονέκτημα ότι δεν θα χρειαστεί καμία στάση πριν από την εκφόρτωση στο λιμάνι ή στην πλατφόρμα φόρτωσης/εκφόρτωσης. Τα ασαφή δεδομένα, τα οποία πρέπει να αξιολογηθούν από εκπαιδευμένο και έμπειρο άτομο, μεταφέρονται αυτόματα σε κέντρο αξιολόγησης επί τόπου.

▪ Σύστημα ασυνεχούς μέτρησης (spot testing)

Για δεξαμενόπλοια, όταν δεν υπάρχει μόνιμη εγκατάσταση ή όταν δεν έχει νόημα να υπάρχει, η μέθοδος δοκιμής πρέπει να είναι ικανή να ανιχνεύει και να εντοπίζει πιθανή διάβρωση με λίγους, επεμβατικούς αισθητήρες στο αγκυροβόλιο ή στο λιμάνι, αμέσως πριν από την εκφόρτωση. Οι δοκιμές αυτές πρέπει να εκτελούνται εντός δύο ωρών και πρέπει επίσης να αξιολογούνται στο ίδιο κέντρο αξιολόγησης επί τόπου. Οι πληροφορίες για τις δοκιμές αυτές πρέπει να είναι διαθέσιμες στη ναυτιλιακή εταιρεία, στον νηογνώμονα και στη λιμενική αρχή.

6.8.3| Βασική έρευνα

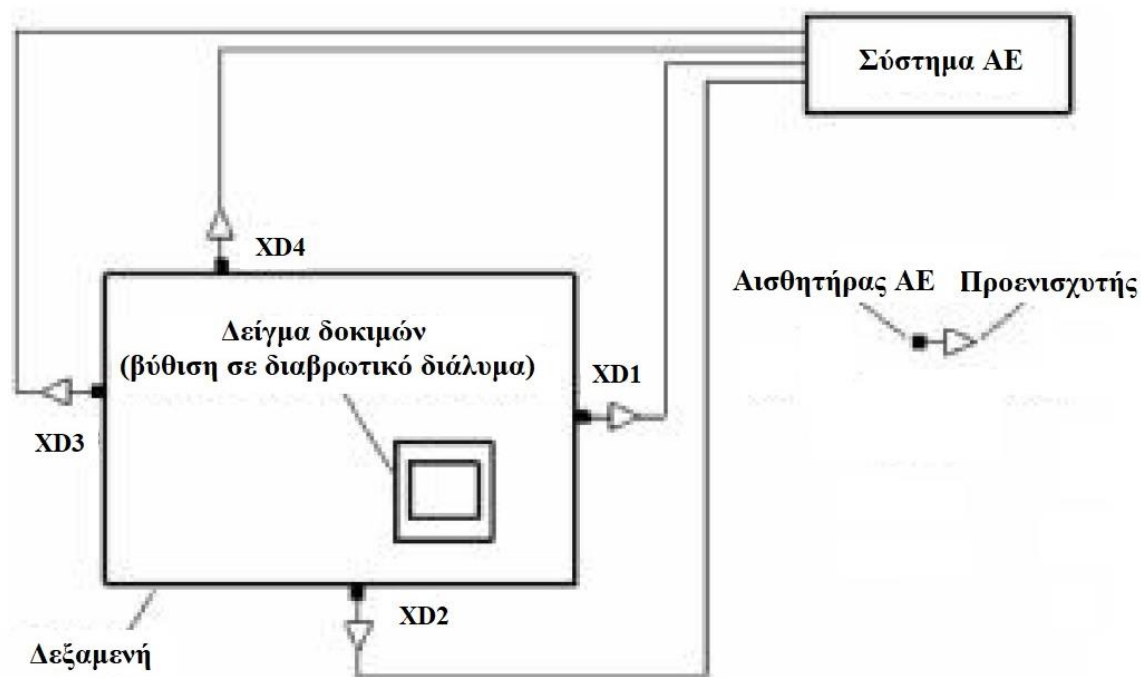
Το κύριο καθήκον του 1ου μέρους αυτού του έργου ήταν ο έλεγχος της σκοπιμότητας εφαρμογής της τεχνικής ΑΕ για τη δοκιμή διάβρωσης των πετρελαιοφόρων. Για το σκοπό αυτό οι δοκιμές έγιναν σε δύο κατευθύνσεις:

- εργαστηριακές δοκιμές σε δείγματα χάλυβα για την ανίχνευση διεργασιών διάβρωσης και
- μετρήσεις φόντου (θορύβου) σε πραγματικά πετρελαιοφόρα.

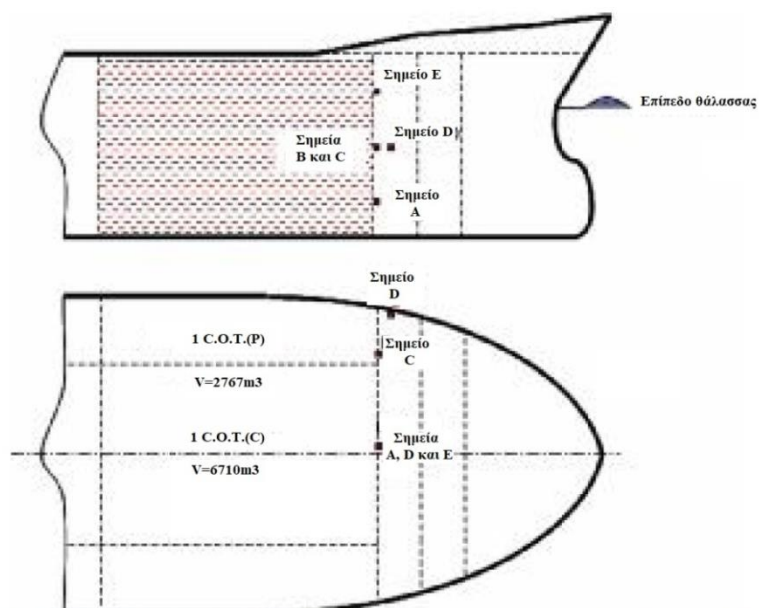
Στην αρχή επιλέχθηκαν τα πιο συνηθισμένα δομικά υλικά πλοίων. Ελήφθησαν δείγματα από αυτά τα δομικά υλικά πλοίων καθώς και προ – διαβρωμένα δείγματα από πλοία σε ναυπηγεία επισκευής. Αυτά τα δείγματα έπρεπε να υποβληθούν σε διαφορετικές διεργασίες διάβρωσης, οι οποίες επιλέχθηκαν, με βάση έρευνες από ναυτιλιακούς και οργανισμούς ταξινόμησης σχετικά με τις αιτίες καταστροφικών διαβρώσεων στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Τα δείγματα βυθίστηκαν σε όξινο περιβάλλον (3% διάλυμα NaCl, pH=4) όπως φαίνεται στην Εικόνα 45. Επιπροσθέτως, παρακολούθηθηκε η φθορά των δειγμάτων με ηλεκτρολυτική μέθοδο διάβρωσης. Η διαδικασία ηλεκτρολυτικής διάβρωσης έδωσε την ευκαιρία να ελεγχτεί η ταχύτητα της διεργασίας διάβρωσης και να συγκριθεί με την παρακολούθηση ΑΕ. Διερευνήθηκαν κυρίως οι πιο επικίνδυνοι και ταχύτεροι τύποι διάβρωσης για τη δομή των πλοίων.

Στην Εικόνα 45 βλέπουμε πάνω την διάταξη του εργαστηρίου δοκιμής και κάτω μια φωτογραφία της λεκάνης δοκιμής για μετρήσεις διάβρωσης σε δείγματα χάλυβα δομικών κατασκευών.

Για να αποκτήσουμε τον θόρυβο υποβάθρου των πλοίων, έπρεπε να εφαρμόσουμε τους αισθητήρες σε πλοία δεμένα στο λιμάνι, στο αγκυροβόλιο, στην ανοικτή θάλασσα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας και επίσης κατά τη διάρκεια του απόπλους. Για το λόγο αυτό ξεκίνησαν πρώτα οι μετρήσεις στο μικρό δεξαμενόπλοιο ναυτικού ORP Baltyk ώστε να διαπιστωθούν οι διαφορετικές ιδιαιτερότητες των πετρελαιοφόρων. Η μέτρηση αυτή έγινε επίσης για να επιλεγούν οι καλύτερες θέσεις ως προς την εφαρμογή αισθητήρων για τη μέτρηση υποβάθρου. Αργότερα έγιναν μετρήσεις σε ένα μεγάλο πετρελαιοφόρο Icarus II με μέγεθος 35.000 DWT (Dead Weight tonnage). Σε αυτό το δεξαμενόπλοιο εφαρμόστηκαν οι αισθητήρες σε μια άδεια δεξαμενή έρματος στον τοίχο σε άμεση επαφή με τις δεξαμενές φορτίου γεμισμένες με αργό πετρέλαιο και το κέλυφος. Ελήφθησαν δεδομένα από το κεντρικό ντεπόζιτο καθώς και από μια δεξαμενή πτέρυγας πάνω και κάτω από τη στάθμη της θάλασσας αλλά επίσης και θόρυβος από το κέλυφος σε άμεση σύνδεση με τη θάλασσα όπως φαίνεται στις Εικόνες 46 και 47.



Εικόνα 45. Διαδικασία ηλεκτρολυτικής διάβρωσης

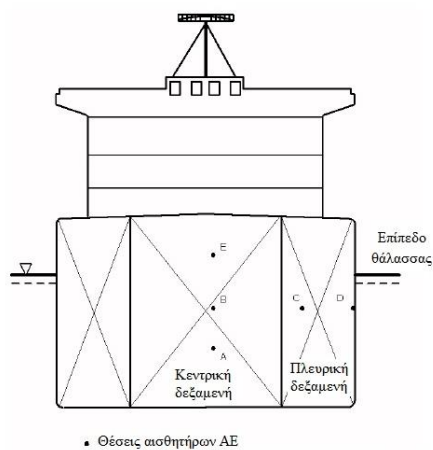


Εικόνα 46. Μετρήσεις θορύβου υποβάθρου στο M/T Icarus II

Στην Εικόνα 46 έχουμε επάνω την διάταξη μετρήσεων θορύβου υποβάθρου στο M/T Icarus II και κάτω την κατάσταση της δεξαμενής νερού έρματος κοντά στο τόξο.

Όλες οι δοκιμές, εργαστηρίου και υποβάθρου, πραγματοποιήθηκαν με εμπορικά διαθέσιμο εξοπλισμό ΑΕ της Vallen και χρησιμοποιήθηκαν από τον συντονιστή του έργου TÜV Austria (τύπου: AMSY 5). Διαφορετικοί αισθητήρες χρησιμοποιήθηκαν για να καλύψουν την περιοχή συχνοτήτων, όπου αναμενόταν τα χρήσιμα σήματα διάβρωσης ΑΕ καθώς και ο θόρυβος του περιβάλλοντος. Όλα τα δεδομένα συγκεντρώθηκαν και αποθηκεύτηκαν σε μια δομημένη βάση δεδομένων για τη διαδικασία αξιολόγησης, η οποία είχε ως αποτέλεσμα τον διαχωρισμό των δεδομένων ΑΕ που προέρχονται από τους διάφορους τύπους διάβρωσης και τα δεδομένα υποβάθρου που καλύπτουν τις πλήρεις υπογραφές ΑΕ από όλα τα πιθανά συμβάντα ενεργειών πλοίων και του περιβάλλοντος.

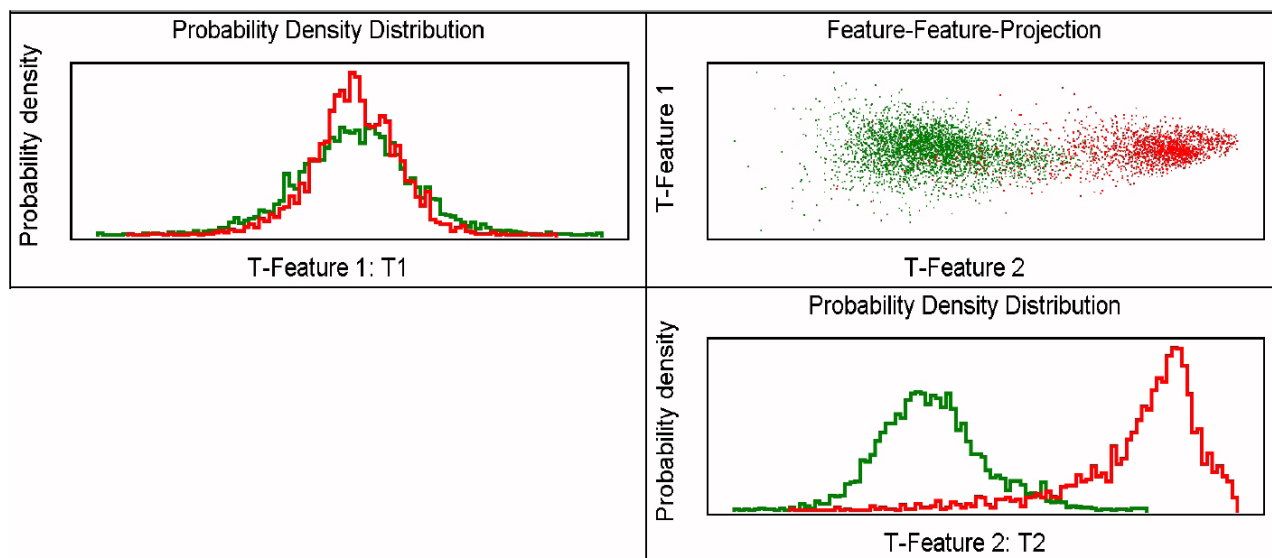
Με βάση το γεγονός ότι τα σήματα ΑΕ δεν έχουν διασπορά συχνότητας καθώς δεν υφίσταται σχεδόν καθόλου εξασθένηση υγρών και διαρροή ενέργειας παρά μόνο από την ογκομετρική διασπορά, θα μπορούσαμε να περιμένουμε το ίδιο περιεχόμενο συχνότητας κοντά στην πηγή, καθώς και σε αξιοσημείωτες αποστάσεις. Αυτό οδήγησε στην εφαρμογή ενός συστήματος τομέα συχνοτήτων αναγνώρισης προτύπων Visual Class TM για τη στατιστική ταξινόμηση των σημάτων ΑΕ. Με αυτό το λογισμικό τα χαρακτηριστικά εξαρτήσεων συχνοτήτων των σημάτων ΑΕ συγκρίνονται σε ένα πολυδιάστατο χώρο και η ταξινόμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση δεδομένα εκπαίδευσης για επιλεγμένες συχνότητες που δίνουν τον καλύτερο διαχωρισμό για το παρόν πρόβλημα όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 20.



Εικόνα 47. Σκίτσο του μεσαίου τμήματος του πλοίου (αριστερά) του δεξαμενόπλοιου Icarus II (δεξιά)

Τα πρώτα αποτελέσματα μας έδειξαν ότι το μέγεθος του υποβάθρου ήταν περίπου τριπλάσιο από τα σήματα διάβρωσης, αλλά διαπιστώθηκε ότι αναμενόταν λόγω της πηγής προέλευσης ότι δηλαδή ο θόρυβος υποβάθρου έχει απόκριση συχνότητας μόνο μέχρι τα 50kHz και η ΑΕ που προήλθε από τη διάβρωση είχε επίσης υψηλότερης συχνότητας περιεχόμενα. Αυτές οι διαφορές έδωσαν την ευκαιρία να μειώσουμε το θόρυβο του περιβάλλοντος στο ίδιο επίπεδο όπως με τα

σήματα διάβρωσης μέσω ενός φίλτρου ζώνης διέλευσης. Τα σήματα διάβρωσης επηρεάστηκαν ελάχιστα από το φιλτράρισμα της ζώνης διέλευσης και έτσι ήταν δυνατό να διαβιβαστούν τα δεδομένα για περαιτέρω επεξεργασία δεδομένων.



Διάγραμμα 20. Διαχωρισμός θορύβου διάβρωσης (κόκκινο) και υποβάθρου (πράσινο)

Στο Διάγραμμα 20 ο διαχωρισμός θορύβου διάβρωσης (κόκκινο) και υποβάθρου (πράσινο) έγινε με τη βοήθεια αναγνώρισης προτύπου βάσει περιοχής συχνότητων.

Τα δύο χαρακτηριστικά T1 και T2 έχουν καλύτερη ισχύ διαχωρισμού. Οι πρώτες δοκιμές έδειξαν την εφαρμογή του ταξινομητή που προέκυψε από τα στοιχεία της εκπαίδευσης και έδωσαν τη σωστή ταξινόμηση των άλλων δεδομένων δοκιμών με βαθμολογία άνω του 80% έως και 90%, πράγμα που είναι αρκετά καλό για ένα στατιστικό σύστημα.

6.8.4| Δοκιμές σε δεξαμενόπλοια, διαπίστευση εξοπλισμού

Στο τέλος της βασικής έρευνας θα μπορούσε να αποδειχτεί ότι η μέθοδος είναι εφικτή για την ανίχνευση και διάκριση των σημάτων ΑΕ, τα οποία παράγονται από τη διάβρωση και από τη διατάραξη του θορύβου από το περιβάλλον και την ίδια τη δομή.

Για να εκτελεστούν πραγματικές δοκιμές με πραγματικά δείγματα διάβρωσης στο εμπορικό δεξαμενόπλοιο, έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ένας εγγενώς Ex – safe αισθητήρας, διότι αν ανοίξουμε τη δεξαμενή ολόκληρη η ζώνη γύρω από το άνοιγμα είναι Ex – Zone 0. Λόγω του γεγονότος ότι δεν υπήρχε αισθητήρας που διατίθεται στο εμπόριο σε αυτό το στάδιο του έργου, η Vallen άρχισε να αναπτύσσει έναν τέτοιο αισθητήρα μαζί με όλο το κύκλωμα έως το όριο πριν από τον εξοπλισμό μέτρησης. Για την ανάπτυξη αυτή οι απαιτήσεις για την ασφάλεια έρχονται σε αντίθεση με τις απαιτήσεις για την ασφάλεια των αισθητήρων. Η Vallen τα κατάφερε και ο αισθητήρας πιστοποιήθηκε από το ηλεκτρικό τμήμα της TÜV Austria ως Ex – Proof σύμφωνα με την οδηγία

ATEX 94/9/EC. Αυτοί οι αισθητήρες προσαρμόστηκαν από την συχνότητα εξάρτησής τους, στην αναμενόμενη συχνότητα για δοκιμές διάβρωσης. Σε αντίθεση με τη δοκιμή ΑΕ για δεξαμενές αποθήκευσης με επίπεδο πυθμένα, δεν πρέπει να εξετάζουμε ελέγχους διαρροής και ως εκ τούτου ο αισθητήρας έχει υψηλότερη κεντρική συχνότητα από ότι για δεξαμενές αποθήκευσης με επίπεδο πυθμένα.

Σε αυτό το στάδιο αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ο ίδιος αισθητήρας βάσης για τον κανονικό εσωτερικό αισθητήρα για τη μόνιμη εγκατάσταση και επίσης για τον αισθητήρα πολλαπλών στοιχείων, ο οποίος κατασκευάστηκε από μια υποδοχή αισθητήρα και τέσσερις μεμονωμένους αισθητήρες ως αισθητήρια στοιχεία.

Η απαραίτητη επανάληψη ενός μέρους των εργαστηριακών δοκιμών για τη δημιουργία ενός καλά καθορισμένου ταξινομητή για τον νέο τύπο αισθητήρα, έδωσε την ευκαιρία να αναπτυχθούν και πραγματικά δείγματα διάβρωσης.

Αυτά τα δείγματα αναπτύχθηκαν σε 2 συνεργάτες την TÜV και την MIG παράλληλα για να δημιουργήσουν τεχνητά δείγματα, τα οποία μπορούν να καλύψουν το πλήρες πεδίο διάφορων διεργασιών διάβρωσης και να τα ξεκινήσουν, όποτε αυτό είναι απαραίτητο, σε καλυμμένα δείγματα χωρίς καμία επαφή με την πραγματική δεξαμενή. Αυτά τα δείγματα διάβρωσης έδωσαν αργότερα τη δυνατότητα να επικυρώσουμε το σύστημα ανίχνευσης με θόρυβο που προέρχεται από πραγματικές διεργασίες διάβρωσης.

Μετά τις προκαταρκτικές δοκιμές και την ανάπτυξη των δειγμάτων διάβρωσης και την επικύρωσή τους στο εργαστήριο, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε διαφορετικές δεξαμενές του δεξαμενόπλοιου ORP Baltyk. Για τις δοκιμές κατασκευάστηκαν 4 αισθητήρες σε μία δεξαμενή για μια μόνιμη εγκατάσταση και τοποθετήθηκαν στη δεξαμενή τεχνητές, φυσικές πηγές διάβρωσης. Μετά την πλήρωση της δεξαμενής τα δείγματα διάβρωσης ανιχνεύθηκαν κατά τη διάρκεια διαφορετικών λειτουργιών αποστολής. Για τον εντοπισμό χρησιμοποιήθηκε ο διαθέσιμος τρισδιάστατος αλγόριθμος εντοπισμού της Vallen. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα, σε σύγκριση με τη δοκιμή δεξαμενής με επίπεδο πυθμένα, ήταν ότι τα κύματα ΑΕ έφθαναν στον αισθητήρα απευθείας στο υγρό, χωρίς μετασχηματισμό κύματος στον εξωτερικό τοίχο.

Η δεύτερη δοκιμή ήταν να εισαγάγουμε το Multi Sensor Assembly – MUSA (Σύστημα πολλαπλών αισθητήρων = υποδοχή συν 4 αισθητήρες) από την κορυφή στη δεξαμενή και να βυθίσει όλους τους αισθητήρες κάτω από το υγρό. Ο υποδοχέας αισθητήρα έπρεπε να έχει καθορισμένη κατεύθυνση και θέση μέσα στη δεξαμενή. Όταν εντοπίστηκαν τα σήματα ΑΕ από την πηγή διάβρωσης, η κατεύθυνση από την οποία έρχεται ο ήχος θα προσδιοριζόταν με σφαιρικές συντεταγμένες θ και φ , με ειδικό πρόγραμμα λογισμικού. Με αυτή τη ακτίνα ήχου θα μπορούσε να

προσδιορίζεται το σημείο που διέσχιζε το εξωτερικό τοίχωμα της δεξαμενής, το οποίο αντιπροσωπεύει τη θέση της διάβρωσης.

Ανακαλύψαμε ότι σύμφωνα με το χαρακτηριστικό λήψης των αισθητήρων, τον περισσότερο χρόνο μόνο 3 αισθητήρες του MUSA πήραν ΑΕ, το οποίο οδηγεί στην ανάπτυξη ενός νέου τρισδιάστατου συστήματος το οποίο είναι το το σύστημα εντοπισμού Cuboid 3 – D. Αυτό το σύστημα θέσης θεωρεί ότι η πηγή βρίσκεται πάνω ή κοντά στον τοίχο της δεξαμενής. Με αυτόν τον πρόσθετο περιορισμό θα μπορούσαμε να ξεπεράσουμε τις δυσκολίες που προέκυψαν από το χαρακτηριστικό λήψης των διαφόρων αισθητήρων στο MUSA.

Μαζί με τα προηγούμενα καθορισμένα κριτήρια φίλτρου (λογικά και συχνότητας) κατέστη δυνατό να ανιχνευθούν σωστά οι πηγές.

Ο ίδιος έλεγχος σημείων (εφαρμογή του MUSA μαζί με 4 αισθητήρες) πραγματοποιήθηκε στο Icarus III, ένα νέο δεξαμενόπλοιο διπλού κελύφους, κατά τη διάρκεια της αποστολής και στην θέση αγκυροβολίου με επιτυχία. Ως περαιτέρω όφελος κατά τη διάρκεια αυτής της δοκιμής θα μπορούσε να αποδειχθεί ότι ο θόρυβος που διαταράσσεται μέσα στις δεξαμενές για δεξαμενόπλοιο διπλού κελύφους είναι πολύ χαμηλότερος. Αυτό είναι προφανές, αλλά βάσει αυτού του γεγονότος θα αυξηθεί η ευαισθησία της μεθόδου για τέτοια δεξαμενόπλοια.

6.8.5| Αποτελέσματα

Κατά τη διάρκεια της μελέτης θα μπορούσε να αποδειχθεί ότι η ΑΕ είναι σε θέση να ανιχνεύσει διάβρωση στις δομές του πλοίου εντός της δεξαμενής ή/και του κελύφους του πλοίου. Με βάση τα διαφορετικά κριτήρια φίλτρων, το συμβατικό φιλτράρισμα ζώνης και το λογικό φιλτράρισμα με ένα σύστημα αναγνώρισης προτύπων τομέα συχνότητας, δύναται να διακριθεί το σήμα ΑΕ που προέρχεται από τη διάβρωση από τον θόρυβο του περιβάλλοντος.

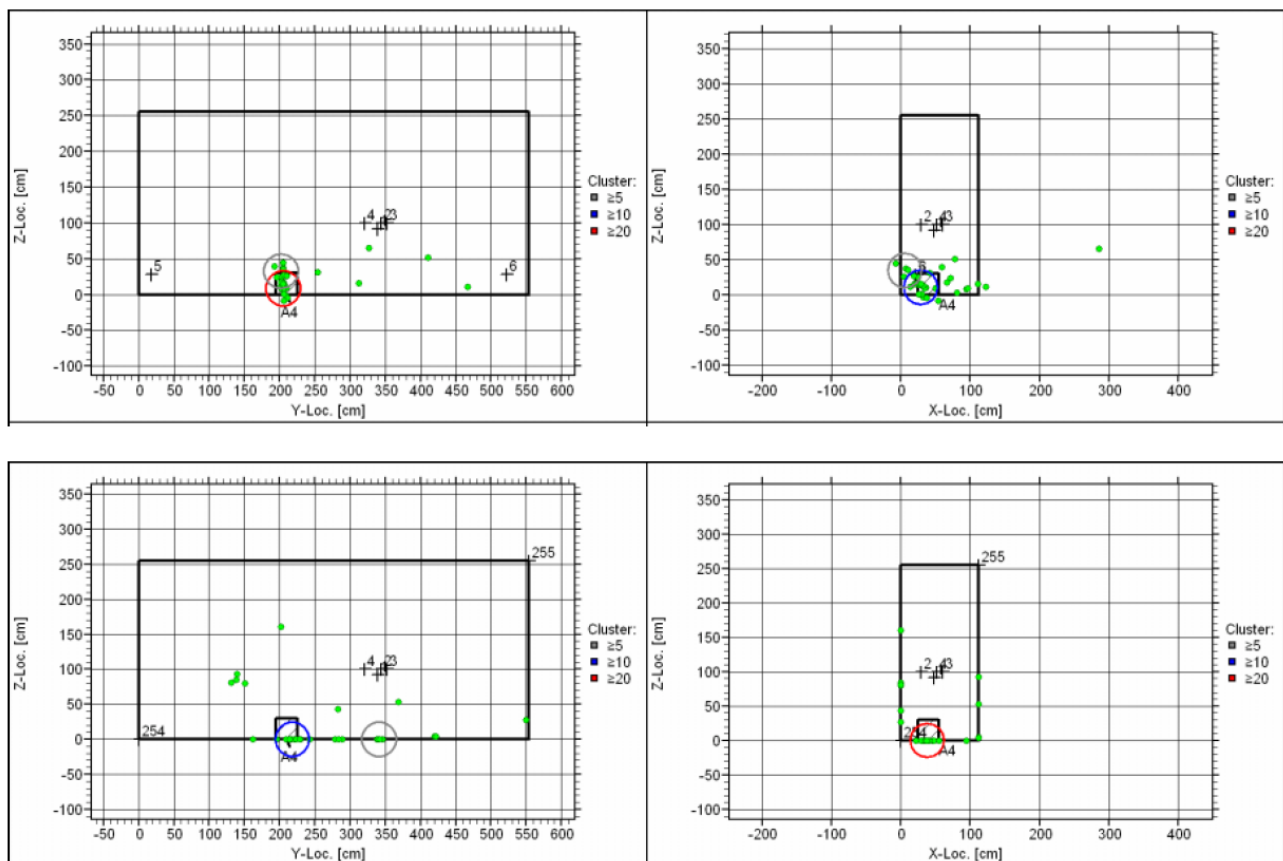
Αναπτύχθηκε και υπάρχει διαθέσιμο ένα σύστημα ανίχνευσης διάβρωσης, με εγγενώς ασφαλείς αισθητήρες Ex – Proof καθώς και το απαραίτητο σύστημα κυκλώματος και μέτρησης με το σχετικό λογισμικό. Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δύο τρόπους, όπως:

- Μόνιμο σύστημα παρακολούθησης, το οποίο θα είναι σε θέση να παρακολουθεί τη δεξαμενή μετά την τοποθέτησή της. Με βάση την σχεδόν απουσία της εξασθένησης κύματος εντός υγρού, ιδιαίτερα χαμηλού ιξώδους υγρού, μία δεξαμενή μπορεί να εποπτεύεται καλύτερα με 4 αντί για 6 αισθητήρες. Επειδή τα αποτελέσματα είναι διαθέσιμα άμεσα, ένα σύστημα λογικής αξιολόγησης θα πρέπει να είναι σε θέση να ενημερώνει μόνιμα το πλήρωμα του πλοίου και τον ιδιοκτήτη σχετικά με την κατάσταση της δομής. Με βάση την εμπειρία με την υποστήριξη των αποτελεσμάτων του συστήματος παρακολούθησης, ο νηογνώμονας θα είναι σε θέση να

καθορίσει τις επόμενες δοκιμές επανάληψης, για το πότε το πλοίο πρέπει να μεταφερθεί στην δεξαμενή επισκευών.

- Το σύστημα δοκιμών σε σημείο, πριν εισέλθει στο λιμάνι στο αγκυροβόλιο ή πριν από την εκφόρτωση στο ίδιο το λιμάνι. Για το λόγο αυτό, το άνω περιγραφόμενο MUSA με 4 στοιχεία αισθητήρα μπορεί να εισαχθεί στη δεξαμενή και να βυθιστεί κάτω από το επίπεδο του προϊόντος αποθήκευσης. Το σύστημα είναι σε θέση να ανιχνεύσει οποιαδήποτε διαδικασία διάβρωσης μέσα στον τοίχο και στη βάση (κοντά στον τοίχο). Μέσω της μέτρησης του χρόνου άφιξης στα διάφορα στοιχεία, το νέο λογισμικό μπορεί να καθορίσει την κατεύθυνση από την οποία έρχεται το κύμα. Η προκύπτουσα περιοχή στον τοίχο θα καθοριστεί από το νέο λογισμικό εντοπισμού Cuboid 3D. Το μέσο αυτό (MUSA) θα βοηθούσε τη λιμενική αρχή για την αξιολόγηση της κατάστασης του εισερχόμενου πλοίου. Μαζί με όλα τα άλλα ευφυή φίλτρα και ίσως με την εισαγωγή του 2 MUSA μπορεί να αυξηθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.

Τα αποτελέσματα της θέσης πηγής σχετικά με μια πηγή διάβρωσης που στα ύφαλα ενός πλοίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 56 και για τα δύο συστήματα.



Σχήμα 56. Αποτελέσματα της θέσης πηγής σχετικά με μια πηγή διάβρωσης

Στο Σχήμα 56 έχουμε σύγκριση της θέσης πηγής που λαμβάνεται με τον τρισδιάστατο αλγόριθμο τοποθεσίας που χρησιμοποιείται για μόνιμη εγκατάσταση (πάνω) και με τον αλγόριθμο εντοπισμού MUSA (κάτω) που χρησιμοποιείται για την επιτόπια δοκιμή.

6.8.6| Συμπεράσματα – Συζήτηση

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι έγιναν οι εργασίες ΕΑ για τη δοκιμή των δεξαμενών πετρελαιοφόρων. Παρόλο που οι περισσότερες εργασίες έγιναν σε πετρελαιοφόρα μονού κελύφους, μπορούμε να ελέγξουμε τις δεξαμενές από δεξαμενόπλοια διπλού κελύφους. Εάν η εξωτερική δομή πλοίου έρχεται σε επαφή με υγρό π.χ. ως πρόσθετη δεξαμενή έρματος, η μέθοδος δοκιμής εφαρμόζεται επίσης για τη δομή του κελύφους.

Το τελευταίο και έντονο πρόβλημα, το οποίο δεν λύνεται αυτή τη στιγμή, είναι η ανίχνευση της διάβρωσης στην πλάκα του καταστρώματος. Όσο οι δεξαμενές δεν γεμίζουν μέχρι το μέγιστο, οι πλάκες καταστρώματος δεν έρχονται σε επαφή με το υγρό με αποτέλεσμα να διακόπτεται η μεταφορά κυμάτων. Εάν ήταν δυνατή η πλήρωση των δεξαμενών μέχρι το μέγιστο για δοκιμές, η μέθοδος δοκιμής θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για αυτήν την περιοχή.

Όπως και σε κάθε μέθοδο ΜΚΕ, είναι σημαντικό να συνδυάσουμε τα αποτελέσματα με την εμπειρογνωμοσύνη του τμήματος επιθεώρησης των νηογνομόνων για περαιτέρω επιθεωρήσεις παρακολούθησης. Το μόνιμο σύστημα μπορεί να συμπεριληφθεί σε άλλα συστήματα προειδοποίησης για τον πλοιοκτήτη και το πλήρωμα.

Παρόλα αυτά γνωρίζουμε ότι όχι μόνο η διάβρωση βλάπτει την ακεραιότητα του πλοίου. Για αυτόν τον λόγο θα πρέπει να ελέγχεται η δομή και για εμφάνιση ρωγμών, ιδιαίτερα ρωγμών κόπωσης. Μια τέτοια μέτρηση θα ήταν σημαντική ακόμη και αν αφορούσε μόνο τα ύποπτα σημεία ώστε να δημιουργηθεί ένα κοινό σύστημα για την ασφάλεια των πλοίων, το οποίο θα ήταν σημαντικό από εμπορική άποψη για τους ίδιους τους πλοιοκτήτες καθώς και για την ασφάλεια του περιβάλλοντος. [26]

6.9| Έλεγχος πεδίου δεξαμενών αποθήκευσης επίπεδου πυθμένα με ΑΕ

Οι συμβατικοί μη καταστρεπτικοί έλεγχοι των δαπέδων των δεξαμενών βασίζονται κυρίως σε οπτικούς ελέγχους και μετρήσεις πάχους τοιχώματος και συνεπώς αντανακλούν τις παρελθούσες περιόδους λειτουργίας των δεξαμενών συνολικά. Η μέθοδος της ΑΕ αντιθέτως, επιτρέπει την παρακολούθηση των ενεργών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα τη στιγμή της δοκιμής στο δάπεδο της δεξαμενής σε συνθήκες παρόμοιες με τις συνθήκες λειτουργίας της. Κατά την μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται η αναγνώριση προτύπου με βάση την συχνότητα για τον προσδιορισμό του μηχανισμού προέλευσης των πηγών ΑΕ που βρίσκονται στο πάτωμα της δεξαμενής. Ο συνδυασμός και των δύο οδηγεί σε μια συμπληρωματική άποψη της κατάστασης του δαπέδου της δεξαμενής αξιοποιώντας και τις δύο προσεγγίσεις: τον προσδιορισμό της συνολικής υποβάθμισης του δαπέδου

της δεξαμενής και την παρακολούθηση των πραγματικών διεργασιών υποβάθμισης που λαμβάνουν χώρα υπό τις τρέχουσες συνθήκες λειτουργίας.

6.9.1| Εισαγωγή

Έχουν ελεγχθεί πάνω από 200 δεξαμενές σε διωλιστήρια, χημικές εγκαταστάσεις και δεξαμενές δεδομένου ότι η τεχνική δοκιμής (ΑΕ), που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο έργου χρηματοδοτούμενου από την ΕΚ, εισήχθη στην αγορά συντήρησης και επιθεώρησης κυρίως στη Γερμανία, την Αυστρία και την Ιταλία. Όπου είναι διαθέσιμα, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με άλλες μεθόδους ΜΚΕ συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των δοκιμών ΑΕ. Προκειμένου να είναι εφικτός ο συνδυασμός των πληροφοριών από διαφορετικές τεχνικές ΜΚΕ, είναι απαραίτητη η ακριβής γνώση των συνθηκών συντήρησης τόσο οι τρέχοντες όσο και οι προηγούμενες, όλων των ενεργειών συντήρησης και όλων των εργασιών προετοιμασίας για τον καθαρισμό της δεξαμενής για εσωτερική επιθεώρηση. Σε σύγκριση με μια δοκιμή ΑΕ, η οποία καταλαμβάνει τη δεξαμενή με το περιεχόμενο προϊόν για μία ή δύο ημέρες, η διαδικασία καθαρισμού και η εσωτερική επιθεώρηση οδηγούν σε διακοπή της δεξαμενής για εβδομάδες ή και μήνες. Αυτό υπογραμμίζει την αύξηση της διαθεσιμότητας της δεξαμενής και το όφελος που σχετίζεται με τη χρήση της διάβρωσης και της δοκιμής διαρροής ΑΕ των δεξαμενών αποθήκευσης (AST).

Σε πολλές χώρες η διάρκεια της περιόδου λειτουργίας έως την επόμενη εσωτερική επιθεώρηση περιορίζεται σε λίγα χρόνια. Στη συνέχεια, η δεξαμενή πρέπει να τεθεί εκτός λειτουργίας και πολύ συχνά η εσωτερική επιθεώρηση πραγματοποιείται για να επιβεβαιωθεί εκ νέου μια καλή κατάσταση δαπέδου. Αυτή η διαδικασία εξακολουθεί να τίθεται υπό αμφισβήτηση από πολλούς χειριστές δεξαμενών, οι οποίοι γνωρίζουν πολύ καλά τις γενικές συνθήκες των δεξαμενών τους σύμφωνα με το τεκμηριωμένο και καταγεγραμμένο ιστορικό λειτουργίας τους. Η υποβάθμιση του δαπέδου λόγω διάβρωσης, ειδικά της γενικής διάβρωσης, μπορεί να προληφθεί αρκετά αποτελεσματικά με κατάλληλα μέτρα, π.χ. μέσα επικάλυψης και καθοδική προστασία. Έτσι, εάν οι συνθήκες λειτουργίας διατηρούνται καλά μέσα στα γνωστά όρια της ασφαλούς λειτουργίας, το πάτωμα της δεξαμενής δεν αναμένεται να υποφέρει από σοβαρή υποβάθμιση.

Εντούτοις, μπορεί να προκύψουν ακόμα και απρόβλεπτες καταστάσεις, οι οποίες οδηγούν σε πιο σοβαρούς τύπους διάβρωσης με υψηλότερους ρυθμούς διάβρωσης από τους αναμενόμενους. Αυτό μπορεί να συμβαίνει σε περιοχές στο δάπεδο της δεξαμενής όπου έχει υποστεί βλάβη η εσωτερική επίστρωση ή λόγω μόλυνσης του αποθέματος με διαβρωτικούς παράγοντες που συσσωρεύονται στο δάπεδο της δεξαμενής. Έτσι, στο χρόνο που οδηγείται στα διαστήματα επιθεώρησης, μπορεί να ανιχνεύσει την εμφάνιση της διάβρωσης μόνο τυχαία, πιθανότατα η παρούσα ζημία διάβρωσης μπορεί να τεκμηριωθεί μόνο για να αποκατασταθούν οι πληγείσες

περιοχές δαπέδου.

Αντιθέτως, η δοκιμή ακουστικών εκπομπών επιτρέπει την ένδειξη δεξαμενών με ενεργές διεργασίες διάβρωσης και δεν παρεμποδίζει σοβαρά τη λειτουργία της δεξαμενής. Ως εκ τούτου, η μέθοδος ΑΕ είναι ένα πολύτιμο εργαλείο συντήρησης και ελέγχου που υποστηρίζει τον χειριστή δεξαμενής για την πρόληψη σοβαρών ζημιών. Οι βέλτιστες συνθήκες για αυτό το είδος παρακολούθησης δίνονται όταν ο έλεγχος ΑΕ ξεκινά μετά την επανέναρξη λειτουργίας της δεξαμενής μετά από εσωτερική επιθεώρηση. Σε αυτή την περίπτωση η τρέχουσα κατάσταση του δαπέδου της δεξαμενής συνήθως εκτιμάται με ακρίβεια με τεχνικές σάρωσης δαπέδου, συνεπώς, προκύπτει ότι μια πρόιμη μέτρηση με ΑΕ δίνει μια ιδανική αναφορά για μελλοντικές δοκιμές επανάληψης. Ένα ιστορικό δεξαμενής που έχει δημιουργηθεί με τέτοιο τρόπο μπορεί να αξιοποιηθεί, παρατείνοντας ουσιαστικά την περίοδο λειτουργίας στις επόμενες δραστηριότητες συντήρησης δεξαμενών. Το κόστος της προετοιμασίας της δεξαμενής για εσωτερική επιθεώρηση μπορεί να φτάσει εύκολα περίπου 100.000 ευρώ, συνεπώς μπορεί να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση χρησιμοποιώντας μη παρεμβατική μέθοδο ΑΕ.

6.9.2 | Τεχνική ελέγχου

Οι πηγές κόστους που οφείλονται στη διάβρωση είναι πολλαπλές και το οικονομικό κόστος της διάβρωσης είναι προφανώς τεράστιο. Εκτός από το άμεσο κόστος, έχουμε και το έμμεσο κόστος, π.χ. η διακοπή της εγκατάστασης ή η απώλεια του προϊόντος, αποτελούν σημαντικούς παράγοντες. Η τεχνική δοκιμής που παρουσιάζεται σε αυτή τη μελέτη, μπορεί να ανιχνεύσει και να εντοπίσει τις ενεργές διεργασίες διάβρωσης στο δάπεδο της δεξαμενής και σε περίπτωση ήδη διαβρωμένου δαπέδου, να διαπιστώσει και να εντοπίσει τη θέση ενεργής διαρροής. Έτσι, είναι ένα χρήσιμο εργαλείο συντήρησης για την οικονομική διαχείριση της υποβάθμισης δεξαμενών. Η ακουστική εκπομπή περιορίζεται γενικά στην ανίχνευση ενεργών βλαβών. Αλλά αυτός ο περιορισμός αποδεικνύεται αντοχής, καθώς αυτή η μέθοδος ΜΚΕ δείχνει μόνο ελαττώματα τα οποία έχουν αντίκτυπο στην υποβάθμιση του δαπέδου της δεξαμενής (προοδευτική απώλεια πάχους τοιχώματος) ή στην ασφάλεια της δεξαμενής (πραγματική απώλεια προϊόντος).

Πρέπει να αναφερθεί και αυτό θα υπογραμμιστεί από τις στατιστικές που δημοσιεύθηκαν αργότερα σε αυτή τη μελέτη, ότι η πλειονότητα των δεξαμενών είναι σε καλή κατάσταση όταν συντηρούνται συνεχώς καλά. Αυτές οι δεξαμενές πρέπει να παραμένουν σε λειτουργία και πρέπει να παρακολουθείται περαιτέρω η κατάσταση δαπέδου. Το αποτέλεσμα της δοκιμής δίνει την κατάσταση του δαπέδου της δεξαμενής όσον αφορά τα ελαττώματα που εξετάζονται από άποψη βαθμών. Το εφαρμοσμένο σύστημα ταξινόμησης δίνεται στον παρακάτω Πίνακα 14.

Βαθμός	Περιγραφή	Συνιστώμενη διάρκεια συντήρησης
I	Δεν υπάρχουν ενεργές πηγές	5 χρόνια
II	Χαμηλή ενεργή διάβρωση	3 χρόνια
III	Μεσαία ενεργή διάβρωση	1 έτος
IV	Διαρροή και / ή υψηλή ενεργή διάβρωση	–

Πίνακας 14. Σύστημα ταξινόμησης για δοκιμές ΑΕ σε AST

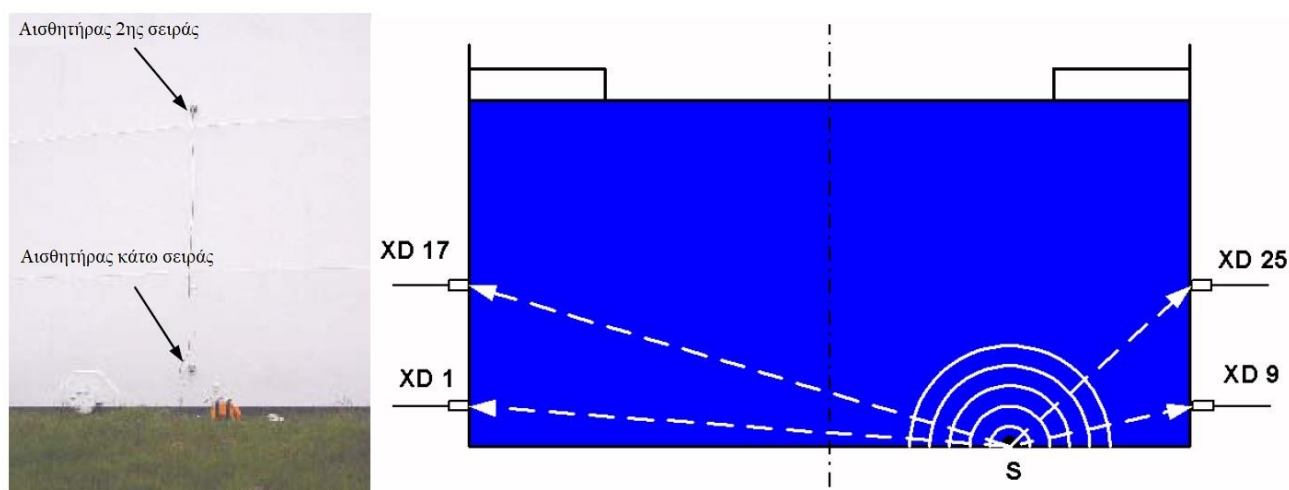
Η συνιστώμενη μέγιστη διάρκεια της επόμενης συντήρησης προκύπτει σε σχέση με την παρούσα κατάσταση κατά τη στιγμή της δοκιμής. Αυτό γνωστοποιείται σαφώς στον υπεύθυνο, έτσι ώστε οι συνθήκες που θέτει ο χειριστής της δεξαμενής κατά την προετοιμασία της δεξαμενής για τη δοκιμή ΑΕ να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερες στις συνήθεις συνθήκες συντήρησης. Εάν οι συνθήκες λειτουργίας διατηρούνται όπως πριν από τη δοκιμή, τότε είναι δυνατή μια πρόβλεψη για την κατάσταση του δαπέδου. Συνεπώς, μετά από αλλαγή των συνθηκών λειτουργίας, η ταξινόμηση δαπέδου δεξαμενής δεν είναι πλέον έγκυρη και μια δοκιμή ΑΕ επανάληψης είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση των νέων συνθηκών λειτουργίας. Αν το δάπεδο της δεξαμενής αντιστοιχεί στην κατηγορία IV, συνιστάται εσωτερικός έλεγχος για να επαληθευθούν οι ενδείξεις που βρέθηκαν με την ΑΕ.

Οι εργασίες προετοιμασίας για την ΑΕ ξεκινούν με τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των δεξαμενών (κατασκευαστικές λεπτομέρειες, προϊόν αποθήκευσης κλπ.). Για το σκοπό αυτό συνήθως αποστέλλεται ένα ερωτηματολόγιο μαζί με βασικές πληροφορίες σχετικά με την τεχνική. Μετά την επί τόπου αξιολόγηση των συμπληρωμένων δηλώσεων του αρμόδιου υπεύθυνου επικοινωνίας, πρέπει να διατεθούν όλοι οι απαραίτητοι πόροι. Το προσωπικό δοκιμής είναι πιστοποιημένο για ΑΕ σύμφωνα με το πρότυπο EN 473 και χρησιμοποιεί τελευταίας τεχνολογίας εξοπλισμό ΑΕ.

Επίσης, πριν από κάθε δοκιμή, γνωστοποιείται στον υπεύθυνο πελάτη ότι κάθε μέτρηση ΑΕ επηρεάζεται από θόρυβο διαφορετικής προέλευσης (μηχανικό, ηλεκτρικό κ.λπ.). Πολλά δεδομένα θορύβου μπορούν να αναγνωριστούν με διαδικασίες λογισμικού και ως εκ τούτου μπορούν να φιλτραριστούν και να μην παρεμβάλλονται στο αποτέλεσμα της δοκιμής. Αλλά το πιο σημαντικό μέρος στην προετοιμασία μιας δεξαμενής επιτόπου είναι απλώς να αποφεύγεται ο θόρυβος, έτσι ώστε οι αισθητήρες ΑΕ να μην λαμβάνουν θόρυβο. Αν ληφθούν κατάλληλα μέτρα πριν από τη δοκιμή, π.χ. την εξάλειψη πηγών θορύβου ή την αποφυγή θορυβώδους χρονικής περιόδου, τότε το περιεχόμενο θορύβου είναι ήδη περιορισμένο και οι αλγόριθμοι απόρριψης θορύβου δεν πρέπει να

επικαλούνται στα όριά τους. Έτσι, η αξιοπιστία του αποτελέσματος της δοκιμής αυξάνεται, κάτι που έχει μεγάλη σημασία, ειδικά εάν συνιστώνται δαπανηρές ενέργειες παρακολούθησης.

Η τυποποιημένη διάταξη απαιτεί τουλάχιστον έναν αισθητήρα ΑΕ για κάθε 15 μέτρα κατά μήκος της περιφέρειας AST σε ύψος περίπου 1m. Αυτή η σειρά αισθητήρων εντοπίζει τα συμβάντα ΑΕ μέσα στην οριζόντια διατομή της δεξαμενής (θέση 2 – Δ). Η θεωρούμενη πορεία της διάδοσης του ηχητικού κύματος (Σχήμα 57) από την πηγή στο πάτωμα της δεξαμενής προς τον αισθητήρα ΑΕ στο κέλυφος της δεξαμενής είναι μέσω του υγρού αποθέματος προϊόντος και συνεπώς η θέση χρησιμοποιεί την ταχύτητα του ήχου του υγρού αποθέματος προϊόντος. Αυτή η διάταξη είναι κατάλληλη όταν μπορούν να αποκλειστούν τα συμβάντα ΑΕ που προέρχονται από άλλα μέρη από το δάπεδο (π.χ. μια οροφή). Σε κάθε άλλη περίπτωση συνιστάται έντονα μια διάταξη δύο σειρών αισθητήρων. Με τη βοήθεια αυτών των πρόσθετων αισθητήρων σε ύψος 3 έως 5 μέτρων πάνω από το δάπεδο και ακριβώς πάνω από τους αισθητήρες κοντά στον πυθμένα, είναι δυνατή η απόρριψη συμβάντων ΑΕ από τις ανώτερες περιοχές της δεξαμενής. Αυτό αυξάνει επίσης την αξιοπιστία της ταξινόμησης δαπέδου. Ένα παράδειγμα για τους αισθητήρες ΑΕ που είναι τοποθετημένοι στο κέλυφος της δεξαμενής μπορεί να φαίνεται στο Σχήμα 57 (αριστερά).

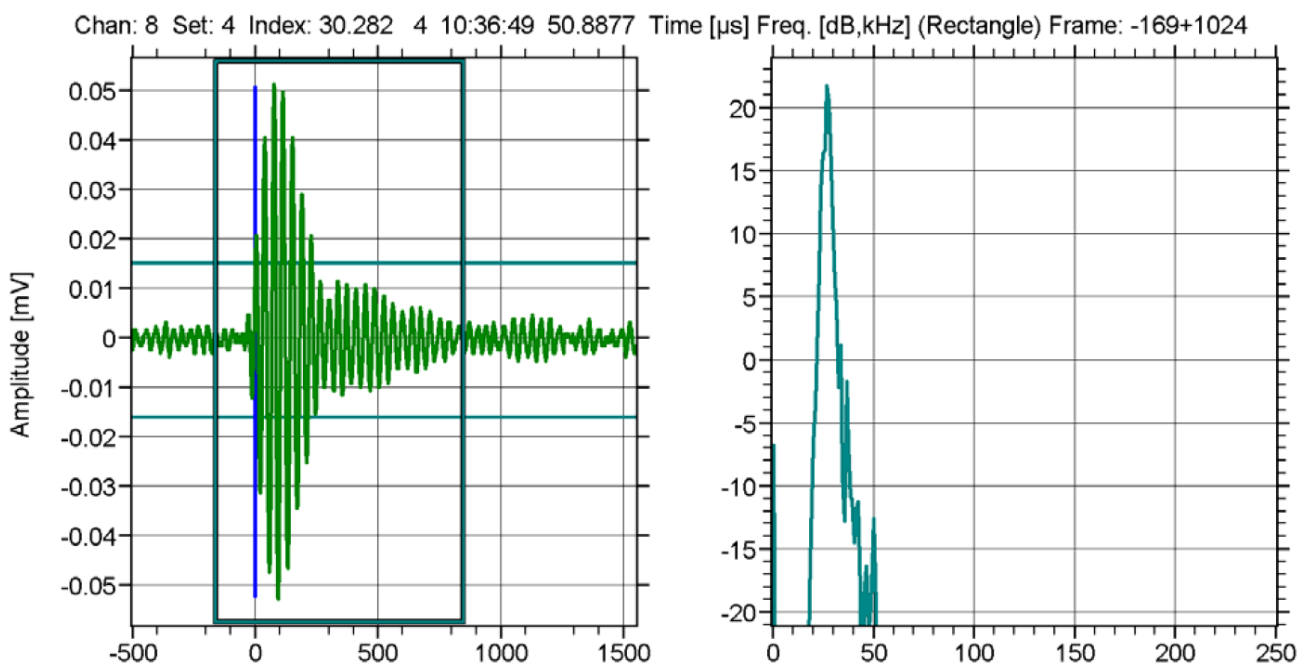


Σχήμα 57. Αισθητήρες ΑΕ τοποθετημένοι στο κέλυφος της δεξαμενής (αριστερά) και διαδρομή διάδοσης κύματος (δεξιά)

Μόλις εντοπιστεί μια πηγή ΑΕ στο πάτωμα της δεξαμενής, είναι σημαντικό να δηλωθεί ο μηχανισμός προέλευσης, προκειμένου να βαθμολογηθεί σωστά το δάπεδο της δεξαμενής. Ο προσδιορισμός του μηχανισμού προέλευσης περιλαμβάνει ουσιαστικά τις ακόλουθες τρεις πτυχές:

1. Απόκτηση δεδομένων και προ – επεξεργασία
2. Εκπροσώπηση δεδομένων
3. Λήψη αποφάσεων

Αυτά τα βήματα οδηγούν στο σχεδιασμό ενός συστήματος αναγνώρισης προτύπων. Για την επιλογή του καλύτερου τρόπου υποβολής δεδομένων πρέπει κανείς να σκεφτεί ότι ένα δάπεδο δεξαμενής καλύπτει μια έκταση μέχρι περίπου 1.000 τετραγωνικών μέτρων. Έτσι, η απόσταση από την πηγή στο πάτωμα της δεξαμενής προς τον αισθητήρα στο κέλυφος της δεξαμενής ποικίλλει σε ένα ευρύ φάσμα και έτσι αντίστοιχα ποικίλλουν και οι παράμετροι σήματος ΑΕ όπως πλάτος κορυφής σήματος, η διάρκεια σήματος, η ενέργεια σήματος κλπ. Η εφαρμοζόμενη τεχνική δοκιμής εκμεταλλεύεται τις κυματομορφές, οι οποίες αποκτώνται και αποθηκεύονται μαζί με τις άλλες παραμέτρους σήματος ΑΕ. Από τα δεδομένα κυματομορφής, η απόκριση συχνότητας των ηχητικών κυμάτων μπορεί να υπολογιστεί και να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση δεδομένων. Το Διάγραμμα 21 δείχνει μια τυπική κυματομορφή σήματος ΑΕ μαζί με την απόκριση συχνότητας. Η διάδοση του ηχητικού κύματος σε υγρά είναι απαλλαγμένη από τη διασπορά της συχνότητας. Έτσι, η απόκριση συχνότητας είναι ανεξάρτητη από την απόσταση από την πηγή έως τον αισθητήρα. Επιπλέον, η εξασθένηση του σχετικού εύρους ζώνης συχνότητας γύρω στα 30kHz μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη. Συνεπώς, προκύπτει ότι η απόκριση συχνότητας του σήματος ΑΕ δεν εξαρτάται από την απόσταση από την πηγή έως τον αισθητήρα ΑΕ.



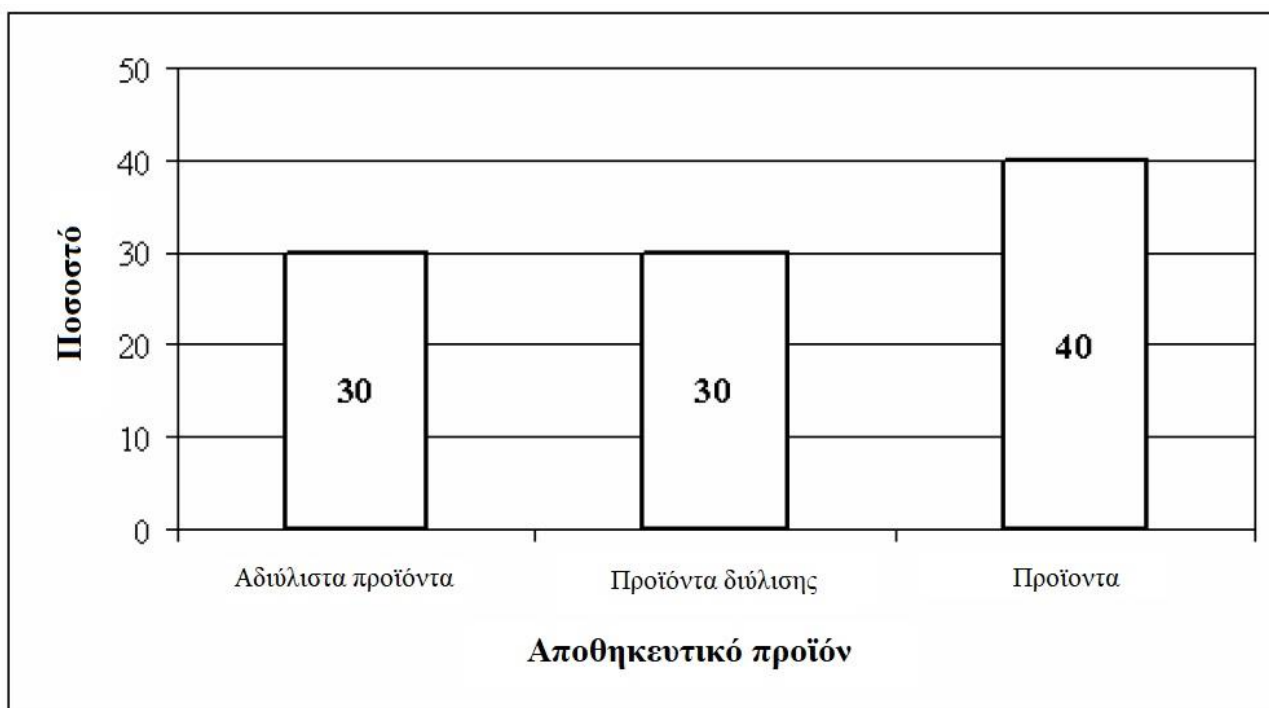
Διάγραμμα 21. Κυματομορφή σήματος ΑΕ και απόκριση συχνότητάς του

Ένας ταξινομητής σχεδιάστηκε με τη βοήθεια μιας βάσης δεδομένων αναφοράς που περιλαμβάνει κυματομορφές σήματος με γνωστούς μηχανισμούς πηγής. Αυτό το εργαλείο εφαρμόζεται κατόπιν σε άγνωστα δεδομένα για να αποφασιστεί αν η ανιχνευόμενη πηγή ΑΕ σχετίζεται με τη διάβρωση ή τη διαρροή. Εάν ο μηχανισμός προέλευσης αποδειχτεί διαρροή, τότε το δάπεδο της δεξαμενής είναι Βαθμού IV και συνιστάται να ανοιχθεί η δεξαμενή το συντομότερο

δυνατό. Εάν ανιχνευτεί διάβρωση, το αποτέλεσμα της δοκιμής μπορεί να ποικίλει από Βαθμού II έως Βαθμού IV ανάλογα με τη δραστηριότητα της πηγής. Επιπλέον, σε μια δεύτερη βαθμίδα ταξινόμησης η ανιχνευόμενη πηγή διάβρωσης αποδίδεται είτε σε καλά εδραιωμένη διάβρωση, η οποία υποδεικνύεται από την παρουσία ενός στρώματος προϊόντος διάβρωσης ή από την έναρξη της διάβρωσης όταν πρόκειται να αναπτυχθεί ένα στρώμα διογκώσεως. Σε περίπτωση που δεν εντοπιστεί ενεργή πηγή, τότε η δεξαμενή είναι απαλλαγμένη από οποιοδήποτε ενεργό ελάττωμα και συνεπώς από την άποψη της ΑΕ μπορεί να λειτουργήσει για άλλα πέντε χρόνια χωρίς περαιτέρω συντήρηση.

6.9.3| Στατιστικές των πραγματοποιούμενων δοκιμών

Μεταξύ περισσότερων από 200 δοκιμασμένες δεξαμενές, το εύρος διαμέτρου των δοκιμασμένων AST (σταθερή οροφής ή πλωτής οροφή) είναι από 4,5m (δεξαμενή προϊόντος χημικής μονάδας) έως 98m (δεξαμενή αργού πετρελαίου). Το αποθεματικό προϊόν ήταν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος καθώς και σε υψηλές θερμοκρασίες (μέγιστη επιφανειακή θερμοκρασία 80°C στη θέση του αισθητήρα) με δοχεία δεξαμενών θερμικά μονωμένα ή όχι. Το Διάγραμμα 22 δείχνει τη διανομή σύμφωνα με το αποθεματικό προϊόν, ομαδοποιημένο στις τρεις κύριες κατηγορίες. Αποστάγματα όπως νάφθα, βενζίνη, πετρέλαιο εσωτερικής καύσης ή καύσιμο πετρέλαιο έχουν καταχωρηθεί στα προϊόντα διύλισης, ενώ χημικά προϊόντα όπως η ακετόνη, το τριχλωροαιθυλένιο, το προπυλενοξείδιο και η καυστική σόδα έχουν προστεθεί στα προϊόντα.

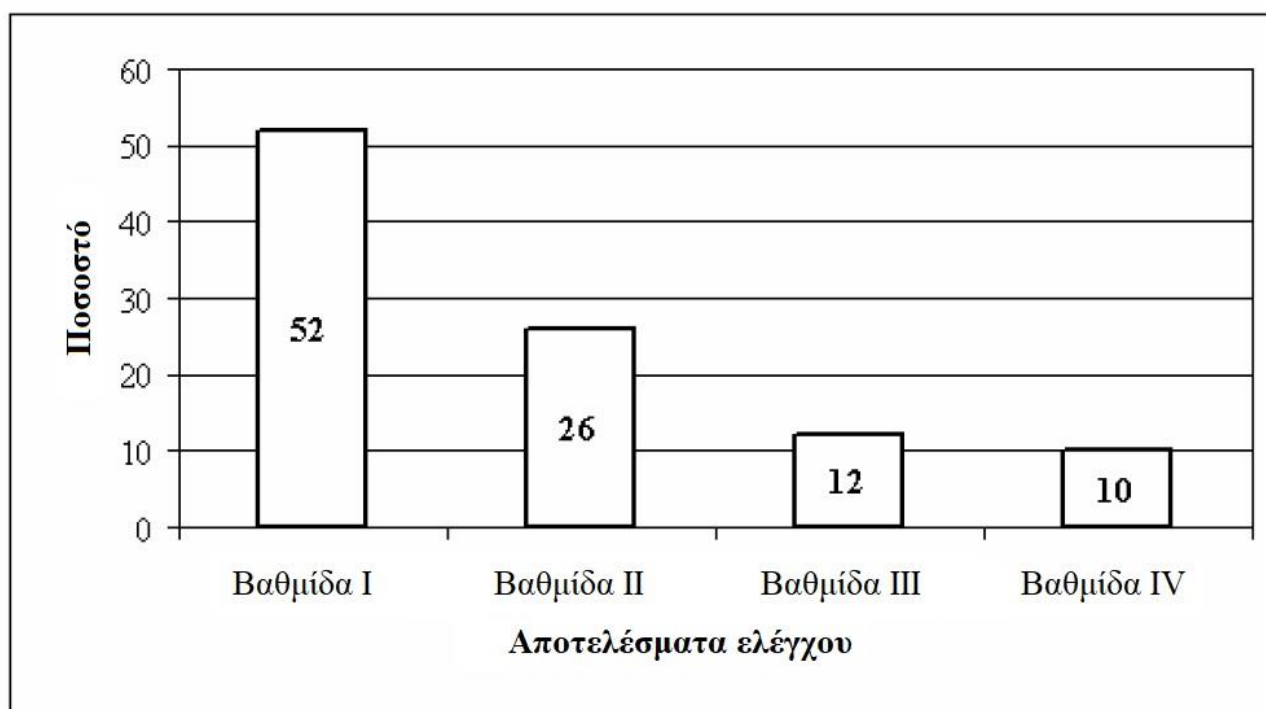


Διάγραμμα 22. Κατανομή των αποθεμάτων προϊόντων δοκιμασμένων AST (σύνολο 218 δεξαμενών)

Συνολικά, η εφαρμογή της τεχνικής δοκιμής καλύπτει μια ευρεία ποικιλία αποθεμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά σε διαφορετικούς κλάδους και οι αντίστοιχες AST έχουν δοκιμαστεί με επιτυχία με ΑΕ. Το Διάγραμμα 23 δίνει μια κατανομή των αποτελεσμάτων των δοκιμών σύμφωνα με τις τέσσερις διαφορετικές ποιότητες από τον Πίνακα 13.

Μπορεί κανείς να πάρει από αυτή τη διανομή ότι η πλειοψηφία των δεξαμενών (52%) αποδίδεται στην Βαθμίδα I, υποδεικνύοντας την καλύτερη κατάσταση δαπέδου. Αυτό υπογραμμίζει την εμπειρία πολλών χειριστών δεξαμενών ότι τα χρονικά καθοδηγούμενα εσωτερικά διαστήματα επιθεώρησης οδηγούν σε δαπανηρά ανοίγματα των δεξαμενών που βρίσκονται ακόμα σε καλή κατάσταση. Με την ενσωμάτωση της ΑΕ στο τακτικό πρόγραμμα συντήρησης και επιθεώρησης, είναι δυνατόν να διαπιστωθεί ότι ορισμένες δεξαμενές μπορούν να παρατείνουν την περίοδο συντήρησης τους.

Η αξιοπιστία της τεχνικής δοκιμής έχει αποδειχθεί δύο φορές: με τη λειτουργία της ασφαλούς δεξαμενής για τη συνιστώμενη περίοδο λειτουργίας και με πολλές επιθεωρήσεις παρακολούθησης. Δεδομένου ότι η ΑΕ έχει ως αποτέλεσμα μια δήλωση σχετικά με τα ενεργά ελαττώματα υπό συνθήκες που υπάρχουν κατά τη διάρκεια της δοκιμής, είναι συμπληρωματική με το αποτέλεσμα μιας εσωτερικής επιθεώρησης, η οποία στοχεύει στην εκτίμηση της συνολικής υποβάθμισης δεξαμενής.



Διάγραμμα 23. Κατανομή αποτελεσμάτων δοκιμασμένων AST (σύνολο 218 δεξαμενών)

Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν συγκρίνουμε και τα δύο είδη δοκιμών. Κάποιος χρειάζεται

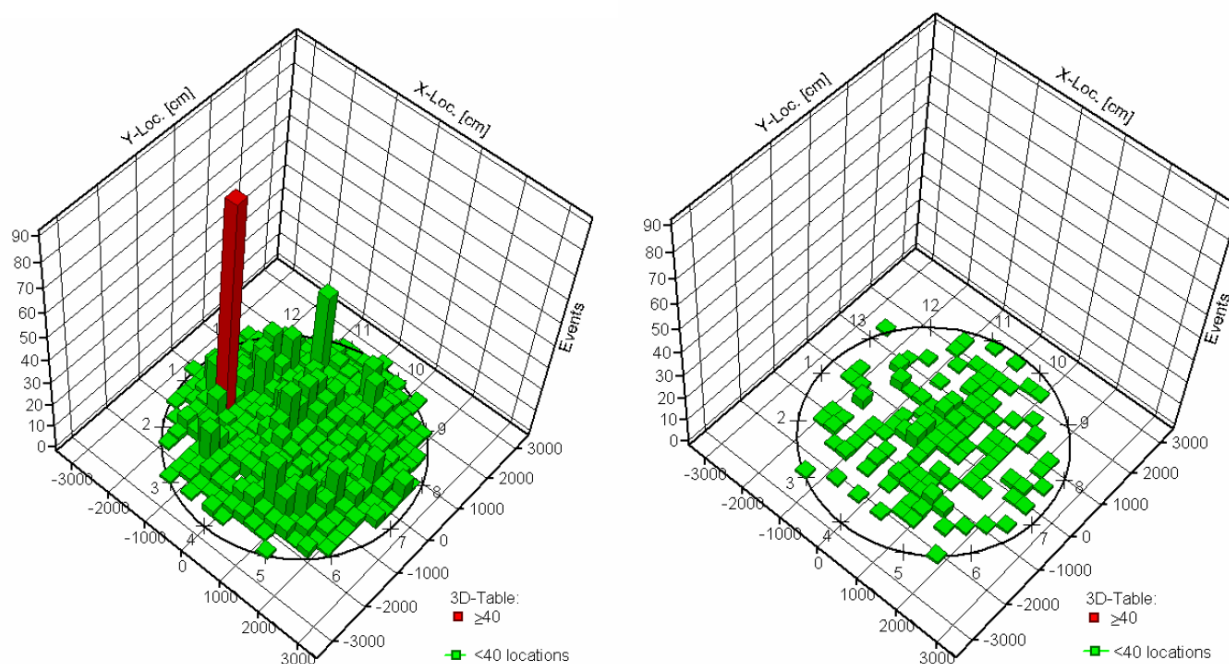
λεπτομερή γνώση του ιστορικού της δεξαμενής καθώς επίσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι ενέργειες που εκτελούνται για τον καθαρισμό της δεξαμενής κατά την τελική εκτίμηση της κατάστασης του δαπέδου σε σύγκριση με το αποτέλεσμα των ΑΕ. Ως παράδειγμα διαπιστώθηκε μια περίπτωση όπου η εσωτερική επικάλυψη έχει αφαιρεθεί με τη διαδικασία καθαρισμού λόγω ανεπαρκούς συγκόλλησης σε μια περιοχή ήδη υπάρχουσας βλάβης διάβρωσης. Δεδομένου ότι το πάτωμα της δεξαμενής είχε χαρακτηριστεί Βαθμίδας Ι, φάνηκε με την πρώτη ματιά ότι αυτό το ελάττωμα δεν έχει ανιχνευθεί. Αφού μελετήθηκε το ιστορικό της δεξαμενής αποδείχθηκε τεκμηριωμένα ότι η εσωτερική επικάλυψη εφαρμόστηκε πάνω στη δεδομένη βλάβη διάβρωσης μετά από αμμοβολή αλλά χωρίς επισκευή.

Τέλος, αποδείχθηκε ότι το αποτέλεσμα ΑΕ ήταν αληθές και αντιπροσώπευε την πραγματική κατάσταση του δαπέδου της δεξαμενής που υπήρχε πριν από τη διαδικασία καθαρισμού της. Φυσικά το αποτέλεσμα της εσωτερικής επιθεώρησης ήταν αλήθεια, πράγμα που έδειξε τη συνολική υποβάθμιση του δαπέδου της δεξαμενής. Αυτή η περίπτωση θα πρέπει απλώς να υπογραμμίσει ότι ο επωφελής συνδυασμός και των δύο αποτελεσμάτων απαιτεί μερικές φορές ακριβή γνώση του ιστορικού της δεξαμενής και των δραστηριοτήτων προετοιμασίας πριν από το άνοιγμα της δεξαμενής. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων που δοκιμάστηκαν, αυτή η λεπτομερής συζήτηση θα μπορούσε να διακοπεί λόγω των συμπεφωνημένων αποτελεσμάτων: ένα δάπεδο δεξαμενής είναι σε καλή κατάσταση.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 23, έχει δοκιμαστεί αρκετός αριθμός AST σε μάλλον κακή κατάσταση. Τα δάπεδα δεξαμενών έχουν βρεθεί με σοβαρή γενική διάβρωση καθώς και δάπεδα δεξαμενών με εντοπισμένες μορφές διάβρωσης και διαρροές δεξαμενών. Όπως μπορεί κανείς να έχει ήδη υποθέσει, στο άλλο άκρο του συστήματος ταξινόμησης πρέπει να διευκρινιστούν κάποιες ενδείξεις πριν από τη λήψη περαιτέρω μέτρων. Δεδομένου ότι η ΑΕ είναι ικανή να ανιχνεύει ενεργή διάβρωση, ανιχνεύει θυσιαζόμενες άνοδοι εντός της δεξαμενής. Μαζί με τον χειριστή δεξαμενής μπορούσαμε να εντοπίσουμε τις ενδείξεις διάβρωσης που βρέθηκαν σε τοποθεσίες όπου είχαν τοποθετηθεί θυσιαζόμενες ανόδους. Σε άλλο σημείο εντοπίστηκε μια σοβαρή πηγή διάβρωσης όχι στο δάπεδο της δεξαμενής, αλλά στην πλωτή οροφή. Δεδομένου ότι εφαρμόστηκε μια διάταξη αισθητήρα σε δύο σειρές όπως φαίνεται στο Σχήμα 57, η ανιχνευόμενη πηγή διάβρωσης θα μπορούσε να αποδοθεί οριστικά στην πλωτή οροφή. Υπήρχε ήδη διείσδυση μιας συγκόλλησης και βρέθηκε προϊόν στα επίπεδα. Η επιφανειακή διάβρωση της οροφής προκαλεί ενδείξεις ΑΕ και ως εκ τούτου, παρουσιάζει βλάβη στην ταξινόμηση του δαπέδου της δεξαμενής εάν δεν αναγνωριστεί σωστά. Με τη βοήθεια δύο σειρών αισθητήρων, αυτό μπορεί να γίνει απλά και αποτελεσματικά.

Σε γενικές γραμμές, κάθε ένδειξη για σοβαρό ελάττωμα αναλύεται αρχικά σχετικά με άλλες πιθανές αιτίες για την αποφυγή δαπανηρών ψευδών ενδείξεων. Το Σχήμα 58 δείχνει και τα δύο είδη

αξιολόγησης για το παράδειγμα διάβρωσης οροφής, χωρίς αλλά και με τη βοήθεια των αισθητήρων δεύτερης σειράς. Η οριζόντια διατομή της δεξαμενής παρουσιάζεται στο επίπεδο $x - y$ μαζί με τις θέσεις των αισθητήρων και τις ενδείξεις της κάτω σειράς, ενώ στην κατακόρυφη κατεύθυνση δίνεται ο αριθμός των εντοπισμένων συμβάντων ΑΕ εντός της περιοχής αναφοράς ανά ώρα. Μπορεί να δει κανείς εύκολα ότι η ένδειξη (κόκκινη στήλη στα αριστερά) εξαφανίζεται όταν επιλέγεται τη βελτιωμένη διάταξη των αισθητήρων (δεξιά).



Σχήμα 58. Τρισδιάστατο διάγραμμα του αποτελέσματος θέσης χωρίς και με δύο σειρές αισθητήρων

6.9.4| Συμπεράσματα

Η μη παρεμβατική δοκιμή δαπέδου δεξαμενής με ΑΕ μπορεί να ανιχνεύσει ενεργό διάβρωση (προοδευτική απώλεια πάχους τοιχώματος) και ενεργή διαρροή (πραγματική απώλεια προϊόντος). Οι δοκιμές καλύπτουν το 100% του δαπέδου της δεξαμενής, καθώς και την κάτω πλευρά και την επάνω πλευρά των φύλλων δαπέδου. Ενσωματωμένη στο τακτικό πρόγραμμα συντήρησης και επιθεώρησης, αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για να διαχωριστούν οι δεξαμενές σε καλή κατάσταση, ικανές για μερικά ακόμη χρόνια ασφαλούς λειτουργίας, από δεξαμενές σε κακή κατάσταση, οι οποίες θα πρέπει να ανοίξουν για εσωτερική επιθεώρηση και επισκευή.

Η εφαρμογή της τεχνικής δοκιμής ΑΕ επιτρέπει στον χειριστή να ανοίγει δεξαμενές με βάση την κατάσταση του δαπέδου της δεξαμενής και όχι με χρονοδιάγραμμα. Επομένως, η συντήρηση μπορεί να επικεντρώνεται σε δεξαμενές, οι οποίες παρουσιάζουν ένδειξη σοβαρού ελαττώματος.

Οι κανονισμοί λειτουργίας δεξαμενών δεν είναι οι ίδιοι σε όλες τις ευρωπαϊκές χώρες. Υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί για τη διάρκεια της περιόδου συντήρησης έως την επόμενη εσωτερική επιθεώρηση. Για να λάβει μια επίσημη έγκριση για την παράταση μιας περιόδου εξυπηρέτησης, ο χειριστής δεξαμενής πρέπει να πείσει την υπεύθυνη αρχή, ότι η μέθοδος που χρησιμοποιεί έχει ήδη οδηγήσει στα πρώτα επιτυχή αποτελέσματα.

Η δοκιμή διάβρωσης με ΑΕ δεν περιορίζεται σε δεξαμενές AST. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη μελέτη που αναλύθηκε, ένα νέο ερευνητικό πρόγραμμα χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (EVG1 – CT – 2002 – 00067) άρχισε να δοκιμάζει δεξαμενές πλοίων, ειδικά δεξαμενών αργού πετρελαίου, για ενεργό διάβρωση. Έχει ήδη αποδειχθεί ότι αυτή η εφαρμογή είναι εφικτή παρά το σκληρό περιβάλλον που υπάρχει στη θάλασσα. Οι συνεχιζόμενες ερευνητικές δραστηριότητες, μαζί με την εμπειρία εκατοντάδων δοκιμών, εξασφαλίζουν συνεχείς βελτιώσεις, ώστε η μέθοδος ΑΕ να ενισχύσει τη θέση της για την υποστήριξη της οικονομικής και ασφαλούς λειτουργίας της εγκατάστασης. [28]

6.10| Δοκιμή δαπέδου δεξαμενής με ΑΕ: Μελέτη στην βάση δεδομένων των δοκιμών και των επακόλουθων επιθεωρήσεων

Για περισσότερο από 2 δεκαετίες τώρα, η τεχνολογία TANKPAC™ έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα αξιόπιστο εργαλείο για την αξιολόγηση της κατάστασης δαπέδου δεξαμενών χωρίς το άνοιγμα ή το άδειασμα της δεξαμενής. Βασίζεται στην ανίχνευση της ακουστικής εκπομπής (ΑΕ) που προκύπτει από τη διάβρωση του δαπέδου με ευαίσθητους αισθητήρες τοποθετημένους στο εξωτερικό της δεξαμενής. Πριν από κάθε δοκιμή, όλες οι προσαρτημένες βαλβίδες αξιολογούνται επίσης για διαρροές. Η τεχνολογία προσφέρει μια πλήρη αξιολόγηση της κατάστασης του δαπέδου της δεξαμενής και μια σύσταση για το διάστημα επανελέγχου, καθιστώντας την ένα οικονομικά αποδοτικό εργαλείο για το προγραμματισμό συντήρησης των δεξαμενών και την ιεράρχηση προτεραιοτήτων.

Σημαντικό μέρος της τεχνολογίας είναι η βάση δεδομένων που περιέχει τα δομικά και ιστορικά δεδομένα των δεξαμενών, τα στοιχεία δοκιμών TANKPAC™, τα αποτελέσματα των δοκιμών και τη συσχέτιση με τις εσωτερικές πληροφορίες επιθεώρησης παρακολούθησης, εφόσον αυτές υπάρχουν. Η βάση δεδομένων χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των αποκτηθέντων δεδομένων ΑΕ, μετά το διαχωρισμό της από τον περιβαλλοντικό θόρυβο, χρησιμοποιώντας μια σειρά αναλύσεων σήματος και προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας. Η ίδια η βάση δεδομένων επανεξετάζεται τακτικά και τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για τη διαρκή βελτίωση της τεχνολογίας μέσω μιας δυναμικής

ρύθμισης, καθώς συσσωρεύεται η τεχνογνωσία (μέχρι στιγμής ανέρχονται σε πάνω από 10.000 δοκιμές παγκοσμίως).

Η παρούσα εργασία αναφέρει μια ανασκόπηση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας και των προηγούμενων μελετών συσχετισμού/αξιολόγησης καθώς και των τελευταίων εξελίξεων στην τεχνολογία TANKPAC™, όπως νέα προηγμένα ιδιόκτητα εργαλεία λογισμικού που επιτρέπουν τώρα την αυτοματοποίηση των βημάτων ανάλυσης και βελτιώνουν την σαφήνεια της παρουσίασης αποτελεσμάτων και την συνολική ποιότητα. Επιπλέον, παρουσιάζεται η βάση δεδομένων TANKPAC™ της Mistras Group Hellas για τις εκατοντάδες δοκιμές που διεξήχθησαν τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια στην περιοχή της Μεσογείου/Μέσης Ανατολής, με γενικές στατιστικές σχετικά με τον τύπο προϊόντος των δεξαμενών δοκιμής. Τέλος, παρουσιάζονται ορισμένες περιπτώσεις ποιοτικής επικύρωσης των αποτελεσμάτων των δοκιμών TANKPAC™ με αποτελέσματα εσωτερικών επιθεωρήσεων υπερήχων ή μαγνητικός έλεγχος διαρροής (Ultrasonic Testing/Magnetic Flux Leakage – UT/MFL).

6.10.1 | Εισαγωγή

Το TANKPAC™ είναι μια μέθοδος παρακολούθησης κατάστασης βασισμένη σε ένα σύστημα ταξινόμησης που παρέχει ταξινόμηση των δαπέδων δεξαμενής η οποία κυμαίνεται από αυτές που μπορούν να επανεξεταστούν στατιστικά μετά από παρατεταμένο χρονικό διάστημα σε αυτές που απαιτούν άμεσες ενέργειες. Το σύστημα TANKPAC™ αποδείχθηκε ένα ουσιαστικό εργαλείο προγραμματισμού συντήρησης με εγγενώς ευεργετικό χαρακτήρα όσον αφορά τη μείωση του κόστους και την κατανομή των πόρων.

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας TANKPAC™ αναγνωρίζονται παγκοσμίως και χρησιμοποιούνται από τις μεγαλύτερες εταιρείες πετρελαιοειδών και πετροχημικών όπως η Saudi Aramco και η Shell.

Η μέθοδος βασίζεται στην αξιολόγηση της δραστηριότητας Ακουστικής Εκπομπής (AE) η οποία παράγεται από την απελευθέρωση ενέργειας κατά τη διάρκεια του θραύσματος ή την κατάρρευση προϊόντων διάβρωσης καθώς η αντίδραση διάβρωσης εξελίσσεται λόγω της αρχικής αύξησης του όγκου. Αυτό προκύπτει κυρίως από μια διαταραχή που μοιάζει με κύμα που προκαλείται από το υγρό και διαδίδεται μέσα στο περιβάλλον προϊόν ή/και μέταλλο. Η διαλογή της συγκεκριμένης διεργασίας απαιτεί ιδιαίτερα ευαίσθητους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες για τοποθέτηση στον τοίχο της δεξαμενής καθώς παρακολουθείται η δεξαμενή και στη συνέχεια αξιολογείται. Λόγω της αυξημένης ευαισθησίας, οι ομαλές συνθήκες δοκιμής και η εξαιρετική αναγνώριση θορύβου είναι απαραίτητες.

Όταν πραγματοποιείται η δοκιμή, οι αισθητήρες ακουστικών εκπομπών τοποθετούνται στον τοίχο της δεξαμενής γύρω από την περιφέρειά της. Μετά την επαλήθευση της ευαισθησίας των αισθητήρων, η δεξαμενή παρακολουθείται για 1 – 2 ώρες για τη δραστηριότητα ΑΕ. Η δραστηριότητα ΑΕ αυξάνεται με την ποσότητα και το ποσοστό διάβρωσης και εξαιτίας αυτού του γεγονότος δημιουργείται εμπειρική σχέση με τη συνολική κατάσταση του δαπέδου.

Η ανάλυση δεδομένων πραγματοποιείται σε δύο βασικά στάδια:

- Το στάδιο της ερμηνείας όπου τα μη συναφή δεδομένα όπως περιβαλλοντικά, μηχανικά και ηλεκτρικά σήματα θορύβου φιλτράρονται και απορρίπτονται.
- Το στάδιο αξιολόγησης όπου η προκύπτουσα/εναπομείνουσα πληροφορία πρώτου σταδίου βαθμολογείται με βάση μια ποικιλία παραμέτρων (π.χ. δραστηριότητα ΑΕ και τα χαρακτηριστικά της, διάφορες μετρήσεις δομής). Επιπλέον, οι χωρικές πληροφορίες για την προαναφερθείσα διεργασία εξάγονται με τη χρήση τελευταίας τεχνολογίας αλγορίθμων τριπλασιασμού, οι οποίοι μπορούν να παρέχουν ενδεικτικές περιοχές που σχετίζονται με σοβαρή διάβρωση.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνουν:

- Έλεγχο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της δεξαμενής.
- Απαιτείται πρόσβαση μόνο στον τοίχο της δεξαμενής
- 100% παρακολούθηση δαπέδου δεξαμενής, συμπεριλαμβανομένου του κυκλικού δακτυλίου
- Προκαταρκτικά αποτελέσματα αμέσως μετά τη δοκιμή
- Η μείωση κινδύνου ρύπανσης περιβάλλοντος, λόγω έγκαιρης διάγνωσης πιθανών διαρροών
- Η σημαντική μείωση του κόστους συντήρησης (δεν χάνουμε χρήματα για το άνοιγμα καλών δεξαμενών)
- Η συντήρηση έχει προτεραιότητα, έχοντας προγραμματίσει πρώτες τις δεξαμενές που εμφανίζουν ζημιά
- Είναι ένα ιδανικό εργαλείο για την εφαρμογή προγραμμάτων ελέγχου με βάση τον κίνδυνο
- Είναι μια πολύ γρήγορη και χαμηλού κόστους επιθεώρηση με ελάχιστες διακοπές λειτουργίας και χρόνου προς χρήση της δεξαμενής

Οι περιορισμοί της μεθόδου περιλαμβάνουν:

- Το γεγονός ότι δεν παρέχει ποσοτικές πληροφορίες σχετικά με το υπόλοιπο πάχος του δαπέδου της δεξαμενής
- Η αβεβαιότητα της θέσης πηγής ΑΕ εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, επομένως οι πληροφορίες πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή. Η ακρίβεια της θέσης της πηγής

διάβρωσης ενδέχεται να υποβαθμιστεί σε μεγάλες δεξαμενές σε κακή κατάσταση

- Μπορεί να εντοπιστούν μικρές διαρροές οι οποίες να μην προκαλούν σημαντική επίδραση στο αποτέλεσμα της δοκιμής. Ωστόσο, οι μικρές διαρροές μπορεί στο σύνολο τους να είναι μέρος ενός πολύ ενεργού δαπέδου διάβρωσης
- Μπορεί να εντοπιστούν μεγάλες διαρροές, αλλά μπορεί να καλύψουν άλλες δραστηριότητες ΑΕ του δαπέδου της δεξαμενής. Στην περίπτωση αυτή, η βαθμολόγηση μπορεί να μην είναι δυνατή
- Η μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για την εκτίμηση της ενεργού διάβρωσης, εάν η εσωτερική κατάσταση της δεξαμενής αλλάζει περιοδικά είτε μέσω αλλαγής του προϊόντος είτε μέσω μηχανικού/χημικού καθαρισμού της δεξαμενής, καθώς αυτό επαναφέρει την εσωτερική κατάσταση του δαπέδου της δεξαμενής. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να είναι δυνατή η ανίχνευση της διάβρωσης κάτω από την επιφάνεια
- Η διάβρωση που δεν έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό της κλίμακας, όπως η MIC5 (βιολογικά προκαλούμενο), μπορεί να μην ανιχνεύεται.

6.10.2 | Εργαλεία ανάλυσης

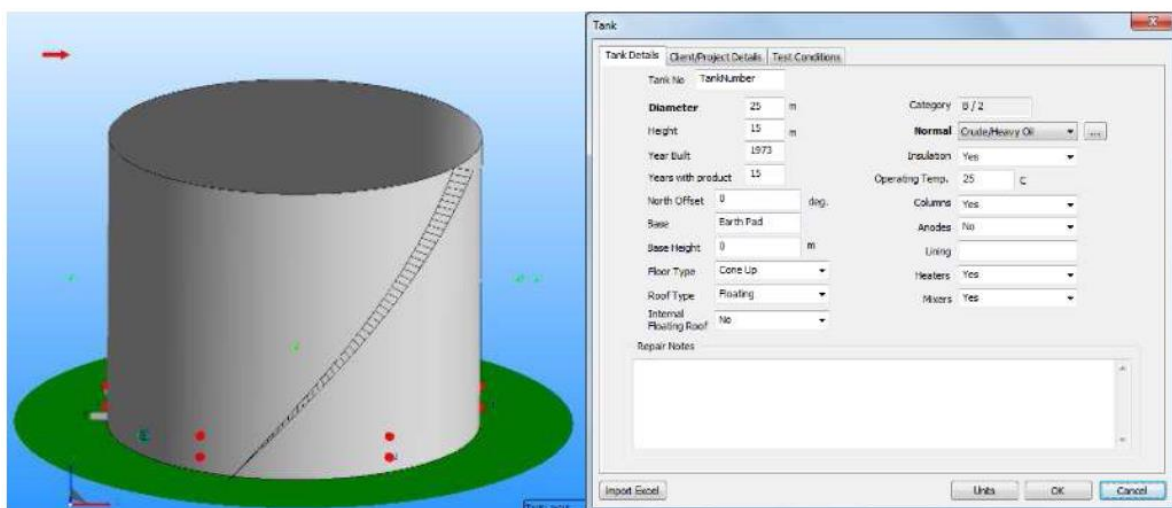
Η ανάλυση πραγματοποιείται με τη χρήση λογισμικού αναγνώρισης μοντέλων NOESIS προηγμένης ΑΕ δεδομένων και λογισμικού νευρωνικών δικτύων. Το λογισμικό έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιείται τόσο σε εφαρμογές πεδίου όσο και σε ερευνητικές εφαρμογές, οι οποίες ποικίλουν σε προηγμένο συνδυασμό φίλτρων, επιλογές ανάλυσης, αυτοματισμούς έως αυτόματη δημιουργία αναφορών.

Το λογισμικό καθίσταται διαισθητικό απέναντι στον χρήστη, αφού όλοι οι έμπειροι αναλυτές TANKPAC™ δεσμεύονται να ακολουθήσουν συγκεκριμένα διαδικαστικά βήματα για να εξαγάγουν πληροφορίες σχετικά με τη δραστική διάβρωση. Δεδομένου ότι η όλη διαδικασία ενσωματώνεται εντός, η ανάλυση δεν είναι πλέον επιρρεπής στα περισσότερα μικρά ανθρώπινα σφάλματα, επομένως εξασφαλίζεται η αυστηρή συμμόρφωση με τα διαδικαστικά βήματα και η συνέπεια και η ποιότητα διατηρούνται στον υψηλότερο βαθμό.

Ο διαισθητικός χαρακτήρας του λογισμικού προς τον χρήστη προσέδωσε μεγάλη προσοχή στην ανάλυση, καθώς μικρές λεπτομέρειες, όπως πολλές διαφορετικές κανονικοποιήσεις ή άλλοι υπολογισμοί, συχνά έλαβαν μέριμνα για την αυτόματη εξαγωγή της πιο γρήγορης πληροφορίας. Δεδομένου ότι ο χρήστης/αναλυτής είναι ελεύθερος να δαπανήσει μεγάλο χρονικό διάστημα κάνοντας όλους τους υπολογισμούς που απαιτούνται συνήθως για το στάδιο της ερμηνείας, όλη η

⁵ MIC (Microbial corrosion, or microbially – induced corrosion, corrosion caused or promoted by microorganisms)
Μικροβιακή διάβρωση ή μικροβιακή επαγόμενη διάβρωση, διάβρωση που προκαλείται ή προάγεται από μικροοργανισμούς

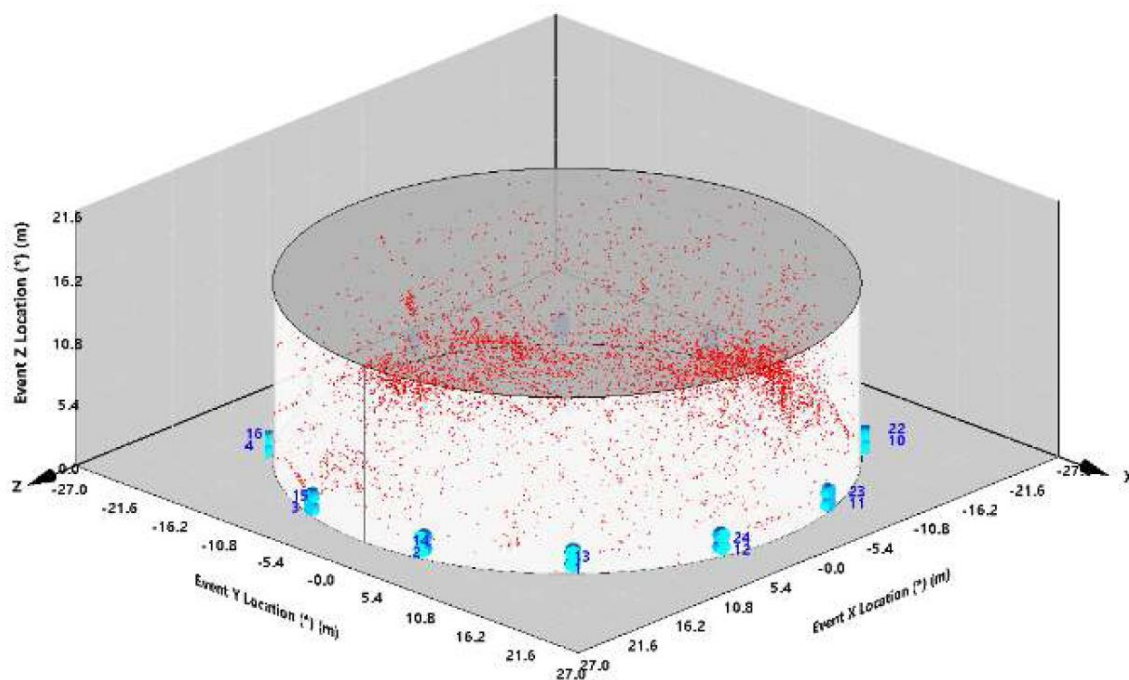
προσπάθεια μπορεί να επικεντρωθεί στον συνδυασμό και την τελειοποίηση των παραμέτρων φιλτραρίσματος. Πολύ συχνά και όπου εμφανίζεται να υπάρχει μια μεγάλη ασάφεια όσον αφορά τα δεδομένα ερμηνείας, εφαρμόζονται πολλοί εναλλακτικοί συνδυασμοί φιλτραρίσματος ή σχήματα με ελάχιστες ενέργειες από την πλευρά των χρηστών, έτσι εναλλακτικά αποτελέσματα ή σενάρια πολλαπλών αναλύσεων διατίθενται μέσα σε λίγα λεπτά. Επιπλέον, ένα αρχείο καταγραφής όλων των ενεργειών διατηρείται στο λογισμικό για μια αναθεώρηση επιπέδου III, διατηρώντας έτσι την υψηλότερη δυνατή ποιότητα και συνέπεια των αποτελεσμάτων. Τέλος, το λογισμικό προσφέρει πλήρη αυτοματοποιημένη αναφορά που μπορεί να βασίζεται σε πρότυπα πελατών και εξαγωγή όλων των πληροφοριών δοκιμής που μπορούν εύκολα να αρχειοθετηθούν σε μια βάση δεδομένων για μελλοντική αναφορά και συγκρίσεις. Στην Εικόνα 48 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα δεξαμενής προγραμματισμένης για επιθεώρηση.



Εικόνα 48. Τρισδιάστατη προβολή δεξαμενής προγραμματισμένης για επιθεώρηση

Είναι επίσης δυνατή η επικάλυψη δεδομένων χρησιμοποιώντας άλλες πηγές (υπερήχους κ.λπ.).

Στην Εικόνα 49 έχουμε την τρισδιάστατη θέση των μη φιλτραρισμένων συμβάντων ΑΕ χρησιμοποιώντας δεδομένα από δύο σειρές για ερμηνεία/φιλτράρισμα. Επίσης, φαίνεται το αποτέλεσμα της τρισδιάστατης θέσης των μη φιλτραρισμένων δεδομένων. Αυτό είναι ένα συμπληρωματικό χαρακτηριστικό, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως σε σταθερές δεξαμενές οροφής, ενώ ορισμένα μη σχετιζόμενα δεδομένα μπορούν να αποκτηθούν λόγω της συμπίκνωσης στο εσωτερικό της δεξαμενής. Χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες και από τις δύο σειρές αισθητήρων, τα συμβάντα ΑΕ που δεν παράγονται από το δάπεδο της δεξαμενής μπορούν να διακριθούν και να απορριφθούν από το σύνολο δεδομένων.



Εικόνα 49. Τρισδιάστατη θέση των μη φιλτραρισμένων συμβάντων ΑΕ

Στην Εικόνα 50 παρακάτω είναι μερικά παραδείγματα διάφορων προεπιλεγμένων (βασικών) καθώς και προηγμένων συνδυασμών επιλογής παραμέτρων που είναι διαθέσιμες σε οποιοδήποτε στάδιο της ανάλυσης.

Select filter type :

- ☒ Top Row Sensors Activity Filter
- ☐ Mechanical Noise Filter
- ☐ EMI Filter
- ☐ Time Filter

<input type="radio"/> Off	<input checked="" type="checkbox"/> Risetime		0	50	AND
<input type="radio"/> Accept	<input checked="" type="checkbox"/> Duration		0	2048	AND
<input checked="" type="radio"/> Reject	<input checked="" type="checkbox"/> Class ID (°)		2	4	

Filter 2

<input type="radio"/> Off	<input checked="" type="checkbox"/> Amplitude		40	100	AND
<input type="radio"/> Accept	<input checked="" type="checkbox"/> Counts		100	250	AND
<input checked="" type="radio"/> Reject	<input checked="" type="checkbox"/> Energy		256	1024	

Filter 3

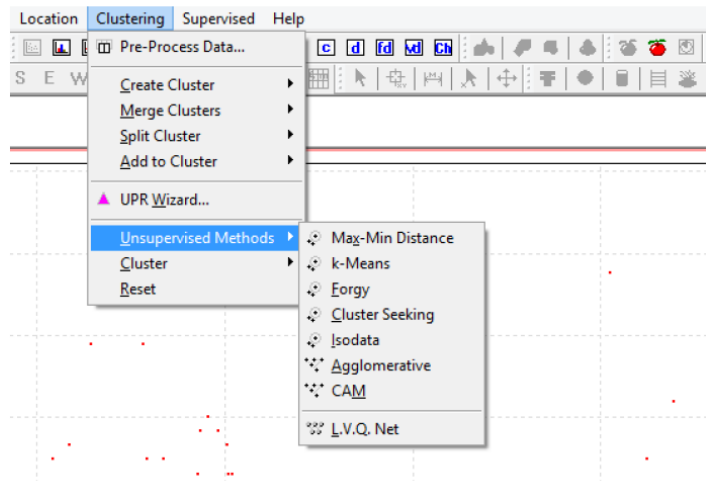
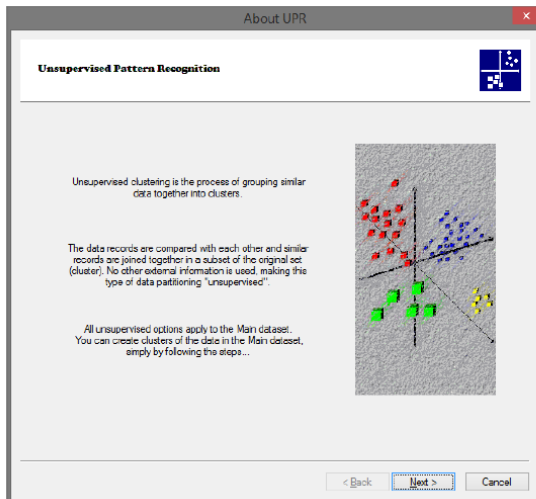
<input type="radio"/> Off	<input checked="" type="checkbox"/> Channel (°)		0	0	AND
<input checked="" type="radio"/> Accept	<input checked="" type="checkbox"/> Parametric 1		0	0	AND
<input type="radio"/> Reject	<input checked="" type="checkbox"/>		0	0	

Filter 4

<input type="radio"/> Off	<input type="checkbox"/>		0	0	AND
---------------------------	--------------------------	--	---	---	-----

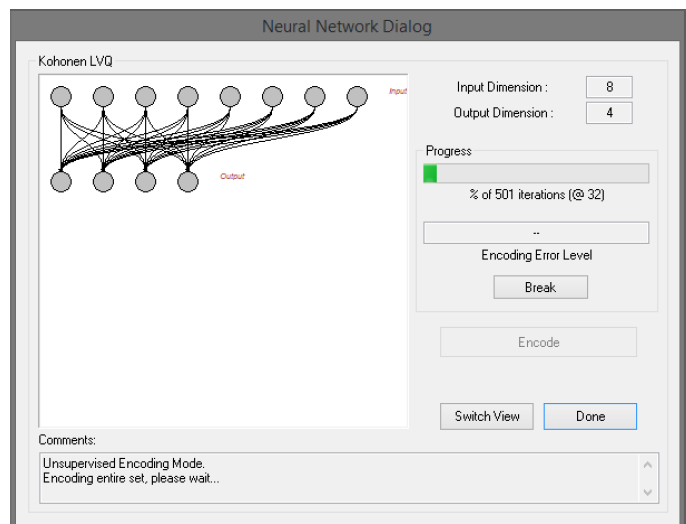
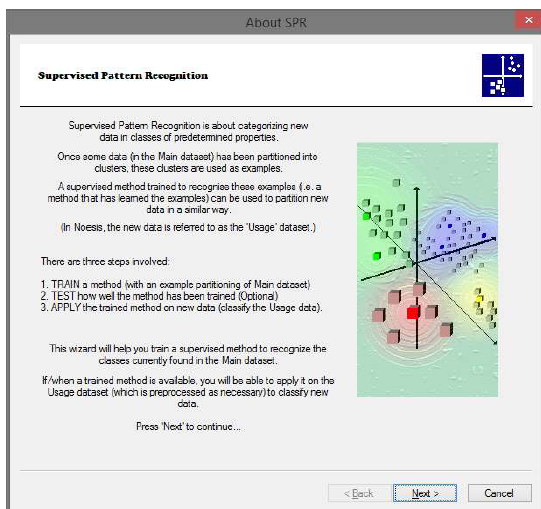
Εικόνα 50. Παραδείγματα επιλογής προεπιλογής και προώθησης φιλτραρίσματος

Στο λογισμικό περιλαμβάνεται μεγάλη ποικιλία ενοτήτων αναγνώρισης προτύπων για την προηγμένη ταξινόμηση και το φιλτράρισμα δεδομένων, χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους με ή χωρίς επιτήρηση ή νευρωνικά δίκτυα.



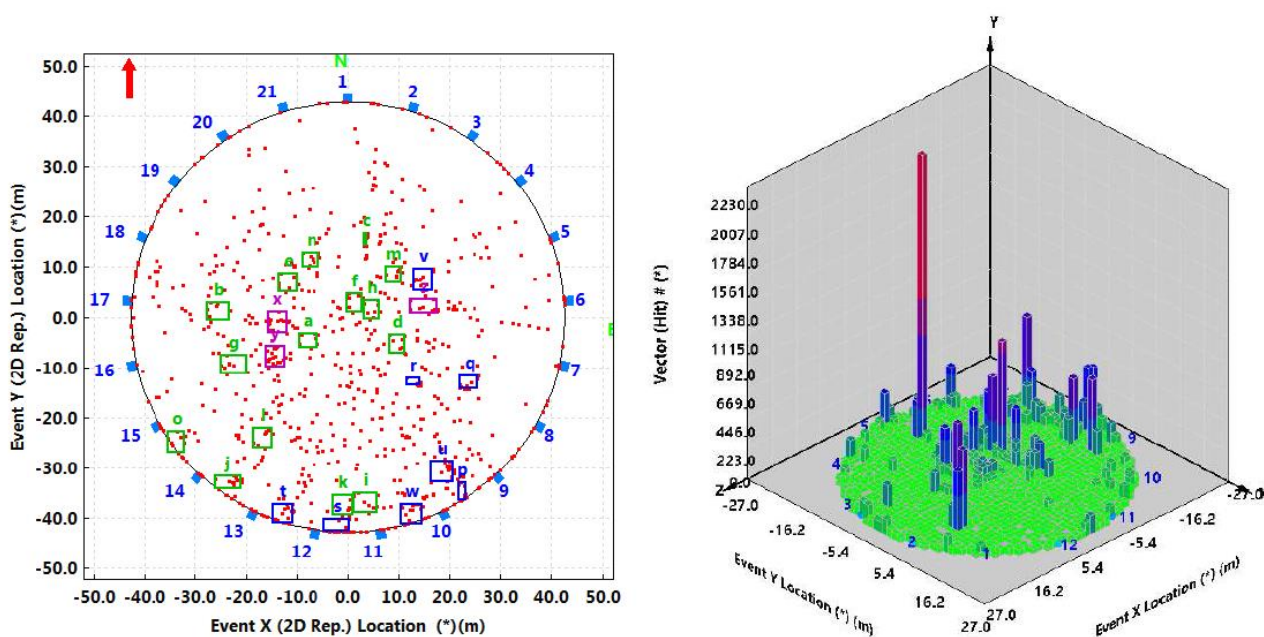
Εικόνα 51. Παραδείγματα υπομονάδων αναγνώρισης μοτίβων χωρίς επίβλεψη

Στην Εικόνα 51 έχουμε παραδείγματα υπομονάδων αναγνώρισης μοτίβων χωρίς επίβλεψη για ερμηνεία και φιλτράρισμα δεδομένων προηγμένης ταξινόμησης.



Εικόνα 52. Παραδείγματα υπομονάδων αναγνώρισης προτύπων για προχωρημένη ερμηνεία και φιλτράρισμα δεδομένων

Μία δισδιάστατη θέση των πηγών διαβρώσεως μαζί με ταξινόμηση χρώματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 53 που ακολουθεί. Τα χρώματα συνδέονται με τη σοβαρότητα των εντοπισμένων συστάδων διάβρωσης του δαπέδου της δεξαμενής.



Εικόνα 53. Παράδειγμα δισδιάστατης θέσης σε δάπεδο δεξαμενής

Το αριστερό δισδιάστατο γράφημα δείχνει τη συστοιχία που σχετίζεται αναλογικά με τη σοβαρότητα. Το δεξί δισδιάστατο γράφημα δείχνει τη χωρική κατανομή δραστηριότητας ΑΕ.

Όλα τα παραπάνω εργαλεία λογισμικού φτιάχνονται για να αντιμετωπίσουν το πιο συνηθισμένο πρόβλημα κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής TANKPAC™ που δεν είναι άλλος από την μόλυνση των δεδομένων με εξωτερικό θόρυβο. Για το σκοπό αυτό, είναι εξαιρετική η αναγνώριση και ο έλεγχος του θορύβου. Τρεις βασικές κατηγορίες πηγών θορύβου είναι κοινές κατά τη διάρκεια των δοκιμών:

1. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις περιβαλλοντικές πηγές που οφείλονται σε καιρικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων αλλά χωρίς να περιορίζονται σε ριπές ανέμου, κλίσεις βροχής ή θερμοκρασίας που προκαλούν σχηματισμό σταγονιδίων συμπύκνωσης και πρόσκρουση στην ελεύθερη επιφάνεια του προϊόντος.
2. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει όλες τις μηχανικές πηγές που μπορεί να υπάρχουν κατά τη διάρκεια της δοκιμής, όπως η λειτουργία γειτονικού εξοπλισμού (π.χ. λειτουργία μεικτή, σωλήνες που έρχονται σε επαφή με τη δεξαμενή, ενεργές αντλίες κλπ.).
3. Η τρίτη κατηγορία, ευκολότερη στον έλεγχο και την απομόνωση σε σύγκριση με τις προηγούμενες δύο κατηγορίες, περιλαμβάνει όλα εκείνα τα σήματα που μπορούν να παραχθούν και στη συνέχεια να αποκτηθούν εξαιτίας ηλεκτρικής, ηλεκτρονικής ή RF (Radio Frequency) παρεμβολής.

Το αποτέλεσμα των μη σχετικών πηγών θορύβου που εμπίπτουν στην πρώτη κατηγορία είναι το λιγότερο ελεγχόμενο από τον χειριστή κατά τη διάρκεια της δοκιμής και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι τόσο ακραίο ώστε να είναι ικανό να απαγορεύσει ή να εμποδίσει τη διαδικασία

δοκιμής. Ωστόσο, το εργαλείο λογισμικού μετά την επεξεργασία μπορεί να ελαχιστοποιήσει τον αντίκτυπό του στην αξιολόγηση δεδομένων, εφόσον η χρονική θέση των πηγών είναι καλά τεκμηριωμένη.

Η δεύτερη και η τρίτη κατηγορία μπορούν να ελέγχονται αποτελεσματικά από τον χειριστή/αναλυτή πριν και κατά τη διάρκεια των δοκιμών, καθώς και στο στάδιο μετά την επεξεργασία, χρησιμοποιώντας τα προαναφερθέντα εξειδικευμένα εργαλεία λογισμικού για την προηγμένη επεξεργασία δεδομένων.

6.10.3 | Προηγούμενες μελέτες και ταξινόμηση δεξαμενών

Η μέθοδος ΑΕ ως μέθοδος μπορεί να προσαρμοστεί για την παρακολούθηση διαφόρων διαδικασιών. Ειδικά για την αξιολόγηση της εσωτερικής κατάστασης του δαπέδου των δεξαμενών, δίδεται μεγάλη έμφαση σε ένα διπλό ερώτημα και πρέπει να αντιμετωπιστεί. Πώς μπορεί να δοθεί προτεραιότητα στις δεξαμενές για συντήρηση και για να εξοικονομηθεί το συντριπτικό ποσό του προκύπτοντος ετήσιου κόστους και περιβαλλοντικών ζητημάτων από τη διαχείριση των τοξικών αποβλήτων;

Από την ανάπτυξη της μεθόδου και την αρχική της εφαρμογή στα τέλη της δεκαετίας του 80, πραγματοποιήθηκαν αρκετές μελέτες για να επαληθευτεί η εγκυρότητα των μεθόδων και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος ξεκίνησε ως μέθοδος ανίχνευσης διαρροών στη δεκαετία του 80, ωστόσο, σύντομα ήταν προφανές ότι θα μπορούσε να επεκταθεί σε μεγάλο βαθμό προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για την αποφυγή διαρροών παρά για την απλή ανίχνευσή τους.

Αυτή η ανάλυση είναι μια ανεξάρτητη ανάλυση της μεθόδου από μια ομάδα χρηστών υπό την προεδρία του Peter van De Loo, όπου τα αποτελέσματα της μεθόδου συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα εσωτερικών επιθεωρήσεων και τις επισκευές που πραγματοποιήθηκαν. Επιπλέον, η μέθοδος εισήχθη επίσης στις ιαπωνικές βιομηχανίες το 1999 και από τότε έχει αναπτυχθεί μια μεγάλη βάση δεδομένων δοκιμών ΑΕ προκειμένου να τηρηθούν οι ιαπωνικοί κανονισμοί για τη συντήρηση των δεξαμενών. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μελέτες, τόσο σε εργαστηριακό όσο και σε πεδίο, που δείχνουν σύγκριση και εκτιμήσεις της ποιότητας της θέσης, καθώς και ανίχνευση διάβρωσης και διάκριση μεταξύ της διάβρωσης και των περαιτέρω σταδίων υποβάθμισης. Η μέθοδος βελτιώνεται συνεχώς με την πάροδο των χρόνων, ενσωματώνοντας την εμπειρία που αποκτάται από την αυξανόμενη ποσότητα δεξαμενών που δοκιμάστηκαν (περισσότερες από 10.000 σε ολόκληρη τη χώρα) και τα αποτελέσματα παρακολούθησης που μοιράζονται διάφοροι κλάδοι που χρησιμοποιούν τη μέθοδο ως το προτιμώμενο εργαλείο για συστήματα συντήρησης δεξαμενών.

Η εσωτερική κατάσταση των δεξαμενών, που προέκυψε από τον μεγάλο πληθυσμό των διεξαγόμενων δοκιμών, αποδίδεται σε έναν πίνακα τύπου ελέγχου βάσει κινδύνου (RBI – Risk – Based Inspection) που χωρίζει την ταξινόμηση της κατάστασης του δαπέδου δεξαμενής και δίνει συστάσεις σχετικά με το διάστημα επιθεώρησης. Χρησιμοποιώντας αυτό το σύστημα ταξινόμησης, η συντήρηση και οι πόροι κατανέμονται εκεί που χρειάζονται περισσότερο. Η ανάλυση του συστήματος ταξινόμησης μπορεί να βρεθεί στις προαναφερθείσες πηγές. Ο παρακάτω Πίνακας 15 δείχνει την ταξινόμηση TANKPAC™ σε μορφή RBI.

"ΒΑΘΜΟΣ PLD"	5	III	III	IV	IV	IV	I - Δεν υπάρχει ενεργή ζημιά, επανεξέταση σε 4/5 έτη
	4	II	III	III	IV	IV	II - Μικρή ενεργή βλάβη, επανεξέταση σε 2 έτη
	3	II	II	III	III	III	III - Ενεργή βλάβη, επανεξέταση σε μέγιστο χρόνο 1 έτους ή προγραμματισμός εσωτερικής επιθεώρησης
	2	I	I	II	II	n/a	IV - Πολύ ενεργή βλάβη, επανεξέταση σε 6 μήνες ή προγραμματισμός εσωτερικής επιθεώρησης
Καθόλου ή 1		I	I	II	n/a	n/a	n/a - Δεν θα έπρεπε να συμβεί εάν χρησιμοποιήθηκε πρότυπο κατώφλι
"ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ"	----	A	B	C	D	E	

Πίνακας 15. Το σύστημα ταξινόμησης TANKPAC™

Μετά τη συλλογή δεδομένων και την απομάκρυνση των εξωγενών πηγών θορύβου, διεξάγονται διάφορα επίπεδα ανάλυσης:

- Όλες οι δραστηριότητες από τη δεξαμενή που καταγράφηκαν πάνω από το όριο του συστήματος, βαθμολογούνται A – E (τουλάχιστον στα περισσότερα) σύμφωνα με την ανεπτυγμένη εμπειρία της τεχνολογίας TANKPAC™.
- Χρησιμοποιώντας τις μεθόδους εντοπισμού χρόνου των πηγών AE που χτυπούν τρεις αισθητήρες, η δραστηριότητα εντοπίζεται και εμφανίζεται στο δάπεδο της δεξαμενής.
- Διεξάγεται περαιτέρω ανάλυση για να προσδιοριστεί τα PLD (Potential Leak Data) τα οποία είναι δεδομένα που βρέθηκαν (από την εμπειρία) ότι είναι πιο χαρακτηριστικά της σοβαρής εντοπισμένης διάβρωσης. Τα δεδομένα PLD ταξινομούνται ξεχωριστά ως 1 έως 5 ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους AE και σχεδιάζονται σε PLD γραφήματα θέσης δεξαμενής.
- Συνδυάζοντας τον Συνολικό βαθμό δεδομένων και τον Βαθμό PLD, παρέχεται ένας σύνθετος βαθμός από I έως IV μαζί με μια σύσταση για σχεδιασμό επιθεώρησης ή επανεξέταση (0 έως 5 έτη). Όπου θεωρείται ότι η δεξαμενή διαρρέει, πρέπει να αναφέρεται.

6.10.4| Στατιστικά στοιχεία της βάσης δεδομένων Mistras Group Hellas

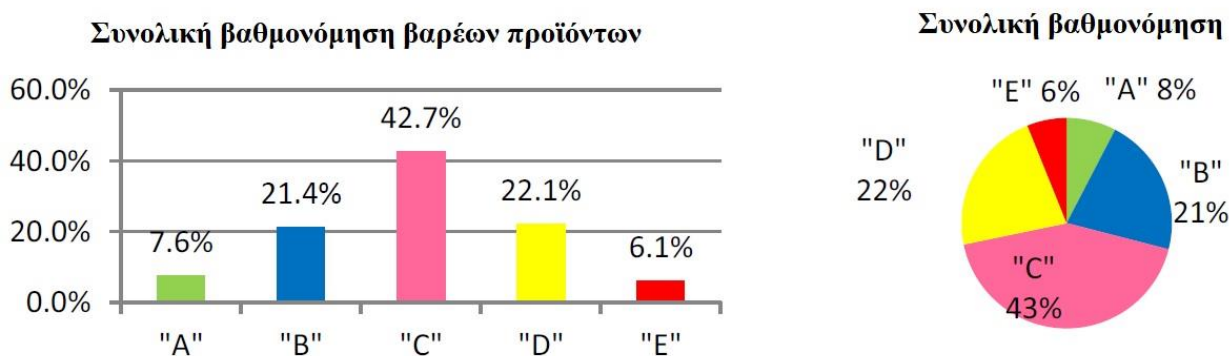
Από το 1997, ένας μεγάλος πληθυσμός δεξαμενών δοκιμάστηκε από την Mistras Group Hellas χρησιμοποιώντας την τεχνολογία TANKPAC™. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν και θα συζητηθούν διάφορες στατιστικές σχετικά με τη χρήση καθώς και τη βαθμολόγηση της δεξαμενής. Το διάγραμμα πίτας στο Σχήμα 59 που ακολουθεί δείχνει ένα αντιπροσωπευτικό ποσοστό των

προϊόντων που χρησιμοποιούνται. Η ταξινόμηση των δεξαμενών με βάση το προϊόν που αποθηκεύεται, θα εξεταστεί εάν το προϊόν είναι ελαφρύ (επεξεργασμένο/τελικό προϊόν) ή βαρύ (ακατέργαστο, παχύ) κ.λπ.



Σχήμα 59. Προϊόντα σε δεξαμενές επιφανειακής αποθήκευσης δοκιμασμένες με το TANKPAC

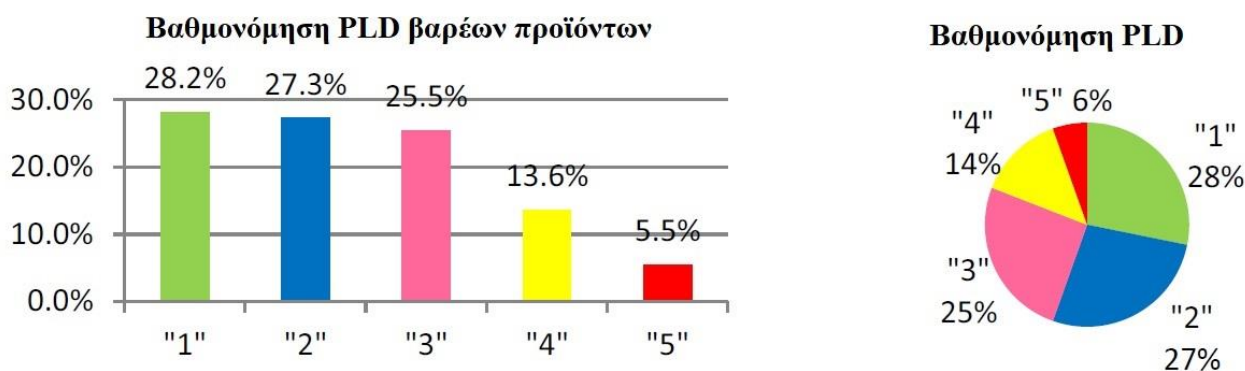
Το Σχήμα 60 που ακολουθεί δείχνει τη διανομή πέντε βαθμών της κατάστασης δαπέδου δεξαμενών βαρέων προϊόντων με βάση τη δραστηριότητα ΑΕ των δεξαμενών. Πάνω από το 70% των δοκιμασμένων δεξαμενών βρέθηκαν να έχουν δευτερεύουσες έως ενδιάμεσες δραστηριότητες ΑΕ (κατηγορίες Α, Β, C) που συνήθως υποδεικνύουν την εμφάνιση ή/και την ανάπτυξη ενεργού διάβρωσης, είτε τοπική είτε γενική. Αυτό διαπιστώνεται ότι είναι χαρακτηριστικό στις περισσότερες δεξαμενές βαρέων προϊόντων δεδομένου ότι το διαβρωτικό περιβάλλον μπορεί να αναπτυχθεί λόγω του νερού ή της υψηλής περιεκτικότητας σε θείο που μπορεί να υπάρχει μαζί με το προϊόν στο εσωτερικό.



Σχήμα 60. Συνολική ταξινόμηση δεξαμενών AST που περιέχουν βαρέα προϊόντα

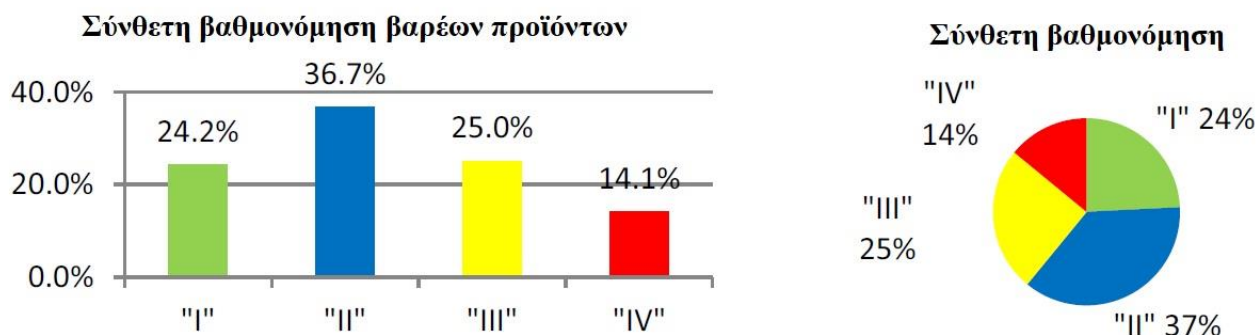
Στο ακόλουθο Σχήμα 61 η κατανομή των αποτελεσμάτων ταξινόμησης PLD φαίνεται από τις δοκιμασμένες δεξαμενές βαρέως προϊόντος. Η ταξινόμηση PLD συσχετίζεται με τοπικά συστάδες εντοπισμένων ΑΕ συμβάντων που σχετίζονται με σοβαρή ενεργή διάβρωση. Από το Σχήμα 61 φαίνεται εύκολα ότι σχεδόν στο 60% (1, 2) έχουν πολύ αραιές ή καμία, τοπικές συστάδες. Το 26%

των περιπτώσεων απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση των τοποθεσιών που βρέθηκαν, ενώ στο υπόλοιπο 20% (4, 5) τοις εκατό των περιπτώσεων εμφανίζεται έντονη τοπική δραστηριότητα ΑΕ η οποία πρέπει να ληφθεί με ιδιαίτερους λόγους, τα δεδομένα, προκειμένου να εξεταστεί διεξοδικά η δραστηριότητα και να παραχθούν σημαντικά, χρήσιμα και αξιόπιστα αποτελέσματα.



Σχήμα 61. PLD Ταξινόμηση δεξαμενών AST που περιέχουν βαρέα προϊόντα

Το Σχήμα 62 παρουσιάζει την κατανομή των σύνθετων βαθμών που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 14, οι οποίες προέκυψαν από την ανάλυση TANKPAC σε δεξαμενές βαρέων προϊόντων. Από αυτή τη διανομή μπορεί κανείς να συμπεράνει με βεβαιότητα ότι τουλάχιστον το 60% (I, II) των δοκιμασμένων δεξαμενών θα μπορούσε να επανεξεταστεί σε μεταγενέστερο χρόνο προκειμένου να εκτιμηθούν και πάλι οι διαφορές στην εσωτερική τους κατάσταση, ενώ ένα μεγάλο ποσοστό σχεδόν το 25% (III) θα πρέπει να επανεξεταστούν εντός μικρότερου χρονικού διαστήματος ή να δοθεί προτεραιότητα στη συντήρηση. Ένα μικρό ποσοστό 14% (μόνο η κατηγορία IV) δεξαμενών βαρέων προϊόντων, όπως αναμένεται, φαίνεται να βρίσκεται στη χειρότερη κατηγορία και συνεπώς θα πρέπει να ληφθούν άμεσα μέτρα από την ιεράρχηση των επιθεωρήσεων έως την πλήρη συντήρηση.

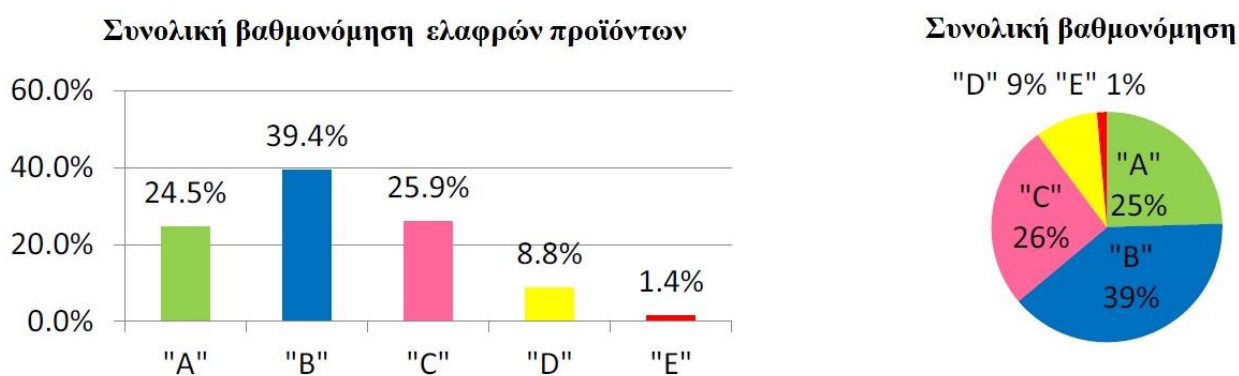


Σχήμα 62. Σύνθετη ταξινόμηση δεξαμενών αποθήκευσης AST που περιέχουν βαρέα προϊόντα

Οι δοκιμασμένες δεξαμενές αποθήκευσης που περιέχουν ελαφρά προϊόντα φαίνεται να έχουν μικρή έως ενδιάμεση ταξινόμηση, με βάση τη δραστηριότητά τους. Αυτό αντικατοπτρίζεται στον

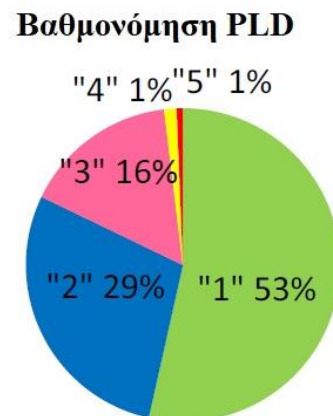
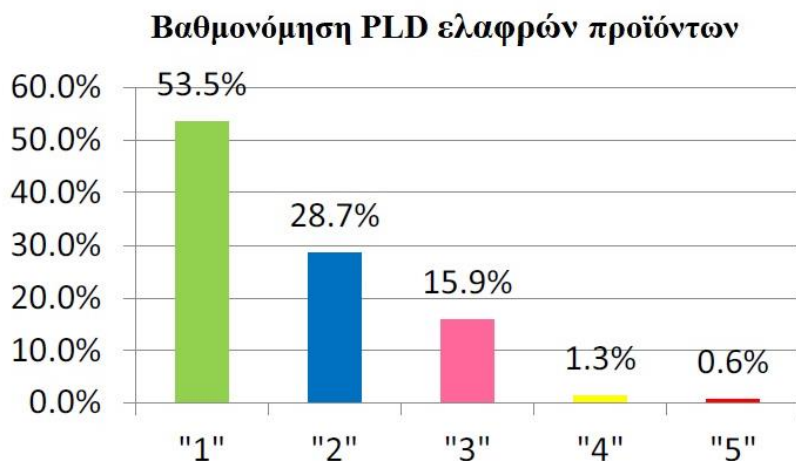
ακόλουθο αριθμό, καθώς περίπου το 90% των δοκιμασμένων δεξαμενών φαίνεται ότι έχουν δευτερεύουσα έως ενδιάμεση ΑΕ. Ένας από τους κύριους λόγους πίσω από αυτό, θα μπορούσε να είναι ότι γενικά, τα ελαφρύτερα προϊόντα είναι καθαρότερα και πιο ομοιογενή, των οποίων η χημική σύνθεση και η καθαρότητα διατηρούνται σε αυστηρές αντισταθμίσεις.

Ως εκ τούτου, είναι λιγότερο πιθανό, άλλοι διαβρωτικοί παράγοντες ή μολύνσεις να υπάρχουν μέσα στην αποθήκευση σε τόσο μεγάλες ποσότητες που θα δημιουργούσαν διαβρωτικό περιβάλλον, όπως το νερό. Φυσικά, η αποτυχία της επένδυσης καθώς και πολλές άλλες αιτίες είναι παράγοντες που συμβάλλουν στην ενεργό διάβρωση, αλλά γενικά παρατηρείται συνήθως μικρή έως ενδιάμεση ΑΕ.



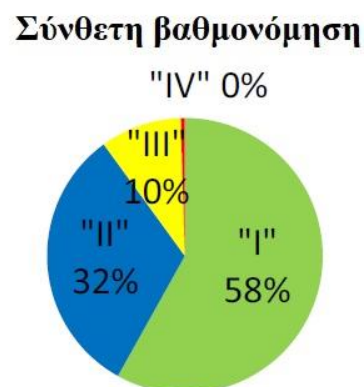
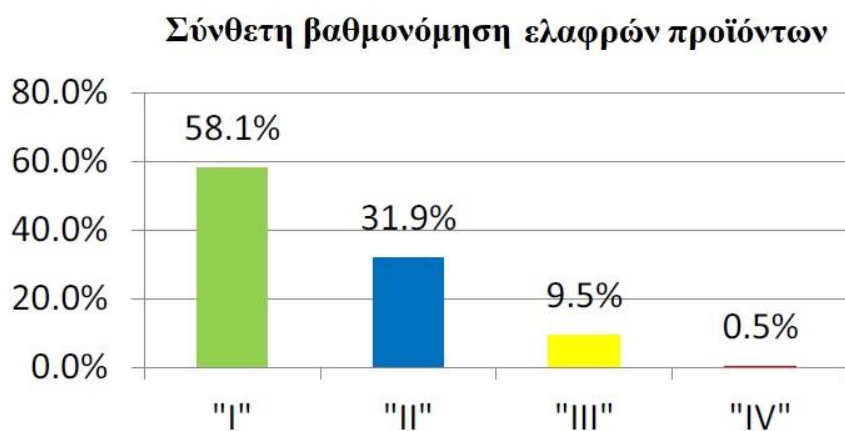
Σχήμα 63. Συνολική ταξινόμηση των δεξαμενών ΑΣΤ που περιέχουν ελαφρά προϊόντα

Η ταξινόμηση PLD για ελαφρά προϊόντα δεν φαίνεται να παρουσιάζει σημαντικές τάσεις, εκτός από το γεγονός ότι μπορούν να εμφανιστούν μικρές τοπικές τοποθεσίες. Στο Σχήμα 64 και 82% (1, 2) των δεξαμενών φαίνεται να μην έχουν τίποτα να εμφανίσει τοπική συσταδοποίηση ΑΕ. Επιπλέον, το άλλο σχεδόν 16% (III) και πάλι όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις βαρέων προϊόντων απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση των τοποθετημένων συστάδων. Ωστόσο, υπάρχει ένα μικρό αλλά σημαντικό ποσοστό σχεδόν 10% με έντονη τοπική δραστηριότητα ΑΕ. Ο ίδιος συλλογισμός για το προαναφερθέν ελεγχόμενο περιβάλλον και την ποιότητα του προϊόντος μπορεί επίσης να εφαρμοστεί εδώ για να δοθεί μια εξήγηση των στατιστικών που προκύπτουν.



Σχήμα 64. PLD Ταξινόμηση δεξαμενών αποθήκευσης AST που περιέχουν ελαφρά προϊόντα

Τέλος, με βάση την κατανομή σύνθετου βαθμού στο Σχήμα 65, οι περισσότερες δεξαμενές δοκιμασμένου ελαφρού προϊόντος (περίπου 90% των κατηγοριών I και II) φαίνεται να είναι σε καλή κατάσταση, ώστε να μπορούν να επανεξεταστούν σε παρατεταμένο χρονικό διάστημα προκειμένου να επανεκτιμηθεί η κατάστασή τους. Ωστόσο, ένα μικρό αλλά σημαντικό ποσοστό 10% απαιτείται άμεση προτεραιότητα για επιθεώρηση ή/και συντήρηση.

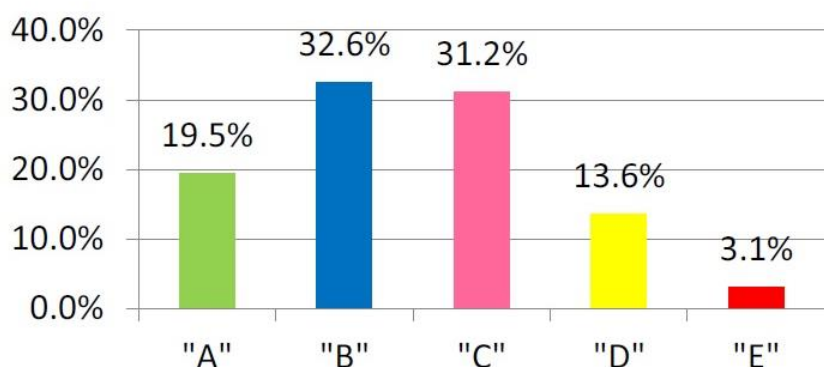


Σχήμα 65. Σύνθετη ταξινόμηση δεξαμενών AST που περιέχουν ελαφρά προϊόντα

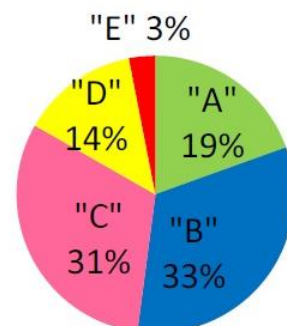
Από τα στατιστικά στοιχεία των δύο αντιπροσωπευτικών περιπτώσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι εμφανής η διαφορά μεταξύ της εκτιμώμενης κατάστασης των δεξαμενών αποθήκευσης ελαφρού προϊόντος και των δεξαμενών αποθήκευσης βαρέων προϊόντων. Επιπλέον, μπορεί κανείς να παρεκκλίνει και να γενικεύσει ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά στο περιβάλλον αποθήκευσης ελαφρών και βαρέων προϊόντων και αυτό είναι σαφώς ενσωματωμένο στη μέθοδο για να έχουμε ομαλοποιημένα και συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Το παρακάτω Σχήμα 66 δείχνει τη διανομή των συνολικών βαθμών σε όλες τις δοκιμασμένες δεξαμενές στη βάση δεδομένων. Από αυτό προκύπτει ότι 87% (Α έως C) των ελεγχόμενων δεξαμενών ανεξάρτητα από το προϊόν εμφανίζονται να έχουν μικρή έως ενδιάμεση δραστηριότητα, η οποία είναι πολύ καλή λαμβάνοντας υπόψη όλες τις επιθεωρήσεις και συντηρήσεις που έχουν συμβεί τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο, το 17% (D & E) των δεξαμενών φαίνεται να είναι πολύ ενεργό σε σχέση με τη δραστηριότητα ΑΕ.

Συνολική βαθμονόμηση όλων των προϊόντων



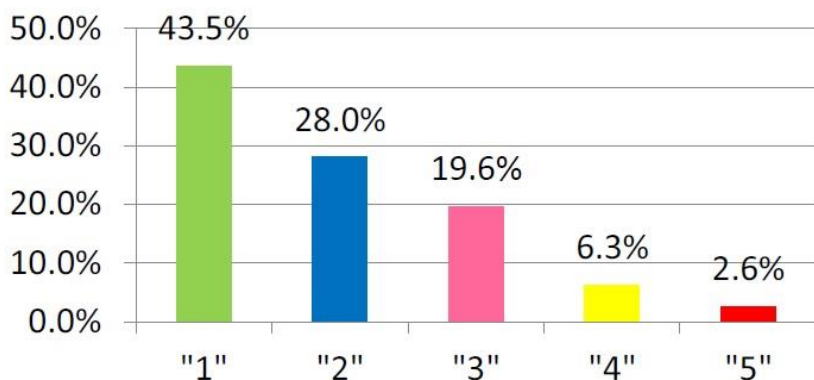
Συνολική βαθμονόμηση



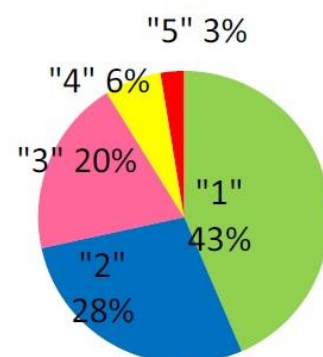
Σχήμα 66. Συνολική ταξινόμηση για όλες τις δεξαμενές ΑΣΤ που ελέγχθηκαν

Η δραστηριότητα του PLD ΑΕ φαίνεται να είναι καθοδική με γραμμικό τρόπο, ωστόσο οι ιδιαίτερα δραστικές εντοπισμένες συστάδες (4 & 5) προκαλούνται κυρίως από επιπρόσθετους λόγους που δεν είναι τόσο διαφανείς και ευθύγραμμοι, όπως μερική αποτυχία επένδυσης, περιοχές που δεν εντοπίστηκαν κατά τη διάρκεια της εσωτερικής επιθεώρησης, κατασκευαστικά ελαττώματα και γενικά ριζικές αιτίες που με οποιονδήποτε τρόπο είναι σπάνιες να συμβούν, αλλά παρόλα αυτά υπάρχουν.

Βαθμονόμηση PLD όλων των προϊόντων

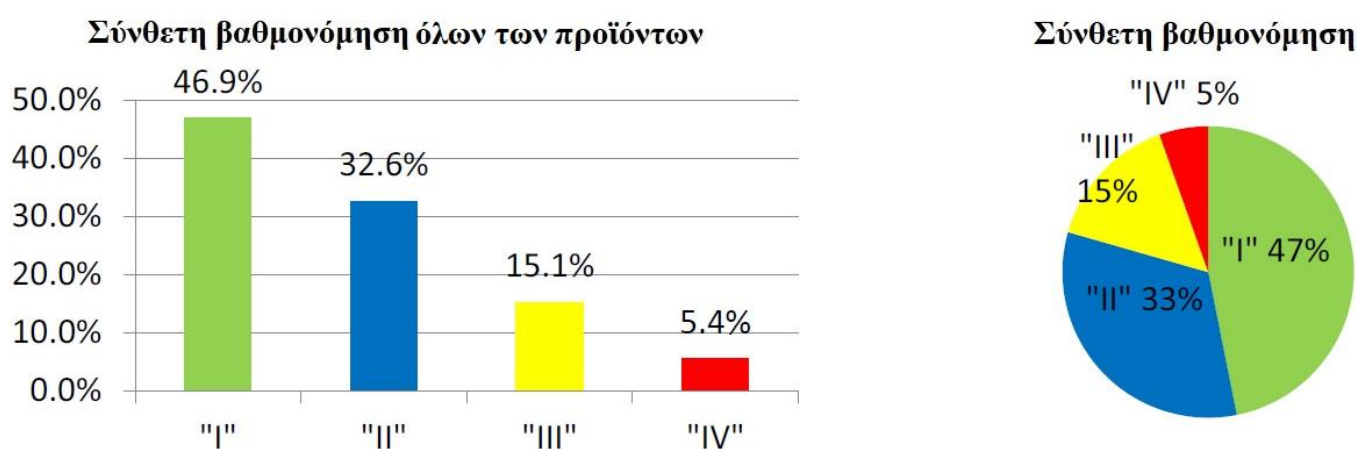


Βαθμονόμηση PLD



Σχήμα 67. Ταξινόμηση PLD για όλες τις δεξαμενές ΑΣΤ που ελέγχθηκαν

Το παρακάτω Σχήμα 68 δείχνει τη σύνθετη βαθμονόμηση όλων των δοκιμασμένων δεξαμενών, η οποία έχει μεγάλη σημασία εξαιτίας του γεγονότος ότι χρησιμοποιείται κυρίως για οποιαδήποτε ιεράρχηση της επικείμενης επιθεώρησης ή συντήρησης. Τα αποτελέσματα σύνθετης ταξινόμησης δείχνουν ότι το 80% όλων των δαπέδων των δεξαμενών χαρακτηρίζονται ως I ή II. Αυτό αντιστοιχεί σε καθυστέρηση στη συντήρηση για τουλάχιστον άλλα 2 χρόνια (για βαθμονομημένες δεξαμενές II) ή 4/5 έτη (για βαθμίδες δεξαμενών κατηγορίας I), όταν πρέπει να πραγματοποιηθεί ξανά η δοκιμή. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει, με βάση τον αριθμό και την ταξινόμηση που δίνονται στον Πίνακα 14, ότι από όλες τις δεξαμενές που δοκιμάστηκαν, συνολικά το 20% (III & IV) χρειάζεται άμεσες δράσεις και ιεράρχηση προτεραιοτήτων.



Σχήμα 68. Σύνθετη βαθμονόμηση για όλες τις δεξαμενές AST που ελέγχθηκαν

Ένα παράδειγμα της συνέπειας των αποτελεσμάτων καθώς και των χρονικών διακυμάνσεων της ταξινόμησης δίνεται στον ακόλουθο Πίνακα 16, ο οποίος δείχνει παραδείγματα των αποτελεσμάτων των δοκιμών των διαφόρων δεξαμενών που ελέγχθηκαν περισσότερες από δύο φορές χωρίς ενδιάμεση εσωτερική επιθεώρηση. Αυτό σημαίνει ότι η εσωτερική κατάσταση κάθε δεξαμενής δεν πραγματοποιήθηκε ή δεν επαναρυθμίστηκε με κανένα τρόπο χημικών ή μηχανικών ενεργειών. Όπως αναμενόταν, η διαβάθμιση έχει μια ελαφρώς αυξανόμενη τάση με το χρόνο, πράγμα που σημαίνει ότι οι συνθήκες των δαπέδων της δεξαμενής έχουν ανοδική κατάσταση διάβρωσης ή θα σταθεροποιηθούν.

Άλλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η συνολική ηλικία της δεξαμενής, τα διαστήματα επιθεώρησης, ο τύπος δαπέδου και φυσικά ο τύπος διατήρησης της δεξαμενής, αλλά αυτά δεν εμπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής της παρούσας μελέτης.

Δεξαμενή	Έτος	Διάμ.	Προϊόν	Τύπος δαπέδου	Έτος κατασκ.	Συνολική	PLD	Σύνθετη	Συστάσεις
1	2004	36.5	Καύσιμο πετρέλαιο	Σταθερός	1971	C	2	II	2 έτη
	2007					C	2	II	2 έτη
	2009					C	3	III	1 έτος
2	2004	56	Βενζίνη	Επιπλέον	1981	C	1	II	2 έτη
	2010					C	1	II	2 έτη
	2012					C	2	II	2 έτη
3	2007	56	Βενζίνη	Επιπλέον	1981	B	3	II	2 έτη
	2011					C	2	III	1 έτος
	2012					C	3	III	1 έτος
	2013					C	3	III	1 έτος
4	2004	14.7	Φυσικό αέριο	Σταθερός	1990	A	1	I	4-5 έτη
	2009					A	1	I	4-5 έτη
	2012					A	2	I	4-5 έτη
5	2006	53.7	Βενζίνη	Σταθερός	1972	C	3	III	1 έτος
	2008					D	3	III	1 έτος
	2009					D	3	III	1 έτος
6	2009	84.1	Αδιύλιστο πετρέλαιο	Επιπλέον	1973	D	3	III	1 έτος
	2010					E	3	III	1 έτος
	2011					E	4	IV	0.5 έτος
7	2009	85.4	Αδιύλιστο πετρέλαιο	Επιπλέον	1972	C	3	III	1 έτος
	2010					D	3	III	1 έτος
	2012					D	3	III	1 έτος

Πίνακας 16. Διακύμανση διαβάθμισης TANKPAC™ με την πάροδο του χρόνου

6.10.5| Ποιοτική Επικύρωση των αποτελεσμάτων του TANKPACTM

Το πακέτο τεχνολογίας TANKPAC™ αναπτύσσεται συνεχώς, με βάση την εμπειρία των επιθεωρητών και τη διερεύνηση των αποτελεσμάτων των εσωτερικών επιθεωρήσεων που διενεργούνται σε μεταγενέστερα στάδια μετά από κάθε δοκιμή ΑΕ. Μια κοινή μέθοδος εσωτερικής επιθεώρησης που χρησιμοποιείται είναι η σάρωση των πλακών δαπέδου δεξαμενής με διαρροή μαγνητικής ροής (MFL). Αυτή η μέθοδος παρέχει ποιοτική επιθεώρηση και πληροφορίες σχετικά με το ποσοστό απώλειας πάχους. Η διερεύνηση των επακόλουθων αποτελεσμάτων εσωτερικών επιθεωρήσεων παρέχει τη δυνατότητα αναθεώρησης και επανεξέτασης των δεδομένων ακουστικών εκπομπών, με στόχο τη βελτίωση των διαδικασιών φιλτραρίσματος υπό το πρίσμα των νέων αποτελεσμάτων.

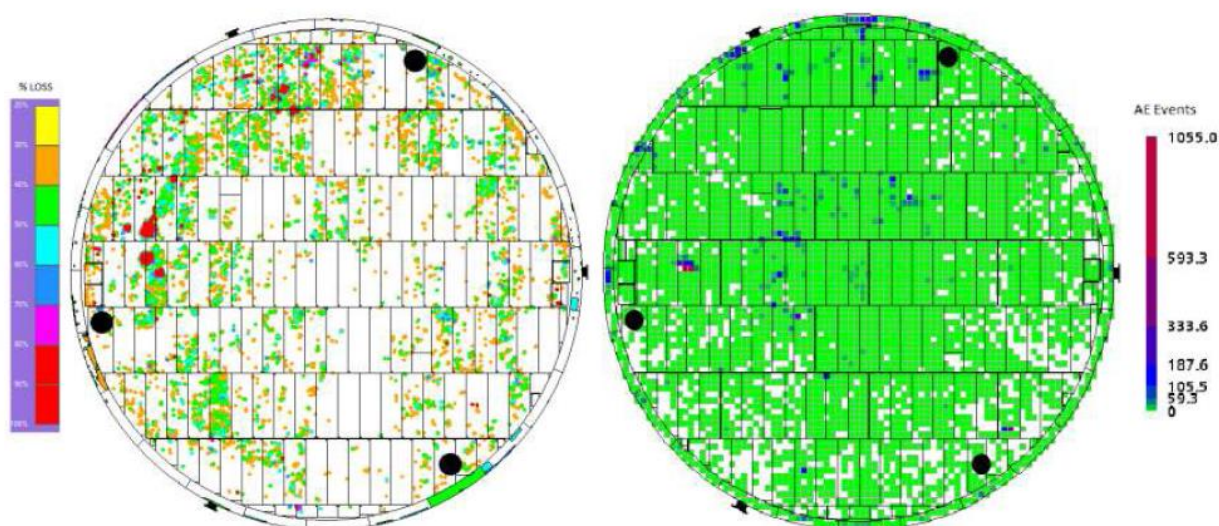
Δυστυχώς, οι διαθέσιμες εσωτερικές επιθεωρήσεις διεξήχθησαν πολλούς μήνες ή χρόνια μετά τη δοκιμή ΑΕ, επομένως δεν υπάρχει άμεση ποιοτική σύγκριση και για τις δύο μεθόδους λόγω της χρονικής διαφοράς των δύο δοκιμών. Ωστόσο, η έμμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η μέθοδος TANKPAC™ δίνει ενδείξεις πιθανής ενεργού βλάβης στα αρχικά στάδια. Οι δοκιμαστικές περιπτώσεις που παρουσιάζονται παρακάτω αποτελούν μείζονα παραδείγματα σημαντικού κόστους που θα μπορούσαν να εξοικονομηθεί εάν είχε χρησιμοποιηθεί κατάλληλο πρόγραμμα επιθεώρησης βάσει της σύστασης της διαδικασίας TANKPAC™. Και στις δύο περιπτώσεις δεν έγιναν ενέργειες από τους ιδιοκτήτες δεξαμενών σύμφωνα με τη διαδικασία και αυτό οδήγησε στην ανάγκη για μεγάλες επισκευές (δηλαδή επιπλέον συσσωρευμένες δαπάνες) αρκετά χρόνια αργότερα.

▪ **1^η Περίπτωση – Σταθερού δαπέδου δεξαμενή διαμέτρου 46μ. η οποία περιέχει πετρέλαιο βαρέως τύπου**

Η ακόλουθη περίπτωση περιγράφει τη δοκιμή της δεξαμενής όπως επιθεωρήθηκε το 2009 χρησιμοποιώντας το TANKPAC™. Η δεξαμενή έχει διάμετρο 46μ. και χρησιμοποιείται για την αποθήκευση βαρέως τύπου πετρελαίου. Οι δοκιμές TANKPAC διήρκεσαν μία ολόκληρη μέρα και βασισμένες σε μια κλίμακα από A (μικρή δραστηριότητα) έως E (ιδιαίτερα ενεργή), η δεξαμενή χαρακτηρίστηκε ως C, μαζί με ενδείξεις πολύ επίμονης τοπικής δραστηριότητας AE. Βάσει των αποτελεσμάτων, ο πελάτης εισηγήθηκε να επανελέγξει τη δεξαμενή μετά από δύο χρόνια (το 2011), αλλά δεν έγινε καμία ενέργεια.

Η συγκεκριμένη δεξαμενή ανοίχθηκε για συντήρηση και επιθεωρήθηκε εσωτερικά με MFL πέντε χρόνια μετά τη δοκιμή AE, το 2014. Διεξήχθη σάρωση MFL και βρέθηκαν τρύπες στις περισσότερες περιοχές όπου το TANKPAC™ είχε αποκαλύψει υψηλή δραστηριότητα AE πριν από πέντε χρόνια. Επιπλέον, φαίνεται ότι οι περιοχές διάβρωσης αυξήθηκαν εντός των πέντε ετών μεταξύ των δύο διαφορετικών επιθεωρήσεων.

Υπάρχουν πρόσθετα πράγματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την εξέταση αυτής της συγκεκριμένης περίπτωσης. Τα αποτελέσματα MFL αναφέρονται για απώλεια πάχους πλάκας πάνω από 30%, ενώ στο TANKPAC δεν είναι δυνατός ο διαχωρισμός αυτών των πληροφοριών. Η δοκιμή MFL διήρκεσε περίπου 10 ημέρες και φυσικά η ανάλυση και η λεπτομέρεια είναι τάξης μεγέθους υψηλότερη.



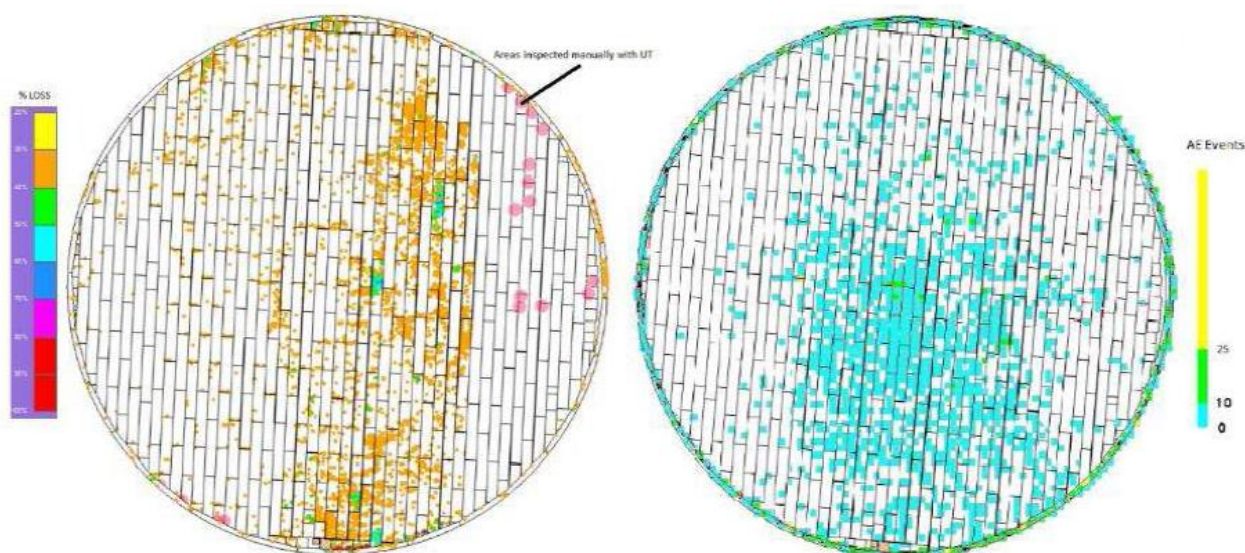
Σχήμα 69. Αποτελέσματα ελέγχου MFL έναντι αποτελεσμάτων TANKPAC™

Στο Σχήμα 69 έχουμε τα αποτελέσματα ελέγχου MFL (αριστερά – απώλεια πάχους > 30% για το 2013) έναντι αποτελεσμάτων TANKPAC™ (το 2008) πέντε χρόνια πριν την εσωτερική επιθεώρηση.

Ωστόσο, κατά την εξέταση των αποτελεσμάτων του TANKPAC, φαίνεται ότι υπάρχει γενική κατάσταση διάβρωσης σε ολόκληρο το δάπεδο της δεξαμενής. Επιπλέον, εκτός από τη γενικευμένη κατάσταση διάβρωσης που υποδεικνύεται από την κατηγορία C, η παρουσία εντοπισμένων περιοχών με υψηλή δραστικότητα ΑΕ θα έπρεπε να σημάνει τη σημασία της επανεξέτασης σύμφωνα με τη σύσταση (δηλαδή 2 έτη), ωστόσο δεν έγιναν τέτοιες ενέργειες. Το αποτέλεσμα ήταν ότι ολόκληρο το δάπεδο της δεξαμενής αντικαταστάθηκε μετά την εσωτερική επιθεώρηση. Είναι σαφές ότι η προηγούμενη ιεράρχηση ίσως οδηγούσε σε σημαντική μείωση του κόστους συντήρησης εξαιτίας των λιγότερων επισκευών που θα χρειαζόταν και του χρόνου διακοπής της δεξαμενής.

▪ **2^η Περίπτωση – Επιπλέοντος δαπέδου δεξαμενή διαμέτρου 85μ. η οποία περιέχει αδιύλιστο πετρέλαιο**

Η συγκεκριμένη δεξαμενή επιθεωρήθηκε με το TANKPAC™ το 2009. Αυτή ήταν μια επιθεώρηση ρουτίνας που διήρκεσε όχι περισσότερο από 8 ώρες. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια ιδιαίτερα δραστική δεξαμενή με το μεγαλύτερο μέρος της δραστηριότητας ΑΕ να λαμβάνει χώρα γύρω από τον κυκλικό δακτύλιο της δεξαμενής. Ο βαθμός δεξαμενής δόθηκε ως D, με σύσταση επανελέγχου σε μέγιστο χρονικό διάστημα 1 έτους ή προγραμματισμένη για εσωτερική επιθεώρηση. Ωστόσο, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, δεν είχαν ληφθεί μέτρα. Η δεξαμενή άνοιξε το 2012 για προγραμματισμένη εσωτερική επιθεώρηση και συντήρηση και πραγματοποιήθηκε έρευνα MFL. Η δοκιμή MFL διήρκεσε σχεδόν 3 εβδομάδες.



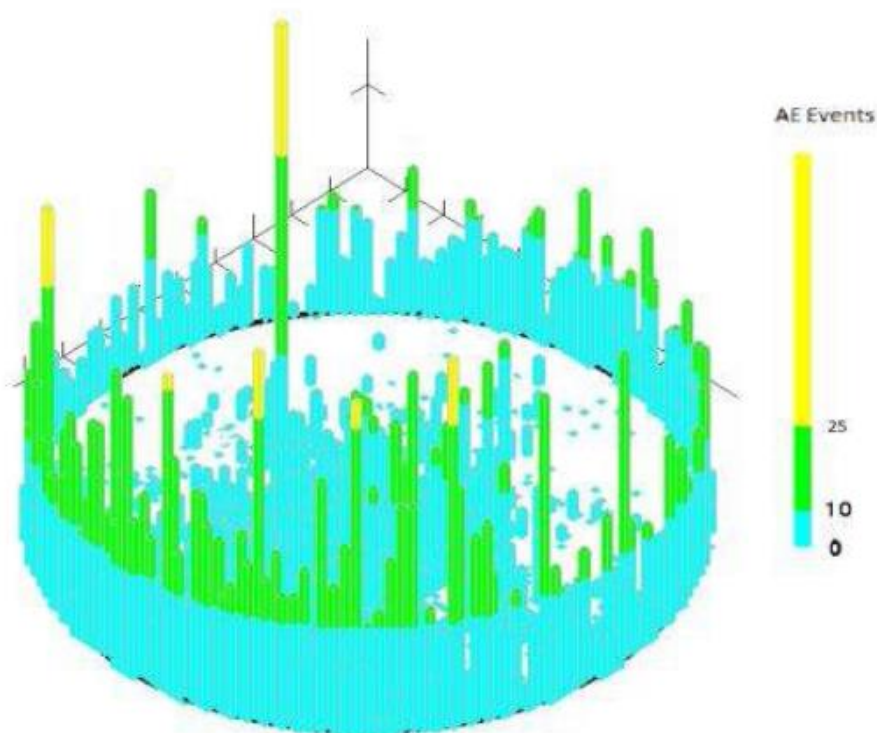
Σχήμα 70. Αποτελέσματα ελέγχου MFL έναντι αποτελεσμάτων TANKPAC™

Στο Σχήμα 70 έχουμε τα αποτελέσματα ελέγχου MFL (αριστερά – απώλεια πάχους > 30% το 2012) έναντι αποτελεσμάτων TANKPAC™ (μέχρι το 2009) τρία χρόνια πριν από την εσωτερική επιθεώρηση. Σημειώστε τη δραστηριότητα των κυκλικών δακτυλίων.

Η επιθεώρηση TANKPAC™ αποκάλυψε ότι το μεγαλύτερο μέρος της δραστηριότητας ΑΕ εκπέμφθηκε από την περιοχή κυκλικού δακτυλίου της δεξαμενής. Ωστόσο, η κάλυψη εξοπλισμού MFL ήταν έως και 100mm από την περιοχή κυκλικού δακτυλίου. Η περιοχή που δεν μπορούσε να καλυφθεί με MFL επιθεωρήθηκε με υπερήχους. Σε αυτή την περίπτωση, βρέθηκε ότι ο κυκλικός δακτύλιος υπέφερε από διάβρωση κάτω πλευράς και απώλειες μεγάλου πάχους. Αυτό είναι προφανές στο αριστερό γράφημα του Σχήματος 70. Επίσης φαίνεται στο Σχήμα 71 το οποίο δείχνει μια τρισδιάστατη όψη της χωρικής κατανομής των εντοπισμένων ΑΕ συμβάντων.

Στο Σχήμα 71 έχουμε τα αποτελέσματα TANKPAC™ της χωρικής κατανομής της εντοπισμένης δραστηριότητας ΑΕ. Σημειώστε τη δραστηριότητα των κυκλικών δακτυλίων.

Σε αυτή την περίπτωση, βρέθηκε ότι το δάπεδο της δεξαμενής έχει γενική διάβρωση τόσο από την κορυφή όσο και από τη βάση, όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα MFL και TANKPAC™. Ωστόσο, το TANKPAC™ έδωσε στοιχεία σχετικά με τη συνεχιζόμενη δραστηριότητα κάτω από τον κυκλικό δακτύλιο, επίσης. Συνολικά εκτελέστηκαν εκτεταμένες επισκευές σε αυτήν τη δεξαμενή. Επιπλέον, το κόστος της απόσυρσης από χρήση ήταν το πιο σημαντικό γεγονός στην περίπτωση αυτή, δεδομένου ότι αυτή η δεξαμενή μεγάλης χωρητικότητας παρέμεινε εκτός λειτουργίας για σχεδόν ένα χρόνο.



Σχήμα 71. Αποτελέσματα TANKPAC™

6.10.6| Συμπεράσματα

Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, η ζήτηση οικονομικά αποδοτικών και αξιόπιστων μεθόδων ΜΚΕ αυξάνεται. Ως εκ τούτου, δίνεται όλο και μεγαλύτερη προσπάθεια στην ανάπτυξη νέων μεθόδων και ιδεών. Το TANKPAC™ είναι μια σχετικά νέα μέθοδος σε σύγκριση με τις κλασσικές μεθόδους ΜΚΕ. Ωστόσο, τα οφέλη από την εφαρμογή του είναι τεράστια.

- Μη παρεμβατική. Δεν διακόπτεται η λειτουργία
- Γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα εντός ωρών με χαμηλό έλεγχο κόστους και συνέπεια
- Εάν χρησιμοποιηθεί ως μέρος προγράμματος συντήρησης της δεξαμενής μπορεί να προκύψει τεράστια εξοικονόμηση κόστους
- Συμβατό με RBI

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων δοκιμών TANKPAC™ ΑΕ με την επακόλουθη παράλληλη επιθεώρηση δαπέδου καταδεικνύει σαφώς την ικανότητα της μεθόδου να προσδιορίσει τη συνολική κατάσταση της διάβρωσης του δαπέδου και των ζημιών πρώιμου σταδίου, καθώς και να εντοπίσει περιοχές που βρίσκονται στο αρχικό στάδιο της βλάβης με λογική ακρίβεια, δεδομένου ότι δεν υπάρχει πρόσβαση στην εσωτερική πλευρά της δεξαμενής. Συνολικά, το εσωτερικό χρονικό διάστημα επιθεώρησης καθορίζεται συνήθως από τους σχετικούς κατασκευαστικούς κώδικες. Για το σκοπό αυτό, η δοκιμή TANKPAC™ μπορεί να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα ως μέρος ενός σχεδίου προγραμματισμού συντήρησης προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα της κατανομής των πόρων συντήρησης και να ελαχιστοποιηθεί σημαντικά η οικονομική επιβάρυνση που μπορεί να συσσωρευτεί από την τυφλή συντήρηση των δεξαμενών αποθήκευσης. [29]

7 | Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε εκτενής αναφορά των βασικότερων τεχνικών ΜΚΕ, δηλαδή του οπτικού ελέγχου, των δινορρευσμάτων, των υπέρυθρων και θερμικών δοκιμών, του ραδιογραφικού ελέγχου, των υπερήχων και των διεισδυτικών υγρών και ακόμη πιο αναλυτική αναφορά σχετικά με τον έλεγχο ακουστικών εκπομπών. Επίσης, αναλύθηκαν και διαπιστώθηκαν τα πλεονεκτήματα των ΜΚΕ σε σχέση με τους αντίστοιχους καταστροφικούς ελέγχους καθώς και σε ποια τεχνική είναι κατάλληλη να επιλεγεί βάσει του υπό δοκιμή υλικού.

Από όσα προηγήθηκαν γίνεται φανερό η ανάγκη επιλογής ΜΚΕ για τον έλεγχο αστοχιών. Συμπερασματικά αναφέρουμε την σπουδαιότητα και το μεγάλο πλεονέκτημα που δίνει προβάδισμα στους ΜΚΕ έναντι των συμβατικών καταστροφικών δοκιμών, όσον αφορά τον προληπτικό και τον περιοδικό έλεγχο, τον έλεγχο ανίχνευσης καθώς και τον έλεγχο επιθεώρησης σημείων αστοχιών στα υλικά και τα εξαρτήματα.

Παράλληλα παρουσιάστηκαν οι ΜΚΕ που εφαρμόζονται από το Τμήμα Ποιοτικού Ελέγχου του Ναυστάθμου Κρήτης, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται, οι τεχνικές που εφαρμόζονται, καθώς και τα πρότυπα που ακολουθούνται και έγινε αναφορά συγκεκριμένων πραγματικών εφαρμογών σε τμήματα που έφεραν αστοχίες.

Όπως διαπιστώθηκε τεκμηριωμένα από την παρούσα εργασία και ιδιαιτέρως στο 6ο κεφάλαιο που αφορά ελέγχους ακουστικών εκπομπών σε δίκτυα και δεξαμενές πετρελαίου, η ανίχνευση διαρροών είναι ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα σε αυτά τα ευαίσθητα τμήματα, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε οικονομικά οφέλη, όπως επίσης και στην πρόληψη σοβαρών επιπτώσεων στον άνθρωπο και στο περιβάλλον. Έγινε προσδιορισμός τύπων διαρροών και αναφορά σε συχνές αστοχίες.

Σε όλες τις μελέτες που παρουσιάστηκαν έγινε αρχικά μία περιγραφή τους και αναφορά της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε. Έπειτα, προσδιορίστηκαν οι βαθμίδες ελέγχου και η αντιστοίχιση τους σε συστάσεις συντήρησης του υπό δοκιμή τμήματος καθώς και μια κατηγοριοποίηση βάσει PAL. Ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε μεγάλη ακρίβεια ως προς τον εντοπισμό της πηγής της αστοχίας, επιβεβαιώθηκε η καταλληλότητα επιλογής των ΑΕ ως μέθοδο αξιολόγησης και ελέγχου της αστοχίας και μέσα από τα αποτελέσματα της εκάστοτε μελέτης αλλά και μέσα από συγκρίσεις με αντίστοιχα αποτελέσματα άλλου τύπου δοκιμών.

Οι μετρήσεις λοιπόν ΑΕ χαρακτηρίζονται από υψηλή ευαισθησία, από πρώιμη και ταχεία ανίχνευση ελαττωμάτων, ρωγμών κλπ., παρέχουν την δυνατότητα να γίνει έλεγχος/επιθεώρηση σε

πραγματικό χρόνο, έχουν συγκριτικά χαμηλό κόστος, όσον αφορά την θέση της αστοχίας είναι εύκολα ανιχνεύσιμη καθώς μόνο τα σημεία που έχουν ρωγμές, ελαττώματα κλπ. παρέχουν βιώσιμες πηγές ακουστικών εκπομπών, έχουν την δυνατότητα απομάκρυνσης ηχητικών διαταραχών μέσω φιλτραρίσματος και τέλος κυριαρχεί το πλεονέκτημα ελαχιστοποίησης του χρόνου εγκατάστασης για έλεγχο, χωρίς την ανάγκη σάρωσης ολόκληρης της δομικής επιφάνειας.

Εν κατακλείδι, μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι η τεχνική ακουστικής εκπομπής αποτελεί ένα αποτελεσματικό μέσο ανίχνευσης διαρροών αγωγών. Η ανάλυση των χαρακτηριστικών της πηγής ήχου και του μηχανισμού μετάδοσης των σημάτων ΑΕ που προκαλούνται από διαρροή μπορεί να είναι μία από τις σημαντικές συνθήκες που εξασφαλίζουν την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια της ανίχνευσης. Τα αποτελέσματα των ακουστικών εκπομπών αφού κατηγοριοποιηθούν μπορούν να δώσουν μεγάλης ακρίβειας συστάσεις για το αν το υπό εξέταση υλικό χρήσης άμεσου επανέλεγχου, μικρής ή μεγάλης επισκευής ή και ακόμα αν είναι στο όριο της άμεσης αντικατάστασης, γεγονός που μεταφράζεται σε εξοικονόμηση κόστους συντήρησης, επισκευής, περιττών ελέγχων αλλά και σε όφελος, όχι αποκλειστικά οικονομικό, όπως προαναφέρθηκε, αλλά ως προς το φυσικό περιβάλλον και τον άνθρωπο.

8 | Βιβλιογραφία

- [1] Non – Destructive Testing – Barry Hull & Vernon John – Macmillan Education
- [2] Cartz, Louis (1995). Non destructive Testing. A S M International.
- [3] Charles Hellier (2003). Handbook of Nondestructive Evaluation. McGraw-Hill. p. 1.1.
- [4] Introduction and History of Penetrant Inspection. www.ndt-ed.org
- [5] Singh S, Goyal A (2007). "The origin of echocardiography: a tribute to Inge Edler". Tex Heart Inst J.
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Nondestructive_testing
- [7] Training Course Series No. 9. Non-destructive Testing: A Guidebook for Industrial Management and Quality Control Personnel. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999
- [8] Non – Destructive Testing (NDT) – Guidance Document: An Introduction to NDT Common Methods – BI NDT – British Institute of Non – Destructive Testing
- [9] Acoustic Emission Science and Technology – Dr. Boris Muravin
- [10] Acoustic Emission Non – Destructive Testing of Structures using Source Location Techniques – Alan G. Beattie – Sandia National Laboratories
- [11] Calculation of J – Integral and Stress Intensity Factors using the Material Point Method – Y. Guo and J. A. Nairn Material Science and Engineering, University of Utah, Salt Lake City, Utah 84112, USA
- [12] https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE_Signal%20Features.php
- [13] <http://www.hellenicnavy.gr/>
- [14] Πιστοποίηση επαγγελματιών – Ο ρόλος του μηχανικού, Μ. Κ. Κωτούζας (Μηχ/γος Μηχ/κός ΑΠΘ –MScQ. Mgmt –ASNT/PCNLevelIII) – TEE, Αθήνα, 29 Σεπτ., 2003
- [15] Prospects of Applications of Acoustic Emission Methods to Testing Bottoms of Tanks for Oil and Oil Derivatives, A. V. Sokolkin, I. Yu. Ievlev, and S. O. Cholakh OAO Slavneft {Megionneftegaz, Megion, Khanty – Mansi Autonomous District, Russia, NTO Inprotest, Yekaterinburg, Russia, Ural State Technical University (UPI), Yekaterinburg, Russia, Received September 5, 2001 - Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 38, No. 2, 2002, pp. 113–115. Translated from Defektoskopiya, No. 2, 2002, pp. 44–47. Original Russian Text Copyright c 2002 by Sokolkin, Ievlev, Cholakh.
- [16] How Reliable is Acoustic Emission (AE) Tank Testing? The Quantified Results of an AE Usergroup Correlation Study! - P.J. van de Loo – Shell, The Netherlands. B. Herrmann –

Dow, Germany. Corresponding Author Contact: Van de Loo – NDT.net - February 1999, Vol.4 No.2

- [17] Health Monitoring of Aboveground Storage Tanks' Floors: A New Methodology Based on Practical Experience – M. Riahi and H. Shamekh – College of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran – ISSN 1061-8309, Russian Journal of Nondestructive Testing, 2006, Vol. 42, No. 8, pp. 537–543. © Pleiades Publishing, Inc., 2006.
- [18] Jerald, E., Field Testing of Flat Bottom Storage Tanks with Acoustic Emission, A Review on Gained Experience, EWGAE2004
- [19] Riahi, M. and Alipour, R., Predictive Model for Determination of Pitting Corrosion in Stainless Steel Pipes, J. Materials Evaluation, 2004, pp. 372–375
- [20] Kosel, T., Grabec, I., and Kosel, F., Intelligent Location of Two Simultaneously Active Acoustic Emission Sources, Aersp. Sci. Technol., 2005, no. 9, pp. 45–53
- [21] Differentiation of Leakage and Corrosion Signals in Acoustic Emission Testing of Aboveground Storage Tank Floors with Artificial Neural Networks, M. Riahi, H. Shamekh, and B. Khosrowzadeh, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, 16557 Iran, ISSN 1061-8309, Russian Journal of Nondestructive Testing, 2008, Vol. 44, No. 6, pp. 436–441. © Pleiades Publishing, Ltd., 2008
- [22] Acoustic Emission Leak Detection on a Metal – Pipeline Buried in Sandy Soil – Thomas M. Juliano, Jay N. Meegoda, F.ASCE and Daniel J. Watts
- [23] A.A. Pollock and S.-Y.S. Hsu, Leak Detection Using Acoustic Emission, Journal of Acoustic Emission, 1 (4), 1982, 237 – 243
- [24] Miller, R.K., et al., The development of acoustic emission for leak detection and location in liquid-filled, buried pipelines, Acoustic Emission: Standards and Technology Update, ASTM STP 1353, Vahaviolos, S.J., Ed., American Society for Testing and Materials, 1998
- [25] Acoustic Emission Leak Detection of Liquid Filled Buried Pipeline - Athanasios Anastasopoulos, Dimitrios Kourousis, Konstantinos Bolas - Envirocoustics ABEE, El. Venizelou 7 & Delfon, 14452 Metamorphosis, Athens, Greece
- [26] Study on source location using an acoustic emission system for various corrosion types – C. Jomdecha, A. Prateepasen, P. Kaewtrakulpong
- [27] Detection of corrosion attack on oil tankers by means of acoustic emission (AE) – Peter Tscheliesnig – Institute for Technical Physics, TÜV Austria, Vienna, Austria
- [28] Field testing of flat bottomed storage tanks with acoustic emission – a review on the gained experience – Gerald Lackner and Peter Tscheliesnig – TÜV Austria, Vienna, Austria
- [29] Acoustic Emission Tank Floor Testing: A Study on the Data-Base of Tests and Follow-Up Inspection – Dimitrios Papasalouros, Konstantinos Bolas, Dimitrios Kourousis, Athanasios Anastasopoulos, Mistras Group Hellas A.B.E.E., Athens, Greece

9 | Παράρτημα

9.1 | Πίνακας Συντμήσεων

Σύντμηση	Περιγραφή
▪ Ελληνικοί όροι	
ΑΕ	Ακουστική Εκπομπή
ΔΤ	Διεύθυνση Τεχνική
ΜΚΕ	Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι
ΝΚ	Ναύσταθμος Κρήτης
ΤΝΔ	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα
ΤΠΕ	Τμήμα Ποιοτικού Ελέγχου
▪ Αγγλικοί Όροι	
ΑΕ	Acoustic Emission
ANN	Artificial Neural Network
API	American Petroleum Institute
ASL	Average Signal Level
ASL	ASL Above Sea Level
AST	Aboveground Storage Tank
FPGA	Field Programmable Gate Array
HDT	Hit Definition Time – Χρόνος Ορισμού Χτυπήματος
HLT	Hit Lockout Time – Χρόνος Κλειδώματος Χτυπήματος
MFL	Magnetic Flux Leakage
NBS	National Bureau of Standards – Εθνικό Γραφείο Προτύπων
NDT	Non Destructive Techniques
PAC	Physical Acoustics Corporation
PAL	Physical Acoustics Ltd
PDT	Peak Definition Time – Χρόνος Ορισμού Κορυφής
PLD	Potential Leak Data

PZT	Lead(Pb) Zirconate Titanate – Μόλυβδος Ζirkονίτης Τιτανάτη
RBI	Risk - Based Inspection
RF	Radio Frequency
SCC	Stress Corrosion Cracking
UT	Ultrasonic Testing
VHDL	Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language
VST	Vertical Steel Tank

9.2 | Σύντομο Βιογραφικό

Μαριάννα Χαμαλίδου

Ειδικότητα:

- (2001) – Απόφοιτος του ΤΕΙ Καβάλας – Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών – Τμήματος Ηλεκτρολογίας

Εργασιακή Εμπειρία:

- (2002) – Ωρομίσθια Εκπαιδευτικός στα Μαθήματα «Αρχές Επεξεργασίας Εικόνας» και «Εισαγωγή την Πληροφορική» για την Ειδικότητα «Τεχνικού Εφαρμογών Πληροφορικής και Αυτοματισμών Γραφείου» του Οργανισμού Επαγγελματικής Εκπαιδευτικής Κατάρτισης (ΟΕΕΚ) του Ινστιτούτου Επαγγελματικής Κατάρτισης Καβάλας
- (2002 – 2003) – Ωρομίσθια Εκπαιδευτικός στο «Εργαστήριο Βιομηχανικών Αυτοματισμών – Έλεγχος Θερμοκρασίας Χώρου» και στο «Εργαστήριο Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου – Εξομοίωση Ψηφιακών Συστημάτων Ελέγχου» του ΤΕΙ Καβάλας – Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών – Τμήματος Ηλεκτρολογίας
- (2004 – 2014) Μόνιμος Πολιτικός Υπάλληλος – Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε. – Ναύσταθμος Κρήτης – Διεύθυνση Καυσίμων NATO – Σταθμός Παροχής Ρεύματος K14. Παροχή Ρεύματος σε Νατοϊκά Πλοία και Υποβρύχια. Επίβλεψη Λειτουργίας, Συντήρηση και Επισκευή Ηλεκτρολογικών Συστημάτων Σταθμού Παροχής Ρεύματος K14 – Επάνδρωση Φυλακών Ασφαλείας σε 24ωρη Βάση
- (2014 – Σήμερα) Μόνιμος Πολιτικός Υπάλληλος – Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε. – Ναύσταθμος Κρήτης – Διεύθυνση Καυσίμων NATO – Γραφείο Ελέγχου Αποθεμάτων – Κίνησης Καυσίμων ΔΚ/NATO. Πετρελεύσεις Νατοϊκών και Ελληνικών Πλοίων – Διαχείριση Νατοϊκών και Ελληνικών Καυσίμων – Λογιστική Τακτοποίηση Νατοϊκών και Ελληνικών Αναφορών

Εκπαίδευση και Κατάρτιση:

Συμμετοχή σε ημερίδες, σεμινάρια και εκπαιδευτικά προγράμματα σχετικά με:

- Νομιμότητα και Διαφάνεια στη Δημόσια Διοίκηση και την Τοπική Αυτοδιοίκηση
- NATO Officer CBRN Defense Policy Course
- ADL 097 Introduction to Maritime Interdiction Operations
- ADL 051 NATO Civil Emergency Planning – An Overview
- ADL 033 Introduction to NATO Environmental Protection
- ADL 015 Human Trafficking Causes, Consequences, Counter Strategies
- ADL 169 Improving Operational Effectiveness by Integrating Gender Perspective (JKO New Version)
- NATO Peace Support Operations
- Project Management Professional
- NATO COMSEC System Engineer
- ISO 9001: 2015 Επιθεωρητής/Επικεφαλής Επιθεωρητής Συστημάτων Διαχείρισης Ποιότητας
- Ανοικτά Δεδομένα
- Σχεσιακές Βάσεις Δεδομένων
- Χειρισμός και Προληπτική Συντήρηση Εγκαταστάσεων Μέσης Τάσης και Υ/Σ
- Υγιεινής και Ασφάλειας Εργαζομένων σε Ναυπηγοεπισκευαστικές Εργασίες
- Σχολείο Α' Βοηθειών
- Εισαγωγή στην Ηλεκτρονική Διακυβέρνηση E – Gov
- AutoCAD
- Robotics
- Artificial Vision & Sensors – Metrology
- Digitization

