



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΧΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ»**

---

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ  
ΧΑΛΥΒΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ**

---

**ΜΑΡΙΑ – ΑΝΝΑ ΤΖΑΛΟΝΙΚΟΥ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΙΩΑΝΝΙΝΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2021**

## **Εσώφυλλο:**

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

## **ΧΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

που απονέμει το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Εγκρίθηκε την... .. από την εξεταστική επιτροπή:

**Επιβλέπων :** κ. Θεόδωρος Ματίκας, Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων

### **Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή :**

- 1.** κ. Θεόδωρος Ματίκας , Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων
- 2.** κ. Νεκταρία – Μαριάνθη Μπάρκουλα , Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων
- 3.** κ. Κωνσταντίνος Δάσιος , Επίκουρος Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής Σχολής του Παν/μίου Ιωαννίνων

### **ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ**

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

(Υπογραφή υποψηφίου)

## Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια περάτωσης του διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Χημεία και τεχνολογία των υλικών», του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων και αποτελεί μελέτη της διάβρωσης του χάλυβα ενίσχυσης με τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής.

Σε αυτό το σημείο αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους τους ανθρώπους, η συμβολή και η συμπαράσταση των οποίων ήταν πολύτιμή και καθοριστική στην εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα της εργασίας μου κ. Θεόδωρο Ματίκα, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών και υπεύθυνο του εργαστηρίου Μηχανικής, Ευφών Αισθητήρων και Μη - Καταστροφικής Αξιολόγησης Υλικών, για την ανάθεση του θέματος, την πλήρη καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές και παρατηρήσεις επί της οργάνωσης, της δομής και του περιεχομένου της παρούσας εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου Μηχανικής, Ευφών Αισθητήρων και Μη - Καταστροφικής Αξιολόγησης Υλικών που με υποστήριξαν σε διάφορα στάδια της μεταπτυχιακής μου διατριβής. Συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταδιδάκτορα του Τμήματος κο Αναστάσιο Μπαλάσκα που με στήριξε και με καθοδήγησε σε όλα τα στάδια της προσπάθειας μου, την υποψήφια διδάκτορα του Τμήματος κα Παναγιώτα - Αικατερίνη Δάλλα για την πολύτιμη συμβολή της στις δοκιμές της ακουστικής εκπομπής.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της κα Νεκταρία - Μαριάνθη Μπάρκουλα Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών καθώς και τον κ. Κωνσταντίνο Δάσιο Επίκουρο Καθηγητή του ομώνυμου Τμήματος για την προσεκτική ανάγνωση της διατριβής μου και τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

## Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε η μελέτη της συμπεριφοράς στη διάβρωση του χάλυβα ενίσχυσης, με τη χρήση της μη καταστροφικής μεθόδου της ακουστικής εκπομπής (ΑΕ) ,στον οποίο υποβλήθηκε στοχευμένη ηλεκτροχημική διάβρωση. Ο λόγος επιλογής μελέτης του χάλυβα ενίσχυσης, ως υλικό, έγινε γιατί σε συνδυασμό με το σκυρόδεμα αποτελούν το οπλισμένο σκυρόδεμα το οποίο αποτελεί το κυριότερο υλικό των κατασκευών, παρουσιάζοντας υψηλές θλιπτικές και εφελκυστικές ιδιότητες. Οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζουν υψηλή πλαστικότητα. Σκοπός της παρούσας διατριβής ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς στη διάβρωση του χάλυβα ενίσχυσης με τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής.

Στο πρώτο μέρος της παρούσας διατριβής παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο με κύριους πυλώνες τα χαρακτηριστικά του χάλυβα ως υλικό, τη διάβρωσή του, τους μη καταστροφικούς ελέγχους και τις μεθόδους εκτίμησης των συνθηκών διάβρωσης του χάλυβα ενίσχυσης, την ανάλυση της μεθόδου ακουστικής εκπομπής.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζεται εκτενώς η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε κυλινδρική ράβδο χάλυβα (χάλυβας 4142 ή σε DIN 1.7225 σε βελτιωμένη μορφή 42CrMo4) μήκους 19 cm και διαμέτρου 18mm με εγκοπή δεξιά και αριστερά μήκους 2 cm, ώστε να είναι δυνατή η έδραση των αισθητήρων της ακουστικής εκπομπής. Στη συνέχεια μελετήθηκε πώς επηρεάζονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι της ΑΕ ( απόλυτη ενέργεια , διάρκεια, Rise time) για διαλύματα με διαφορετική κατά βάρος συγκέντρωση NaCl.

Τέλος, αναλύονται τα βασικότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν κατά την πραγματοποίηση της διατριβής.

## **Abstract**

In the context of this thesis, the study of the corrosion behaviour of reinforcing steel was carried out using the non-destructive method of acoustic emission (AE) ,in which targeted electrochemical corrosion was subjected. The reason for choosing to study reinforcing steel, as a material, was because in combination with concrete they form the reinforced concrete which is the main material of structures, exhibiting high compressive and tensile properties. Reinforced concrete structures have a high degree of ductility. The aim of this thesis was to study the corrosion behaviour of reinforcing steel using the acoustic emission method.

The first part of this thesis presents the theoretical background with the main pillars being the characteristics of steel as a material, its corrosion, the non-destructive tests and the methods of assessing the corrosion conditions of reinforcing steel, the analysis of the acoustic emission method.

The second part presents in detail the experimental procedure followed and presents the results of the tests carried out on a cylindrical steel bar (4142 steel or DIN 1. 7225 in improved form 42CrMo4) 19 cm long and 18 mm in diameter with a 2 cm long notch on the right and left side to allow the acoustic emission sensors to be fitted. Then it was studied how the characteristic parameters of AE (absolute energy , duration, Rise time) are affected for solutions with different weight concentration of NaCl.

Finally, the main conclusions drawn during the thesis are analysed.

## Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	ix
Κατάλογος πινάκων	xi
<b>ΜΕΡΟΣ Ι: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ</b>	<b>1</b>
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Χάλυβας</b>	<b>1</b>
1. Ορισμός	1
1.1 Παραγωγή χάλυβα	1
1.2 Ποιότητες και κατηγορίες χάλυβα	2
1.3 Χάλυβες οπλισμένου σκυροδέματος (χάλυβες ενίσχυσης)	6
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Διάβρωση χάλυβα</b>	<b>8</b>
2.1 Διάβρωση	8
2.2 Μηχανισμός του χάλυβα ενίσχυσης στο σκυρόδεμα	9
2.3 Αιτίες διάβρωσης	11
2.3.1 Ενανθράκωση	11
2.3.1.1 Παράγοντες αντίστασης στην ενανθράκωση	13
2.3.1.2 Ενανθράκωση λόγω κύκλων διαβροχής και ξήρανσης	13
2.3.2 Προσβολή χλωριόντων	13
2.4 Στάδια διάβρωσης	16
2.5 Μορφές διάβρωσης	17
2.6 Παράγοντες που επιδρούν στη διάβρωση.	20
2.7 Επιπτώσεις διάβρωσης	22
2.7.1 Μείωση της διατομής και της εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα	22
2.7.2 Ρηγμάτωση και αποφλοίωση σκυροδέματος	23
2.7.3 Απώλεια συνάφειας χάλυβα – σκυροδέματος	25
2.7.4 Απώλεια πλαστιμότητας χάλυβα	27
2.7.5 Μείωση ακαμψίας και αύξηση βέλους κάμψης	27
2.8 Μέθοδοι βελτίωσης της αντίστασης του χάλυβα έναντι της διάβρωσης	28
2.9 Οπλισμοί προστατευμένοι από τη διάβρωση	29
2.9.1 Ανοξειδωτες ράβδοι (stainless steel bars)	30
2.9.2 Ράβδοι με εποξική επικάλυψη (epoxy coated bars)	30
2.9.3 Γαλβανισμένες ράβδοι (galvanized bars)	31
2.9.4 Ράβδοι από ινοπλισμένα πολυμερή (με ίνες υάλου ή άνθρακα)	31
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Μη καταστροφικός έλεγχος( ΜΚΕ) – Μέθοδοι εκτίμησης συνθηκών διάβρωσης του χάλυβα ενίσχυσης</b>	<b>33</b>
3.2 Εισαγωγή στους μη καταστροφικούς ελέγχους	33
3.2 Μέθοδοι εκτίμησης συνθηκών διάβρωσης χάλυβα ενίσχυσης	36
3.2.1 Half Cell Potential	36

3.2.1.1	Μετρούμενη ποσότητα	38
3.2.1.2	Εξοπλισμός μεθόδου half cell potential	39
3.2.1.3	Διαδικασία μέτρησης	40
3.2.1.4	Ερμηνεία των αποτελεσμάτων μέτρησης	41
<b>Κεφάλαιο 4° : Μέθοδος Ακουστικής Εκπομπής ( ΑΕ )</b>		<b>51</b>
4.1	Εισαγωγή	51
4.2	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδου ακουστικής εκπομπής ΑΕ	52
4.3	Πηγές ακουστικής εκπομπής	54
4.4	Σήματα ακουστικής εκπομπής και χαρακτηριστικοί παράμετροι	54
4.5	Προσομοίωση σημάτων ακουστικής εκπομπής	58
4.6	Βασικές αρχές διάδοσης κυμάτων σε συνεχή μέσα	58
4.7	Εντοπισμός θέσεων πηγών ΑΕ	61
4.7.1	Μονοδιάστατος εντοπισμός θέσης	62
4.7.2	Δισδιάστατος εντοπισμός θέσης	62
4.8	Σύστημα καταγραφής δεδομένων	63
4.9	Το πρόβλημα του θορύβου	67
4.10	Καταγραφή και χαρακτηρισμός των σημάτων ΑΕ	68
<b>ΜΕΡΟΣ ΙΙ :ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>		<b>71</b>
<b>Κεφάλαιο 5° : Πειραματικό μέρος</b>		<b>71</b>
5.1	Περιγραφή πειραματικής διάταξης	71
5.2	Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες	74
5.3	Προενισχυτές	74
5.4	Λογισμικό συλλογής και ανάλυσης δεδομένων	75
5.5	Παραμετροποίηση του λογισμικού για λήψη δεδομένων	77
5.6	Το λογισμικό NOESIS	77
5.7	Τοποθέτηση αισθητήρων	78
<b>Κεφάλαιο 6° : Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα</b>		<b>80</b>
6.1	Δοκιμή σπασίματος μύτης μολυβιού ( lead pencil break test)	80
6.2	Ηλεκτροχημική (ποτενσιοδυναμική) διάβρωση	81
6.3	Ποτενσιοδυναμική καμπύλη	83
6.4	Πειραματικές δοκιμές	84
<b>ΜΕΡΟΣ ΙV : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ &amp; ΣΥΖΗΤΗΣΗ</b>		<b>95</b>
<b>Κεφάλαιο 7°: Συμπεράσματα και προτάσεις μελλοντικής έρευνας</b>		<b>95</b>
7.1	Σύνοψη αποτελεσμάτων	95
7.2	Προτάσεις μελλοντικής έρευνας	97





## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής χυτοσιδήρου και ημιτελών προϊόντων χάλυβα [1] .....	1
Σχήμα 1.2 Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής τελικών προϊόντων χάλυβα [1] .....	2
Σχήμα 1.3 Παράδειγμα σήμανσης για την αναγνώριση της χώρας και της μονάδας παραγωγής χάλυβα κατηγορίας B500A [5] .....	5
Σχήμα 1.4 Παράδειγμα σήμανσης για την αναγνώριση της χώρας και της μονάδας παραγωγής χάλυβα κατηγορίας B500C[5] .....	5
Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση της ανόδου και της καθόδου [14] .....	10
Σχήμα 2.2 Το μέτωπο του ενανθρακωμένου σκυροδέματος συναντά τον οπλισμό [12] .....	12
Σχήμα 2.3 Ποσότητα σκουριάς που δημιουργείται ως ποσοστό του βάρους του χάλυβα σε συνάρτηση με το pH του σκυροδέματος [17] .....	12
Σχήμα 2.4 Ποσότητα σκουριάς που δημιουργείται ως ποσοστό του βάρους του χάλυβα σε συνάρτηση με το pH του σκυροδέματος. [19] .....	15
Σχήμα 2.5 Καταστροφή προστατευτικού στρώματος και ανακύκλωση χλωριόντων [14] .....	15
Σχήμα 2.6 Φαινόμενα υποβάθμισης του οπλισμένου σκυροδέματος που συμβαίνουν κατά τα στάδια έναρξης και διάδοσης [20] .....	17
Σχήμα 2.7 Ομοιόμορφο στρώμα από το προϊόν της διάβρωσης που δημιουργείται κατά την ομοιόμορφη διάβρωση [17] .....	18
Σχήμα 2.8 Βελονοειδής διάβρωση σε χαλύβδινη ράβδο οπλισμού που προκλήθηκε λόγω προσβολής χλωριόντων στο σκυρόδεμα [12] .....	19
Σχήμα 2.9 Πιθανά σχήματα των κοιλωμάτων που δημιουργούνται κατά τη βελονοειδή διάβρωση [17] .....	19
Σχήμα 2.10 Διάγραμμα των σταδίων διάρκειας ζωής μια κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος που εκτίθεται σε διαβρωτικό περιβάλλον [4] .....	22
Σχήμα 2.11 Ο κύκλος διάβρωσης του οπλισμού που οδηγεί στην αποφλοιώση του σκυροδέματος [12] .....	24
Σχήμα 2.12 Αποφλοιώση σκυροδέματος λόγω διάβρωσης οπλισμού [17] .....	25
Σχήμα 2.13 Αντοχή συνάφειας συναρτήσει του βαθμού διάβρωσης [23] .....	27
Σχήμα 2.14 Τοποθέτηση επικαλυμένων ράβδων σε έργα γεφυροποιίας [12] .....	30
Σχήμα 2.15 Εφαρμογή ράβδων GFRP [12] .....	32
Σχήμα 3.1 Εφαρμογή ράβδων GFR [26] .....	37
Σχήμα 3.2 Ηλεκτρόδιο αναφοράς χαλκού σε ηλεκτρόδια χαλκού [17] .....	38
Σχήμα 3.3 Εξοπλισμός μέτρησης half cell potential του χάλυβα στο σκυρόδεμα [14] .....	40
Σχήμα 3.4 Συσκευή μέτρησης του half cell potential [30] .....	40
Σχήμα 3.5 Εξοπλισμός μέτρησης LPR με απεριόριστη περιοχή μέτρησης [14] .....	43
Σχήμα 3.5 Συσκευή μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης που το βοηθητικό ηλεκτρόδιο είναι επίθεμα αφρού [14] .....	46
Σχήμα 3.6 Συσκευή μέτρησης ρυθμού διάβρωσης με προστατευτικό δακτύλιο [14] .....	46
Σχήμα 3.6 Επίδραση θερμοκρασίας στον ρυθμό διάβρωσης ενανθρακωμένου σκυροδέματος [20] .....	49
Σχήμα 3.7 Ρυθμός διάβρωσης σε σχέση με τη σχετική υγρασία σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα [20] .....	50
Σχήμα 3.8 Ρυθμός διάβρωσης σε σχέση με τη σχετική υγρασία σε προσβεβλημένο από χλωριόντα σκυρόδεμα ..	50
Σχήμα 4.1 Σχηματική αναπαράσταση των αρχών της AE [32] .....	52
Σχήμα 4.2 Κυματομορφή συνεχούς ακουστικής εκπομπής (continue AE) [34] .....	55
Σχήμα 4.3 Κυματομορφή στιγμιαίας ακουστικής εκπομπής κρουστικού σήματος (burst type AE). [34] .....	55

Σχήμα 4.4 Γραφική παράσταση κυματομορφής ΑΕ [34] .....	56
Σχήμα 4.5 Διάφορα είδη κυμάτων όπου διακρίνεται η διεύθυνση διάδοσης και η κίνηση των σημείων του υλικού μέσου (α) κύματα P (β) κύματα S (γ) επιφανειακά κύματα Rayleigh (δ) επιφανειακά κύματα Love [34] .....	60
Σχήμα 4.6 Κυματομορφή ελαστικών κυμάτων όπου διακρίνονται τα κύματα P (πρώτη άφιξη) τα κύματα S και τα επιφανειακά κύματα (κύματα Rayleigh) διαφορετικής συχνότητας και πλάτους [34].....	60
Σχήμα 4.7 Μονοδιάστατος εντοπισμός θέσης πηγής ΑΕ κατά τη δοκιμή κάμψης τριών σημείων σε ορθογώνια ράβδο. [35].....	62
Σχήμα 4.8 Εντοπισμός θέσης πηγής ΑΕ σε δύο διαστάσεις [36] .....	63
Σχήμα 4.9 Τυπικός εξοπλισμός μέτρησης ΑΕ [37] .....	64
Σχήμα 4.10 Αισθητήρας ΑΕ τύπου συντονισμού και απόκριση συχνότητας [38] .....	65
Σχήμα 4.11 Αισθητήρας ΑΕ τύπου μεγάλου εύρους ζώνης και απόκριση συχνότητας [38] .....	65
Σχήμα 4.12 Αισθητήρας ΑΕ τύπου R-Cast και απόκριση συχνότητας [38].....	66
Σχήμα 5.1 Physical Acoustics PCI-2 based AE system [40].....	71
Σχήμα 5.2 Εμπρόσθια και οπίσθια όψη του πολυκάναλου συστήματος DiSP του οίκου APC [34] .....	72
Σχήμα 5.3 Σχηματική απεικόνιση συστήματος συλλογής ακουστικών εκπομπών [34] .....	73
Σχήμα 5.5 Σχηματική απεικόνιση συστήματος προενισχυτή και πραγματική εικόνα αυτού [43] .....	75
Σχήμα 5.6 Αρχική οθόνη του ΑΕwin.....	75
Σχήμα 5.7 Δοκίμιο, ράβδος χάλυβα .....	78
Σχήμα 6.1 Πηγή ΑΕ Hsu-Nielson .....	80
Σχήμα 6.2 Δοκίμιο στο οποίο πραγματοποιήθηκε η δοκιμή σπασίματος μύτης μολυβιού .....	81
( με τα βέλη σημειώνονται οι θέσεις σπασιμάτων).....	81
Σχήμα 6.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός ποτενσιοδυναμικής διάβρωσης .....	82
Σχήμα 6.4 Φωτογραφική απεικόνιση της επιφάνειας που υπόκειται σε ποτενσιοδυναμική διάβρωση .....	82
Σχήμα 6.5 Ποτενσιοδυναμική καμπύλη για ράβδο χάλυβα σε διάλυμα 3,5% NaCl.....	83
Σχήμα 6.6 Φωτογραφική απεικόνιση πειραματικής δοκιμής .....	88
Σχήμα 6.7 Καταγραφή με ΑΕ της pitting corrosion χάλυβα με προσθήκη 0.6% και 3.5% NaCl ( αθροιστικά hits συναρτήσει του χρόνου).....	89
Σχήμα 6.8 Καταγραφή με ΑΕ της pitting corrosion χάλυβα με προσθήκη 0.6% και 3.5% NaCl ( αθροιστική ενέργεια συναρτήσει του χρόνου).....	91
Σχήμα 6.9 Διαγράμματα των παραμέτρων ΑΕ α) της διάρκειας β) απόλυτης ενέργειας γ) του Rise Time και την απόλυτη ενέργεια των ανιχνευόμενων σημάτων ΑΕ για τον χάλυβα σε διάλυμα 0.6% και 3.5% κ.β. NaCl....	93

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1 Χημικές συνθέσεις, τρόποι παραγωγής και περίοδος χρήσης [2] .....	3
Πίνακας 1.2. Κατηγορίες χάλυβα σύμφωνα με τις Ελληνικές προδιαγραφές ΕΛΟΤ ([3] και ίδιας επεξεργασίας)....	4
Πίνακας 1.3 Μηχανικά χαρακτηριστικά των δύο κατηγοριών χάλυβα που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα [4] .....	5
Πίνακας 3.1 Εύρος τιμών δυναμικού χάλυβα σε σκυρόδεμα [28] .....	39
Πίνακας 3.2 Κριτήρια για τη διάβρωση του οπλισμού σκυροδέματος για ηλεκτρόδια χαλκού και αργυρού [14] [29] .....	42
Πίνακας 3.3 Ερμηνεία ρυθμού διάβρωσης για συσκευές με προστατευτικό δακτύλιο [14] .....	48
Πίνακας 3.4 Ερμηνεία ρυθμού διάβρωσης για συσκευές χωρίς προστατευτικό δακτύλιο [14] .....	48
Πίνακας 6.1 Τιμές των παραμέτρων των εφαρμοσμένων συνθηκών διάβρωσης .....	83

# Μέρος I: Θεωρητικό Υπόβαθρο

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Χάλυβας

### 1. Ορισμός

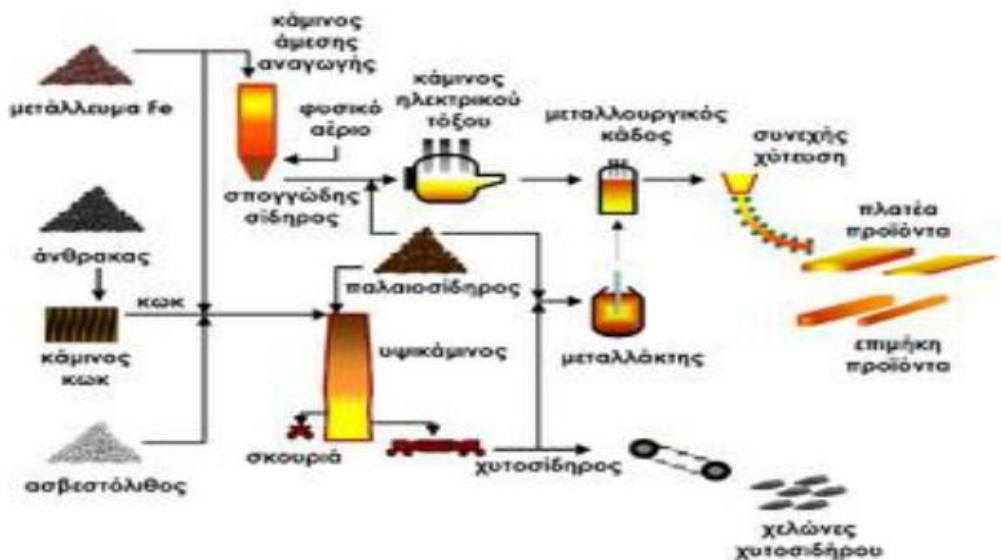
Ο χάλυβας (ατσάλι) είναι κράμα σιδήρου – άνθρακα που περιέχει λιγότερο από 2,06% κ.β. άνθρακα, λιγότερο από 1,0% κ.β. μαγγάνιο και πολύ μικρό ποσοστό πυριτίου, φωσφόρου, θείου και οξυγόνου. [1]

Ο χάλυβας έχει πολλές εφαρμογές, όπως στην αρχιτεκτονική, τη ναυπηγική κ.α, αφού πρόκειται για το πιο διαδεδομένο υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο.

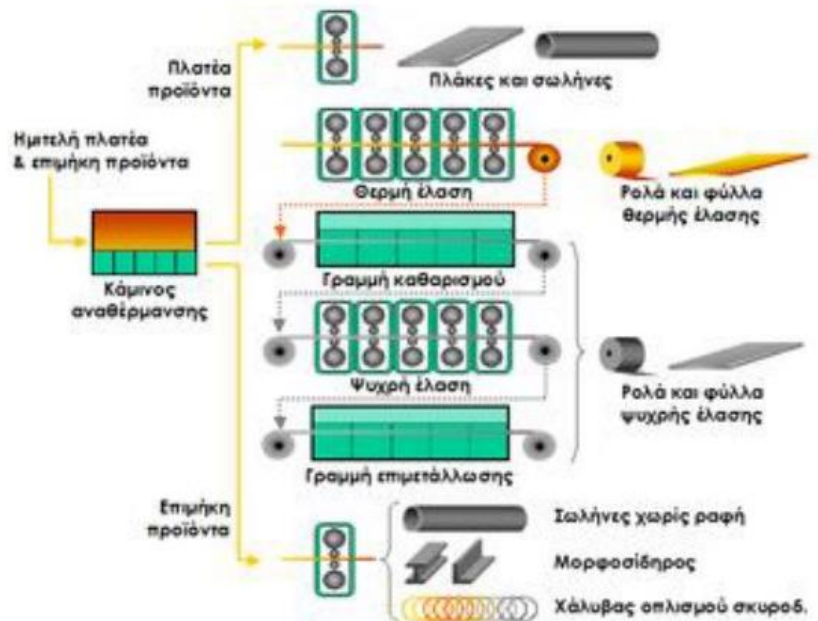
### 1.1 Παραγωγή χάλυβα

Η παραγωγή χάλυβα γίνεται με τρεις βασικές μεθόδους:

- Με αναγωγή σιδηρομεταλλευμάτων σε υψικάμινο για την παραγωγή χυτοσιδήρου σε χάλυβα μέσα σε μεταλλάκτη με εμφύσηση οξυγόνου
- Με την άμεση αναγωγή σιδηρομεταλλευμάτων (δηλ. αναγωγή σε στερεά κατάσταση) σε φρεατώδη κάμινο για την παραγωγή σπογγώδους σιδήρου ( αγγλ. Direct reduced iron ή DRI) και τη μετατροπή του σπογγώδους σιδήρου σε χάλυβα μέσα σε κάμινο ( κλίβανο) ηλεκτρικού τόξου
- Με την ανάτηξη παλαιοσιδήρου (σκραπ) σε κάμινο ( κλίβανο) ηλεκτρικού τόξου ( Electric Arc Furnace- EAF)



Σχήμα 1.1 Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής χυτοσιδήρου και ημιτελών προϊόντων χάλυβα [1]



Σχήμα 1.2 Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής τελικών προϊόντων χάλυβα [1]

## 1.2 Ποιότητες και κατηγορίες χάλυβα

Τα είδη του χάλυβα είναι περισσότερα από 3.500 και παρουσιάζουν διαφορετικές χημικές, μηχανικές και περιβαλλοντολογικές ιδιότητες. Το 75% των ειδών χάλυβα έχουν δημιουργηθεί τα τελευταία είκοσι χρόνια και παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε σχέση με τις παλαιότερες ποιότητες χάλυβα.

Οι χάλυβες διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, την περαιτέρω κατεργασία τους, την κρυσταλλική τους δομή και την τελική τους χρήση.

Ως προς τη χημική τους σύσταση, οι χάλυβες ταξινομούνται ως εξής:

- Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες. Με περιεκτικότητα σε άνθρακα έως 2,06%, μικρό ποσοστό μαγγανίου (έως 1,65%), πυριτίου και χαλκού (έως 0.6%).
- Κραματομένοι χάλυβες , δηλαδή κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα σε σημαντικές περιεκτικότητες.
- Ανάλογα με την περαιτέρω επεξεργασία τους, διακρίνονται σε:
- Χάλυβες διαμόρφωσης, με περαιτέρω μηχανική κατεργασία
- Χυτοχάλυβες, που παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή πλινθωμάτων και επαναχυτεύονται για την κατασκευή διαφόρων εξαρτημάτων

Ως προς την κύρια κρυσταλλική τους φάση, διακρίνονται σε περλιτικούς, φερριτικούς, μαρτενσιτικούς κλπ.

Η ονοματολογία των χαλύβων γίνεται σύμφωνα με διάφορα συστήματα τυποποίησης όπως DIN, ASTM, ΕΛΟΤ

**Πίνακας 1.1 Χημικές συνθέσεις, τρόποι παραγωγής και περίοδος χρήσης [2]**

Κατηγορία Χάλυβα	Τυπική χημική σύνθεση ( % κ.β.)						Τρόπος Παραγωγής	Κόρια Περίοδος χρήσης (δεκαετίες)
	C	Mn	Si	S	P	V		
St I και S220	0,08-0,12	≈0,50	≈0,10	0,03-0,06	0,01 - 0,05	-	Θ.Ε.-Χ.	Έως '70
St IIIα και S400	0,30-0,40	0,80-1,00	0,20-0,30	0,03-0,06		-	Θ.Ε.-Χ.	'60 έως '90
St IIIβ ελικ/βας	0,10-0,15	≈0,50	≈0,10			-	Ψ.Κ.-Σ	'60 έως '70
S500	0,35-0,40	1,00-1,20	0,20-0,30	0,03-0,06		0,02-0,03	Θ.Ε.-Χ.	'90-'95
S400s	≈0,15	0,60-1,00	0,15-0,30	0,03-0,05		-	Θ.Ε.-Θ.	'90-'95
S500s	0,18-0,20	1,00-1,20	0,20-0,30	0,03-0,05		0,04-0,09	Θ.Ε.-Χ.	'90-'95
S500s	0,15-0,20	0,60-1,00	0,15-0,30	0,03-0,05		-	Θ.Ε.-Θ	'92 έως 2007
B500A	0,20-0,22	0,90-1,20	0,15-0,30	0,03-0,05		-	Θ.Ε.-Θ ή Ψ.Κ-Ο	Από 2006
B500C	0,20-0,22	0,90-1,20	0,15-0,30	0,03-0,05		-	Θ.Ε.-Θ.	Από 2006

**Πίνακας 1.2. Κατηγορίες χάλυβα σύμφωνα με τις Ελληνικές προδιαγραφές ΕΛΟΤ ([3] και ίδιας επεξεργασίας)**

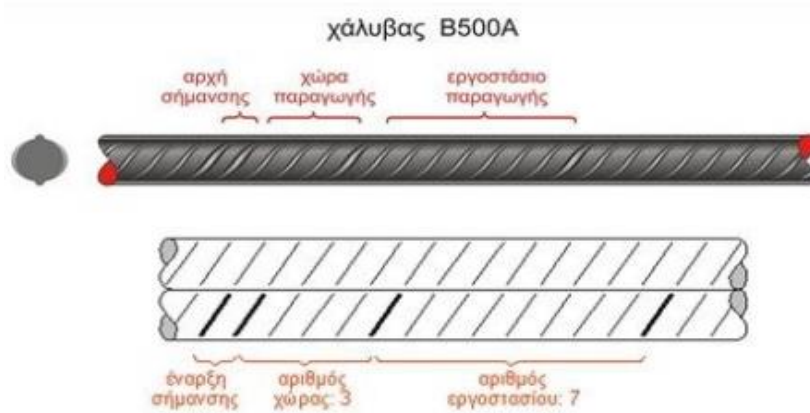
Κατηγορία χάλυβα	Προδιαγραφή	Έτος έκδοσης-εφαρμογής
S220	ΕΛΟΤ 959	1987
S400	ΕΛΟΤ 959	1987
S400s	ΕΛΟΤ 971	1987
S500	ΕΛΟΤ 959	1987
S500s	ΕΛΟΤ 971	1987
Γενικές απαιτήσεις	ΕΛΟΤ EN 10080 ΕΛΟΤ 1421-1	2005
B500A	ΕΛΟΤ 1421-2	2005
B500C	ΕΛΟΤ 1421-3	2005

Όπως ορίζεται από τα πρότυπα ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-2, ΕΛΟΤ 1421-3 [3] και του Νέου Κανονισμού Τεχνολογίας Οπλισμού σκυροδέματος ΚΤΧ 2008 [2], οι κατηγορίες χάλυβα που χρησιμοποιούνται σήμερα στην Ελλάδα είναι τεχνικής κλάσης B500A και B500C. [4]Οι χάλυβες αυτοί παράγονται με θερμική επεξεργασία. Στο εξωτερικό περίβλημά τους και την επιφάνειά τους επικρατεί η μαρτενσιτική δομή η οποία παρουσιάζει μεγάλη μηχανική αντοχή αλλά μειωμένη πλαστιμότητα. Στο εσωτερικό τους επικρατεί η φερριτο-περλιτική δομή ,η οποία παρουσιάζει χαμηλή μηχανική αντοχή αλλά έχει υψηλή πλαστιμότητα. Στον πίνακα 1.3.3. παρουσιάζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των δύο αυτών κατηγοριών χάλυβα.

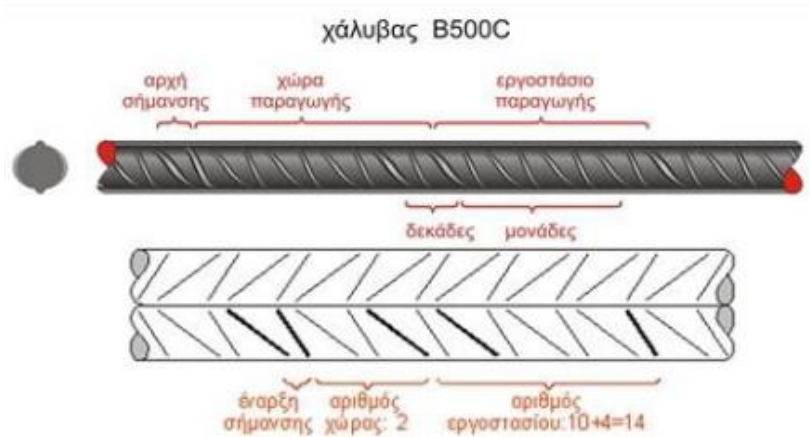
Πίνακας 1.3 Μηχανικά χαρακτηριστικά των δύο κατηγοριών χάλυβα που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα [4]

Κατηγορίες Χάλυβα	Όριο Διαρροής Rp (MPa)	Όριο Αντοχής Rm (MPa)	Ομοιόμορφη Παραμόρφωση Ag (%)	Λόγος Rm/ Rp
B500A	$\geq 500$	$\geq 525$	$\geq 2.5$	1.05
B500C	$\geq 500$	$575 \leq Rm \leq 675$	$\geq 7.5$	$1.15 \leq Rm/Rp \leq 1.35$

Οι χάλυβες B500C χρησιμοποιούνται για τον οπλισμό σε έργα από σκυρόδεμα, ενώ οι B500A χρησιμοποιούνται σε δομικά πλέγματα.



Σχήμα 1.3 Παράδειγμα σήμανσης για την αναγνώριση της χώρας και της μονάδας παραγωγής χάλυβα κατηγορίας B500A [5]



Σχήμα 1.4 Παράδειγμα σήμανσης για την αναγνώριση της χώρας και της μονάδας παραγωγής χάλυβα κατηγορίας B500C [5]



### 1.3 Χάλυβες οπλισμένου σκυροδέματος (χάλυβες ενίσχυσης)

Οι χάλυβες οπλισμού είναι ράβδοι χάλυβα οι οποίες παρέχονται σε συνδυασμό με το σκυρόδεμα, δίνοντας ως προϊόν το οπλισμένο σκυρόδεμα [6]. Αυτό παρουσιάζει ενισχυμένες ιδιότητες σε τάση και συμπίεση. Ο χάλυβας οπλισμού στο σκυρόδεμα προλαμβάνει και ελαχιστοποιεί την παρουσία ρωγμών στο σκυρόδεμα υπό τάσης. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του οπλισμού και του σκυροδέματος είναι παρόμοια και αυτό εξασφαλίζει ότι το σκυρόδεμα υποβάλλεται σε ελάχιστη πίεση κατά τη διάρκεια μεταβολών της θερμοκρασίας. Η επιφάνεια των ράβδων οπλισμού είναι διαμορφωμένη έτσι ώστε να παρουσιάζει έναν κατάλληλο δεσμό με το περιβάλλον υλικό του σκυροδέματος .

Οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται για τον οπλισμό σκυροδέματος διακρίνονται στις εξής κατηγορίες: [2][4][7]

- Σύμφωνα με τη μέθοδο παραγωγής, σε
- Θερμής έλασης ,χωρίς περαιτέρω θερμική ή θερμομηχανική κατεργασία (χάλυβες ΘΕ-Χ)
- Θερμής έλασης που ακολουθείται από μια άμεση εν σειρά διαδικασία θερμικής κατεργασίας (χάλυβες ΘΕ-Θ)
- Ψυχρής κατεργασίας, με ολκή ή έλαση του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση (χάλυβες ΨΚ-Ο) ή με στρέψη του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση (χάλυβες ΨΚ-Σ) ή με συνδυασμό των παραπάνω
- Σύμφωνα με τη μορφή της επιφάνειας της ράβδου
- Λείους χάλυβες κυκλικής διατομής
- Χάλυβες με ανάγλυφες νευρώσεις
- Χάλυβες με κοιλότητες (αυλακώσεις)
- Σύμφωνα με την ολκιμότητα
- Χάλυβες υψηλής ολκιμότητας
- Χάλυβες μέσης ολκιμότητας
- Χάλυβες χαμηλής ολκιμότητας
- Σύμφωνα με την συγκολλησιμότητα
- Χάλυβες συγκολλησίμους
- Χάλυβες μη συγκολλησίμους

Σύμφωνα με την αντοχή τους στη διάβρωση

- Κοινούς χάλυβες (κράματα Fe-C και με άλλα στοιχεία σε μικρά ποσοστά)
- Ανοξειδωτους χάλυβες (κράματα Fe-Cr σε ελάχιστη περιεκτικότητα). Η αντοχή στη διάβρωση αυξάνεται αν υπάρχουν και κράματα όπως Ni (νικέλιο) , Mo (μολυβδένιο) ,Ti (τιτάνιο).

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> : Διάβρωση χάλυβα

### 2.1 Διάβρωση

Η διαδικασία διάβρωσης που λαμβάνει χώρα σε ένα κομμάτι μη επικαλυμμένου χάλυβα είναι πολύ περίπλοκη και οφείλεται στις ηλεκτροχημικές ή χημικές αντιδράσεις του μετάλλου με το περιβάλλον στο οποίο θα λειτουργεί. [8] Παράγοντες όπως, η δομή του χάλυβα, η παρουσία ακαθαρσιών λόγω της υψηλότερης παρουσίας ανακυκλωμένου χάλυβα, η άνιση εσωτερική πίεση και η έκθεση σε μη ομοιόμορφο περιβάλλον επηρεάζουν τη διαδικασία διάβρωσης. [9] Το περιβάλλον μπορεί να είναι φυσικό π.χ. θάλασσα, ύπαιθρος ή τεχνητό π.χ. εργαστηριακοί ή βιομηχανικοί χώροι.

Είναι πολύ εύκολο για τις μικροσκοπικές περιοχές του εκτεθειμένου χάλυβα να γίνουν ανοδικές ή καθοδικές μεταξύ τους. Ένας μεγάλος αριθμός τέτοιων περιοχών μπορεί να αναπτυχθεί σε ένα μικρό τμήμα του εκτεθειμένου χάλυβα. Επιπλέον, είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι γαλβανικών στοιχείων διάβρωσης στην ίδια μικρή περιοχή ενός ενεργού διαβρωτικού κομματιού χάλυβα.[4] Η χημική σύσταση του χάλυβα υποβοηθά επιπλέον τον σχηματισμό των γαλβανικών αυτών στοιχείων ,δεδομένου ότι κατά την παραγωγική διαδικασία του χάλυβα παρατηρούνται ανομοιομορφίες και ατέλειες στην επιφάνεια του, οι οποίες είναι ικανές να δημιουργήσουν μια διαφορά δυναμικού της τάξης των mV.

Καθώς προχωρά η διαδικασία διάβρωσης, τα προϊόντα διάβρωσης τείνουν να συσσωρεύονται σε ορισμένες περιοχές του μετάλλου. Αυτά τα προϊόντα διάβρωσης έχουν διαφορετική σύνθεση από την αρχική κατάσταση. Οι νέες συνθέσεις που εκτίθενται στην επιφάνεια οδηγούν σε αλλαγές στις ανοδικές και καθοδικές περιοχές. Καθώς συμβαίνει η αλλαγή στις ανοδικές και τις καθοδικές περιοχές, μπορούν να προσβληθούν και να διαβρωθούν πρώτα τα αδιάβροχα τμήματα του μετάλλου. Αυτό θα επιταχύνει τη συνολική διάβρωση της επιφάνειας του χάλυβα.

Τα προϊόντα διάβρωσης του χάλυβα είναι σωματίδια οξειδίου και έχουν ένα διακριτικό καφέ κόκκινο (σκουριά) χρώμα. Μόνο μια μικρή ποσότητα αυτών των σωματιδίων μπορεί να προκαλέσει διάβρωση μιας μη επικαλυμμένης επιφάνειας από χάλυβα. Ο χάλυβας διαβρώνει φυσικά όταν εκτίθεται στην ατμόσφαιρα, αλλά η διαδικασία διάβρωσης επιταχύνεται όταν τα ηλεκτροχημικά κύτταρα διάβρωσης είναι ενεργά στην επιφάνεια.

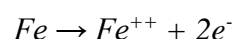
## 2.2 Μηχανισμός του χάλυβα ενίσχυσης στο σκυρόδεμα

Παρότι η επικάλυψη του χάλυβα με σκυρόδεμα συνιστά έναν τύπο προστασίας του σιδηροπλισμού έναντι περιβαλλοντικών επιδράσεων [10], παρόλα αυτά σε βάθος χρόνου το σκυρόδεμα δύναται να χάσει την προστατευτική του ιδιότητα λόγω διείσδυσης χλωριόντων, ενανθράκωσης ή συνδυασμό και των δύο. Η ενανθράκωση μειώνει την αλκαλικότητα του σκυροδέματος με ταυτόχρονη παρουσία υγρασίας και οξυγόνου, έχοντας σαν αποτέλεσμα τη μείωση του pH σε τιμές μικρότερες του 9. [11] Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μετάβαση του χάλυβα από τη παθητική στην ενεργητική κατάσταση και την έναρξη του φαινομένου της διάβρωσης.

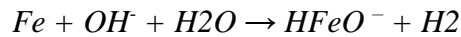
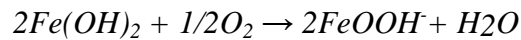
Η διάβρωση είναι μια ηλεκτροχημική διαδικασία η οποία περιλαμβάνει μεταφορά ιόντων για να πραγματοποιηθεί απαιτεί την ύπαρξη ανόδου, καθόδου και ηλεκτρολύτη μέσω του οποίου διακινούνται τα ιόντα. Στο οπλισμένο σκυρόδεμα τον ρόλο του ηλεκτρολύτη παίζει το σκυρόδεμα, οι πόροι του οποίου περιέχουν υγρασία. Ο χάλυβας έχει τον ρόλο της ηλεκτρικής σύνδεσης. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται στη διεπιφάνεια μετάλλου- ηλεκτρολύτη, με τη μετακίνηση των ιόντων να γίνεται μέσω του ηλεκτρολύτη. Με απουσία εξωτερικής ηλεκτρικής πηγής, η εν λόγω ηλεκτροχημική διαδικασία απαιτεί δύο αντιδράσεις: μία ανοδική αντίδραση (παραγωγή ηλεκτρονίων) κατά την οποία λαμβάνει χώρα η οξείδωση του χάλυβα (παράγοντας ιόντα σιδήρου) και μία καθοδική αντίδραση (με κατανάλωση ηλεκτρονίων) κατά την οποία λαμβάνει χώρα η αναγωγή οξυγόνου (παράγοντας ιόντα υδροξυλίου). [12] Η ανοδική και η καθοδική αντίδραση πραγματοποιούνται ταυτόχρονα σε διαφορετικές περιοχές της χαλύβδινης ράβδου με έναν αριθμό ηλεκτρονίων να κινούνται μέσα σε αυτή.

### Ανοδικές αντιδράσεις

Στην άνοδο λαμβάνει χώρα η ανοδική διάλυση του σιδήρου με τα άτομα του να μετατρέπονται σε ιόντα. Ως άνοδος λειτουργεί το τμήμα του χάλυβα όπου έχει καταστραφεί το προστατευτικό στρώμα οξειδίων.



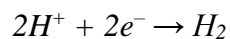
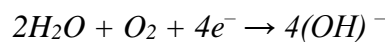
Το  $Fe(OH)_2$  είναι αδιάλυτο και σχηματίζει ένα ογκώδες στρώμα σκωρίας επί της επιφάνειας του χάλυβα [13]



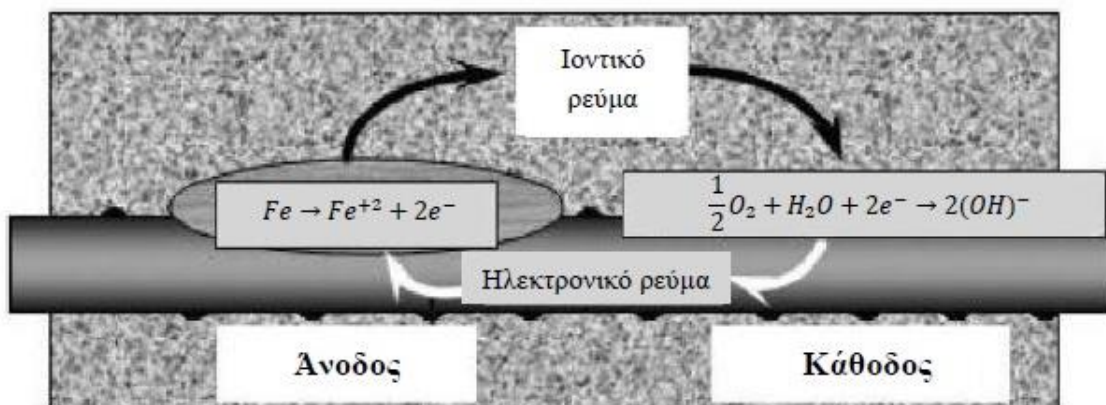
Οι συνθήκες του περιβάλλοντος, επηρεάζουν την ταχύτητα των ανοδικών αντιδράσεων. Στην περίπτωση που στην επιφάνεια του μετάλλου δημιουργηθεί παθητικό στρώμα, η οξείδωση του χάλυβα εκδηλώνεται αργά. Η οξείδωση του χάλυβα εκδηλώνεται γρήγορα όταν το παθητικό στρώμα καταστραφεί από την παρουσία χλωριόντων ή από τη μείωση της τιμής του pH του υδατικού διαλύματος στο πορώδες του σκυροδέματος.

#### Καθοδικές αντιδράσεις

Ως κάθοδος λειτουργεί η περιοχή του χάλυβα που έχει οξυγόνο και νερό και δεν έχει απαραίτητα καταστραφεί το στρώμα οξειδίων. Το οξυγόνο που διαχέεται μέσω του πορώδους του σκυροδέματος, φτάνει στην επιφάνεια του οπλισμού και προσλαμβάνει τα διαθέσιμα ηλεκτρόνια, παράγοντας ιόντα υδροξυλίου.



Όταν η τιμή του pH είναι μεταξύ 4 και 10, προκαλείται η διάβρωση του χάλυβα, ενώ όταν η τιμή του pH του υγρού των πόρων βρίσκεται μεταξύ 10 και 13.5, ο οπλισμός του χάλυβα παραμένει σε παθητικοποιημένη κατάσταση.



Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση της ανόδου και της καθόδου [14]

## 2.3 Αιτίες διάβρωσης

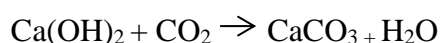
Οι δύο κυριότερες αιτίες διάβρωσης του οπλισμένου σκυροδέματος είναι η ενανθράκωση (carbonation) και η προσβολή χλωριόντων (chloride attack) . Τα δύο αυτά φαινόμενα προσβάλλουν το αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα να ξεκινήσει το φαινόμενο της διάβρωσης του χάλυβα ενίσχυσης.

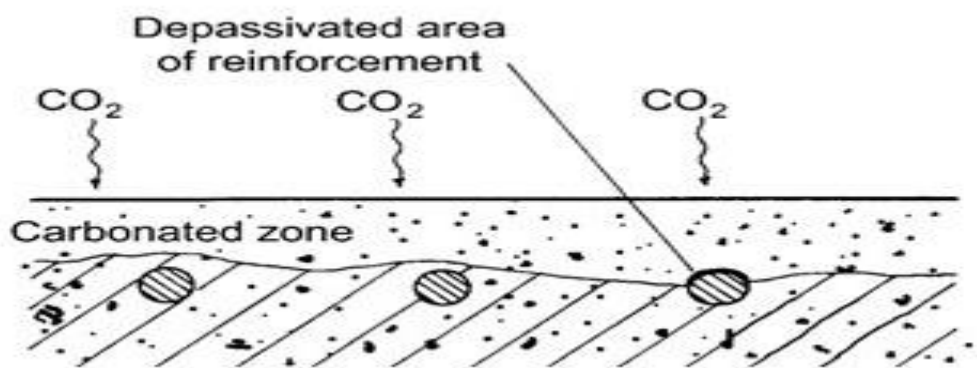
Ένα άλλο φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει διάβρωση ή επιτάχυνση αυτής λόγω ενανθράκωσης στον οπλισμό είναι η υποβολή των στοιχείων του οπλισμένου σκυροδέματος σε συχνούς κύκλους διαβροχής και ξήρανσης (wet dry cycling). [15]

### 2.3.1 Ενανθράκωση

Η ενανθράκωση εντοπίζεται ως η μείωση του pH του διαλύματος των πόρων σε περιοχές της επιφάνειας του σκυροδέματος. [16]

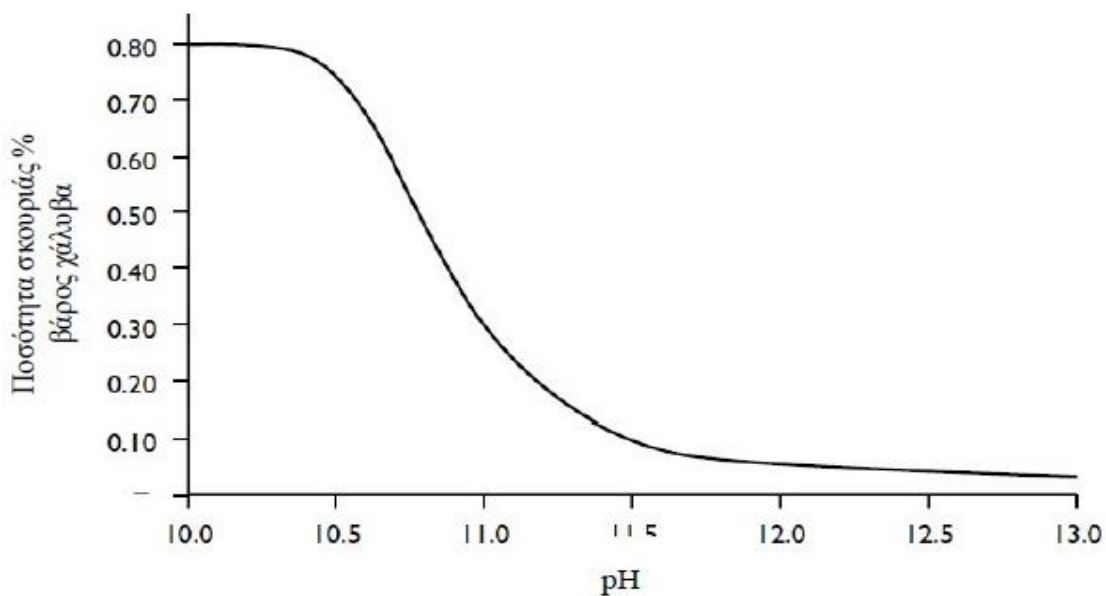
Στην ουσία η ενανθράκωση είναι το αποτέλεσμα της αντίδρασης των αλκαλικών συστατικών ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) του τσιμεντοπολτού ή και του μη ενυδατωμένου τσιμέντου με το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) της ατμόσφαιρας, το οποίο διαχέεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω των πόρων, λόγω της διαφορετικής συγκέντρωσης του μεταξύ της ατμόσφαιρας και του πορώδους του σκυροδέματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός λεπτού στρώματος ενανθρακωμένου σκυροδέματος, πάχους μικρότερο του ενός χιλιοστού. Όσο το υδροξείδιο του ασβεστίου πλεονάζει, η τιμή του pH είναι μεταξύ 12 και 13, το περιβάλλον είναι αλκαλικό και ο οπλισμός προστατεύεται από τη διάβρωση. Όμως η αντίδραση του υδροξειδίου του ασβεστίου με το διοξείδιο του άνθρακα προχωράει έως ότου εξαντληθεί όλο το υδροξείδιο του ασβεστίου. Τότε η τιμή του pH μειώνεται σε τιμές μικρότερες του 9 και ο οπλισμός πλέον δεν προστατεύεται και σημειώνεται η αποπαθητικοποίησή του σε μεγάλες επιφάνειες του ή σε όλη του την επιφάνεια ενώ μπορεί να ξεκινήσει η διάβρωση του. Το προϊόν της αντίδρασης είναι το ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ).





Σχήμα 2.2 Το μέτωπο του ενανθρακωμένου σκυροδέματος συναντά τον οπλισμό [12]

Οι κατασκευές σκυροδέματος σε βιομηχανικές περιοχές συνήθως παρουσιάζουν ταχύτερους ρυθμούς ενανθράκωσης εξαιτίας της υψηλότερης συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> στο περιβάλλον τους. Η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> δεκαπλασιάζεται σε μεγάλα αστικά κέντρα, ενώ σε βιομηχανικές περιοχές μπορεί να είναι έως και 100 φορές υψηλότερη.



Σχήμα 2.3 Ποσότητα σκουριάς που δημιουργείται ως ποσοστό του βάρους του χάλυβα σε συνάρτηση με το pH του σκυροδέματος [17]

### **2.3.1.1 Παράγοντες αντίστασης στην ενανθράκωση**

Οι παράγοντες που καθορίζουν την αντίσταση στην ενανθράκωση του οπλισμένου σκυροδέματος είναι οι εξής:

Το πάχος της επικάλυψης και η σχετική υγρασία του αέρα. Όσο μεγαλύτερη η απόσταση, τόσο μικρότερος ο ρυθμός ενανθράκωσης

Ο λόγος νερού/τσιμέντου ( $w/z$ ). Το τσιμέντο δεσμεύει χημικά και φυσικά, περίπου το 0,4 του βάρους του σε νερό. Συχνά στην πράξη όμως για να επιτυγχάνεται η εργασιμότητά του αυξάνεται ο λόγος αυτός. Το πλεονάζον και μη δυνάμενο να δεσμευτεί νερό εξατμίζεται αφήνοντας τον όγκο του σαν τριχοειδή και πόρους που αργότερα θα είναι η αφετηρία της ενανθράκωσης. [18] Αν ο λόγος  $w/z$  είναι μεγάλος, η ενανθράκωση επιταχύνεται. Αν η ποσότητα του τσιμέντου είναι μεγάλη (κατά συνέπεια μικρός λόγος  $w/z$ ), εξασφαλίζεται και η μεγαλύτερη παρουσία αλκαλίων και η ενανθράκωση καθυστερεί.

Η ποιότητα του σκυροδέματος. Η ανοιχτή δομή πόρων του σκυροδέματος διευκολύνει τη διάχυση του  $CO_2$ . [17] Σε μακροσκοπική κλίμακα, το σκυρόδεμα πρέπει να έχει καλή συμύκνωση ενώ σε μικροσκοπική πρέπει να έχει μικρούς πόρους οι οποίοι να έχουν μικρή διασύνδεση με το διοξείδιο του άνθρακα.

### **2.3.1.2 Ενανθράκωση λόγω κύκλων διαβροχής και ξήρανσης**

Η ενανθράκωση των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα ευνοείται όταν αυτές υποβάλλονται σε συνεχείς κύκλους διαβροχής και ξήρανσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη διείσδυση του  $CO_2$  και την παροχή του νερού στο οποίο διαλύεται. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται σε χώρες που υπάρχει εναλλαγή ξηρών και υγρών εποχών.

### **2.3.2 Προσβολή χλωριόντων**

Όταν η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου  $Cl^-$  υπερβαίνει το 0.4 – 0.6 του βάρους του τσιμέντου, τότε αυτά διαπερνούν το προστατευτικό στρώμα του οξειδίου μέσω των πόρων του, με μεγάλη ευκολία, επιφέροντας τοπική ή γενική καταστροφή του επιφανειακού προστατευτικού οξειδίου, έχοντας ως αποτέλεσμα την αρχή οξείδωσης του οπλισμού.

Τα χλωριόντα που προσβάλλουν το σκυρόδεμα μπορούν να προϋπάρχουν σε αυτό ή να προέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον. Τα χλωριόντα προϋπάρχουν στο σκυρόδεμα αν έχουν προστεθεί σε αυτό επιταχυντές που τα περιέχουν (π.χ. χλωριούχο ασβέστιο) το οποίο χρησιμοποιούνταν ευρέως έως τα μέσα της δεκαετίας του 1970. Επίσης τα χλωριόντα μπορεί



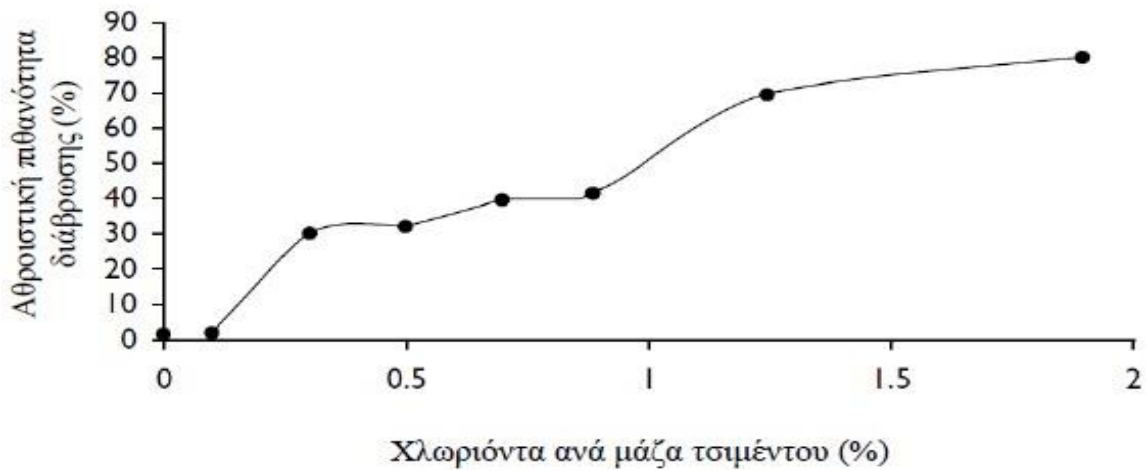
να αποτελούν συστατικό του σκυροδέματος αν σε αυτό έχουν προστεθεί αδρανή που έχουν συλλεχθεί από παραθαλάσσιες περιοχές ή αν έχει χρησιμοποιηθεί θαλασσινό νερό στο μείγμα. Η διείσδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα μπορεί να γίνει λόγω της επαφής των κατασκευών με θαλασσινό νερό ή ακόμη και αν η κατασκευή βρίσκεται σε απόσταση από την ακτή, μπορεί να επιτευχθεί εξίσου το φαινόμενο της διάβρωσης, λόγω των χλωριούχων αλάτων που βρίσκονται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Ένας άλλος παράγοντας είναι η χρήση αποπαγωτικών αλάτων, κατά τη διάρκεια του χειμώνα, για το λιώσιμο του χιονιού. Επίσης τα κτήρια στα οποία γίνεται χρήση χημικών (ενυδρεία, αποθήκες αλάτων), είναι επιρρεπή στην προσβολή από χλωριόντα.

Ο βαθμός διείσδυσης των χλωριόντων μπορεί να προβλεφθεί δύσκολα διότι ο προσδιορισμός ενός ελάχιστου ορίου της συγκέντρωσης χλωριόντων ικανό για την έναρξη της διάβρωσης δεν είναι εύκολος, λόγω της πολυπαραμετρικότητας του προβλήματος (συμπεριλαμβανόμενης και της επίδρασης των περιβαλλοντικών συνθηκών), αλλά και της δυσκολίας και μη ικανοποιητικής ακρίβειας που ενέχουν οι μέθοδοι εκτίμησης της περιεκτικότητας του σκυροδέματος σε χλωριόντα.

Αν το σκυρόδεμα είναι στεγνό, αρχικά, υπάρχει απορρόφηση που αποτελεί τριχοειδή δράση. Ειδικά το θαλασσινό νερό απορροφάται με μεγάλη ταχύτητα. Στη συνέχεια τα άλατα μεταφέρονται από το νερό τριχοειδώς μέσω των πόρων και διαχέονται στο σκυρόδεμα.

Τα περισσότερα κείμενα προδιαγραφών και κανονισμών θέτουν μέγιστα επιτρεπόμενα όρια συγκέντρωσης Cl<sup>-</sup> στο σκυρόδεμα [δηλαδή, μέγιστες επιτρεπόμενες περιεκτικότητες των συνολικών (οξυδιαλυτών) χλωριόντων στο σκυρόδεμα], εκφρασμένα ως μάζα χλωριόντων επί τοις εκατό, κατά βάρος τσιμέντου (ή τσιμεντοειδών υλικών). [12]

Από το ποσοστό χλωριόντων που υπάρχει στο σκυρόδεμα, μπορεί να προκύψει η πιθανότητα διάβρωσης της κατασκευής.[19]

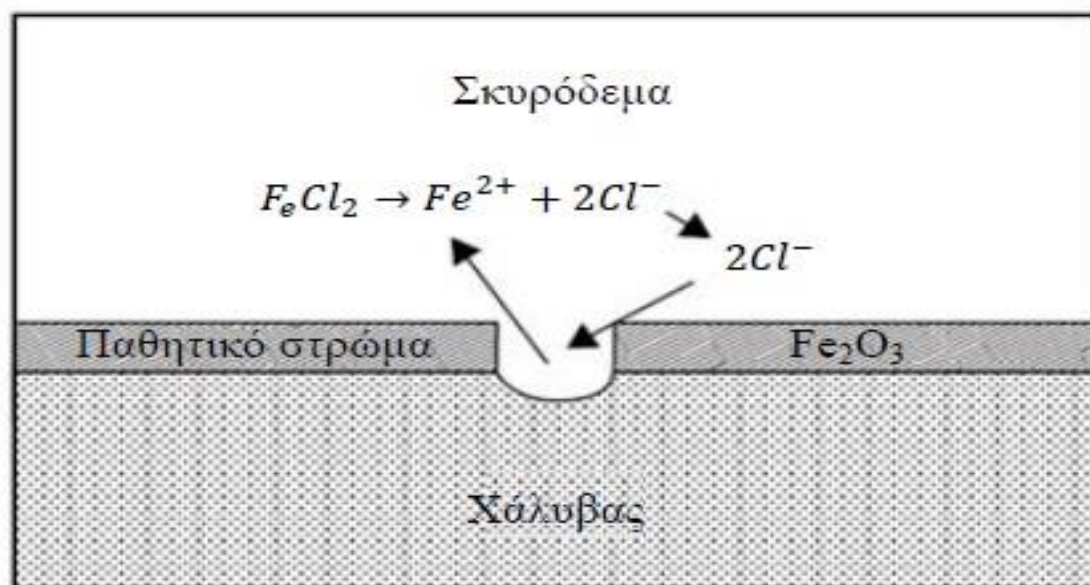


Σχήμα 2.4 Ποσότητα σκουριάς που δημιουργείται ως ποσοστό του βάρους του χάλυβα σε συνάρτηση με το pH του σκυροδέματος. [19]

### 2.3.2.1 Μηχανισμός προσβολής χλωριόντων

Η αποπαθητικοποίηση του χάλυβα από τα χλωριόντα δεν είναι η ίδια με αυτή της ενανθράκωσης. Τα χλωριόντα δρουν ως καταλύτες για τη διάβρωση, προσβάλλοντας το παθητικό στρώμα του οπλισμού χωρίς να μειώνουν το pH, όπως συμβαίνει στην ενανθράκωση.

Τα χλωριόντα δεν καταναλώνονται κατά τη διαδικασία, αλλά ανακυκλώνονται με αποτέλεσμα να καταστρέφουν το προστατευτικό στρώμα, να επιταχύνουν τη διάβρωση και να είναι δύσκολο να εξαλειφθούν.

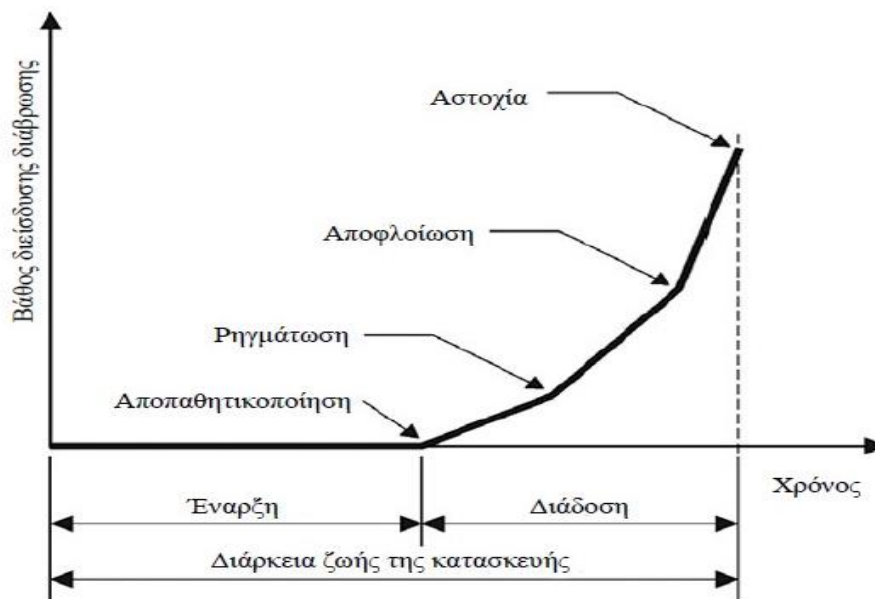


Σχήμα 2.5 Καταστροφή προστατευτικού στρώματος και ανακύκλωση χλωριόντων [14]

## 2.4 Στάδια διάβρωσης

Τα στάδια διάρκειας ζωής μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι τα εξής:

- Το στάδιο έναρξης (initiation phase) κατά τη διάρκεια του οποίου ο οπλισμός διατηρεί την παθητικότητά του και κατά το οποίο συμβαίνουν τα φαινόμενα που μπορούν να οδηγήσουν στην αποπαθητικοποίηση του, όπως η ενανθράκωση και η διείσδυση χλωριόντων. Η διάρκεια του σταδίου εξαρτάται από το πάχος του σκυροδέματος που καλύπτει τον οπλισμό, τον ρυθμό διείσδυσης των μέσων διάβρωσης και της συγκέντρωσής τους που είναι ικανή για να αποπαθητικοποιηθεί ο οπλισμός. Επίσης η διάρκεια του σταδίου έναρξης μπορεί να επηρεαστεί και από μια πιθανή πόλωση του οπλισμού. Η διάρκεια του αυξάνεται από μια καθοδική πόλωση, ενώ μπορεί να μειωθεί από μια ανοδική πόλωση. Το στάδιο έναρξης ολοκληρώνεται όταν αρχίζει το φαινόμενο της διάβρωσης. Η διάρκεια του σταδίου μπορεί να παραταθεί με τη χρήση αναστολέων διάβρωσης που αναμιγνύονται με το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος έτσι ώστε να αποτραπεί η έναρξη της διάβρωσης.
- Το στάδιο διάδοσης (propagation phase) το οποίο εξελίσσεται έως ότου οι επιπτώσεις της διάβρωσης δεν είναι πλέον ανεκτές. Η διάβρωση εμφανίζεται όταν έχει καταστραφεί το προστατευτικό στρώμα και στην επιφάνεια του οπλισμού υπάρχει παρουσία νερού και οξυγόνου. Το στάδιο της διάδοσης ολοκληρώνεται όταν στην κατασκευή επέλθει εγκάρσια μείωση της διατομής του οπλισμού, η ρηγμάτωση του σκυροδέματος, η αποφλοίωση και αποκόλληση του και τελικά η κατάρρευση της κατασκευής. Ο ρυθμός της διάβρωσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την υγρασία.



**Σχήμα 2.6 Φαινόμενα υποβάθμισης του οπλισμένου σκυροδέματος που συμβαίνουν κατά τα στάδια έναρξης και διάδοσης [20]**

Στο στάδιο της διάδοσης, όταν πρόκειται για διάβρωση λόγω ενανθράκωσης του σκυροδέματος, προκαλείται γενική καταστροφή του προστατευτικού στρώματος αφού όλη η επιφάνεια του χάλυβα διαβρώνεται καθώς έρχεται σε επαφή με το ενανθρακωμένο σκυρόδεμα.

Στην περίπτωση της διεσόδους χλωριόντων, η διάβρωση είναι τοπικής μορφής και δημιουργούνται διαβρωμένες κοιλοότητες που περιβάλλονται από μη διαβρωμένες περιοχές. Η διάβρωση είναι γενικής μορφής μόνο όταν υπάρχει μεγάλη παρουσία χλωριόντων τα οποία καταστρέφουν το προστατευτικό στρώμα του οπλισμού σε ευρεία περιοχή.

## 2.5 Μορφές διάβρωσης

Η διάβρωση του χάλυβα παρουσιάζεται σε διαφορετικές μορφές, ανάλογα με το είδος του μετάλλου και του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Οι πιο χαρακτηριστικές είναι οι εξής:

### ➤ Ομοιόμορφη διάβρωση

Πρόκειται για το πιο κοινή μορφή διάβρωσης. Χαρακτηρίζεται από ηλεκτροχημική ή χημική δράση, η οποία προχωρά ομοιόμορφα στο μεγαλύτερο μέρος ή στο σύνολο της εκτεθειμένης επιφάνειας, έχοντας ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός προϊόντος διάβρωσης, σχεδόν ισοπαχούς και ομοιόμορφου, ή μιας ομοιόμορφης διάλυσης της μεταλλικής επιφάνειας. Τα προϊόντα διάβρωσης εμφανίζονται όταν το μέταλλο έρθει σε επαφή με οξύ ή διάλυμα και παραμένουν στη διαβρωμένη επιφάνεια. Η ομοιόμορφη διάβρωση μπορεί να εκδηλωθεί και σε ξηρή ατμόσφαιρα, οπότε πραγματοποιείται

οξειδωση σε υψηλές θερμοκρασίες, με το σχηματιζόμενο προϊόν διάβρωσης να λειτουργεί ως προστατευτικό στο μέταλλο. Ο χρόνος ζωής του εκτεθειμένου υλικού μπορεί να προσδιοριστεί με σχετικά μεγάλη ακρίβεια μέσω απλών δοκιμών.



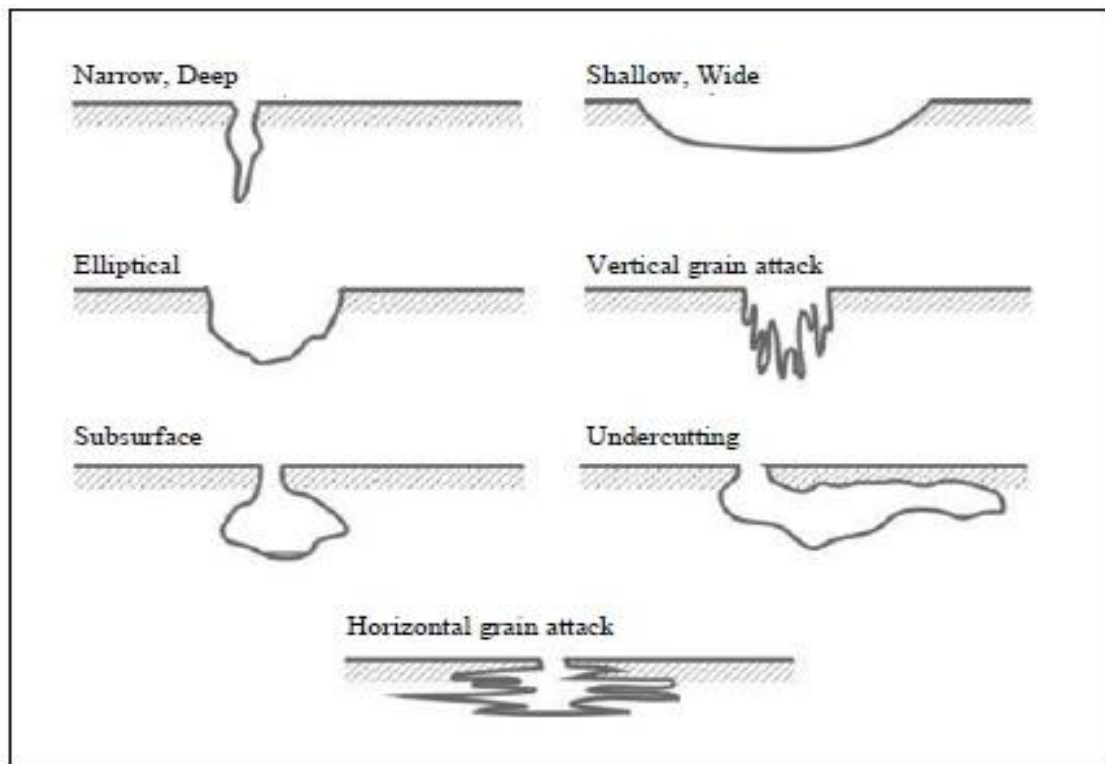
**Σχήμα 2.7 Ομοιόμορφο στρώμα από το προϊόν της διάβρωσης που δημιουργείται κατά την ομοιόμορφη διάβρωση [17]**

➤ Διάβρωση με βελονισμούς

Πρόκειται για τη διάβρωση μιας μεταλλικής επιφάνειας περιορισμένης σε ένα σημείο ή μια μικρή περιοχή με τη δημιουργία μικρών κοιλοτήτων ή βελονισμών. Το συγκεκριμένο είδος διάβρωσης είναι το πιο καταστρεπτικό, διότι προκαλεί καταστροφή του υλικού παρουσιάζοντας διατρήσεις (βελονισμούς). Η διάκριση των βελονισμών είναι πολύ δύσκολη λόγω του μικρού τους μεγέθους ή λόγω του ότι συχνά καλύπτονται από άλλα προϊόντα διάβρωσης. Όταν διασπασθεί η ομοιογένεια του προστατευτικού οξειδίου, οι επιφάνειες στις οποίες παρουσιάζεται η ανωμαλία γίνονται άνοδοι ηλεκτρολυτικού κελιού και η υπόλοιπη επιφάνεια δρα ως κάθοδος. Τα διαλύματα χλωρίου προκαλούν διάβρωση με βελονισμούς. Οι σημαντικότερες αιτίες που μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση με βελονισμούς είναι η θερμοκρασία, η ταχύτητα ροής των ιόντων χλωρίου, η διαφορά της συγκέντρωσης οξυγόνου και η διαφοροποίηση των περιβαλλοντολογικών συνθηκών



Σχήμα 2.8 Βελονοειδής διάβρωση σε χαλύβδινη ράβδο οπλισμού που προκλήθηκε λόγω προσβολής χλωριόντων στο σκυρόδεμα [12]



Σχήμα 2.9 Πιθανά σχήματα των κοιλωμάτων που δημιουργούνται κατά τη βελονοειδή διάβρωση [17]

➤ Σπηλαιώδης διάβρωση

Πρόκειται για τη μορφή διάβρωσης κατά την οποία σχηματίζονται εσοχές και σπηλιές λόγω της παρουσίας φυσαλίδων ατμού, οι οποίες σπάνε κοντά στη μεταλλική επιφάνεια. Κατά το σπάσιμο των φυσαλίδων, δημιουργούνται κύματα σύγκρουσης με την επιφάνεια, τα οποία αντιστοιχούν σε τοπικές πιέσεις έως 400 atm, με συνέπεια την επιτάχυνση της διάβρωσης και την τοπική καταστροφή της επιφάνειας.

➤ Γαλβανική διάβρωση

Πρόκειται για ηλεκτροχημική μορφή διάβρωσης και ονομάζεται γαλβανική ή διάβρωση επαφής και εντοπίζεται σε συνδέσεις μετάλλων ή στις περιπτώσεις που ένα μέταλλο διαδέχεται ένα άλλο. Η γαλβανική διάβρωση παρουσιάζεται όταν δύο μέταλλα βρίσκονται σε αγώγιμη επαφή μεταξύ τους και σε διαβρωτικό περιβάλλον. Αυτή η συνθήκη έχει ως αποτέλεσμα τη σχεδόν αποκλειστική διάβρωση του ευγενέστερου μετάλλου, ενώ το αγενέστερο μέταλλο μεταβαίνει στο περιβάλλον υπό μορφή ιόντων, με τα ηλεκτρόνια που παράγονται να καταναλώνονται στην επιφάνεια. Η γαλβανική διάβρωση εξαρτάται από τη φύση, τη διαβρωτικότητα καθώς και την αγωγιμότητα του περιβάλλοντος. Σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση και εξέλιξη της γαλβανικής διάβρωσης παίζει και η υγρασία.

➤ Περικρυσταλλική διάβρωση

Πρόκειται για τη μορφή της διάβρωσης που εντοπίζεται στα όρια των κρυσταλλικών κόκκων των μεταλλικών υλικών, τα οποία εμφανίζονται ανοδικότερα του κυρίως μετάλλου, λόγω συγκέντρωσης σε αυτά ακαθαρσιών και στοιχείων κραματοποίησης. [4]. Λόγω αυτής της μορφής διάβρωσης, υπό την επίδραση μηχανικών τάσεων ή καταπονήσεων, υποβαθμίζονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού ακόμη και αν το φορτίο που επιβάλλεται είναι αρκετά μικρότερο από το φορτίο αντοχής του υλικού σε εφελκυσμό.

## 2.6 Παράγοντες που επιδρούν στη διάβρωση.

[2] Η ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα αυξάνεται τόσο εντός όσο και εκτός σκυροδέματος με:

➤ Την αύξηση της θερμοκρασίας

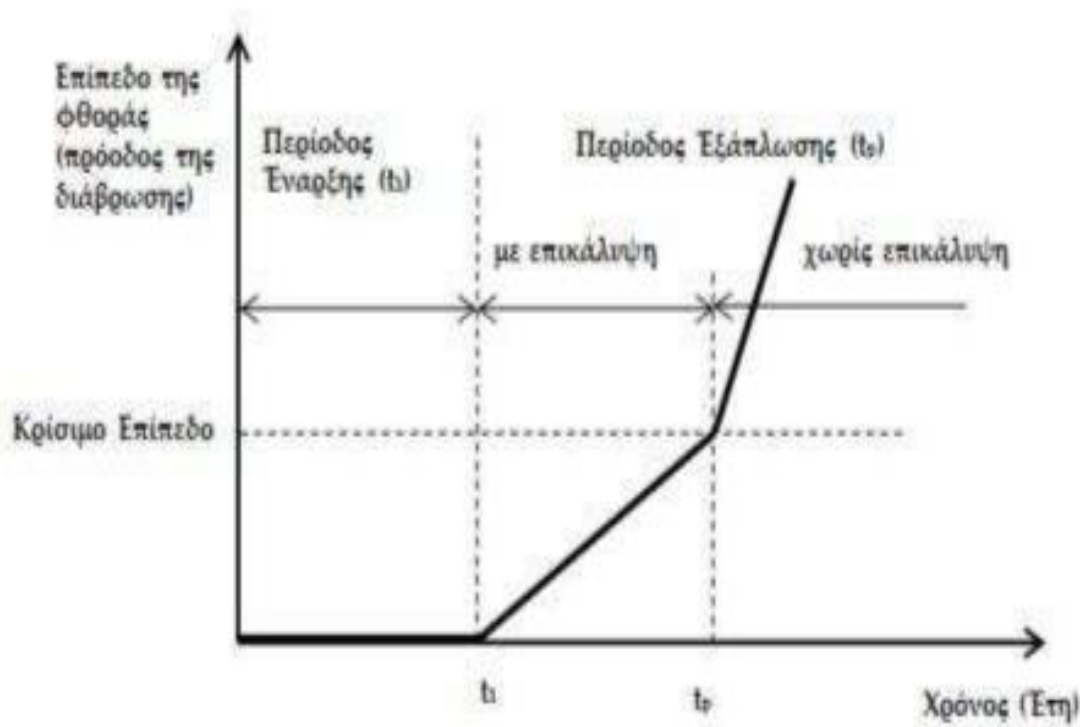
- Τη μείωση του pH
- Την αύξηση της παρουσίας αλάτων (π.χ. θαλάσσιο περιβάλλον)
- Την επαφή του χάλυβα με το έδαφος, το νερό κ.λ.π.
- Την επαφή του χάλυβα με διαφορετικά υλικά και περιβάλλοντα
- Την ύπαρξη ατελειών στην επιφάνεια του χάλυβα
- Την ύπαρξη επιφανειακής αλλοίωσης λόγω προϋπάρχουσας διάβρωσης
- Την επαφή των χαλύβων διαφορετικής χημικής σύστασης και διαφορετικού βαθμού διάβρωσης
- Την αύξηση πορώδους του σκυροδέματος

Η ταχύτητα της περαιτέρω διάβρωσης όπως και η συνάφεια μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος επηρεάζεται από την ύπαρξη προϊόντων διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού. Αν και με την ύπαρξη μιας μικρής ποσότητας οξειδίων του σιδήρου στην επιφάνεια του χάλυβα βελτιώνεται η συνάφεια οπλισμού και σκυροδέματος, η αύξηση των οξειδίων οδηγεί σε σταδιακή απώλεια της συνάφειας.

Η εκτίμηση της χρονικής έναρξης της βλάβης διάβρωσης του χάλυβα, καθώς και η εκτίμηση των παραμέτρων της, είναι χρήσιμη ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί η διάρκεια ζωής μιας κατασκευής. Η οποία διάρκεια ζωής χωρίζεται σε δύο περιόδους:

- Την αρχική περίοδο  $t_i$ , κατά την οποία ξεκινά η υποβάθμιση της παθητικής προστασίας του χάλυβα, μέσω ενανθράκωσης ή διείσδυσης χλωριόντων
- Την περίοδο εξέλιξης της διάβρωσης  $t_p$ , κατά την οποία εξελίσσεται η διαδικασία διάβρωσης μέχρι την τελική αστοχία, οπότε παύει η λειτουργικότητα της κατασκευής





**Σχήμα 2.10 Διάγραμμα των σταδίων διάρκειας ζωής μια κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος που εκτίθεται σε διαβρωτικό περιβάλλον [4]**

## 2.7 Επιπτώσεις διάβρωσης

Το φαινόμενο της διάβρωσης του χάλυβα ενίσχυσης καθώς και η παραγωγή των προϊόντων της γύρω από τον χάλυβα, προκαλούν επιπτώσεις στα μέλη του οπλισμένου σκυροδέματος.

Αρχικά οι επιπτώσεις είναι ακίνδυνες όμως όσο αυξάνεται η φθορά λόγω της διάβρωσης, καθίστανται επικίνδυνες για την αντοχή, τη λειτουργικότητα αλλά και για την αισθητική της κατασκευής. Οι επιπτώσεις δεν παρουσιάζονται μεμονωμένα, αλλά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Οι σημαντικότερες επιπτώσεις της διάβρωσης είναι η μείωση της διατομής και της εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα, η αποφλοίωση του σκυροδέματος λόγω θρυμματισμού, η απώλεια της συνάφειας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος, η απώλεια πλαστιμότητας του χάλυβα και η μείωση της ακαμψίας και η αύξηση του βέλους κάμψης του μέλους.

### 2.7.1 Μείωση της διατομής και της εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα

Όπως αναφέρθηκε η διάβρωση είναι μια ηλεκτροχημική διαδικασία, κατά την οποία τα άτομα του σιδήρου του χάλυβα μετατρέπονται σε ιόντα στην περιοχή της ανόδου, ενώ στην περιοχή της καθόδου δημιουργούνται ιόντα υδροξυλίου. Τα ιόντα του σιδήρου αντιδρούν με αυτά του υδροξυλίου και παράγουν ως προϊόν, τη σκουριά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη

μείωση της ενεργής διατομής του οπλισμού και κατά συνέπεια τη μείωση της εφελκυστικής αντοχής του οπλισμού.

Η απώλεια της μάζας του χάλυβα και ο όγκος της ράβδου οπλισμού, ο οποίος είναι κυλινδρικός, συνδέονται με τη σχέση:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi r^2 L}$$

$$m = (\rho \cdot \pi \cdot L)r^2$$

Όπου  $m$  είναι η απώλεια μάζας σε gr,  $r$  είναι η απώλεια ακτίνας της διατομής σε mm,  $\rho$  είναι η πυκνότητα του χάλυβα σε gr/mm<sup>3</sup>,  $L$  το μήκος της ράβδου οπλισμού σε mm.

Η σχέση αυτή εκφράζει ότι η απώλεια μάζας του χάλυβα είναι ανάλογη του τετραγώνου της απώλειας της ακτίνας της διατομής του. Το συμπέρασμα που βγαίνει από αυτή είναι ότι η μάζα του οπλισμού, άρα και οι μηχανικές του ιδιότητες, επηρεάζονται ακόμη και από μια μικρή απώλεια της διαμέτρου της, λόγω διάβρωσης. Αυτό υποθέτει ομοιόμορφη διάβρωση του οπλισμού, αν και στην πραγματικότητα η διάβρωση του δεν είναι ποτέ πλήρως ομοιόμορφη. Η επίδραση της διάβρωσης μπορεί να είναι μεγαλύτερη σε κάποια σημεία του οπλισμού ενώ σε άλλα σημεία να διατηρείται πλήρως η διατομή του χάλυβα.

Τα προϊόντα της διάβρωσης που δημιουργούνται και προκαλούν κατά συνέπεια την απώλεια τμήματος του χάλυβα, δεν συμμετέχουν στην κατανομή των φορτίων επηρεάζοντας σε σημαντικό βαθμό την αντοχή του μέλους.

Η διάβρωση είναι τοπικής μορφής και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορεί να προσδιοριστεί ακριβώς μέσω μίας σχέσης η μείωση της διατομής του χάλυβα με τη μείωση της εφελκυστικής αντοχής του. Γεγονός όμως είναι ότι η επίδραση της μείωσης της αντοχής του χάλυβα είναι σημαντική για την ασφάλεια μιας κατασκευής, ειδικά αν αυτή είναι μεγάλη και ακόμη και αν αυτή πραγματοποιείται μόνο σε ένα σημείο ενός μέλους.

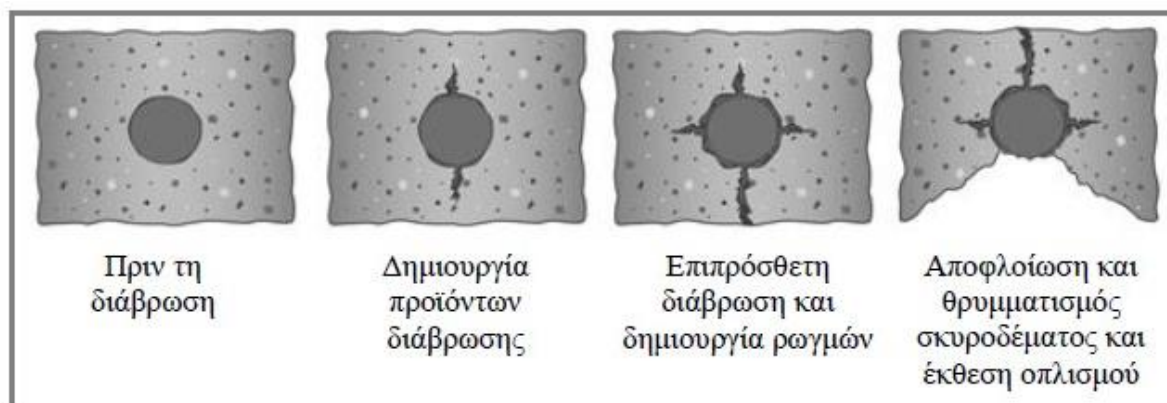
### **2.7.2 Ρηγμάτωση και αποφλοίωση σκυροδέματος**

Οι επιπτώσεις που επιφέρει η διάβρωση του χάλυβα ενίσχυσης στο σκυροδέμα είναι η ρηγμάτωση (cracking) του σκυροδέματος και έπειτα η αποφλοίωση ή ο θρυμματισμός (spalling) του, οι οποίες μειώνουν την ικανότητά του να παραλαμβάνει φορτία.

Οι ρηγματώσεις σχηματίζονται όταν ο όγκος του χάλυβα που καταναλώνεται κατά τη διαδικασία της διάβρωσης, είναι μικρότερος από τον όγκο των προϊόντων αυτής. Όσο

αυξάνεται ο όγκος των προϊόντων, αυξάνεται και η πίεση στη διεπιφάνεια χάλυβα – σκυροδέματος έχοντας ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στο σκυροδέμα. Όταν οι τάσεις αυτές ξεπεράσουν την εφελκυστική τάση του σκυροδέματος, επέρχεται η ρηγματώσή του με αποτέλεσμα να είναι ευκολότερη η διαδρομή των διαβρωτικών στοιχείων μέχρι τον οπλισμό προκαλώντας έτσι την περαιτέρω διάβρωσή του. [21]

Οι ρωγμές κατά μήκος του οπλισμού είναι οριζόντιες, ενώ είναι γωνιακές γύρω από το σημείο που τελειώνει ο οπλισμός. Αν δεν αντιμετωπιστούν οι ρηγματώσεις που δημιουργούνται στη διεπιφάνεια χάλυβα – σκυροδέματος, τότε αυτές μεγαλώνουν, με την πάροδο του χρόνου, έως ότου επέλθει η αποκόλληση του σκυροδέματος από τον οπλισμό (αποφλοίωση).



**Σχήμα 2.11 Ο κύκλος διάβρωσης του οπλισμού που οδηγεί στην αποφλοίωση του σκυροδέματος [12]**

Οι επιπτώσεις λόγω της αποφλοίωσης του σκυροδέματος είναι δύο. Η πρώτη αφορά την απώλεια συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα.

Η δεύτερη επίπτωση αφορά την απώλεια τμήματος του σκυροδέματος, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του μέλους στο οποίο παρατηρείται η προαναφερθείσα μείωση.

Η απώλεια αυτή, αρχικά, παρουσιάζει μόνο επιπτώσεις αισθητικής φύσεως στο διαβρωμένο μέλος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τον σχεδιασμό της κατασκευής λαμβάνονται υπόψη πολλαπλοί συντελεστές ασφαλείας, οπότε όσο η απώλεια σκυροδέματος και κατά συνέπεια η μείωση της αντοχής διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα, η ακεραιότητα της κατασκευής δεν κινδυνεύει. [17] Εάν η αποφλοίωση δεν αντιμετωπιστεί έγκαιρα μπορεί να

αποδειχτεί καταστροφική για μια κατασκευή, αφού τα μέλη της θα υποστούν εκτεταμένες δομικές ζημιές.



**Σχήμα 2.12** Αποφλοΐωση σκυροδέματος λόγω διάβρωσης οπλισμού [17]

### **2.7.3** Απώλεια συνάφειας χάλυβα – σκυροδέματος

Η συνάφεια χάλυβα – σκυροδέματος είναι σημαντική για τη δημιουργία του οπλισμένου σκυροδέματος, ως σύνθετο υλικό με μεγαλύτερη αντοχή. Η χρήση του χάλυβα, ως οπλισμού, στο σκυρόδεμα γίνεται με σκοπό ώστε σε ένα μέλος από οπλισμένο σκυρόδεμα, την πλειοψηφία των εφελκυστικών τάσεων να μπορεί να την παραλαμβάνει ο χάλυβας και τις θλιπτικές το σκυρόδεμα. Αυτή η σύνθετη παραλαβή των τάσεων συμβαίνει λόγω της συνάφειας του χάλυβα με το σκυρόδεμα. Μεμονωμένα το σκυρόδεμα έχει μικρή αντοχή σε εφελκυσμό σε σχέση με την αντοχή του σε θλίψη.

Η συνάφεια χάλυβα – σκυροδέματος οφείλεται κυρίως σε δύο παράγοντες. Ο πρώτος είναι η προσκόλληση και ο δεύτερος η μηχανική των υλικών. [22]

Η προσκόλληση υπάρχει λόγω της δύναμης που αναπτύσσεται μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος, λόγω της πίεσης που ασκείται από το σκυρόδεμα στον οπλισμό και λόγω της μεταξύ τους χημικής συγκόλλησης.

Η συνάφεια από μηχανικής άποψης, οφείλεται στις νευρώσεις που παρουσιάζει ο οπλισμός. Αυτές αλληλοσυνδέονται με το σκυρόδεμα που τις περιβάλλει και έτσι παρουσιάζουν αντίσταση σε οποιαδήποτε κίνηση.

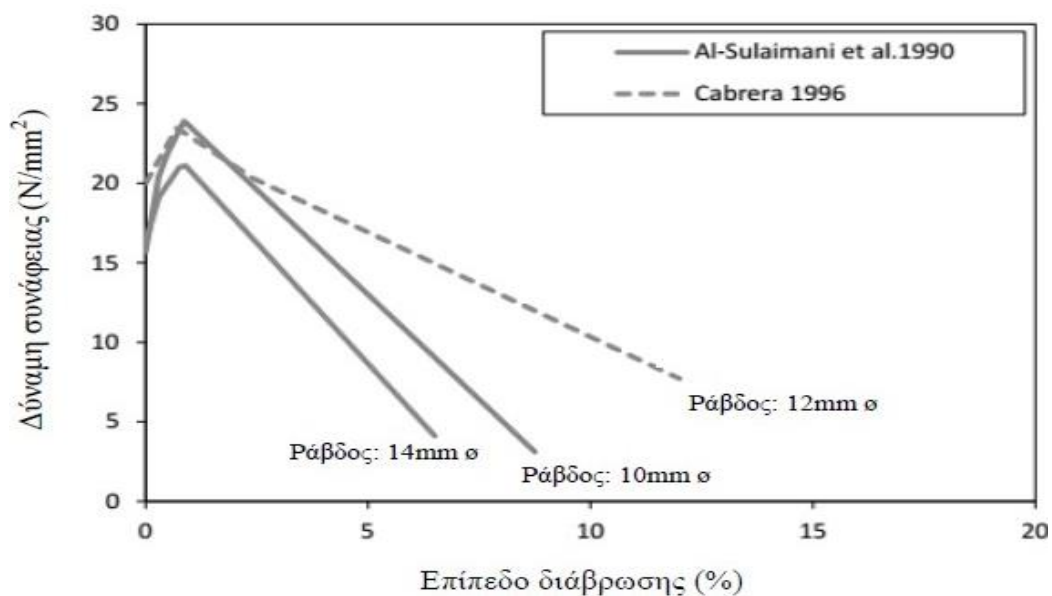
Οι παράγοντες που καθορίζουν τη συνάφεια μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος, επηρεάζονται από τη διάβρωση των ράβδων οπλισμού.

Η επίδραση της διάβρωσης στην πίεση που ασκεί το σκυρόδεμα στον οπλισμό είναι πολύπλοκη για τον λόγο του ότι αρχικά παρατηρείται αύξησή της και στη συνέχεια μειώνεται. Η αύξηση της στην αρχή οφείλεται στο ότι τα μόρια των προϊόντων της διάβρωσης καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο από τα άτομα του σιδήρου. Όσο η διάβρωση εξελίσσεται και παράγονται νέα προϊόντα της, τόσο αυξάνεται η πίεση που ασκούν στον οπλισμό και το σκυρόδεμα έως ότου το τελευταίο να ρηγματωθεί λόγω εφελκυσμού, οπότε χάνεται και η περιοριστική πίεση που ασκεί στον οπλισμό.

Η διάβρωση επηρεάζει επίσης και τη μηχανική συνάφεια μεταξύ οπλισμού – σκυροδέματος. Η διάβρωση που συμβαίνει στην επιφάνεια του οπλισμού επιδρά πολύ περισσότερο στις νευρώσεις του, προκαλώντας την υποβάθμισή τους με γρήγορους ρυθμούς, με αποτέλεσμα η περιοχή έδρασης του σκυροδέματος και του υπολοίπου των νευρώσεων να μειώνεται ,με συνέπεια και τη μείωση της συνάφειας.

Η χημική συγκόλληση παύει να υφίσταται όταν μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος δημιουργηθεί ένα στρώμα σκουριάς. Αυτή λειτουργεί ως λιπαντικό υλικό με αποτέλεσμα να πάσουν να υφίστανται και οι δυνάμεις τριβής μεταξύ των δύο υλικών.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η συνάφεια μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την τρέχουσα διάβρωση. Αρχικά η συνάφεια αυξάνεται, αφού η αύξηση της περιοριστικής πίεσης του σκυροδέματος στον οπλισμό υπερτερεί των υπολοίπων παραμέτρων . Έπειτα η συνάφεια αγγίζει το μέγιστο της και στη συνέχεια μειώνεται με πολύ γρήγορο ρυθμό.



Σχήμα 2.13 Αντοχή συνάφειας συναρτήσει του βαθμού διάβρωσης [23]

#### 2.7.4 Απώλεια πλαστιμότητας χάλυβα

Ως πλαστιμότητα του χάλυβα οπλισμού ορίζεται η ικανότητά του να επιτυγχάνει μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς να αυξάνονται οι τάσεις όταν ξεπεραστεί το όριο ελαστικότητάς του. Οπότε ένας χάλυβας υψηλής πλαστιμότητας απορροφά ευκολότερα ενέργεια σε σχέση με έναν χάλυβα χαμηλής πλαστιμότητας.

Η πλαστιμότητα του χάλυβα επηρεάζεται από τη διάβρωση. Όταν ο χάλυβας παρουσιάζει υψηλή πλαστιμότητα, άρα παραμορφώνεται πλαστικά, η αντοχή του σε τάσεις που είναι μεγαλύτερες από το όριο ελαστικότητας του είναι μεγαλύτερη. Όταν ο χάλυβας έχει χαμηλή πλαστιμότητα, είναι πιο εύθραυστος και μπορεί να αστοχήσει απότομα, οδηγώντας σε κατάρρευση κάποιο μέλος της κατασκευής, χωρίς να υπάρχει κάποια προειδοποίηση.

#### 2.7.5 Μείωση ακαμψίας και αύξηση βέλους κάμψης

Όταν οι εφελκυστικές τάσεις, που ασκούνται από τα προϊόντα διάβρωσης, ξεπεράσουν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, δημιουργούνται ρηγματώσεις με επακόλουθο τη μείωση της ακαμψίας του σκυροδέματος. Η μείωση της ακαμψίας προκαλεί τη δημιουργία ακόμη περισσότερων ρηγματώσεων με αποτέλεσμα την αύξηση του βέλους κάμψης του μέλους που έχει διαβρωθεί. Το αυξημένο βέλος κάμψης δεν είναι παράγοντας που οδηγεί σε αστοχία της κατασκευής, είναι όμως παράγοντας που οδηγεί στην απώλεια λειτουργικότητας της.

Το βέλος κάμψης αυξάνεται επειδή ένα μέλος της κατασκευής έχει απολέσει τμήμα του σκυροδέματος του, άρα είναι λιγότερο άκαμπτο και παραμορφώνεται πιο εύκολα.

## 2.8 Μέθοδοι βελτίωσης της αντίστασης του χάλυβα έναντι της διάβρωσης

Οι κυριότερες αντιδιαβρωτικές μέθοδοι προστασίας του οπλισμένου σκυροδέματος για την αντιμετώπιση της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού, είναι οι εξής [24] :

- **Βελτίωση των υλικών επίχρισης**, κάνοντας χρήση ειδικών σκυροδεμάτων, με υδατοστεγείς μεμβράνες, με χρήση επικαλύψεων οργανικής ή ανόργανης φύσης. Όλα τα παραπάνω συμβάλλουν στην αύξηση προστασίας του σκυροδέματος.
- **Χρήση αναστολέων διάβρωσης**, οι οποίοι καθυστερούν τη διάβρωση όταν προστεθούν με μικρές συγκεντρώσεις και υπό την προϋπόθεση ότι δεν έχει εκδηλωθεί η διάβρωση του οπλισμού. Οι αναστολείς διάβρωσης μπορούν να εισαχθούν είτε στη φάση παραγωγής του σκυροδέματος, είτε ψεκάζοντας επιφανειακά το σκυρόδεμα.
- **Η μέθοδος της καθοδικής προστασίας του οπλισμού**, η οποία κάνει χρήση του μηχανισμού της διάβρωσης ως μέσο προστασίας.[4] Με τη μέθοδο αυτή καταφέρνουμε να αναιρέσουμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανοδικής και καθοδικής περιοχής του χάλυβα ενίσχυσης, καθιστώντας τον εξ ολοκλήρου ως κάθοδο. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιβολή εξωτερικών ρευμάτων ή με χρήση θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων.

**Μεταλλική επικάλυψη του οπλισμού με ψευδάργυρο Zn.** [4] Ο ψευδάργυρος είναι ηλεκτροαρνητικότερος του σιδήρου του οπλισμού. Αυτό σημαίνει ότι όταν το επίχρισμα ψευδαργύρου καταστρέφεται ο χάλυβας συνεχίζει να προστατεύεται , και αυτό γιατί το επίχρισμα λειτουργεί ως θυσιαζόμενη άνοδος. Στην περίπτωση που ο ψευδάργυρος αντιδράσει με το υδροξείδιο ασβεστίου του σκυροδέματος, υπάρχει κίνδυνος μείωσης της συνάφειας του χάλυβα - σκυροδέματος. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού, ο γαλβανισμένος χάλυβας κατεργάζεται με διάλυμα χρωμικού άλατος με στόχο την παθητικοποίηση της επιφάνειας του.

- **Κεραμική επικάλυψη του οπλισμού**
- **Επικάλυψη οπλισμού με εποξειδικές ρητίνες.** Η μέθοδος αυτή προσφέρει ικανοποιητική προστασία στον εγκιβωτισμένο οπλισμό όταν το πάχος του εποξειδικού στρώματος είναι έως 0.3 mm και δεν καταστρέφεται κατά τη μεταφορά, τη διαμόρφωση, την τοποθέτηση του οπλισμού ή τη δόνηση του σκυροδέματος. Η προστασία του οπλισμού αυξάνεται όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του στρώματος. Αλλά ταυτόχρονα μειώνεται η συνάφεια μεταξύ χάλυβα-σκυροδέματος και η πρόσφυση του εποξειδικού στρώματος στον οπλισμό. Επιπλέον η εποξειδική επίστρωση μπορεί να καταστραφεί λόγω κάμψης διαμόρφωσης της ράβδου, των συγκολλήσεων των σιδηροπλισμών, της έκθεσης



σε υψηλές θερμοκρασίες άνω των 200° C (σε περίπτωση πυρκαγιάς) και αν εκτεθεί παρατεταμένα στην υπεριώδη ακτινοβολία.

- Εφαρμογή **ψηγματοβολής** για την απολίπανση της χαλύβδινης επιφάνειας και απομάκρυνση των επιφανειακών ακαθαρσιών. Με την ψηγματοβολή προωθείται ένα ρεύμα αποξεστικού υλικού στη χαλύβδινη επιφάνεια, δίχως να παρεμβαίνουν στη χημική σύσταση ή στη διαδικασία παραγωγής της οξείδωσης. Αυτή η μέθοδος μπορεί, όμως, να επιφέρει ταυτόχρονα θλιπτικές τάσεις και παραμορφώσεις στο χάλυβα.

Ανάλογες μέθοδοι είναι η **υδροβολή**, με εκτόξευση νερού υψηλής πίεσης, και η **αμμοβολή**, με την εκτόξευση σωματιδίων άμμου, οι οποίες απομακρύνουν τις επιφανειακές ακαθαρσίες από τον χάλυβα. Η απομάκρυνση των εστιών μόλυνσης του χάλυβα, συντελούν στο να καθυστερήσει η εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης.

- Η χρήση **συμπαγών χαλύβων** οπλισμού σκυροδέματος, όπως οι ανοξείδωτοι χάλυβες και οι ράβδοι Τιτανίου, οι οποίοι παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε διάβρωση. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες προκύπτουν από την προσθήκη χρωμίου και νικελίου στα κράματα σιδήρου. Στην επιφάνεια τους σχηματίζεται ένα οξείδιο του χρωμίου, με πολύ μεγάλη πρόσφυση σε αυτήν, το οποίο απομονώνοντας το υλικό, λειτουργεί ως παθητική προστασία και το προστατεύει από το φαινόμενο της διάβρωσης. Η προστασία που παρέχεται είναι θερμοδυναμικού τύπου, διότι το προστατευτικό στρώμα μπορεί να δημιουργηθεί εκ νέου σε περίπτωση τοπικών αφαιρέσεων του υλικού.

## 2.9 Οπλισμοί προστατευμένοι από τη διάβρωση

Υπάρχουν ειδικές κατηγορίες (ποιότητες) ράβδων οπλισμού που παρουσιάζουν υψηλή αντοχή έναντι οξείδωσης και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, ανεξάρτητα από τις συνθήκες μέσα στις οποίες βρίσκονται. Οι ράβδοι αυτές είναι: [12]

- Ράβδοι με ειδική χημική σύσταση - Ανοξείδωτες (stainless steel bars)
- Ράβδοι με εποξική επικάλυψη (epoxy coated bars)
- Γαλβανισμένες ράβδοι (galvanized bars)
- Ράβδοι από ινοπλισμένα πολυμερή (με ίνες υάλου ή άνθρακα)

(Fiber Reinforced Polymer – FRP bars/CFRP bars)



### 2.9.1 Ανοξειδωτες ράβδοι (stainless steel bars)

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες περιέχουν χρώμιο ( περιεκτικότητα 10 – 12% κ.β.) και μπορούν να περιέχουν και άλλα στοιχεία ( μαγγάνιο, νικέλιο κ.α.) που προσδίδουν πρόσθετες ιδιότητες, όπως συγκολλησιμότητα. Το βασικό συστατικό που είναι το χρώμιο, δημιουργεί στην επιφάνεια της ράβδου ένα μικρού πάχους προστατευτικό στρώμα τριοξειδίου του χρωμίου (  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), που την προστατεύει από τη διάβρωση. Τα μέταλλα που θα επιλεχθούν, καθώς και η περιεκτικότητά του κράματος, εξαρτώνται από την απαιτούμενη προστασία και αντοχή, που επιθυμούμε, καθώς και από το κόστος.

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες σε σχέση με τους απλούς χάλυβες, παρουσιάζουν μια σειρά από προτερήματα , όπως αντοχή σε εφελκυσμό και κόπωση, πλαστιμότητα και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.

Αν και οι ανοξειδωτοι χάλυβες θεωρούνται ότι δεν οξειδώνονται, υπό συγκεκριμένες συνθήκες και σε περιβάλλον με υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων, μπορούν να προσβληθούν.

### 2.9.2 Ράβδοι με εποξική επικάλυψη (epoxy coated bars)

Πρόκειται για ράβδους οπλισμού, οι οποίοι επικαλύπτονται με εποξικό υλικό , έτσι ώστε να προστατευτούν από τη διείσδυση των χλωριόντων και να καθυστερήσει το φαινόμενο της διάβρωσης.

Η μέθοδος της εποξικής επικάλυψης εφαρμόζεται για πάνω από 40 έτη και οι επικαλυμμένες ράβδοι έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογής, όπως σε χώρους στάθμευσης οχημάτων, επισκευές, σε λιμενικά έργα, σε έργα γεφυροποιίας κ.α.



Σχήμα 2.14 Τοποθέτηση επικαλυμμένων ράβδων σε έργα γεφυροποιίας [12]

Πρόβλημα για τις επικαλυμμένες ράβδους αποτελούν οι ασυνέχειες και κατασκευαστικές ατέλειες της εποξικής επικάλυψης.

### **2.9.3 Γαλβανισμένες ράβδοι (galvanized bars)**

Οι γαλβανισμένες ράβδοι κατασκευάζονται με επιψευδαργύρωση (γαλβάνισμα), δηλαδή με την εφαρμογή μιας επικάλυψης ψευδαργύρου στον χάλυβα ή τον σίδηρο. Η επικάλυψη αυτή εμποδίζει τις διαβρωτικές ουσίες να φτάσουν στο πιο ευαίσθητο μέταλλο. Επίσης ο ψευδάργυρος λειτουργεί ως άνοδος, έτσι ώστε σε περίπτωση που γδαρθεί η επικάλυψη, ο εκτεθειμένος χάλυβας θα συνεχίσει να προστατεύεται από τον υπόλοιπο ψευδάργυρο.

### **2.9.4 Ράβδοι από ινοπλισμένα πολυμερή (με ίνες υάλου ή άνθρακα) (Fiber Reinforced Polymer – FRP bars/CFRP bars)**

Οι ράβδοι από ινοπλισμένα πολυμερή αποτελούνται από πολυμερές υλικό οπλισμένο με ίνες υάλου (Glass FRP - GFRP) ή άνθρακα (Carbon FRP - CFRP) και έχουν βρει εφαρμογή σε κατασκευές που βρίσκονται σε περιβάλλοντα με υψηλή περιεκτικότητα σε χλωριόντα, στη γεφυροποιία και σε αποκαταστάσεις ιστορικών κατασκευών.

Οι ράβδοι από ινοπλισμένα πολυμερή παρουσιάζουν μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή σε σχέση με τους κοινούς χάλυβες, μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας, αλλά μη επαρκή πλαστικότητα. Επίσης η θλιπτική τους αντοχή καθώς και το μέτρο ελαστικότητας που παρουσιάζουν είναι χαμηλότερα σε σχέση με αντίστοιχα μεγέθη σε εφελκυσμό.



**Σχήμα 2.15 Εφαρμογή ράβδων GFRP [12]**

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> : Μη καταστροφικός έλεγχος( ΜΚΕ) – Μέθοδοι εκτίμησης συνθηκών διάβρωσης του χάλυβα ενίσχυσης

### 3.2 Εισαγωγή στους μη καταστροφικούς ελέγχους

Με τον όρο Μη Καταστροφικός Έλεγχος (ΜΚΕ) (Distructive Testing- NDT) εννοούνται οι μέθοδοι που επιτρέπουν τον έλεγχο ενός υλικού, ενός αντικειμένου, μιας κατασκευής. Οι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό, για τη μέτρηση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού. Καθώς επίσης και για τον εντοπισμό αλλαγών της επιφάνειας, την ανίχνευση μεταβολών στη δομή ενός υλικού-μιας κατασκευής, την παρουσία ατελειών, ασυνεχειών και ρωγμών στην επιφάνεια των υλικών, δίχως να εμποδίζεται η λειτουργική χρήση της δομής και να βλάπτεται η αρτιότητα της.

Ο μη καταστροφικός έλεγχος αναφέρεται σε διαφορετικές μεθόδους, με την κάθε μέθοδο να χωρίζεται σε διαφορετικές τεχνικές οι οποίες να έχουν κοινή φυσική βάση, όμως διαφοροποιούνται ως προς την εφαρμογή τους σε εργαστηριακό επίπεδο ή σε πραγματικό χρόνο. [25]

Οι κατηγορίες στις οποίες ταξινομούνται οι μέθοδοι του ΜΚΕ, σύμφωνα με τη διεθνή κοινότητα του ΜΚΕ, είναι οι εξής:

- Οπτικής (Visual).
- Μαγνητικής - Ηλεκτρικής (Magnetic - Electrical).
- Μηχανικής ταλάντωσης (Mechanical vibration).
- Ακτινοβολίας (Radiation).
- Θερμικής (Thermal), Χημικής - Ηλεκτροχημικής (Chemical - Electrochemical).
- Δειόδυσης (Penetrating).

Από τις παραπάνω κατηγορίες οι ευρέως χρησιμοποιούμενες και πιο σημαντικές μέθοδοι ΜΚΕ, τόσο για τα υλικά όσο και για τις κατασκευές, είναι οι εξής:

**Ακουστική εκπομπή (Acoustic emission).** Πρόκειται για μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου και χρησιμοποιείται σε υλικά που είναι δυνατόν να παρουσιάσουν επιφανειακές και εσωτερικές ατέλειες. Με βάση τον ορισμό της ASTM (American Society for Testing and Materials), η Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission, AE) περιλαμβάνει τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη δημιουργία και μετάδοση παροδικών ελαστικών κυμάτων που παράγονται μέσα σε ένα υλικό με ταχεία απελευθέρωση ενέργειας. Η πηγή αυτών των κυμάτων μπορεί να οφείλεται στην αλλαγή φάσης του υλικού, λόγω θερμικών

τάσεων. Επίσης όταν το υλικό βρίσκεται υπό μηχανική καταπόνηση λόγω της έναρξης και διάδοσης μικρορωγμών ή της ολίσθησης μεταξύ των κόκκων του. Εκτενέστερη αναφορά και ανάλυση της μεθόδου θα γίνει σε επόμενη ενότητα.

**Ακουστό-υπέρηγου(Acoustic- ultrasonic)**. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό εσωτερικών και επιφανειακών ατελειών των υλικών και συνδυάζει τα προτερήματα των υπερήχων με αυτά της ακουστικής εκπομπής. Μέσω ενός μορφομετατροπέα ηψίσυχνα ακουστικά κύματα στέλνονται στο υπό εξέταση υλικό, ενώ η συλλογή και η επεξεργασία τους μπορεί να γίνει από αισθητήρες και μεθοδολογία της ακουστικής εκπομπής. Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να καταγραφεί η παρουσία ατελειών στο υλικό, αλλά δεν μπορεί να προσδιοριστεί η θέση τους.

**Διεισδυτικά υγρά (Liquid penetrant)**. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε μη πορώδη υλικά για την ανίχνευση ατελειών τριχοειδών διαστάσεων. Τα υγρά έχουν χρωστικές και στην εξέταση χρησιμοποιείται υπεριώδης ακτινοβολία.

**Δινορεύματα (Eddy current)**. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ρωγμών σε μέταλλα και γενικότερα σε αγωγίμες ηλεκτρικά κατασκευές και βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Ένα πηνίο διαρρέεται από ρεύμα με αποτέλεσμα αυτό να δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο γύρω του. Τοποθετώντας το πηνίο πάνω στην υπό εξέταση κατασκευή ή μεταλλικό υλικό, αυτό θα επάγεται ρεύμα στην επιφάνεια της/του. Αν υπάρχουν ατέλειες στην επιφάνεια του υλικού παράγονται δινορεύματα τα οποία παράγουν μαγνητικό πεδίο, το οποίο μπορεί να μετρηθεί. Με τη μέτρηση αυτού του πεδίου ανιχνεύεται και η ατέλεια στην επιφάνεια του μετάλλου.

**Θερμογραφία (Thermografic)**. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη τοπική διαφορά θερμοκρασίας στην επιφάνεια ενός υλικού λόγω της ύπαρξης ατελειών στην υποεπιφάνειά του. Η διαφορά θερμοκρασίας οφείλεται στους διαφορετικούς βαθμούς θερμικής μεταφοράς στις περιοχές που υπάρχουν ασυνέχειες. Η μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια ενός δοκιμίου μπορεί να γίνει με αγωγή, με θερμική μεταβίβαση , με ακτινοβολία.

**Μαγνητικά σωματίδια (Magnetic Particle)**. Η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων βασίζεται στις ιδιότητες του μαγνητικού πεδίου και χρησιμοποιείται για την ανίχνευση μόνο επιφανειακών ατελειών των υλικών ή κατασκευών. Καλύπτουμε με μαγνητικά σωματίδια, τα οποία βρίσκονται σε μορφή σκόνης ή σε υγρή μορφή, την επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού και κατόπιν το μαγνητίζουμε. Στις περιοχές όπου υπάρχουν επιφανειακές ατέλειες παρατηρούνται μεταβολές στη μαγνητική ροή και αυξημένη συγκέντρωση των μαγνητικών

σωματιδίων. Με αυτόν τον τρόπο και υπό κατάλληλες συνθήκες φωτισμού, γίνονται ορατές οι επιφανειακές ατέλειες ενός υλικού ή μιας κατασκευής.

**Ολογραφία (Holography).** Με τη μέθοδο της ολογραφίας καταγράφονται οι ατέλειες των υλικών και των επιφανειών ,μέσω της καταγραφής μετατοπίσεων στην επιφάνεια των υπό μελέτη στοιχείων. Με τη μέθοδο αυτή, είναι δυνατό να καταγραφούν πολύ μικρές επιφανειακές μετατοπίσεις. Η ύπαρξη ατέλειας σε ένα στοιχείο μπορεί να εντοπιστεί ,όταν παρατηρούνται μεγαλύτερες επιφανειακές μετατοπίσεις σε σύγκριση με αντίστοιχα στοιχεία που δεν παρουσιάζουν ατέλειες. Είναι αναγκαία η προσεκτική ευθυγράμμιση της οπτικής διάταξης της μεθόδου, καθότι είναι ευαίσθητη σε εξωτερικές διεγέρσεις, όπως οι ταλαντώσεις, μικροδονήσεις.

**Οπτικός έλεγχος (Visual inspection).** Ο οπτικός έλεγχος είναι η παλαιότερη και πιο απλή μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου. Ο οπτικός έλεγχος χρησιμοποιείται ως μέθοδος για τον εντοπισμό των επιφανειακών ατελειών και πραγματοποιείται με γυμνό μάτι ή και με τη χρήση οργάνων. Ο οπτικός έλεγχος προηγείται του μηχανικού αλλά, σε συνδυασμό με τους προηγούμενους, είναι αναγκαία η γνώση και η εμπειρία του ελεγκτή ως προς τη γνώση των υλικών και των χαρακτηριστικών του, για την αναγνώριση των επιφανειακών ανωμαλιών-ασυνεχειών. Αν και ο μηχανικός έλεγχος είναι πιο γρήγορος, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη απόδοση επιτρέποντας πολλές επαναλήψεις παρατήρησης, το ανθρώπινο μάτι είναι εύκολα προσαρμόσιμο στις πιθανές διαφορετικές συνθήκες. Για παράδειγμα η αλλαγή στον φωτισμό επηρεάζει την παρατήρηση μιας επιφάνειας που πραγματοποιείται μέσω κάμερας. Ενώ το μάτι του ελεγκτή μπορεί να προσαρμοστεί πιο εύκολα στις μεταβολές του φωτισμού.

**Ραδιογραφία με ακτίνες X ή Γ (X-Γ-Ray radiography).** Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, με τη μορφή ακτινών X ή Γ και βασίζεται στον διαφορετικό βαθμό απορρόφησης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, λόγω του πάχους και των ιδιοτήτων του υλικού. Το ποσοστό απορρόφησης της ακτινοβολίας είναι συνδεδεμένο με το πάχος και την πυκνότητα του υλικού. Με τη μέθοδο της ραδιογραφίας εντοπίζονται οι περιοχές στις οποίες παρουσιάζεται βλάβη, μέσω της καταγραφής της μη απορροφημένης ενέργειας, η οποία μπορεί να καταγραφεί ή από αισθητήρες ή σε ειδικό φιλμ. Με τη ραδιογραφία μπορούν να εντοπιστούν κενά υλικού, ανάλογα με το ποσοστό απορρόφησης της ακτινοβολίας ή μικρορωγμές εφόσον αυτές βρίσκονται παράλληλα με την εκπεμπόμενη δέσμη ακτινών.

**Υπέρηχοι (Ultrasonic).** Η μέθοδος των υπερήχων χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό εξωτερικών και εσωτερικών ατελειών στα υλικά. Με τη μέθοδο αυτή στέλνονται ηψίσυχνα ηχητικά κύματα στο υπό εξέταση υλικό και στη συνέχεια μελετάται η διαταραχή του εκπεμπόμενου κύματος προκειμένου να εντοπιστούν τυχόν ατέλειες στο εκάστοτε υλικό. Η διάδοση του κύματος στο υλικό εξαρτάται από τις ιδιότητες του μέσου διάδοσης, την ύπαρξη

διεπιφανειών, καθώς και την παρουσία πόρων, ρωγμών κλπ στο υλικό. Ο χαρακτηρισμός του τύπου βλάβης γίνεται με χρήση πρότυπου διαθλώμενου ή ανακλώμενου κύματος από αντικείμενο που δεν παρουσιάζει βλάβη ή από αντικείμενο που παρουσιάζει γνωστή βλάβη.

Τα προβλήματα του ΜΚΕ δεν μπορούν να λυθούν από μια και μοναδική μέθοδο, οπότε δεν μπορεί να χαρακτηριστεί μία μέθοδος καλύτερη από κάποια άλλη. Πολλές φορές απαιτείται ο συνδυασμός μεθόδων προκειμένου να εντοπιστούν και να χαρακτηριστούν οι αστοχίες στα υλικά ή τις κατασκευές.

### **3.2 Μέθοδοι εκτίμησης συνθηκών διάβρωσης χάλυβα ενίσχυσης**

Οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ή την πρόβλεψη του βαθμού διάβρωσης ενός μέλους ή μιας κατασκευής είναι οι εξής:

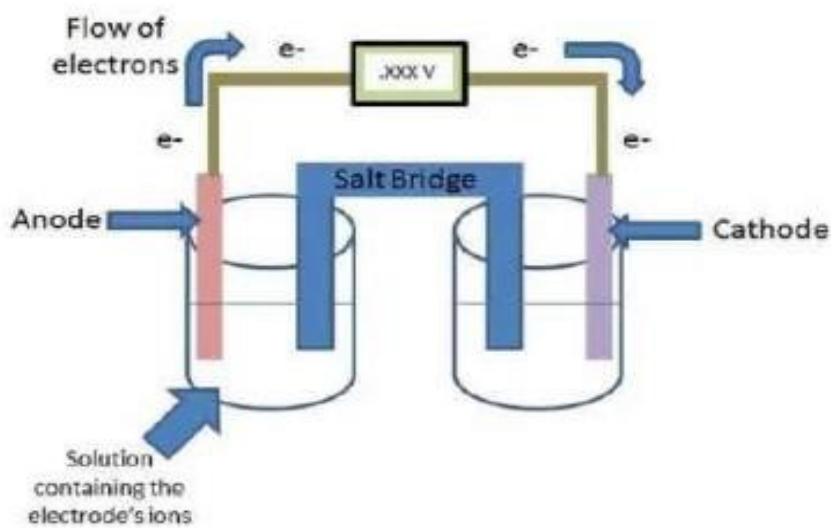
1. Οπτικός έλεγχος
2. Ακουστική εκπομπή (AE)
3. Half cell potential
4. LPR- Ρυθμός διάβρωσης (Corrosion rate)

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει αναφορά στις πιο σύνθετες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου, μέσω των οποίων μπορεί να προβλεφθεί ή να προσδιοριστεί ο βαθμός διάβρωσης ενός μέλους μιας κατασκευής ή και ολόκληρης αυτής.

#### **3.2.1 Half Cell Potential**

Η μέθοδος του half cell potential είναι η μόνη μέθοδος μέτρησης διάβρωσης που έχει κανονικοποιηθεί από την ASTM. Είναι μια ένδειξη κινδύνου διάβρωσης του χάλυβα. Στην ουσία προσδιορίζει την πιθανότητα διάβρωσης των ράβδων χάλυβα στις κατασκευές από σπλισμένο σκυρόδεμα. Το half cell potential (δυναμικό ημιστοιχείου) είναι το δυναμικό που αναπτύσσεται σε ένα ημιστοιχείο εξαιτίας της αντίδρασης οξειδωσης ή αναγωγής .

Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται ένα κελί του οποίου κάθε άκρο αναφέρεται ως ημιστοιχείο (half cell). Κάθε half cell αποτυπώνεται ως ένα ηλεκτρόδιο μέσα σε διάλυμα (ηλεκτρολύτης) και τα δύο αυτά ηλεκτρόδια συνδέονται μεταξύ τους. Ένα από τα ηλεκτρόδια θα λειτουργήσει ως άνοδος με ταυτόχρονη έκλυση ηλεκτρονίων.[26] Για να αποτυπώσουμε τον παραπάνω μηχανισμό στο σπλισμένο σκυρόδεμα, θα πρέπει να έχουμε ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς με γνωστό δυναμικό.



**Σχήμα 3.1 Εφαρμογή ράβδων GFR [26]**

Το δυναμικό διάβρωσης  $E_{corr}$  (half cell ράβδου/σκυροδέματος) υπολογίζεται ως η διαφορά δυναμικού σε σχέση με ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς.[27] Η τιμή της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του χάλυβα ενίσχυσης και ενός ηλεκτροδίου αναφοράς εξαρτάται από τον τύπο του ηλεκτροδίου αναφοράς και από τον βαθμό διάβρωσης του χάλυβα.

Το ηλεκτρόδιο αναφοράς ή ημιστοιχείο (half cell) είναι μια απλή συσκευή που αποτελείται από ένα κομμάτι μετάλλου βυθισμένο σε διάλυμα των δικών του ιόντων, του οποίου η συγκέντρωση είναι προκαθορισμένη. Κυρίως πρόκειται για μέταλλα όπως χαλκός σε κορεσμένο θεικό χαλκό ή άργυρος σε χλωριούχο άργυρο). Για τον προσδιορισμό του κινδύνου διάβρωσης, το ηλεκτρόδιο αναφοράς θα ενωθεί με τον σίδηρο του χάλυβα, ο οποίος περιβάλλεται από τα οξείδια σιδήρου που έχουν δημιουργηθεί εξαιτίας της διάβρωσης.[17] Αν ενώσουμε τα δύο αυτά στοιχεία θα δημιουργηθεί ένα ηλεκτρικό στοιχείο, το οποίο παράγει τάση λόγω των διαφορετικών θέσεων των δύο μετάλλων στην ηλεκτροχημική ακολουθία και λόγω της διαφοράς των διαλυμάτων.





**Σχήμα 3.2 Ηλεκτρόδιο αναφοράς χαλκού σε ηλεκτρόδια χαλκού [17]**

### **3.2.1.1 Μετρούμενη ποσότητα**

Εάν μετακινήσουμε το ηλεκτρόδιο αναφοράς (half cell –ημιστοιχείο) κατά μήκος της επιφάνειας του σκυροδέματος, θα παρατηρήσουμε μία μεταβολή και του πλήρους στοιχείου και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κατάσταση της επιφάνειας του οπλισμού είναι διαφορετική σε κάθε σημείο κάτω από το σκυρόδεμα.

Η τάση που μετριέται είναι διαφορετική ανάλογα με την κατάσταση του χάλυβα. Αν ο χάλυβας διατηρεί την παθητικότητά του, οι τιμές της τάσης είναι θετικές και κυμαίνονται από 0 έως 200mV. Αν χάνει την παθητικότητά του και μικρές περιοχές έχουν διαβρωθεί ή η παθητική στρώση του χάλυβα είναι υπό κατάρρευση, οι τιμές της τάσης είναι αρνητικές και γύρω στα -350 mV. Όταν ο χάλυβας βρίσκεται σε φάση ενεργούς διάβρωσης παίρνει τιμές πιο αρνητικές των -350 mV [28]. Οι τιμές της τάσης είναι αρνητικές λόγω του ότι συνδέεται ο θετικός ακροδέκτης του βολτομέτρου στο χάλυβα και ο αρνητικός ακροδέκτης στο ηλεκτρόδιο αναφοράς.[29]

Η μέθοδος του half potential στην ουσία μετράει τη θερμοδυναμική της διάβρωσης και όχι τον ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα ενίσχυσης. Αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι η τεχνική αυτή μπορεί να δώσει πολύ αρνητικές τιμές τάσης, σε συνθήκες κορεσμού με ταυτόχρονη απουσία του οξυγόνου που είναι απαραίτητο για να δημιουργηθεί το προστατευτικό οξειδικό στρώμα. Αφού όμως δεν υπάρχει οξυγόνο, δεν μπορεί να υπάρξει και διάβρωση.

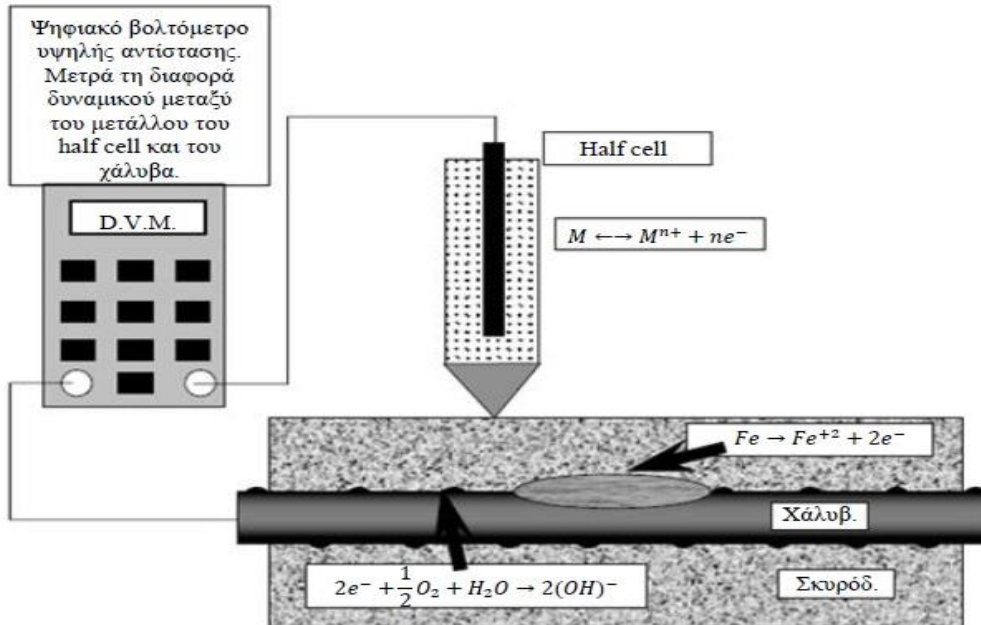
Η τάση της διάβρωσης που μετριέται είναι εμπειρική και δε βασίζεται σε επιστημονική θεωρία, με αποτέλεσμα πολλές φορές να οδηγεί σε παραπλανητικά συμπεράσματα. Αυτό συμβαίνει γιατί η τάση, πέρα από συνάρτηση των συνθηκών διάβρωσης, επηρεάζεται από την παρουσία οξυγόνου, το στρώμα σκυροδέματος, την αντίσταση του σκυροδέματος (ποσοστό υγρασίας στο σκυρόδεμα).

**Πίνακας 3.1** Εύρος τιμών δυναμικού χάλυβα σε σκυρόδεμα [28]

Εύρος τιμών δυναμικού χάλυβα σε σκυρόδεμα	
Κορεσμένο σκυρόδεμα με απουσία οξυγόνου	-0.9....-1.0V
Υγρό, παρουσία χλωριόντων σκυρόδεμα	-0.4....-0.6 V
Υγρό, απουσία χλωριόντων σκυρόδεμα	+0.1....-0.2 V
Υγρό, ανθρακούχο σκυρόδεμα	+0.1....-0.4 V
Ξηρό, ανθρακούχο σκυρόδεμα	+0.2....0 V
Ξηρό σκυρόδεμα	+0.2....0 V

### 3.2.1.2 Εξοπλισμός μεθόδου half cell potential

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του half cell δυναμικού, συνίσταται σε ένα βολτόμετρο ψηφιακής μορφής, υψηλής αντίστασης και το οποίο συνδέεται με το ηλεκτρόδιο αναφοράς και με τον χάλυβα οπλισμού, μέσω καλωδίων. Όταν πρόκειται για μετρήσεις επαναλαμβανόμενες και σε μεγάλες επιφάνειες, το μεμονωμένο ηλεκτρόδιο μπορεί να αντικατασταθεί με τον ειδικό τροχό (wheel electrode).



Σχήμα 3.3 Εξοπλισμός μέτρησης half cell potential του χάλυβα στο σκυρόδεμα [14]



Σχήμα 3.4 Συσκευή μέτρησης του half cell potential [30]

### 3.2.1.3 Διαδικασία μέτρησης

Η διαδικασία μέτρησης είναι απλή και ακολουθούνται τα εξής βήματα: [17]

1. Έλεγχος και βαθμονόμηση του ηλεκτροδίου αναφοράς.
2. Έλεγχος του ψηφιακού βολτομέτρου και των σχετικών καλωδίων και συνδέσεων.
3. Επιλογή της επιφάνειας μέτρησης που μπορεί να είναι ολόκληρο στοιχείο ή μια αντιπροσωπευτική περιοχή ενός στοιχείου.

4. Προσδιορισμός της θέσης του χάλυβα και της απόστασης των ράβδων με τη χρήση cover meter.
5. Σύνδεση του καλωδίου με ήδη εκτεθειμένο χάλυβα ή με χάλυβα που εκτίθεται ειδικά για αυτό τον σκοπό. Η σύνδεση πρέπει να είναι μεταξύ μετάλλων και μπορεί να γίνει και με τη χρήση των ειδικών βιδών (self-tapping screws).
6. Έλεγχος της συνέχειας του χάλυβα με τη χρήση ενός μετρητή αντίστασης συνεχούς ρεύματος μεταξύ δύο απομακρυσμένων σημείων.
7. Σχεδιασμός του πλέγματος (grid) με τα σημεία στα οποία θα ληφθούν μετρήσεις. Το μέγεθος και το σχήμα του καθορίζονται κυρίως από τις αποστάσεις των ράβδων και τη γεωμετρία του μετρούμενου στοιχείου.
8. Διαβροχή της επιφάνειας μέτρησης για να εξασφαλιστεί καλή επαφή μεταξύ του ηλεκτροδίου και του σκυροδέματος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί νερό της βρύσης, διάλυμα σαπουνιού ή ακόμα και διάλυμα αλατόνευρου.
9. Καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών, των στοιχείων του ηλεκτροδίου αναφοράς, του υγρού επαφής, της ηλεκτρικής σύνδεσης, του βάθους της επικάλυψης του οπλισμού, της κατάστασης τους σκυροδέματος και της ακριβούς τοποθεσίας της μέτρησης. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσεις και την ερμηνεία τους.
10. Λήψη και καταγραφή των μετρήσεων.
11. Εξέταση για ανωμαλίες και έλεγχος για αιτίες διάβρωσης στις περιοχές που έδωσαν τις πιο αρνητικές τιμές.

#### **3.2.1.4 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων μέτρησης**

Για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων μέτρησης είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε το είδος του ηλεκτροδίου αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε. Αυτό γιατί κάθε ηλεκτρόδιο δίνει διαφορετικές τιμές εξόδου. Όπως προαναφέρθηκε, το ηλεκτρόδιο αναφοράς αποτελείται από ένα μέταλλο που είναι σε διάλυμα των δικών του ιόντων. Χαρακτηριστικά ο αργυρός βρίσκεται σε διάλυμα χλωριούχου αργύρου, ο χαλκός σε θεϊκό χαλκό και το μαγγάνιο σε διοξείδιο μαγγανίου.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα κριτήρια που καθορίζουν τις συνθήκες διάβρωσης για τα ηλεκτρόδια αναφοράς αργυρού και χαλκού, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876 .

**Πίνακας 3.2 Κριτήρια για τη διάβρωση του οπλισμού σκυροδέματος για ηλεκτρόδια χαλκού και αργυρού [14] [29]**

Κλάση Διάβρωσης	Είδος ηλεκτροδίου αναφοράς		Συνθήκες Διάβρωσης
	Χαλκός σε κορεσμένο θεϊκό χαλκό	Αργυρός σε χλωριούχο άργυρο	
1	> -200mV	> -100mV	Μικρός (10%) κίνδυνος διάβρωσης
2	-200 μέχρι -350 mV	-100 μέχρι -250 mV	Μεσαίος κίνδυνος Διάβρωσης
3	-350 μέχρι -500 mV	-250 μέχρι -400 mV	Μεγάλος (>90%) κίνδυνος διάβρωσης
4	< -500 mV	< -400 mV	Σίγουρη διάβρωση

### 3.2.3 LPR-Ρυθμός διάβρωσης

Η μέθοδος της αντίστασης γραμμικής πόλωσης LPR (linear polarization resistance) είναι μια κοινή εργαστηριακή μέθοδος εκτίμησης του ρυθμού διάβρωσης στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα ,πρωτίστως χάρη στην απλότητα της , όχι μόνο στην εφαρμογή της, αλλά και στην εκτίμηση των αποτελεσμάτων. [31]

Το να γνωρίζουμε τον ρυθμό διάβρωσης μας επιτρέπει να γνωρίζουμε πόσος χάλυβας μετατρέπεται σε σκουριά και το ποσοστό του μετάλλου που χάνεται κατά τη στιγμή της μέτρησης. Σε αντίθεση η γνώση του ρυθμού διάβρωσης δεν μας δίνει πληροφορίες για τον υπολογισμό της απώλειας της διατομής του οπλισμού ή για τον ρυθμό αποφλοιώσης του σκυροδέματος.

Μετρώντας το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από την ανοδική αντίδραση και καταναλώνεται από την καθοδική αντίδραση και στη συνέχεια μετατρέποντας τη ροή του ρεύματος σε απώλεια μετάλλου με το νόμο του Faraday, μπορούμε να προσδιορίσουμε την ποσότητα του χάλυβα που διαλύεται και της σκουριάς.

$$m = \frac{Mit}{zF} \quad (\text{νόμος Faraday})$$

όπου  $m$  = η μάζα του χάλυβα που καταναλώνεται

$M$  = ατομική μάζα του μετάλλου (56 gr για τον χάλυβα)

$i$  = ρεύμα σε Ampere

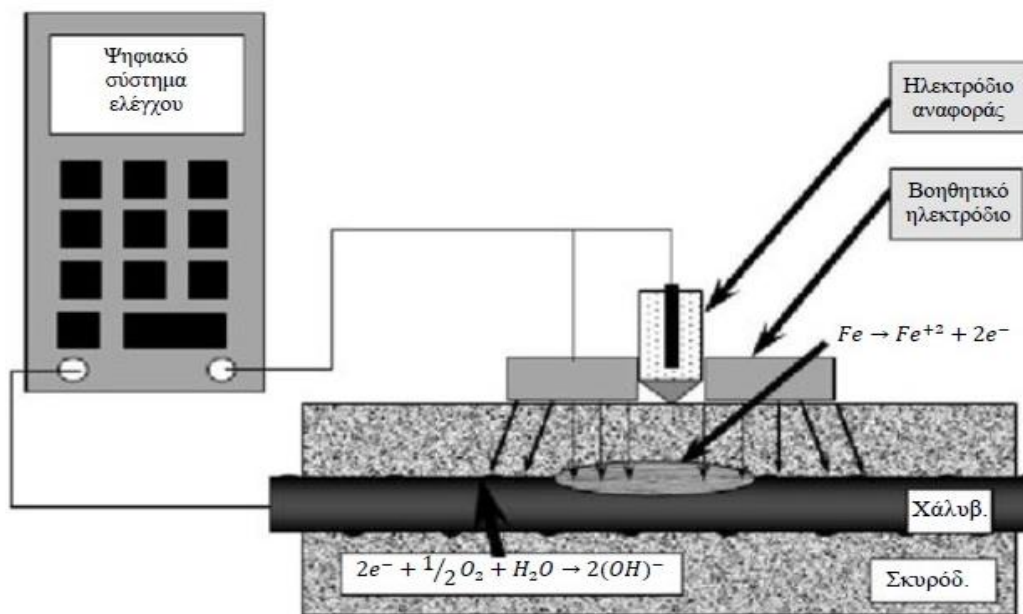
$t$  = χρόνος σε sec

$z$  = ιοντική αλλαγή (2 για τον σίδηρο)

$F$  = σταθερά Faraday

### 3.2.2.1 Εξοπλισμός μεθόδου LPR

Ο εξοπλισμός της μεθόδου LPR είναι μια εξελιγμένη μορφή του εξοπλισμού της half cell potential. Πρόκειται για μια ενισχυμένη μορφή του ηλεκτροδίου αναφοράς, στο οποίο είναι συνδεδεμένο ένα ηλεκτρόδιο που έχει βοηθητικό ρόλο και ένα τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος και μεταβλητής τάσης. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς έχει ένα δακτυλιοειδές βοηθητικό κύκλο, μέσα από τον οποίο περνά το ρεύμα στον χάλυβα. Το βοηθητικό ηλεκτρόδιο είναι συνήθως από ανοξείδωτο ατσάλι με αγωγίμο αφρό προκειμένου να είναι διασφαλισμένη η καλή επαφή του με το σκυρόδεμα.



Σχήμα 3.5 Εξοπλισμός μέτρησης LPR με απεριόριστη περιοχή μέτρησης [14]

Στη μέθοδο LPR γίνεται πόλωση του χάλυβα με ηλεκτρικό ρεύμα και παρακολουθείται η επίδραση της πόλωσης αυτής στο δυναμικό του ηλεκτροδίου αναφοράς. Κατόπιν γίνεται μέτρηση του δυναμικού του ηλεκτροδίου αναφοράς, ενώ μέσω του βοηθητικού ηλεκτροδίου περνά στον οπλισμό ένα ρεύμα μικρής έντασης.

$$I_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$$

Όπου B είναι σταθερά η οποία για το σκυρόδεμα παίρνει τιμές 26-52 mV, αναλόγως την παθητικότητα ή την ενεργή κατάσταση του.  $R_p$  είναι η αντίσταση πόλωσης (Ohm).

Η παραπάνω σχέση συνδέει τη διαφορά δυναμικού του ηλεκτροδίου αναφοράς με το ρυθμό διάβρωσης.

Η αντίσταση πόλωσης δίνεται από τη σχέση:

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} = \frac{\text{Διαφορά δυναμικού}}{\text{Εφαρμοζόμενο ρεύμα}}$$

Η διαφορά δυναμικού πρέπει να διατηρηθεί σε μια τιμή μικρότερη από περίπου 20 mV έτσι ώστε να ισχύει η εξίσωση και να διατηρηθεί η γραμμικότητά της, που δίνει στη μέθοδο την εναλλακτική ονομασία της γραμμικής πόλωσης. Επίσης πρέπει να προσεχθεί το φαινόμενο του «iR drop», δηλαδή της τάσης που υπάρχει λόγω του ότι ένα ρεύμα ρέει διαμέσου του σκυροδέματος το οποίο έχει πεπερασμένη ηλεκτρική αντίσταση.[17] Αυτό μπορεί να μετρηθεί αν απενεργοποιηθεί το ρεύμα σε κάποιο στάδιο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μέτρησης έτσι ώστε να μετρηθεί το δυναμικό χωρίς το iR drop.

Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο του iR drop μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δύο μεθόδους μέτρησης, στις οποίες μπορούν να γίνουν προσαρμογές. Η πρώτη μέθοδος είναι η γαλβανοστατική, κατά την οποία εφαρμόζεται σταθερό ρεύμα και παρακολουθείται το δυναμικό. Η δεύτερη μέθοδος είναι η ποτενσιοστατική κατά την οποία το ρεύμα αυξάνεται έως ότου επιτευχθούν προκαθορισμένες τιμές δυναμικού. Η γραφική παράσταση της μεταβολής του ρεύματος σε συνάρτηση με τη μεταβολή του δυναμικού, μας δίνει την κλίση της αντίστασης πόλωσης  $R_p$ . Από αυτή μπορούμε να υπολογίσουμε την απώλεια της εγκάρσιας διατομής του χάλυβα ανά έτος ( $\mu\text{m}/\text{year}$ ). Μια γραφική παράσταση της μεταβολής του ρεύματος συναρτήσει της μεταβολής του δυναμικού δίνει την κλίση της αντίστασης πόλωσης  $R_p$  έτσι ώστε να υπολογιστεί η απώλεια εγκάρσιας διατομής του χάλυβα ανά έτος ( $\mu\text{m}/\text{year}$ ).

$$\chi = \frac{11 \times 10^6}{RpA} B$$

όπου A το εμβαδόν της επιφάνειας του χάλυβα που μετράται σε cm<sup>2</sup>.

Προκειμένου να έχουμε σωστές μετρήσεις, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο LPR, θα πρέπει να είναι καθορισμένη η επιφάνεια μέτρησης. Στις περιπτώσεις μη οπλισμένου σκυροδέματος το μέγεθος των δειγμάτων, στα οποία γίνεται η μέτρηση της γραμμικής πόλωσης, είναι γνωστό.

Πολύ σημαντικό για τη λήψη ορθών μετρήσεων ρυθμού διάβρωσης είναι ο καθορισμός της επιφάνειας μέτρησης. Στις εφαρμογές μη οπλισμένου σκυροδέματος, η μέτρηση της γραμμικής πόλωσης γίνεται σε δείγματα γνωστού μεγέθους. Στο οπλισμένο σκυρόδεμα αυτό δεν είναι δυνατό διότι ο χάλυβας είναι μέσα στο σκυρόδεμα και είναι μέρος ενός συνολικού δικτύου οπλισμών και ταυτόχρονα το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται, προκαλεί τη διάβρωση.

Όπως είναι προφανές, η μέθοδος δεν μπορεί να καλύψει όλο το δίκτυο των οπλισμών, αλλά τα ηλεκτρόδια μπορούν να ανιχνεύσουν μια πολύ μικρότερη περιοχή. Δεν είναι δυνατό όμως να υποθέσουμε ότι η περιοχή στην οποία γίνεται η μέτρηση είναι αυτή κάτω από το ηλεκτρόδιο, διότι το βοηθητικό ηλεκτρόδιο μεταφέρει ρεύμα και στις επιφάνειες που είναι κοντά του και όχι μόνο σε αυτή που είναι από κάτω του. Η αναλογία μεταξύ μεγέθους ηλεκτροδίου και μετρούμενης επιφάνειας δεν είναι 1:1 και αν κάνουμε αυτή την υπόθεση, θα οδηγηθούμε σε εσφαλμένα αποτελέσματα, με τιμές πολλαπλάσιες των σωστών. Αυτό συμβαίνει κυρίως στις περιπτώσεις χαμηλών ρυθμών διάβρωσης. Για το λόγο αυτό υπάρχουν συστήματα μέτρησης όπου το ηλεκτρόδιο είναι εφοδιασμένο με ένα επίθεμα αφρού, το οποίο παίζει τον ρόλο του βοηθητικού ηλεκτροδίου, ώστε να διασφαλιστεί ότι η μετρούμενη επιφάνεια είναι αυτή ακριβώς κάτω από το ηλεκτρόδιο.





**Σχήμα 3.5** Συσκευή μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης που το βοηθητικό ηλεκτρόδιο είναι επίθεμα αφρού [14]

Επίσης υπάρχουν συσκευές που περιορίζουν τη έκταση της επιφάνειας στην οποία εφαρμόζεται το ρεύμα, μέσω ενός προστατευτικού δακτυλίου. Αυτό μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε την παράμετρο  $A$  και κατά συνέπεια μπορούμε να υπολογίσουμε και την απώλεια του χάλυβα.



**Σχήμα 3.6** Συσκευή μέτρησης ρυθμού διάβρωσης με προστατευτικό δακτύλιο [14]

### 3.2.2.2 Λήψη μετρήσεων

Οι μετρήσεις του ρυθμού διάβρωσης είναι αρκετά χρονοβόρες και αυτό οφείλεται σε δύο λόγους. [28]

- Λόγω του ότι το σκυρόδεμα καθυστερεί να αντιδράσει με το ηλεκτρικό πεδίο
- οι αλλαγές που γίνονται σε αυτό πρέπει να είναι αργές έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι ηλεκτροχημικές ιδιότητες του σκυροδέματος μεταβάλλονται γραμμικά και χωρίς να δημιουργούνται φαινόμενα χωρητικής αντίστασης (capacitance).

Ο συνολικός χρόνος μέτρησης διαφέρει ανάλογα από τη συσκευή που χρησιμοποιείται. Οι συσκευές παλαιού τύπου, οι οποίες, πλέον, χρησιμοποιούνται σπάνια, χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να καταγράψουν μια μέτρηση και δε δίνουν απευθείας τον ρυθμό διάβρωσης, αλλά θα πρέπει να τον υπολογίσουμε με τις προηγούμενες σχέσεις.

Υπάρχουν νεώτερες συσκευές με μικροεπεξεργαστή, οι οποίες μπορούν να δώσουν μέσα σε λίγα λεπτά την τελική τιμή του ρυθμού διάβρωσης.

Στον χρόνο μέτρησης συμπεριλαμβάνεται και ο χρόνος προετοιμασίας της συσκευής, έχοντας υπόψη ότι η συσκευή πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε οπλισμό που βρίσκεται σε γνωστή θέση και οι διαστάσεις του είναι γνωστές.

Οι μετρήσεις του ρυθμού διάβρωσης σε μια κατασκευή γίνονται σε επιλεγμένα στρατηγικά σημεία και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι χρειάζεται αρκετός χρόνος για να γίνει λήψη μιας τιμής του. Τα σημεία μέτρησης επιλέγονται βάσει των μετρήσεων δυναμικού που έχουν γίνει σε προγενέστερο χρόνο με το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Έτσι τα σημεία στα οποία θα πρέπει να γίνονται μετρήσεις είναι αυτά στα οποία οι τιμές του δυναμικού είναι μικρότερες, μεγαλύτερες και όπου παρατηρείται απότομη κλίση αυτού.

Το δυναμικό, κατά τη μέτρηση, πρέπει να διατηρείται σταθερό ούτως ώστε να είναι δυνατή η καταγραφή της πραγματικής διαφοράς δυναμικού. Στις πολύ στεγνές κατασκευές, αυτό το κριτήριο, μπορεί να δημιουργήσει μία δυσκολία διότι μεταβάλλονται οι συνθήκες με γρήγορους ρυθμούς. Σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να διαβρέξουμε τοπικά την κατασκευή και να πραγματοποιήσουμε τη μέτρηση σε μεταγενέστερο χρόνο.

Οι τιμές του ρυθμού διάβρωσης μεταβάλλονται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Σε θερμές συνθήκες ο ρυθμός διάβρωσης επιταχύνεται, ενώ όταν πρόκειται για υγρό σκυρόδεμα ο ρυθμός αυξάνεται, λόγω του ότι μειώνεται η αντίσταση.

Επίσης για να έχουμε μια σωστή μέτρηση του ρυθμού διάβρωσης, θα πρέπει αυτή να γίνεται για μια γνωστή επιφάνεια του χάλυβα που βρίσκεται κάτω από τον αισθητήρα. Δηλαδή

θα πρέπει να γνωρίζουμε την ακριβή θέση και το μέγεθος του οπλισμού. Αν θέλουμε να κάνουμε συγκριτικές μετρήσεις, είναι ικανοποιητικό να πάρουμε μετρήσεις σε παρόμοιες θέσεις. Όπως και αν θέλουμε να παρακολουθήσουμε μία κατασκευή, θα πρέπει να πραγματοποιούμε μετρήσεις σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια του έτους.

### 3.2.2.3 Ερμηνεία μετρήσεων

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ορθότητα των μετρήσεων του ρυθμού διάβρωσης, είναι απαραίτητη η απόκτηση εμπειρίας. Με την πάροδο των χρόνων και μετά από έρευνα στο πεδίο και το εργαστήριο, θεσπίστηκαν κριτήρια που καθορίζουν τις συνθήκες ή τον ρυθμό διάβρωσης σε συνάρτηση του ρυθμού διάβρωσης.

Πίνακας 3.3 Ερμηνεία ρυθμού διάβρωσης για συσκευές με προστατευτικό δακτύλιο [14]

Κλάση Διάβρωσης	Ρυθμός διάβρωσης $I_{corr}$	Συνθήκες διάβρωσης
1	$< 0.1 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	Παθητική κατάσταση
2	0.1 μέχρι $0.5 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	Χαμηλή έως μέτρια διάβρωση
3	0.5 μέχρι $1 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	Μέτρια έως πολλή διάβρωση
4	$> 1 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	Ψηλός ρυθμός διάβρωσης

Πίνακας 3.4 Ερμηνεία ρυθμού διάβρωσης για συσκευές χωρίς προστατευτικό δακτύλιο [14]

Κλάση Διάβρωσης	Ρυθμός διάβρωσης $I_{corr}$	Πιθανότητα διάβρωσης
1	$< 0.2 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	Δεν αναμένεται διάβρωση
2	0.2 μέχρι $1 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	Αναμένεται διάβρωση σε 10 έως 15 χρόνια
3	1 μέχρι $10 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	Αναμένεται διάβρωση σε 2 έως 10 χρόνια
4	$> 10 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	Αναμένεται διάβρωση σε 2 ή λιγότερα χρόνια

### 3.2.2.4 Ρυθμός υποβάθμισης

Οι μετρήσεις του ρυθμού διάβρωσης χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του βαθμού υποβάθμισης μιας κατασκευής. Η σημασία του τρέχοντος βαθμού υποβάθμισης είναι μεγάλη

,διότι βασιζόμενοι σε αυτόν μπορούμε να καθορίσουμε ποια μέλη μιας κατασκευής χρίζουν εργασιών αποκατάστασης, μπορούμε να αποφασίσουμε το είδος των παρεμβάσεων (αισθητικές, μικρής έκτασης ή μεγαλύτερες επιδιορθωτικές εργασίες), τον χρόνο υλοποίησης των παρεμβάσεων (άμεσα ή μεταγενέστερα).

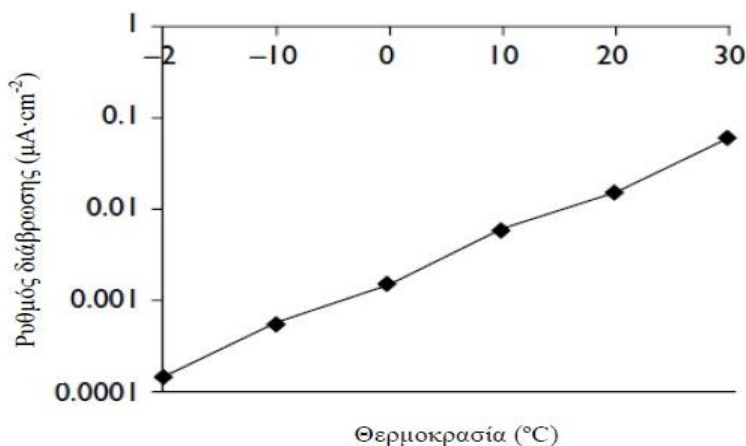
Για την πρόβλεψη του βαθμού υποβάθμισης, πέρα από τον ρυθμό διάβρωσης, είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε και δεδομένα σχετικά τον βαθμό ενανθράκωσης, τη διείδυση γλωριόντων και τις μετρήσεις του πάχους επικάλυψης.

### 3.2.2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό διάβρωσης

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό διάβρωσης είναι κυρίως περιβαλλοντολογικοί. Οι σημαντικότεροι είναι η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία της περιοχής στην οποία βρίσκεται η υπό εξέταση κατασκευή.

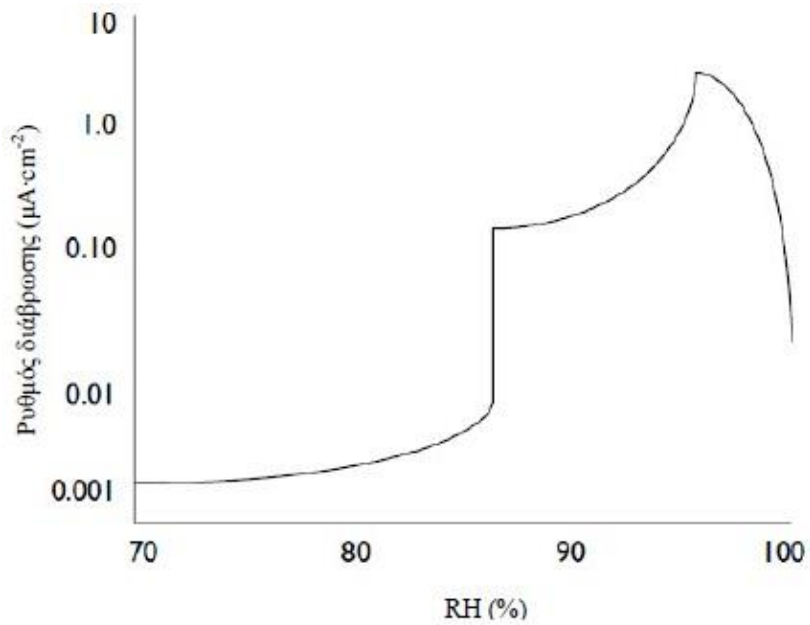
Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία παρατηρείται στο σκυρόδεμα μια μεγαλύτερη κινητικότητα των ιόντων και τα άλατα να γίνονται περισσότερο διαλυτά, με αποτέλεσμα τη μείωση της αντίστασης του σκυροδέματος. Επίσης η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει τη μείωση της σχετικής υγρασίας στο σκυρόδεμα.

Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες το νερό των πόρων παγώνει και η διάβρωση σταματά καθώς τα ιόντα δεν μπορούν πλέον να κινηθούν. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι αυτό συμβαίνει αρκετά κάτω από το περιβαλλοντικό σημείο πήξης λόγω του ότι τα ιόντα στο νερό των πόρων μειώνουν το σημείο τήξης αρκετά κάτω από τους 0°C. [20]

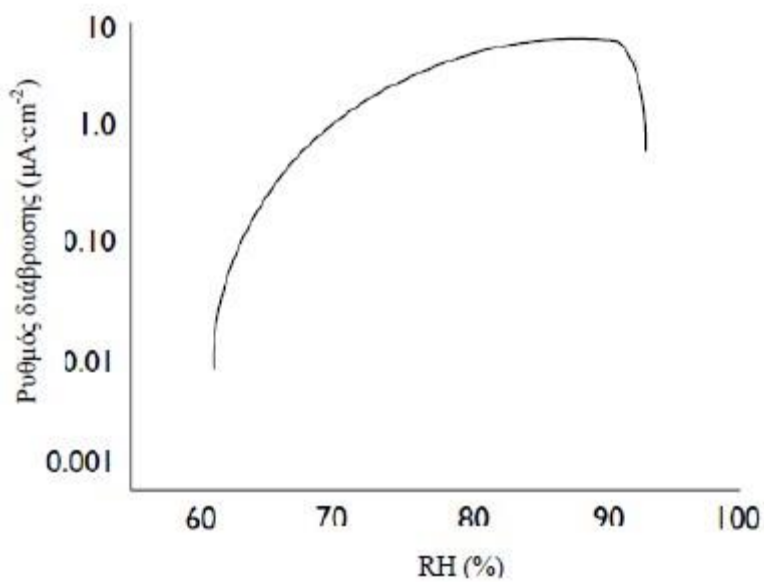


**Σχήμα 3.6 Επίδραση θερμοκρασίας στον ρυθμό διάβρωσης ενανθρακωμένου σκυροδέματος [20]**

Το ποσοστό της σχετικής υγρασίας (RH) καθορίζει την ποσότητα του νερού που υπάρχει στους πόρους ούτως ώστε να μπορέσει να συνεχιστεί η αντίδραση της διάβρωσης. Ο υψηλότερος ρυθμός διάβρωσης υπάρχει όταν η σχετική υγρασία του σκυροδέματος αγγίζει ποσοστά άνω του 90%.



**Σχήμα 3.7 Ρυθμός διάβρωσης σε σχέση με τη σχετική υγρασία σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα [20]**



**Σχήμα 3.8 Ρυθμός διάβρωσης σε σχέση με τη σχετική υγρασία σε προσβεβλημένο από χλωρίοντα σκυρόδεμα**

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> : Μέθοδος Ακουστικής Εκπομπής ( ΑΕ )

### 4.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος της **Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕ)** χρησιμοποιείται στα πειράματα μη καταστροφικού ελέγχου υλικών και κατασκευών. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E610-82 η ακουστική εκπομπή (ΑΕ) ορίζεται ως εξής: “πρόκειται για κατηγορία φαινομένων με τα οποία μεταβατικά ελαστικά κύματα παράγονται από την απότομη απελευθέρωση της ενέργειας από συγκεκριμένες πηγές μέσα σε ένα υλικό, ή τα ίδια τα μεταβατικά ελαστικά κύματα που παράγονται με τον τρόπο αυτό”.

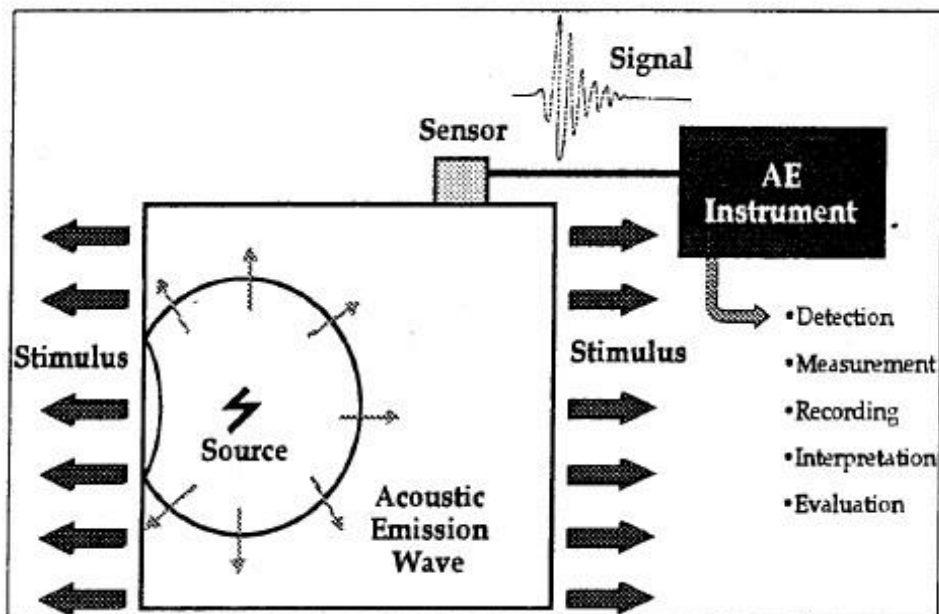
Η ακουστική εκπομπή χρησιμοποιείται στα υλικά στα οποία δημιουργούνται μηχανικές ταλαντώσεις χωρίς να διεγείρονται εξωτερικά. Το φάσμα που καλύπτει η ακουστική εκπομπή είναι αρκετά ευρύ και μπορεί να καλύπτει χαμηλές συχνότητες (π.χ. σεισμοί), συχνότητες του μεγέθους 20 Hz-20 kHz (σπάσιμο ξύλου), καθώς επίσης και το υπερηχητικό φάσμα( μικρο-ρηγματώσεις στερεών).

Όταν η ένα υλικό ή μια κατασκευή φορτίζεται και η τάση που του ασκείται ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή, η αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια στη δομή του υλικού απελευθερώνεται υπό τη μορφή μεταβατικών ελαστικών κυμάτων και το υλικό αστοχεί. Τα συγκεκριμένα κύματα διαδίδονται, μέσα στο υλικό, ομόκεντρα γύρω από τη θέση δημιουργίας τους και μπορούν να ανιχνευτούν στην επιφάνεια του χρησιμοποιώντας κατάλληλους αισθητήρες

Η ακουστική εκπομπή βασίζεται στην ανίχνευση και μετατροπή των ελαστικών κυμάτων σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία στη συνέχεια ψηφιοποιούνται και οδηγούνται σε κατάλληλο ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής και ανάλυσης δεδομένων.

Στην ακουστική εκπομπή είναι το ίδιο το υλικό που παράγει το ηλεκτρικό σήμα, χωρίς τη χρήση κάποιας εξωτερικής πηγής.

Χρησιμοποιώντας την ακουστική εκπομπή επιδιώκουμε να απομονώσουμε τον θόρυβο, να αναγνωρίσουμε τα σήματα που προέρχονται από πραγματικές ατέλειες του υλικού, να προσδιορίσουμε την ακριβή θέση της ατέλειας καθώς επίσης και προσδιορίσουμε τον βαθμό της βλάβης στο υλικό.



Σχήμα 4.1 Σχηματική αναπαράσταση των αρχών της ΑΕ [32]

Η ακουστική εκπομπή έχει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών όπως η επιθεώρηση των υλικών και η μελέτη των φαινομένων της μηχανικής παραμόρφωσης, της θραύσης και της διάβρωσης αυτών. Επίσης μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες σχετικά με την αντοχή, τη συσσωρευμένη βλάβη και την έναρξη αστοχίας ενός υλικού, όταν αυτό είναι υπό τάση.

#### 4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεθόδου ακουστικής εκπομπής ΑΕ

Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου, στα παρακάτω πεδία:

##### Πλήρης επιθεώρηση της κατασκευής

Η ακουστική εκπομπή πλεονεκτεί όταν πρόκειται να ελέγξουμε μεγάλες κατασκευές. Ο έλεγχος όλου το όγκου της κατασκευής μπορεί να γίνει με την εφαρμογή φορτίου σε αυτήν χρήση ικανοποιητικού αριθμού αισθητήρων. Είναι, δηλαδή, απαραίτητη μόνο η πρόσβαση στους αισθητήρες και δεν είναι αναγκαία η σάρωση όλης της κατασκευής για τον εντοπισμό τοπικών ατελειών. Στην περίπτωση που εντοπιστεί κάποια βλάβη, προσδιορίζεται η περιοχή η οποία παρουσιάζει έντονη δραστηριότητα ακουστικής εκπομπής και μπορεί να πραγματοποιηθεί πιο λεπτομερής έλεγχος τοπικά, κάνοντας χρήση άλλης μεθόδου ΜΚΕ.

## **Μηδενική καταστροφή εξωτερικής μόνωσης**

Για τη διενέργεια του ελέγχου μιας κατασκευής η οποία είναι επικαλυμμένη με μονωτικό υλικό, δεν είναι απαραίτητη η αφαίρεση της μόνωσης παρά μόνο στα σημεία στα οποία πρόκειται να τοποθετηθούν οι αισθητήρες. Αυτό έχει ως συνέπεια την εξοικονόμηση χρόνου και κόστους, ειδικά σε περιπτώσεις ελέγχου διάβρωσης κάτω από μονωτικό υλικό.

## **Παραγωγή σήματος από το υλικό**

Σε αντίθεση με τις άλλες μη καταστροφικές μεθόδους, το σήμα που ανιχνεύεται μέσω της ακουστικής εκπομπής δεν παράγεται από κάποια εξωτερική πηγή, αλλά από το ίδιο το υλικό. Δηλαδή η ατέλεια μέσα στο υλικό παράγει ακουστική εκπομπή, η οποία μπορεί να ταξιδέψει δεκάδες ή και εκατοντάδες μέτρα, ανάλογα με το μέγεθος της κατασκευής, έως ότου ανιχνευθεί από τους αισθητήρες. Η διαφορά στους χρόνους αφίξεων των σημάτων στους αισθητήρες, καθιστά δυνατό τον εντοπισμό της περιοχής από την οποία προήλθαν τα σήματα αυτά. Αυτό μπορεί να συμβεί κατόπιν κατάλληλων υπολογισμών.

## **Έλεγχος εν λειτουργία (On-line)**

Παράλληλα με την καταγραφή των ατελειών μια κατασκευής σε πραγματικό χρόνο, μπορεί να πραγματοποιείται και ο έλεγχος αυτής on-line.

## **Ταχύτητα**

Το χρονικό διάστημα της μεθόδου της ακουστικής εκπομπής είναι από μερικές ώρες έως και λιγότερο. Καμία άλλη συγκρίσιμη τεχνική δε επιτρέπει τον έλεγχο και τον εντοπισμό ατελειών σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα.

## **Εντοπισμός Θέσης**

Η θέση ή η περιοχή της ατέλειας ενός υλικού ή μιας κατασκευής μπορεί να προσδιοριστεί όταν ο έλεγχος πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας δύο ή περισσότερους αισθητήρες. Γραμμικός (μονοδιάστατος) εντοπισμός θέσης χρησιμοποιείται σε μεγάλου μήκους κυλίνδρους αερίου, σωληνώσεις και γενικά σε κατασκευές των οποίων η μία διάσταση υπερσχύει σημαντικά έναντι των άλλων δύο.[33] Επίπεδος (δισδιάστατος) εντοπισμός θέσης πραγματοποιείται σε μεγάλες επιφάνειες, σε μεγάλου πάχους δοχεία και δεξαμενές, ενώ τρισδιάστατος εντοπισμός θέσης πραγματοποιείται κατά τον έλεγχο μετασχηματιστών και κατασκευών σκυροδέματος.



## **Μόνιμη Καταγραφή Αποτελεσμάτων**

Τα δεδομένα που έχουν προκύψει ψηφιοποιούνται και αποθηκεύονται μόνιμα σε υπολογιστή, επιτρέποντας την εκ νέου επεξεργασία και ανάλυση τους.

Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής παρουσιάζει και τα εξής, μη παραβλέψιμα, μειονεκτήματα:

### **Μη άμεση επαναληψιμότητα**

Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής δεν μπορεί να επαναληφθεί άμεσα και ούτε είναι δυνατή η γεωμετρική απεικόνιση της βλάβης, σε αντίθεση με τις μεθόδους των ακτινών X και των υπερήχων που είναι δυνατή.

### **Παρουσία θορύβου**

Πολλές φορές παρατηρείται θόρυβος στα σήματα της ακουστικής εκπομπής. Ο θόρυβος αυτός μπορεί να είναι ηλεκτρονικός, μηχανικός ή και άλλης φύσης και πολλές φορές είναι δύσκολο να εξαλειφθεί.

## **4.3 Πηγές ακουστικής εκπομπής**

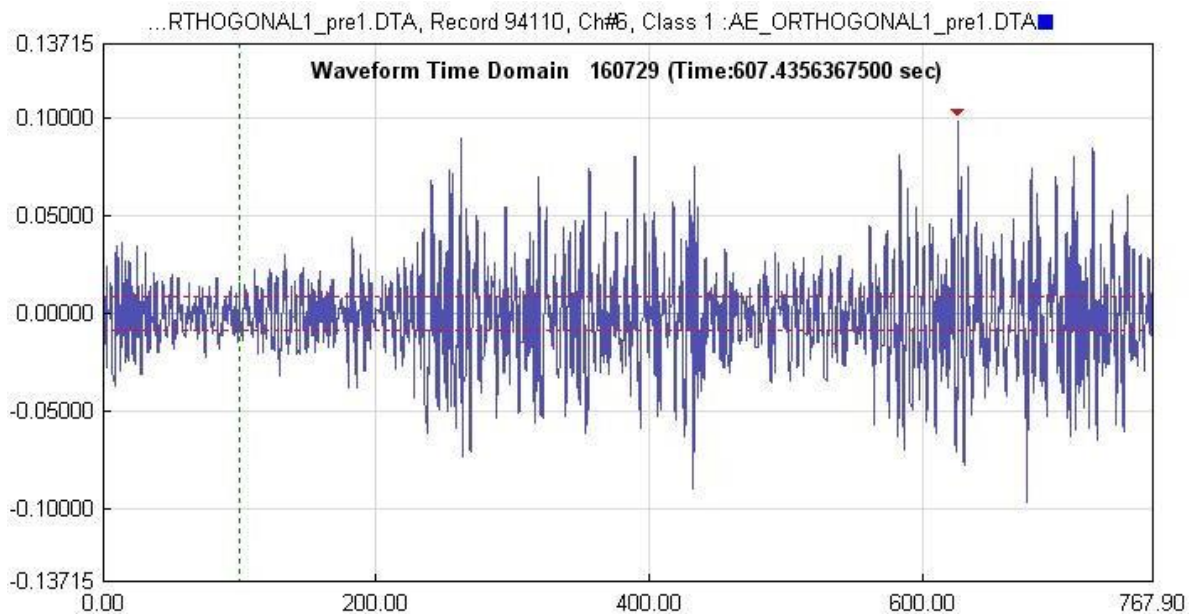
Συνήθεις πηγές ακουστικής εκπομπής μπορεί να προκύψουν από την έναρξη ρωγμών, από ολισθήσεις (slip) και κινήσεις εξάρθρωσης, (twinning), από τη θραύση ινών, αποστρωματοποιήσεις στα σύνθετα υλικά, από το μετασχηματισμό φάσης στα μέταλλα. Όλες αυτές οι παραμορφώσεις απελευθερώνουν ενέργεια με τη μορφή ελαστικών κυμάτων, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως φυσικοί υπέρηχοι. Όταν ασκείται μία τάση σε ένα υλικό, αυτό καταπονείται. Αν το αντικείμενο επανέλθει στις αρχικές του διαστάσεις (ελαστική παραμόρφωση) ή παραμορφωθεί μόνιμα όταν αφαιρεθεί η τάση (πλαστική παραμόρφωση), εξαρτάται από το μέγεθος της τάσης καθώς και τις ιδιότητες του υλικού. Οι πιο εύκολα ανιχνεύσιμες ακουστικές εκπομπές είναι όταν ένα υλικό φορτωθεί κοντά στο σημείο αντοχής του ή όταν υποβληθεί σε πλαστική παραμόρφωση.

Η ακουστική εκπομπή βασίζεται στην μετατροπή των ελαστικών κυμάτων σε ηλεκτρικά σήματα. Πολλές φορές όμως αυτό καθίσταται δύσκολο λόγω του θορύβου στον περιβάλλοντα χώρο, θόρυβο τον οποίο οι αισθητήρες καταγράφουν ως μη επιθυμητό σήμα.

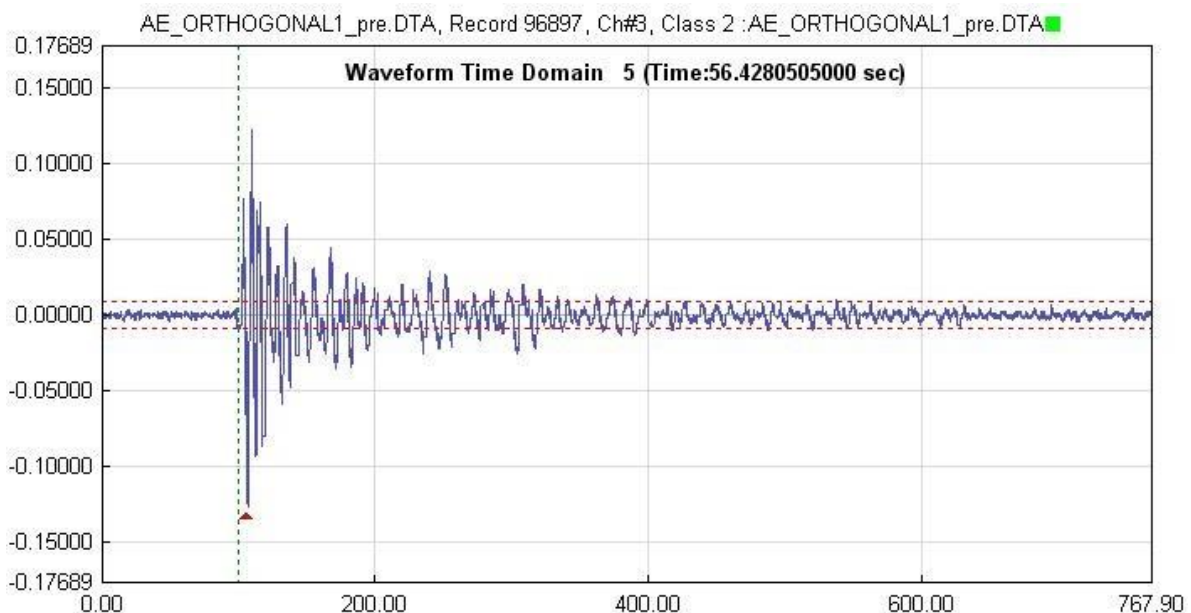
## **4.4 Σήματα ακουστικής εκπομπής και χαρακτηριστικοί παράμετροι**

Η μορφή του σήματος που ανιχνεύεται, κατά την ακουστική εκπομπή, είναι πολύπλοκη. Αυτό συμβαίνει γιατί στο σήμα εμπεριέχονται όλες οι πληροφορίες σχετικά με την πηγή προέλευσης του, το μέσο διάδοσης του και του αισθητήρα ο οποίος το ανιχνεύει.

Τα σήματα που λαμβάνουν οι αισθητήρες είναι δύο τύπων , συνεχούς ή κρουστικού ανάλογα με την πηγή προέλευσής τους, η οποία μπορεί να είναι η έναρξη μιας μικρορωγμής, η καταγραφή επαναλαμβανόμενων ή και επικαλυπτόμενων γεγονότων ή η μεταξύ τους ολίσθηση επιφανειών.



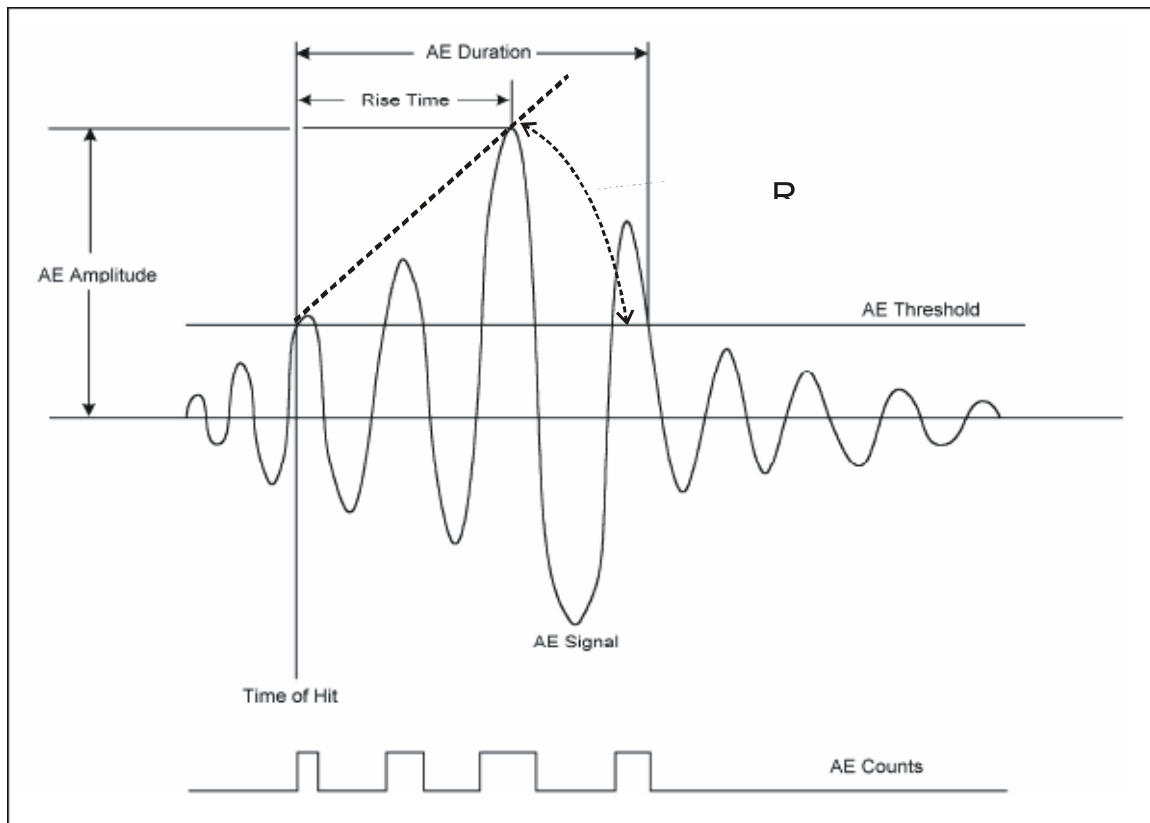
**Σχήμα 4.2** Κυματομορφή συνεχούς ακουστικής εκπομπής (continue AE) [34]



**Σχήμα 4.3** Κυματομορφή στιγμιαίας ακουστικής εκπομπής κρουστικού σήματος (burst type AE). [34]

Όπως προαναφέρθηκε η κυματομορφή που λαμβάνει ο εργαστηριακός εξοπλισμός, μαζί με όλες τις πληροφορίες που εμπεριέχονται στο σήμα AE, μπορεί να απεικονιστεί μέσω

μιας γραφικής παράστασης. Τα μέσα συλλογής και ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο που χρησιμοποιούνται μας επιτρέπουν, πέρα από την καταγραφή και την ανάλυση των παραμέτρων, να αποθηκεύσουμε ολόκληρη την κυματομορφή σε κάθε έναν από τους αισθητήρες, για μεταγενέστερη ανάλυση και δημιουργία βάσεων δεδομένων.



**Σχήμα 4.4** Γραφική παράσταση κυματομορφής AE [34]

Οι βασικές παράμετροι της AE είναι οι εξής:

**Χρόνος κτυπήματος (Time of hit):** Είναι η χρονική στιγμή που ανιχνεύεται το σήμα από το σύστημα. Το χτύπημα εντοπίζεται μόλις το πλάτος του σήματος ξεπεράσει το κατώφλι που του έχουμε ορίσει.

**Πλάτος (Amplitude):** Το πλάτος της ακουστικής εκπομπής είναι η μέγιστη τάση του σήματος που λαμβάνεται κατά την διάρκεια ενός χτυπήματος. Το πλάτος σε dB υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:  $dB = 20 \log ( V_{max} / 1\mu\text{Volt} )$  – απολαβή προενισχυτή.

**Ενέργεια (Energy):** Είναι το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής της τάσης στην διάρκεια ενός AE χτυπήματος.

**Counts (υπερβάσεις):** Είναι το πόσες φορές το σήμα AE έχει ξεπεράσει το κατώφλι μας. Στο συγκεκριμένο σχήμα έχουμε 4 counts.

**Διάρκεια (duration):** Η διάρκεια της ακουστικής εκπομπής είναι ο χρόνος από την πρώτη φορά που το σήμα μας ξεπέρασε το κατώφλι μέχρι την τελευταία καταγραφή άνω του κατωφλίου.

**RMS (Root mean square):** Είναι η ενεργός τιμή της τάσης σε Volt του ΑΕ σήματος.

**ASL (Average Signal Level):** Είναι το μέτρο του συνεχώς μεταβαλλόμενου και υπολογισμένου κατά μέσο όρο πλάτους του σήματος. Η διαφορά του με το RMS είναι ότι το RMS μετριέται σε volt ενώ το ASL μετριέται σε dB. Ο χρόνος μέσα στον οποίο υπολογίζεται, ρυθμίζεται από 0 – 1000 msec.

**Κατώφλι (Threshold):** Είναι η τιμή της ελάχιστης τάσης που έχουμε ορίσει. Όταν ξεπεραστεί αυτή η τάση τότε αρχίζει το σύστημα και καταγράφει την ακουστική εκπομπή.

**Χρόνος Ανύψωσης (Rise Time):** Είναι ο χρόνος μεταξύ της έναρξης του σήματος ΑΕ (όταν αυτό υπερβεί το κατώφλι) και της κορυφής που αντιστοιχεί στο μέγιστο πλάτους της τάσης του.

**Γωνία Ανύψωσης (Rise Angle):** Είναι ο λόγος του χρόνου ανύψωσης RT προς το μέγιστο πλάτος A (σε  $\mu\text{s}/\text{V}$ ).

**Counts to Peak:** Είναι τα counts μεταξύ της αρχής των μετρήσεων (από την υπέρβαση του κατωφλίου) μέχρι την κορυφή του μέγιστου πλάτους. Στην συγκεκριμένη περίπτωση του σχήματος ισούται με 3.

**Μέση συχνότητα (Average Frequency):** Είναι η μέση συχνότητα ολόκληρης της καταγραφής του ΑΕ χτυπήματος. Προκύπτει από άλλα χαρακτηριστικά ΑΕ όπως τα counts και τη διάρκεια, ως ο λόγος  $Ae\_counts / \text{διάρκεια}$ .

**Συχνότητα Αντήρησης (Reverberation Frequency):** Η συχνότητα αντήρησης είναι η μέση συχνότητα που καθορίζεται μετά από την κορυφή της κυματομορφής ΑΕ. Εξαρτάται από άλλες παραμέτρους της κυματομορφής και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:  $(AE\_counts - counts\_to\_peak) / (duration - rise\_time)$

**Συχνότητα Εκκίνησης (Initiation Frequency):** Η συγκεκριμένη συχνότητα είναι η μέση συχνότητα της κυματομορφής υπολογισμένη από την αρχική υπέρβαση του κατωφλίου μέχρι και το μέγιστο πλάτος της κυματομορφής. Υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:  $(AE\_counts\_to\_peak) / (rise\_time)$

**Ένταση Σήματος (Signal Strength):** Είναι το ολοκλήρωμα της τάσης του ανορθωμένου σήματος καθ' όλη την διάρκεια της κυματομορφής. Έχει εύρος τιμών από 3.05pVs (1 count) έως 13.01mVs.

**Απόλυτη Ενέργεια (Absolute Energy):** Είναι η τιμή της ενέργειας του χτυπήματος ακουστικής εκπομπής και μετριέται σε attoJoule (10<sup>-18</sup>Joule) Η τιμή της παίρνει τιμές από 0.000931aJ – 1310.25nJ

#### 4.5 Προσομοίωση σημάτων ακουστικής εκπομπής

Στην μέθοδο ΑΕ, προκειμένου να μελετηθούν τα σήματα, είναι αναγκαίος ένας τρόπος παραγωγής τους, με τρόπο ακριβή και επαναληπτικό. Γι' αυτόν τον λόγο υπάρχουν οι εξής μέθοδοι προσομοίωσης των πηγών ΑΕ:

- Σπάσιμο τριχοειδών αγγείων γυαλιού (Glass Capilarity)
- Σπάσιμο μύτης μολυβιού (Pencil Lead Break)
- Παλμική γεννήτρια λέιζερ (Pulsed Laser Generator)
- Πιεζοηλεκτρική γεννήτρια παλμών
- Πηγές σπινθηρισμών(Spark Source)

Η πιο συνηθισμένη σε χρήση λόγω της απλότητάς της, της δυνατότητας αναπαραγωγής, της καλής απόκρισης στο πεδίο του χρόνου, είναι το σπάσιμο μύτης μολυβιού. Με το σπάσιμο μύτης μολυβιού προσομοιώνουμε μια κρουστική πηγή ΑΕ. Σπάζοντας τη μύτη του μολυβιού, η οποία έχει διάμετρο 0.5 mm, στην επιφάνεια του προς μελέτη στοιχείου, απελευθερώνεται δύναμη με μέσο όρο ανύψωσης περίπου 2.5 msec.

#### 4.6 Βασικές αρχές διάδοσης κυμάτων σε συνεχή μέσα

Τα διάφορα είδη ελαστικών κυμάτων που διαδίδονται σε στερεά μέσα με διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης, η εξάσθениση (attenuation), η διασκόρπιση (dispersion), η σκέδαση (scattering) των κυμάτων κατά την αλληλεπίδρασή τους με ασυνέχειες του μέσου διάδοσης (ανακλάσεις, διαθλάσεις) και οι πολλαπλές διαδρομές αποτελούν τις παραμέτρους της διάδοσης του κύματος για τους σκοπούς τις ΑΕ. [32] Η γνώση των παραγόντων αυτών είναι πολύ σημαντική για τον αξιόπιστο και βέλτιστο σχεδιασμό του ελέγχου καθώς και για την κατανόηση των κυματομορφών που μετρώνται από το σύστημα ΑΕ.

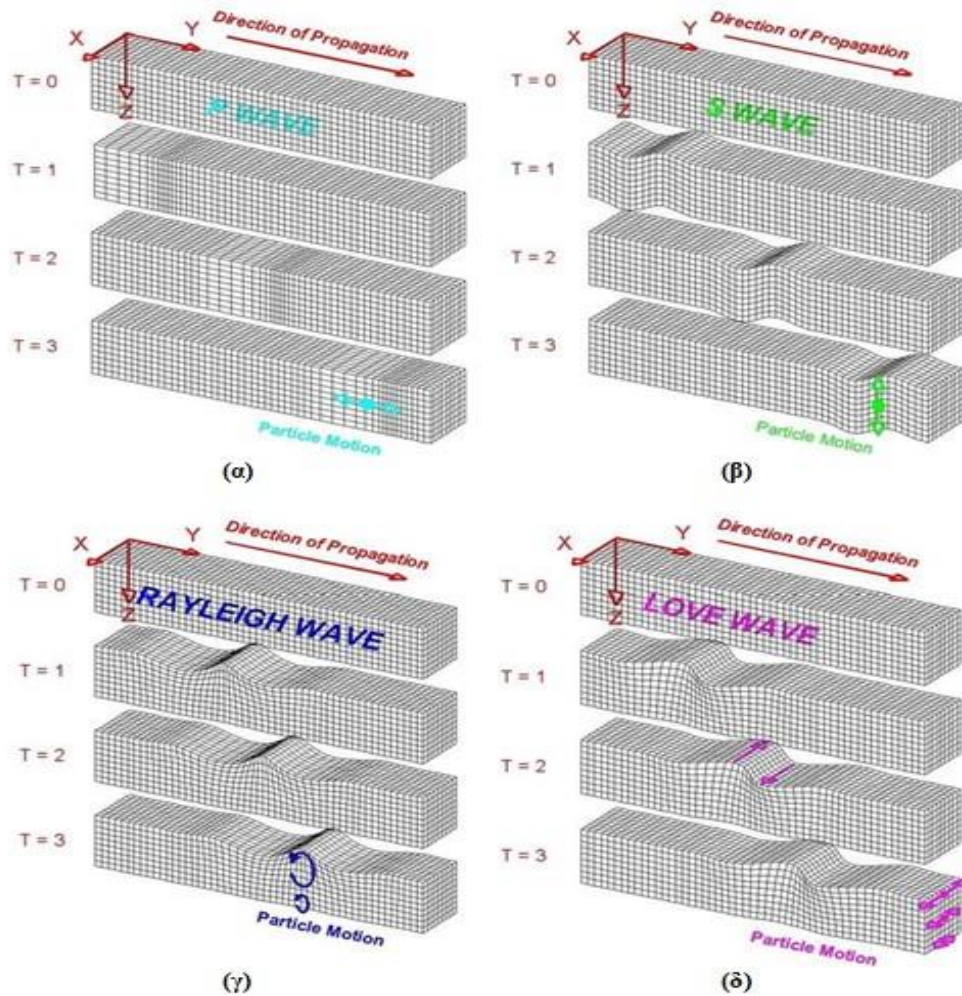
##### I. Μορφές και ταχύτητα κυμάτων

Η ταχύτητα διάδοσης ενός κύματος αποτελεί σημαντική πληροφορία, καθώς μας επιτρέπει τον εντοπισμό της πηγής που προκαλεί την ακουστική εκπομπή. Τα διάφορα είδη κυμάτων ταξιδεύουν στο συνεχές μέσο με διαφορετικές ταχύτητες.

Οι βασικοί τύποι ελαστικών κυμάτων είναι τα κύματα χώρου (body waves) και διαδίδονται μέσα στο υλικό και τα κύματα επιφάνειας (surface waves) τα οποία διαδίδονται κατά μήκος της επιφάνειας του υλικού ή κατά μήκος ενός στρώματος εντός του υλικού. Στα κύματα χώρου ανήκουν τα διαμήκη κύματα στα οποία τα υλικά σημείων του μέσου διάδοσης κινούνται κατά τη διεύθυνση διάδοσης ( κύματα πίεσης ή P) και τα εγκάρσια κύματα στα οποία η κίνηση των υλικών σημείων πραγματοποιείται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (κύματα διάτμησης ή S). Τα διαμήκη κύματα έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης από τα διαμήκη και για αυτόν τον λόγο ονομάζονται πρωτογενή (primary waves) σε αντιδιαστολή με τα εγκάρσια (secondary waves) Τα διαμήκη και τα εγκάρσια κύματα μπορούν να διαδοθούν σε άπειρο ελαστικό μέσο (bulk waves).

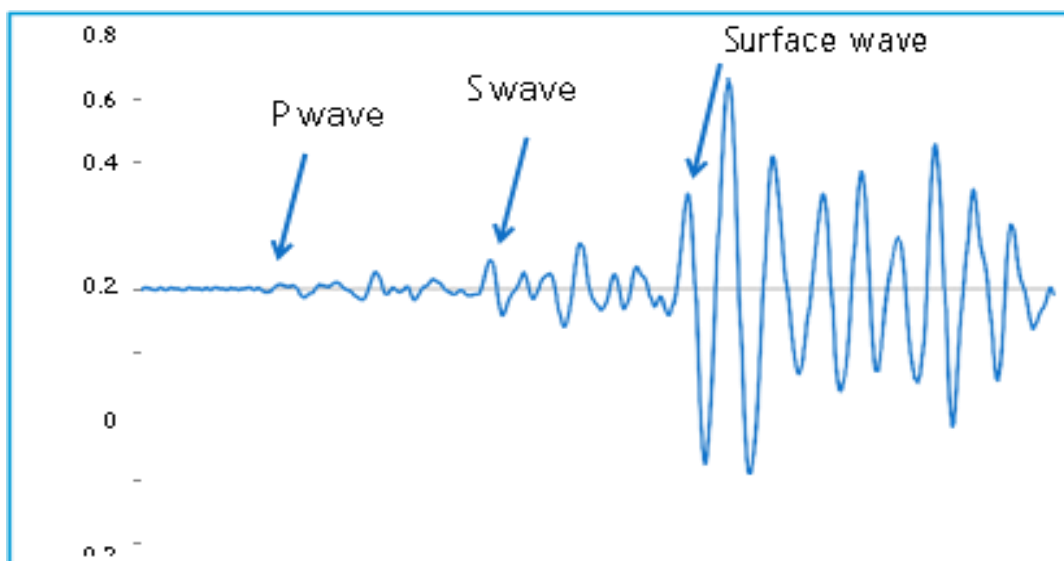
Στην κατηγορία των επιφανειακών κυμάτων ανήκουν τα κύματα Rayleigh στα οποία τα υλικά σημεία του μέσου κινούνται ελλειπτικά και αντίθετα στη διεύθυνση διάδοσης του μέσου και παρουσιάζουν κατακόρυφη πόλωση (επιφανειακά SV κύματα). Το πλάτος τους μειώνεται εκθετικά με το βάθος του μέσου και κάνουν μικρή απόσβεση της ενέργειας που μεταφέρουν. Άλλη μια κατηγορία επιφανειακών κυμάτων είναι τα κύματα Love, στα οποία τα υλικά σημεία κινούνται κατακόρυφα στη διεύθυνση πόλωσης και παρουσιάζουν οριζόντια πόλωση (επιφανειακά SH κύματα).

Άλλη μια κατηγορία είναι τα κύματα Lamb τα οποία δημιουργούνται σε λεπτές πλάκες όπου το πάχος της πλάκας είναι μικρότερο από το μήκος κύματος. Η ταχύτητα διάδοσής τους είναι συνάρτηση του πάχους της πλάκας και της συχνότητας κυματικής διαταραχής. [32]



Σχήμα 4.5 Διάφορα είδη κυμάτων όπου διακρίνεται η διεύθυνση διάδοσης και η κίνηση των σημείων του υλικού μέσου (α) κύματα P (β) κύματα S (γ) επιφανειακά κύματα Rayleigh (δ) επιφανειακά κύματα Love [34]

Τα πλάτη των επιφανειακών κυμάτων εξασθενούν λιγότερο σε σύγκριση με τα κύματα χώρου, οπότε είναι ανιχνεύσιμα σε μεγαλύτερες αποστάσεις.



Σχήμα 4.6 Κυματομορφή ελαστικών κυμάτων όπου διακρίνονται τα κύματα P (πρώτη άφιξη) τα κύματα S και τα επιφανειακά κύματα (κύματα Rayleigh) διαφορετικής συχνότητας και πλάτους [34]

## II. Εξασθένηση κύματος

Το πλάτος του κύματος ελαττώνεται καθώς διαδίδεται, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να ανιχνευθούν από τους αισθητήρες οι πηγές σημάτων ΑΕ όταν οι αποστάσεις από τους τελευταίους είναι μεγάλες. Οι κύριες αιτίες αυτής της μείωσης του πλάτους είναι:

- **Γεωμετρική απόσβεση.** Το πλάτος μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με τη ρίζα της απόστασης από την πηγή για δισδιάστατες κατασκευές, ενώ σε τρισδιάστατες κατασκευές μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση από την πηγή. Δηλαδή μπορεί να μειωθεί το πλάτος του έως και 50% όταν διπλασιάζεται η απόσταση από την πηγή.
- **Απόσβεση λόγω του μέσου διάδοσης.** Αυτού του είδους η απόσβεση συνδέεται με την απορρόφηση των κινητικών και ελαστικών ενεργειών του κύματος, κατά τη διάδοσή του στο μέσο, και μετατροπή τους σε θερμότητα. Το πλάτος μειώνεται εκθετικά με την απόσταση.
- **Σκέδαση.** Ένα μέρος της ενέργειας που μεταδίδεται αρχικά, αντανακλάται όταν το μέσο παρουσιάζει δομικές ασυνέχειες, γεωμετρικές ασυνέχειες (π.χ. μη μεταλλικές προσμίξεις, δίδυμα όρια) ή περιοχές με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Αυτό που παρατηρείται είναι η αποκοπή της διαδιδόμενης ενέργειας από το κύμα και η ανακατανομή σε όλες τις διευθύνσεις. Το ποσοστό της ενέργειας που αποκόπτεται είναι συνάρτηση της γεωμετρίας και των υλικών του μέσου.

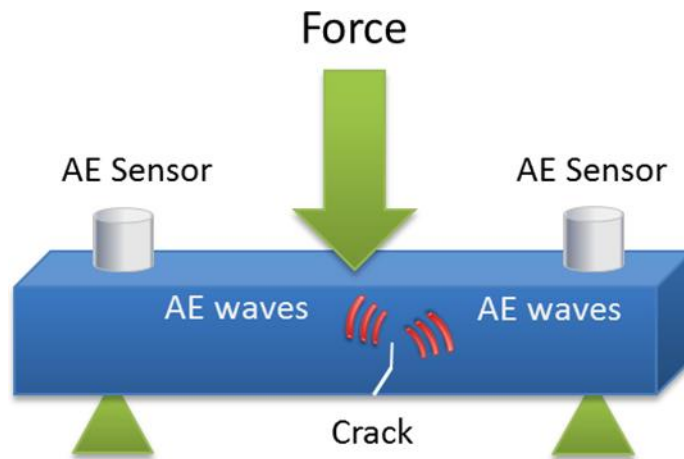
### 4.7 Εντοπισμός θέσεων πηγών ΑΕ

Μέσω της ταχύτητας του ακουστικού κύματος και του χρόνου άφιξης στον κάθε αισθητήρα, μπορούμε να υπολογίσουμε την θέση της πηγής της ακουστικής εκπομπής και κατά συνέπεια την περιοχή της ατέλειας ενός υλικού ή μιας κατασκευής. Για το λόγο αυτό απαιτούνται τα σήματα δύο ή και περισσότερων αισθητήρων ανάλογα αν ο εντοπισμός της θέσης της πηγής είναι μονοδιάστατος ή δισδιάστατος.



#### 4.7.1 Μονοδιάστατος εντοπισμός θέσης

Ο μονοδιάστατος εντοπισμός ή γραμμικός γίνεται στις περιπτώσεις που μια από της διαστάσεις του υπό εξέταση υλικού είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες. Π.χ. σωληνώσεις, μεγάλου μήκους κύλινδροι αερίου. Σε αυτή την περίπτωση κάνουμε χρήση δύο αισθητήρων, τους οποίους τοποθετούμε στα δύο άκρα του υλικού.



**Σχήμα 4.7 Μονοδιάστατος εντοπισμός θέσης πηγής ΑΕ κατά τη δοκιμή κάμψης τριών σημείων σε ορθογώνια ράβδο. [35]**

Η απόσταση  $d$  της θέσης της ακουστικής πηγής από τον αισθητήρα που καταγράφει πρώτος το σήμα, δίνεται από τη σχέση:

$$d = \frac{1}{2}(D - \Delta T \cdot V)$$

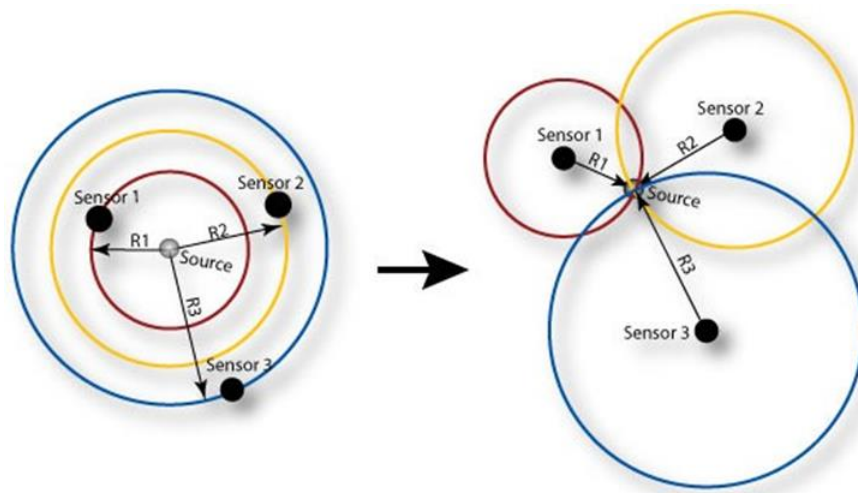
Όπου:  $D$  είναι η απόσταση μεταξύ των δύο αισθητήρων

$V$  η ταχύτητα διάδοσης των ελαστικών κυμάτων στο υλικό

$\Delta T$  η διαφορά των χρόνων άφιξης του σήματος στους δύο αισθητήρες

#### 4.7.2 Δισδιάστατος εντοπισμός θέσης

Δισδιάστατος ή επίπεδος εντοπισμός θέσης πηγής ΑΕ γίνεται στις περιπτώσεις μεγάλων επιφανειών και κατασκευών μεγάλου πάχους, όπως δεξαμενές ή μεγάλα δοχεία. Στην περίπτωση αυτή γίνεται χρήση τριών τουλάχιστον αισθητήρων.



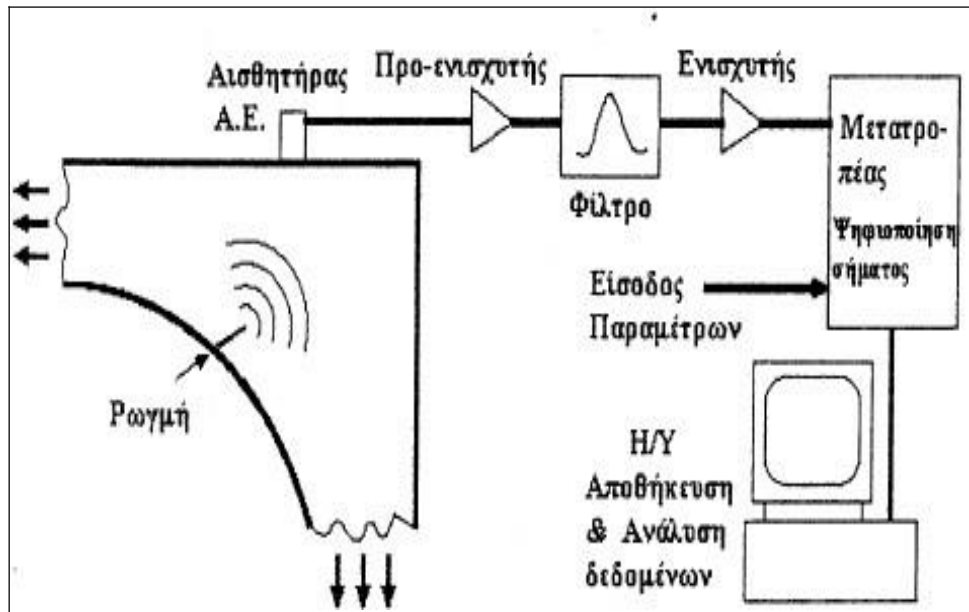
**Σχήμα 4.8 Εντοπισμός θέσης πηγής ΑΕ σε δύο διαστάσεις [36]**

Το ελαστικό κύμα που παράγεται στη θέση της πηγής (source) διαδίδεται σε ισότροπο υλικό προς κάθε κατεύθυνση και τα κυκλικά μέτωπα κύματος διατρέχουν διαφορετικές αποστάσεις ( $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_3$ ) μέχρι να ανιχνευτούν από τους αισθητήρες ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ). Η θέση της πηγής θα βρίσκεται στο σημείο τομής των τριών κύκλων με κέντρα τις θέσεις των αισθητήρων και ακτίνες ίσες με τις αποστάσεις που διέτρεξε το κύμα μέχρι να καταγραφεί από τον κάθε αισθητήρα. [34]

Στις περιπτώσεις κατασκευών σκυροδέματος γίνεται τρισδιάστατος εντοπισμός θέσης με τη χρήση τεσσάρων αισθητήρων.

#### **4.8 Σύστημα καταγραφής δεδομένων**

Ο έλεγχος μέσω ΑΕ μπορεί να γίνει με κινητό εξοπλισμό στο περιβάλλον του υλικού ή στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας σταθερά συστήματα καταγραφής. Ο εξοπλισμός θα πρέπει να επιτυγχάνει την αναγνώριση των σημάτων που προέρχονται από πραγματικές αστοχίες του υλικού, να είναι σε θέση να προσδιορίζει τη θέση αυτής, να απομονώνει τον θόρυβο και να χαρακτηρίζει τον τύπο και την κρισιμότητα της βλάβης.



Σχήμα 4.9 Τυπικός εξοπλισμός μέτρησης ΑΕ [37]

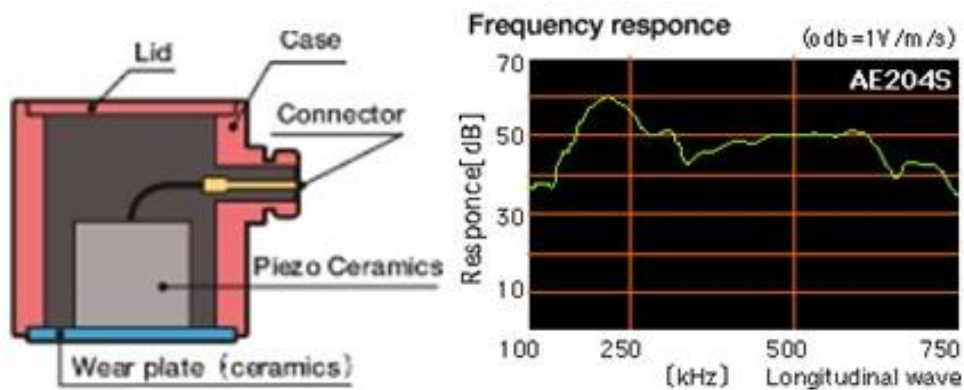
Ένα τυπικό σύστημα ΑΕ αποτελείται από τους αισθητήρες, προενισχυτές, φίλτρο και ενισχυτή καθώς και τα συστήματα καταγραφής, απεικόνισης και αποθήκευσης των μετρήσεων.

Οι αισθητήρες ΑΕ είναι πολύ ευαίσθητοι, ικανοί να ανιχνεύουν τα ελαστικά κύματα και είναι πιεζοκρύσταλλοι, tourmaline ή quartz ή είναι κατασκευασμένοι από κεραμικά υλικά. Ο ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος αισθητήρα είναι ο πιεζοηλεκτρικός.

Η επιλογή του αισθητήρα γίνεται βάσει του στόχου που πρέπει να επιτευχθεί και ταξινομούνται κυρίως σε δύο τύπους: στα μοντέλα στενού εύρους συχνοτήτων (συντονισμού), οι οποίοι διαθέτουν μεγάλη ευαισθησία και στα μοντέλα με ευρύ εύρος συχνοτήτων, με μικρότερη ευαισθησία.

#### ➤ Μοντέλο Συντονισμού

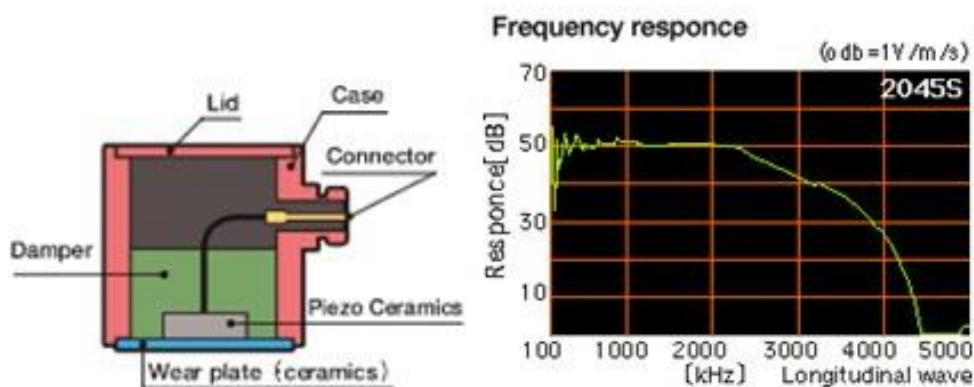
Χρησιμοποιείται όταν υπάρχει ανάγκη επίτευξης υψηλής ευαισθησίας. Οι αισθητήρες αυτοί παρουσιάζουν συχνότητες συντονισμού στην περιοχή 60 kHz έως 1MHz. Οι αισθητήρες του μοντέλου αυτού διαθέτουν μηχανισμό πιεζοηλεκτρικού επιταχυνσιόμετρου στην περίπτωση που χρειαστούν χαμηλότερα χαρακτηριστικά συντονισμού.



Σχήμα 4.10 Αισθητήρας ΑΕ τύπου συντονισμού και απόκριση συχνότητας [38]

➤ Μοντέλο Μεγάλου Εύρους Ζώνης

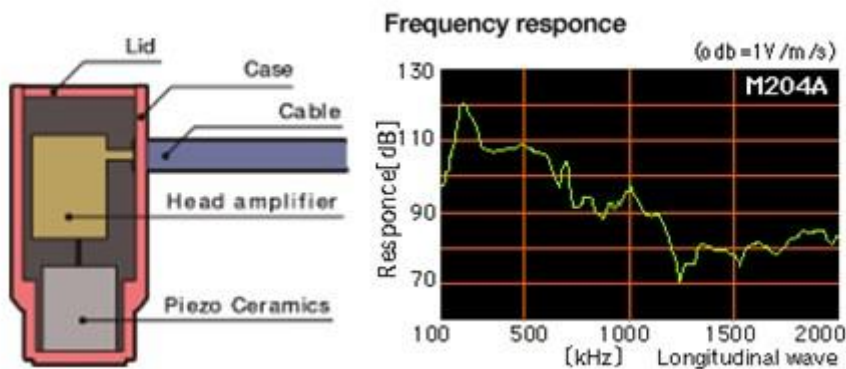
Σε αυτό το μοντέλο αισθητήρα συνδέεται ένας αποσβεστήρας στην κορυφή του στοιχείου ανίχνευσης για να καταστείλει το συντονισμό.



Σχήμα 4.11 Αισθητήρας ΑΕ τύπου μεγάλου εύρους ζώνης και απόκριση συχνότητας [38]

➤ R-Cast Type

Στο μοντέλο αυτό ενσωματώνεται ένας ενισχυτής και ένας προενισχυτής, προκειμένου να προκύψει υψηλή ευαισθησία σε χαμηλά επίπεδα θορύβου. Η ευαισθησία αυτού του μοντέλου αισθητήρα είναι τουλάχιστον διπλάσια σε σύγκριση με άλλα μοντέλα.



Σχήμα 4.12 Αισθητήρας ΑΕ τύπου R-Cast και απόκριση συχνότητας [38]

Προκειμένου να γίνει σωστή καταγραφή των πληροφοριών οι οποίες περιλαμβάνονται στο ελαστικό κύμα που ανιχνεύεται από τον αισθητήρα, θα πρέπει οι επιφάνειες στις οποίες τοποθετούνται οι αισθητήρες να καθαρίζονται πολύ καλά, προκειμένου να επιτευχθεί καλή ακουστική σύζευξη μεταξύ αισθητήρα και επιφάνειας. Και αυτό γιατί τα τασικά κύματα ανακλώνται στη διεπιφάνεια δύο υλικών που έχουν διαφορετική ακουστική αντίσταση. Συνήθως χρησιμοποιούνται μέσα όπως σιλικόνη, γράσο κ.α. προκειμένου να εξασφαλιστεί η καλή μετάδοση κύματος.

Οι αισθητήρες λειτουργούν συνήθως στη συχνότητα συντονισμού τους, προκειμένου η ευαισθησία του συστήματος ΑΕ να είναι η μέγιστη. Το ηλεκτρικό σήμα που εξέρχεται, προενισχύεται κατά 20-60dB και οδηγείται στο φίλτρο προκειμένου να εξαλειφθούν πιθανοί ανεπιθύμητοι θόρυβοι. Το φίλτρο θα πρέπει να έχει τα ίδια όρια συχνοτήτων με αυτά του αισθητήρα. Κατόπιν το σήμα ενισχύεται περισσότερο και μια κατάλληλη κάρτα το μετατρέπει σε ψηφιακό, ούτως ώστε να μπορεί να επεξεργαστεί περαιτέρω.

Το σύστημα ΑΕ έχει στη διάθεσή του έναν αριθμό καναλιών στα οποία συνδέεται ο ίδιος αριθμός αισθητήρων. Στα κανάλια το σήμα που εκπέμπουν οι αισθητήρες ψηφιοποιείται και καταγράφεται. Αυτά μπορούν να καταγράψουν την κυματομορφή ΑΕ ή χαρακτηριστικές παραμέτρους του σήματος. Εκτός της απεικόνισης των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, είναι δυνατή η επεξεργασία των δεδομένων και σε μεταγενέστερο χρόνο, εφόσον το πείραμα έχει ολοκληρωθεί.

Παρόλα αυτά έχει μεγάλη σημασία η αρχική επιλογή του αριθμού των αισθητήρων, οι τιμή της ενίσχυσης ή προενίσχυσης, προκειμένου η τελική πληροφορία που θα καταγραφεί να είναι απαλλαγμένη από θορύβους. Είναι σημαντική δηλαδή η επιλογή της σωστής πειραματικής διάταξης πριν την έναρξη του πειράματος.

## 4.9 Το πρόβλημα του θορύβου

Προκειμένου ο έλεγχος με τη μέθοδο της ΑΕ να στεφθεί με επιτυχία, θα πρέπει να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που προκαλεί ο θόρυβος στην τελική πληροφορία, να εξαλειφθούν. Για να μπορέσει να απαλειφθεί ο θόρυβος, θα πρέπει να είναι η γνωστές οι πηγές του. Οι πηγές του θορύβου μπορούν να διακριθούν στις εξής: [39]

### I) Ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος

Στην κατηγορία αυτή υπάγονται :

- Ο λευκός θόρυβος κατά την προενίσχυση, ο οποίος καθορίζει την ευαισθησία του συστήματος. Ο τύπος αυτός του θορύβου είναι αναπόφευκτος και με ένα καλό σχεδιασμό του προενισχυτή είναι δυνατό να περιοριστεί στα θεωρητικά όρια.
- Ο παρασιτικός θόρυβος που δημιουργείται στο σύστημα της ΑΕ από αλληλεπίδραση των διαφόρων εξαρτημάτων του. Με καλό σχεδιασμό είναι εφικτός ο περιορισμός και του τύπου αυτού.
- Η κακή γείωση του συστήματος μπορεί να προκαλεί επίσης θόρυβο.
- Θόρυβος παράγεται και από την ηλεκτρομαγνητική επιρροή στοιχείων όπως πρίζες, ραδιοφωνικοί σταθμοί, παρακείμενοι πομποί και δέκτες κ.α.

### II) Μηχανικός θόρυβος

Ο μηχανικός θόρυβος προέρχεται από :

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

Για την αποφυγή του θορύβου μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες διαδικασίες

- Απαλοιφή του θορύβου στην πηγή.

- Έλεγχος του φορτίου φόρτισης
- Κατάλληλη επιλογή της συχνότητας λειτουργίας και μείωση ευαισθησίας του ελέγχου
- Χρήση ειδικών ηλεκτρονικών φίλτρων για τις συχνότητες.
- Χρήση ειδικών αισθητήρων για την απομάκρυνση του θορύβου.
- Εισαγωγή μέσων μόνωσης ή απόσβεσης ανάμεσα στην πηγή του θορύβου και τους αισθητήρες.
- Τοποθέτηση των αισθητήρων μακριά από τις πηγές θορύβου.

#### 4.10 Καταγραφή και χαρακτηρισμός των σημάτων ΑΕ

Τα δεδομένα που λαμβάνονται με τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής, θα πρέπει να καταγράφονται με σωστό και αξιόπιστο τρόπο, από τη στιγμή που η ΑΕ δεν είναι άμεσα επαναλήψιμη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί καθορίζοντας την ευαισθησία του συστήματος, δηλαδή την ικανότητα του να ανιχνεύει μικρού εύρους σήματα. Η ευαισθησία του συστήματος καθορίζεται από την ευαισθησία των αισθητήρων και από την μεταξύ τους απόσταση. Ο κυριότερος παράγοντας όμως είναι το «κατώφλι» που ορίζει ένα επίπεδο τάσης με το οποίο συγκρίνονται τα σήματα ΑΕ. Αν το εύρος του ενισχυμένου σήματος ΑΕ ξεπερνά το κατώφλι, τότε καταγράφεται ως σήμα ΑΕ. Προκύπτει δηλαδή ότι η ευαισθησία του συστήματος είναι τόσο μικρότερη όσο υψηλότερη είναι η τιμή τάσης του κατωφλίου.

Γενικά ισχύει ότι για τη δοκιμή ακεραιότητα μιας κατασκευής είναι σημαντικότερα τα μεγαλύτερα και ισχυρότερα σήματα. Επίσης όσο μεγαλύτερη η ευαισθησία του συστήματος, τόσο μεγαλώνει και ο κίνδυνος του θορύβου. Για τους παραπάνω λόγους, η συνιστώμενη τιμή για γενική χρήση, ορίζονται τα 40 dB.

Μία από τις μεθόδους ανάλυσης και χαρακτηρισμού ενός σήματος ΑΕ έχει ως απαίτηση κάθε φορά που το σήμα υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο κατώφλι, να καταγράφεται μια μέτρηση. Αυτό επιτυγχάνεται με τον καθορισμό κάποιων χαρακτηριστικών παραμέτρων του σήματος. Τέτοιες χρονικές παράμετροι είναι:

- Hit Definition Time (HDT). Ο μέγιστος χρόνος διάρκειας μιας μέτρησης ώστε να αποφεύγεται η καταγραφή των ανακλάσεων
- Hit Location Time (HLT). Ο χρόνος αναμονής του συστήματος μέχρι την επόμενη μέτρηση

- Peak Definition Time (PDT). Ο μέγιστος χρόνος μεταξύ δύο συνεχόμενων κορυφών του σήματος

Οι παράμετροι αυτοί καθορίζονται πριν την έναρξη του πειράματος και συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:

$$HLT > HDT > 2 * PDT$$

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή σημάτων είναι δύο.

- Αποθήκευση ολόκληρου του παλμού. Η μέθοδος αυτή αν και προσφέρει πολλές πληροφορίες, μειονεκτεί στην ύπαρξη μεγάλου αριθμού σημάτων και στη δυσκολία καταγραφής και ανάλυσής τους
- Παραμετροποίηση του σήματος. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην περιγραφή του σήματος ΑΕ μέσω συγκεκριμένων παραμέτρων

Ο χαρακτηρισμός των σημάτων ΑΕ έχει ως στόχο τον συσχετισμό της πληροφορίας που κουβαλάνε με τον προσδιορισμό της μορφής αστοχίας των υλικών ή κατασκευών. Ο συσχετισμός αυτός είναι αρκετά δύσκολος, όπου η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχει πληθώρα διαφορετικών αστοχιών στα υλικά, πολλαπλές πηγές θορύβου και πληθώρα παραμέτρων που επηρεάζουν τον τασικό παλμό, καθώς και την τελική μορφή του σήματος που καταγράφεται.

Οι μέθοδοι χαρακτηρισμού των σημάτων ΑΕ, είναι οι:

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



Οι μέθοδοι αυτοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, Την κατηγορία των συμβατικών μεθόδων (conventional AE), στην οποία αναλύονται στατιστικά τα αποτελέσματα. Σε αυτή την ομάδα ανήκει και η μέθοδος συσχετισμού του πλάτους σήματος με τη μορφή κάθε αστοχίας. Η τεχνική αυτή αν και παρουσιάζει μεγαλύτερη ευκολία, παρουσιάζει μια σειρά μειονεκτημάτων με κυριότερο τη δυσκολία διαχωρισμού διαφορετικών φαινομένων, τα οποία παράγουν σήματα με παρόμοιο πλάτος. Οπότε προκειμένου να επιτύχουμε καλύτερο διαχωρισμό, θα πρέπει να κάνουμε χρήση επιπλέον παραμέτρων του σήματος, όπως η ενέργεια, τα counts και η συνολική διάρκεια του σήματος, καθώς επίσης και εξελιγμένες τεχνικές ανάλυσης.

Η δεύτερη κατηγορία είναι η κατηγορία ποσοτικών μεθόδων (quantitative AE), κατά την οποία τα τασικά κύματα μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα με συναρτήσεις μεταφοράς και γίνεται μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών κυματικής διάδοσης. Στόχος των παραπάνω είναι να βρεθεί ο αρχικός παλμός διέγερσης.

## *Μέρος II :Πειραματικό μέρος*

### **Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> : Πειραματικό μέρος**

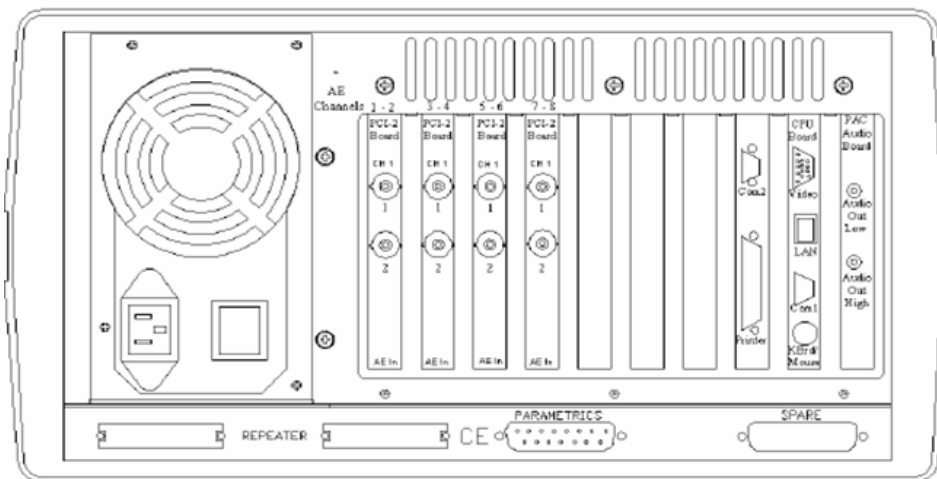
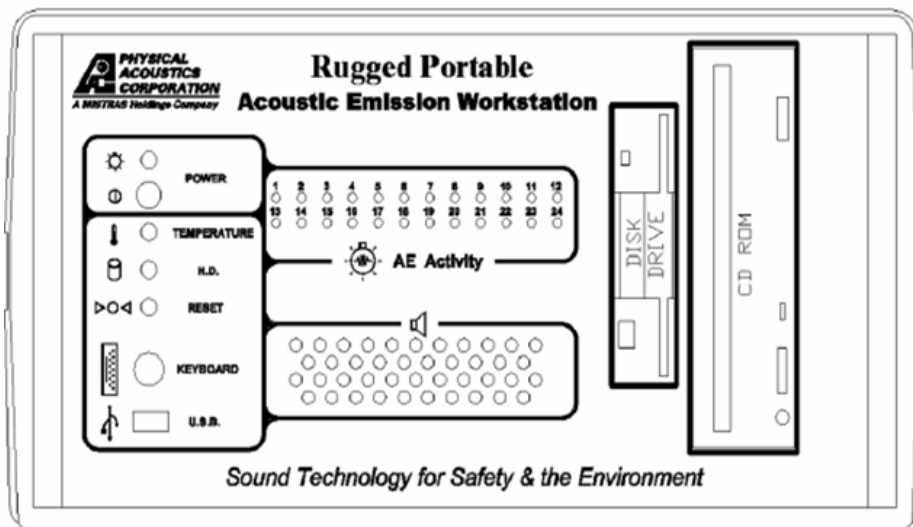
#### **5.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης**

Για της μετρήσεις των ακουστικών εκπομπών χρησιμοποιήσαμε το πολυκάναλο σύστημα DiSP (φορητή έκδοση) του οίκου Physical Acoustics Corporation το οποίο έχει εξοπλιστεί με 3 κάρτες PCI-2. Η κάρτα PCI-2 είναι ένα δικάναλο σύστημα, το οποίο χρησιμοποιείται για τη συλλογή δεδομένων ακουστικών εκπομπών και για την ψηφιακή επεξεργασία σήματος πάνω σε μία PCI κάρτα.



**Σχήμα 5.1 Physical Acoustics PCI-2 based AE system [40]**

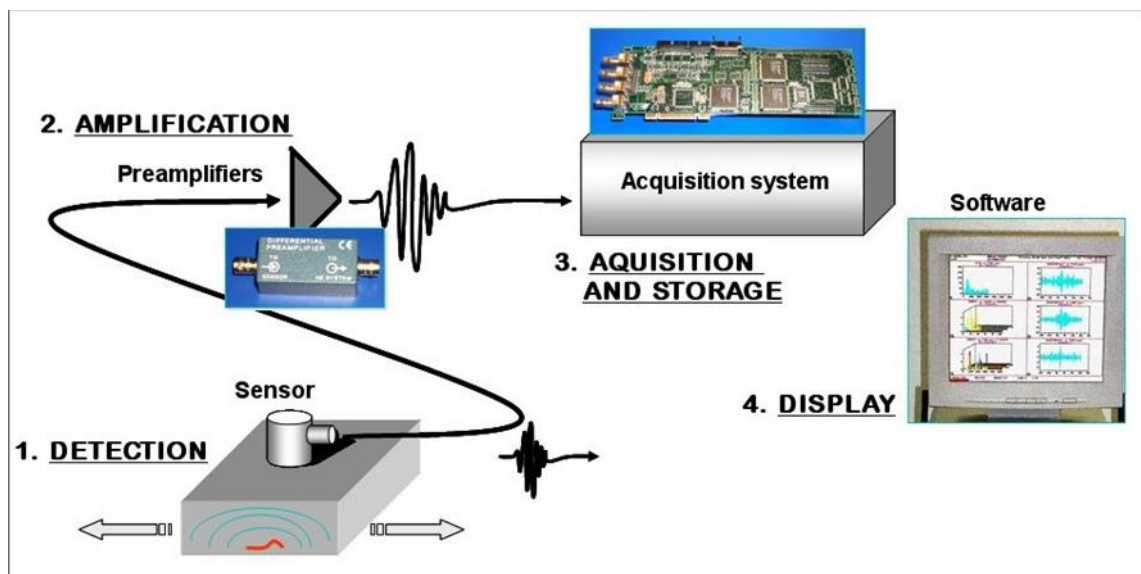
Το ακουστικό σήμα θα περάσει μέσα από τον ενισχυτή ο οποίος είναι προγραμματιζόμενος και από το ενδιάμεσο κύκλωμα, το οποίο έχει επιλογή τιμών ενίσχυσης από 0 έως 6 db. Κατόπιν θα περάσει από το κύκλωμα φίλτρων στο οποίο χρησιμοποιούνται ένα εκ των τεσσάρων υπερπυκνωμάτων φίλτρων και ένα εκ των 6 βαθυπερατών, ανάλογα με το ποια θα επιλέξει ο χρήστης. Το φιλτραρισμένο σήμα το οποίο είναι σε αναλογική μορφή θα περάσει έπειτα σε ψηφιακό μετατροπέα, με ταχύτητα δειγματοληψίας έως 40 MegaSample/sec. Αφού έχει μετατραπεί σε ψηφιακή μορφή πλέον, το σήμα πηγαίνει στο based FPGA όπου λαμβάνονται δειγματοληψίες πολύ χαμηλού θορύβου για επεξεργασία 18 bit. Το σήμα σε κβαντοποιημένη κυματομορφή θα περάσει από τον εσωτερικό επεξεργαστή εντοπισμού χτυπημάτων, από τον οποίο θα λάβουμε τα χαρακτηριστικά που θέλουμε από το σήμα καθώς και άλλες παραμέτρους των ακουστικών εκπομπών , όπως π.χ. raise time κλπ.



**Σχήμα 5.2** Εμπρόσθια και οπίσθια όψη του πολυκάναλου συστήματος DiSP του οίκου APC [34]

Η συσκευή της κάρτας PCI είναι εφοδιασμένη με κάρτα ήχου και λαμπτήρα led. Όταν προκύψει κάποιο hit το σήμα θα περάσει στην κάρτα ήχου και ακούγεται ήχος, ενώ παράλληλα αναβοσβήνει το led. Επίσης υπάρχουν βύσματα με αναλογικές εισόδους και οχτώ ψηφιακές εισοδοι και έξοδοι, οι οποίες αλληλεπικοινωνούν.

Η πειραματική διάταξη για την καταγραφή των σημάτων AE απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα και αποτελείται από πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, προενισχυτές, από το σύστημα συλλογής των σημάτων.

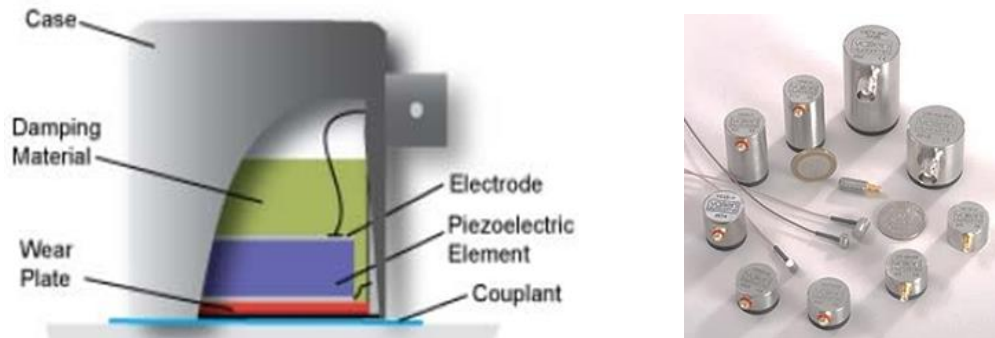


Σχήμα 5.3 Σχηματική απεικόνιση συστήματος συλλογής ακουστικών εκπομπών [34]

Πάνω στο υπό έλεγχο δοκίμιο ή κατασκευή προσαρμόζονται οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες με τη βοήθεια ενός υλικού σύζευξης, το οποίο μπορεί να είναι , αναλόγως της περίπτωσης της κατασκευής, νερό, γράσο, μέλι. Το υλικό σύζευξης χρησιμοποιείται ώστε να εξασφαλιστεί η διάδοση των ελαστικών κυμάτων από το υλικό στην επιφάνεια του αισθητήρα, χωρία να αποσβεστούν στη διεπιφάνεια επαφής τους.

Το σήμα που παράγεται στον αισθητήρα από τα ελαστικά κύματα είναι πολύ μικρό και γι' αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούμε προενισχυτές πριν αυτό να εισέλθει στο σύστημα καταγραφής και ανάλυσης. Λόγω του προβλήματος του θορύβου, σε πολλούς αισθητήρες ενσωματώνεται ο προενισχυτής προκειμένου να διασφαλιστεί η υψηλή τιμή του σήματος. Κατόπιν η μονάδα συλλογής καταγράφει το ενισχυμένο σήμα, ενώ είναι δυνατή, για κάθε ένα αισθητήρα, η καταγραφή ολόκληρης της κυματομορφής. Η εξαγωγή των παραμέτρων της ΑΕ μπορεί να γίνει σε σχεδόν πραγματικό χρόνο.

## 5.2 Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες



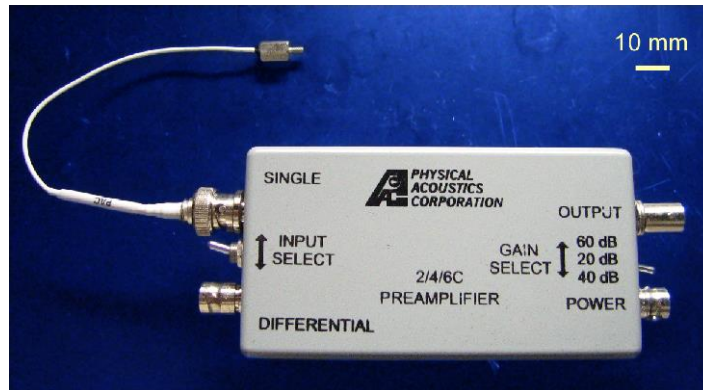
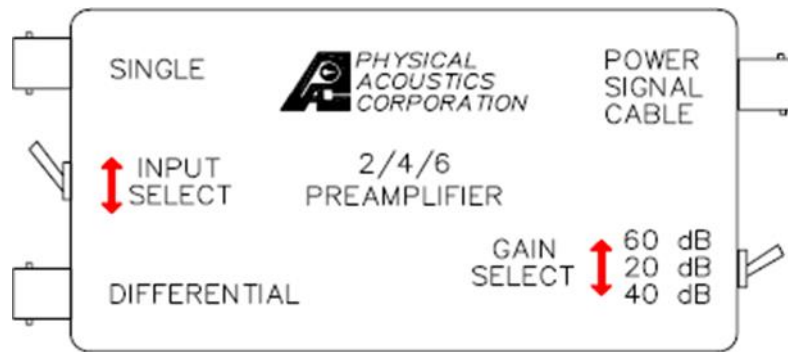
Σχήμα 5.4 Σχηματική απεικόνιση πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα και πραγματικές εικόνες αυτών. [41] [42]

Η δομή ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα αποτελείται από το περίβλημα (case), μέσα στο οποίο βρίσκεται το υλικό απόσβεσης (damping material), ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος (piezoelectric element) ο οποίος ενώνεται με τα ηλεκτρόδια (electrodes) που στην συνέχεια καταλήγουν στο καλώδιο που πάει στον προενισχυτή και τη θήκη στήριξης (wear plate). Επιπλέον κάτω από τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο τοποθετείται ένα στρώμα προστασίας, προκειμένου να περιοριστούν οι ταλαντώσεις του κρυστάλλου. Προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες είναι σημαντική η τοποθέτηση, στο σημείο επαφής του αισθητήρα με το υπό εξέταση υλικό, ενός παχύρρευστου μέσου για την μείωση των απωλειών.

Στην τοποθέτησή τους πάνω στη ράβδο χάλυβα τοποθετήσαμε μέλι για καλύτερη επαφή με αυτή.

## 5.3 Προενισχυτές

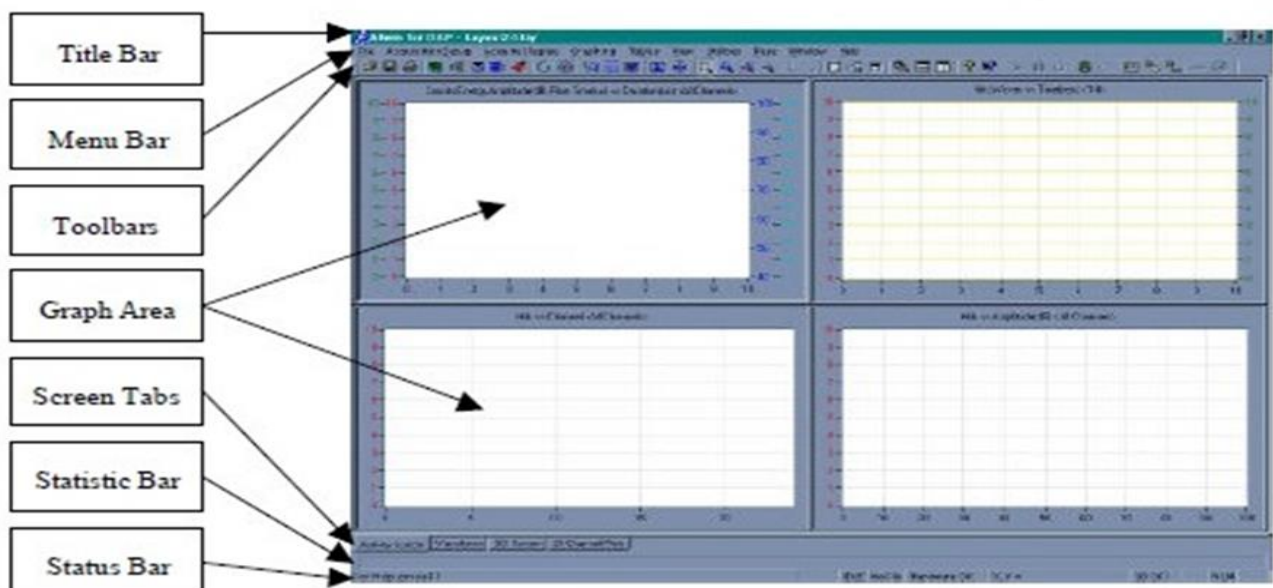
Οι προενισχυτές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι 0/2/4 με εύρος 0dB, 20dB, 40dB και η επιλογή του εύρους γίνεται με διακόπτη ο οποίος βρίσκεται στον προενισχυτή. Οι παραπάνω προενισχυτές χρησιμοποιούνται στην περίπτωση που δεν είμαστε σίγουροι για το εύρος των συχνοτήτων. Οι προενισχυτές έχουν ενσωματωμένα φίλτρα και έτσι είναι εύκολη η αλλαγή τους χωρίς να είναι απαραίτητη βαθμονόμηση.



Σχήμα 5.5 Σχηματική απεικόνιση συστήματος προενισχυτή και πραγματική εικόνα αυτού [43]

#### 5.4 Λογισμικό συλλογής και ανάλυσης δεδομένων

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για τη συλλογή των δεδομένων είναι το AEwin της PAC. Αφού γίνει η εκκίνηση του προγράμματος, στην οθόνη του υπολογιστή εμφανίζεται η παρακάτω απεικόνιση.



Σχήμα 5.6 Αρχική οθόνη του AEwin

Στην αρχική οθόνη του προγράμματος διακρίνονται τα εξής:

**Menu Bar:** Πρόκειται για την μπάρα με τις εντολές κειμένου όπως File, Acquisition Setup, Acquire/Replay, Graphing, Tables, View, Utilities, Page, Window και Help. Όλα τα προηγούμενα έχουν υπό-μενού το οποίο εμφανίζεται μόλις πατήσουμε πάνω τους.

**Toolbar Icons:** Είναι εικονίδια τα οποία αποτελούν συντομεύσεις των διαφόρων επιλογών του Menu bar και άλλων επιλογών. Τοποθετώντας το ποντίκι πάνω σε κάποιο από τα εικονίδια εμφανίζεται η περιγραφή της λειτουργίας του.

**Graph Area:** Είναι το σημαντικότερο πεδίο, γιατί σε αυτό απεικονίζεται η γραφική παράσταση η οποία περιλαμβάνει όλες τις σημαντικές πληροφορίες που επιθυμούμε να αντλήσουμε. Στο Graph setup menu έχουμε τη δυνατότητα επιπλέον επιλογών απεικόνισης των γραφικών παραστάσεων.

**Screen page tabs:** Με το πρόγραμμα AEwin ειθαι δυνατή η απεικόνιση πολλών γραφικών παραστάσεων σε διαφορετικές καρτέλες. Ο χρήστης μπορεί να ονομάσει τις καρτέλες ή αυτές να πάρουν το όνομά τους από τη γραφική παράσταση που απεικονίζουν. Πατώντας δεξί κλικ μπορούμε να μετονομάσουμε, να προσθέσουμε ή και να διαγράψουμε τις καρτέλες.

**Statistics Bar:** Σε αυτό το μενού είναι δυνατό να πάρουμε πληροφορίες όπως AE counts, Total AE Hits, Total AE Events, Total Waveforms, Cumulative Counts, Cumulative Energy, Time of test κ.ά. Με αυτά τα στοιχεία παίρνουμε ένα πολύ χρήσιμο σετ στατιστικών πληροφοριών.

**Status Bar:** Σε αυτό περιέχονται επιλογές ενώ τρέχει το πείραμα όπως Replay, Abort test, Test paused κτλ. Δίπλα από το text status field εμφανίζεται το όνομα του αρχείου που αποθηκεύεται το αποτέλεσμα του τεστ. Δίπλα από αυτό βρίσκεται το system diagnostics text field.

### **File Menu:**

**New\_Layout:** Δημιουργεί νέο Layout με τις default ρυθμίσεις ενώ αφαιρούνται όλα τα παλιά layouts από την οθόνη.

**Open Layout:** Ανοίγει layouts από αρχείο

**Save Layout/Save Layout as:** Αποθηκεύει το Layout

**Specify Data Folder:** Επιλέγουμε τον φάκελο στο σκληρό δίσκο όπου αποθηκεύονται τα Layouts.

**Print Page:** Τυπώνει τις γραφικές παραστάσεις του Layout

**Export to JPG:** Αποθηκεύει το layout σε μορφή εικόνας jpeg

## 5.5 Παραμετροποίηση του λογισμικού για λήψη δεδομένων

Προκειμένου να μπορέσουμε να συλλέξουμε και να αναλύσουμε περαιτέρω τις μετρήσεις θα πρέπει να παραμετροποιήσουμε το σύστημα και αυτό επιτυγχάνεται μέσω του Acquisition Setup Menu. Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή απόδοση του συστήματος θα πρέπει να πραγματοποιήσουμε μια σειρά από ρυθμίσεις όπως:

Στην καρτέλα AE Channel Setup του AE Hardware Setup της PCI-2 κάρτας, επιλέγουμε την ενεργοποίηση των 6 καναλιών, την προενίσχυση που έχουν, όπως επίσης και το κατώφλι (threshold) πάνω από το οποίο θα καταγράφονται τα χτυπήματα (hits). Επίσης ρυθμίζουμε τις τιμές του αναλογικού φίλτρου (20kHz – 1MHz) , το ρυθμό δειγματοληψίας, το μήκος σε byte (length) ή το χρόνο σε ms πριν την ενεργοποίηση (pre-trigger time) για την καταγραφή των κυματομορφών σε κάθε hit.

Στην καρτέλα AE Timing parameters του AE Hardware Setup της κάρτας PCI-2 είναι δυνατό να ενεργοποιήσουμε-απενεργοποιήσουμε τα κανάλια και να διαμορφώσουμε τα Peak Definition Time (PDT), Hit Definition Time (HDT) και Hit Lockout Time (HLT). Η διαμόρφωση των τιμών αυτών των παραμέτρων είναι βασική ώστε το σύστημα, κάνοντας χρήση κυλιόμενων παραθύρων, των οποίων η διάρκεια προκαθορίζεται από τον χρήστη, να είναι σε θέση να εντοπίσει την κορυφή και το τέλος της κυματομορφής χωρίς να λαμβάνει υπόψη πιθανές σκεδάσεις και ανακλάσεις που εμφανίζονται στην ουρά της κυματομορφής.

Στην καρτέλα Data Sets/Parametrics του AE Hardware Setup της κάρτας PCI-2 είναι δυνατή η επιλογή από τον χρήστη ποιων παραμέτρων του ακουστικού σήματος θέλει να λαμβάνει (π.χ. πλάτος, ενέργεια κ.α.). Υπάρχουν δύο σετ δεδομένων. Το πρώτο αποτελείται από τα δεδομένα που καταγράφονται όταν ανιχνευτεί, βάσει του threshold, ένα hit. Το δεύτερο αποτελείται από τα δεδομένα που καταγράφονται συνεχώς ανεξάρτητα από το αν έχει γίνει ή όχι ένα hit. Η μέγιστη δειγματοληψία στην τελευταία περίπτωση είναι κάθε 1ms ενώ μπορούν να καταγράφονται οι παράμετροι RMS, ASL, threshold και απόλυτη ενέργεια.

Στην καρτέλα Parametric Setup του AE Hardware Setup της κάρτας PCI-2 είναι δυνατή η βαθμονόμηση των παραμετρικών εισόδων, των οποίων κάνουμε χρήση για την καταγραφή αναλογικών σημάτων από άλλους αισθητήρες.

## 5.6 Το λογισμικό NOESIS

Το λογισμικό NOESIS χρησιμοποιείται για την παρουσίαση και ανάλυση των δεδομένων των ακουστικών εκπομπών, έχοντας παράλληλα τη δαναγνώρισης προτύπων με χρήση νευρωνικών δικτύων.



Τα δεδομένα εισάγονται ως αρχεία τύπου .dta (δεδομένα του AEWIn) όπου υπάρχει η δυνατότητα φόρτωσης των κυματομορφών που καταγράφονται σε κάθε hit AE. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα δημιουργίας ενός μεγάλου αριθμού γραφημάτων απεικόνισης των hit based AE data και των time driven data καθώς και γραφημάτων συσχετισμού τους. Προκειμένου ο χρήστης να μπορεί να εστιάσει στην ανάλυση των δεδομένων που έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (π.χ. διάρκεια, πλάτος, κ.α.), είναι δυνατή η δημιουργία κλάσεων οι οποίες επιτρέπει επιλεκτικά την απομόνωση των δεδομένων βάσει προκαθορισμένων, από τον χρήστη, κριτηρίων. Επιπλέον το NOESIS διαθέτει εργαλεία φασματικής ανάλυσης των κυματομορφών (FFT, power spectrum, wavelet analysis, κ.ά.)

### 5.7 Τοποθέτηση αισθητήρων

Το δοκίμιο πρόκειται για μία κυλινδρική ράβδο χάλυβα (χάλυβας 4142 ή σε DIN 1.7225 σε βελτιωμένη μορφή 42CrMo4) μήκους 19 cm και διαμέτρου 18mm με εγκοπή δεξιά και αριστερά μήκους 2 cm, ώστε να είναι δυνατή η έδραση των αισθητήρων της ακουστικής εκπομπής. Η διάμετρος στην εγκοπή μειώθηκε κατά 1/3 της αρχικής διαμέτρου (12mm). Η τοποθέτηση των αισθητήρων γίνεται στις ειδικά διαμορφωμένες εγκοπές των άκρων της ράβδου.



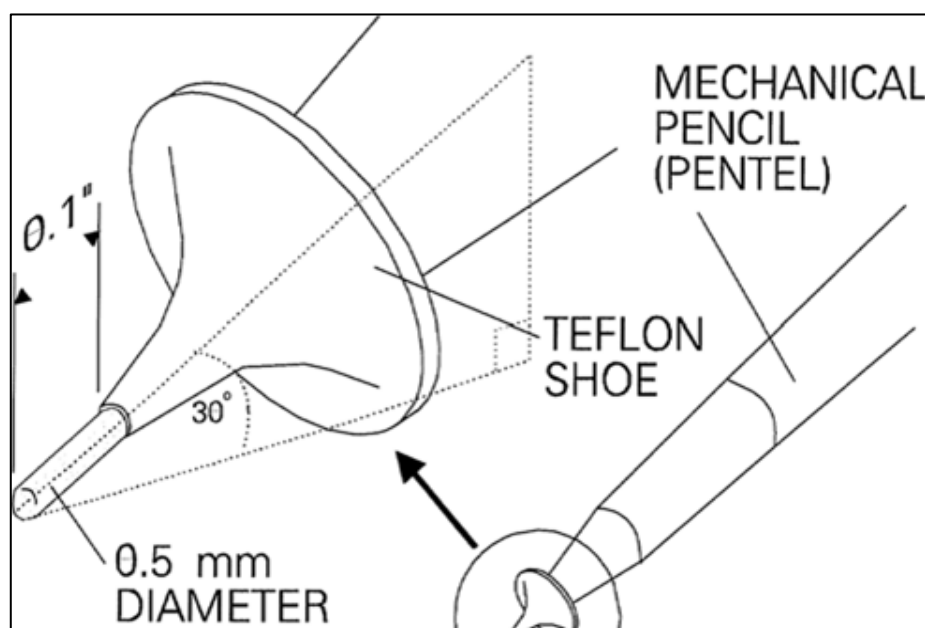
Σχήμα 5.7 Δοκίμιο, ράβδος χάλυβα

Λόγω του ότι οι αισθητήρες βρίσκονται σε επαφή με την κατασκευή, απαιτείται κατάλληλο μέσο σύζευξης μεταξύ των επιφανειών του αισθητήρα και της κατασκευής, διαφορετικά δε θα είναι δυνατό είτε να καταγραφούν οι κυματομορφές είτε να παρουσιαστούν μεγάλα σφάλματα στις μετρήσεις. Το χρησιμοποιούμενο μέσο σύζευξης αισθητήρα-κατασκευής, αλλά και ο τρόπος στήριξης του αισθητήρα σε αυτό, παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην αξιοπιστία των πειραμάτων. Η επιφάνεια έδρασης των αισθητήρων πρέπει να είναι όσο είναι δυνατό λεία και καθαρή. Το μέσο έδρασης θα πρέπει να είναι στερεό και ελαφρύ. Η ποσότητα του μέσου σύζευξης που τοποθετείται πρέπει να καλύπτει την επιφάνεια του αισθητήρα με ένα λεπτό στρώμα. Τότε ο αισθητήρας τοποθετείται στην επιφάνεια του δοκιμίου και πιέζεται για να βελτιστοποιηθεί η επαφή του. Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι R15 και τοποθετήθηκαν σε κατακόρυφη θέση και η σύζευξή τους με την επιφάνεια της ράβδου η πραγματοποιήθηκε με την χρήση μελιού. Επειδή τα πειράματα επαναλήφθηκαν πολλές φορές και υπήρχε κίνδυνος αποκόλλησης του αισθητήρα από τη ράβδο, χρησιμοποιήθηκαν σφιγκτήρες με τους οποίους οι αισθητήρες στερεωνόταν στη ράβδο.

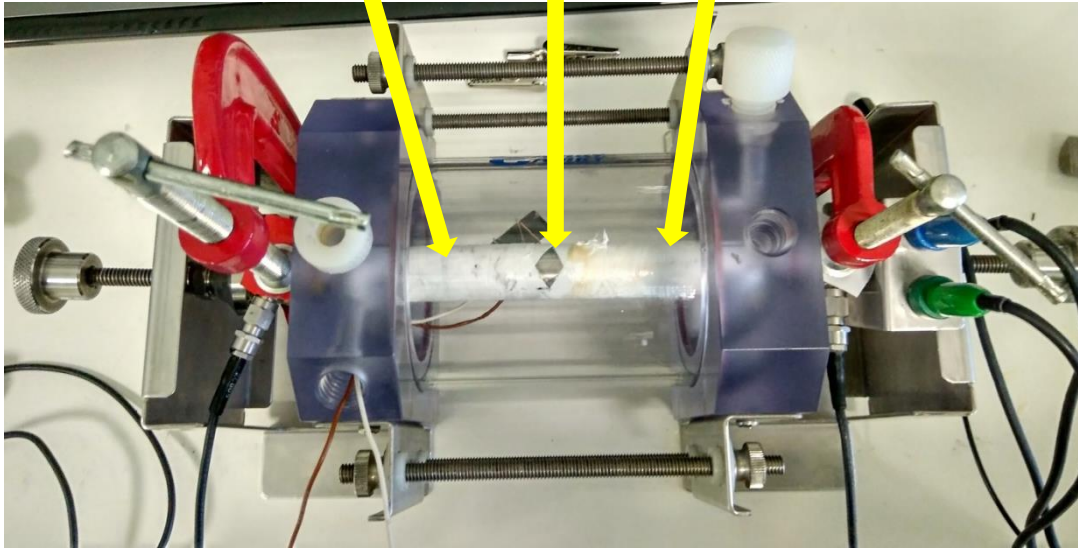
## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> : Πειραματική διαδικασία και αποτελέσματα

### 6.1 Δοκιμή σπασίματος μύτης μολυβιού ( lead pencil break test)

Κατά το πρότυπο ASTM-E976, πηγές ΑΕ προσομοιώνονται από σπασίματα μύτης μολυβιού στην επιφάνεια των υπό εξέταση δοκιμίων, με στόχο να διαπιστωθεί ότι οι χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες έχουν τοποθετηθεί σωστά και ανιχνεύουν τα σήματα ΑΕ. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί έναν εύκολο και φθινό τρόπο απόδειξης της σωστής τοποθέτησης των αισθητήρων και της καλής λειτουργίας τους. Ο παλμός που παράγεται, σε αυτή την περίπτωση, έχει μικρή διάρκεια και καλή επαναληψιμότητα. Αυτή η τυποποιημένη δοκιμή περιλαμβάνει το σπάσιμο μυτών μηχανικού μολυβιού πάχους 0.5mm σκληρότητας 2H και μήκους 3mm στην επιφάνεια των δοκιμίων και ανάμεσα από τους αισθητήρες, προκειμένου να διαπιστωθεί η καταγραφή σημάτων των ΑΕ από όλους τους αισθητήρες και ότι λαμβάνονται σήματα από όλες τις περιοχές του υλικού. Το μηχανικό μολύβι είναι εφοδιασμένο με ειδικό κάλυμμα (Nielsen shoe) προκειμένου να εξασφαλίζει πάντα σταθερή γωνία σπασίματος της μύτης (30°) και να διασφαλίζει ότι η μεταλλική άκρη του μολυβιού δε θα ακουμπήσει κατά το σπάσιμο της μύτης στην επιφάνεια του δοκιμίου παράγοντας έτσι επιπλέον ακουστικά σήματα.



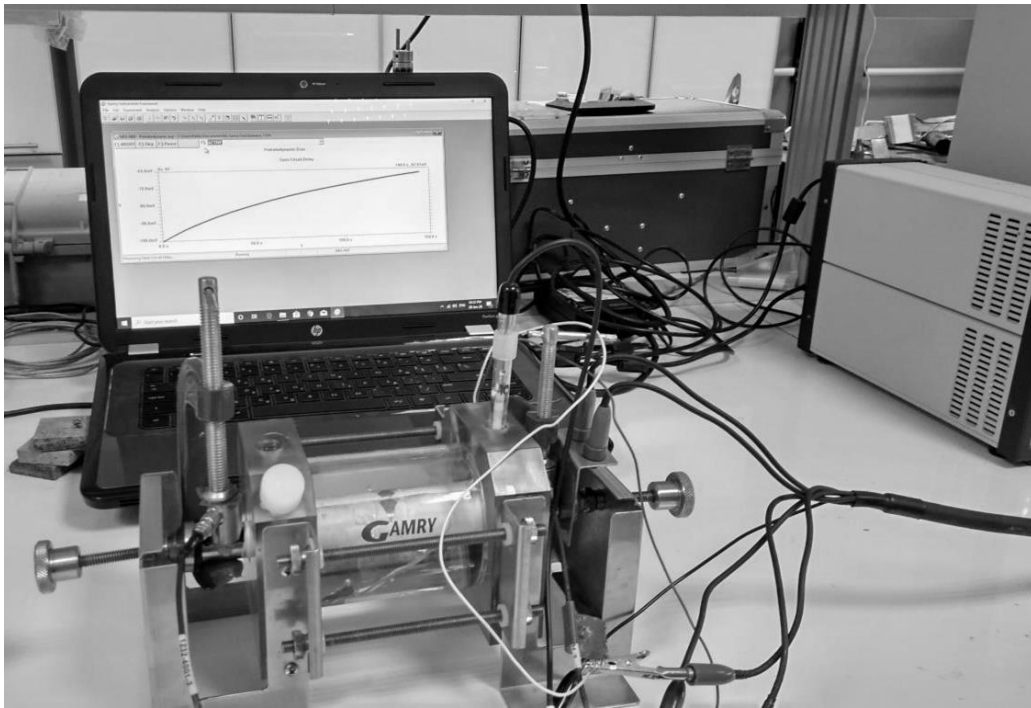
Σχήμα 6.1 Πηγή ΑΕ Hsu-Nielson



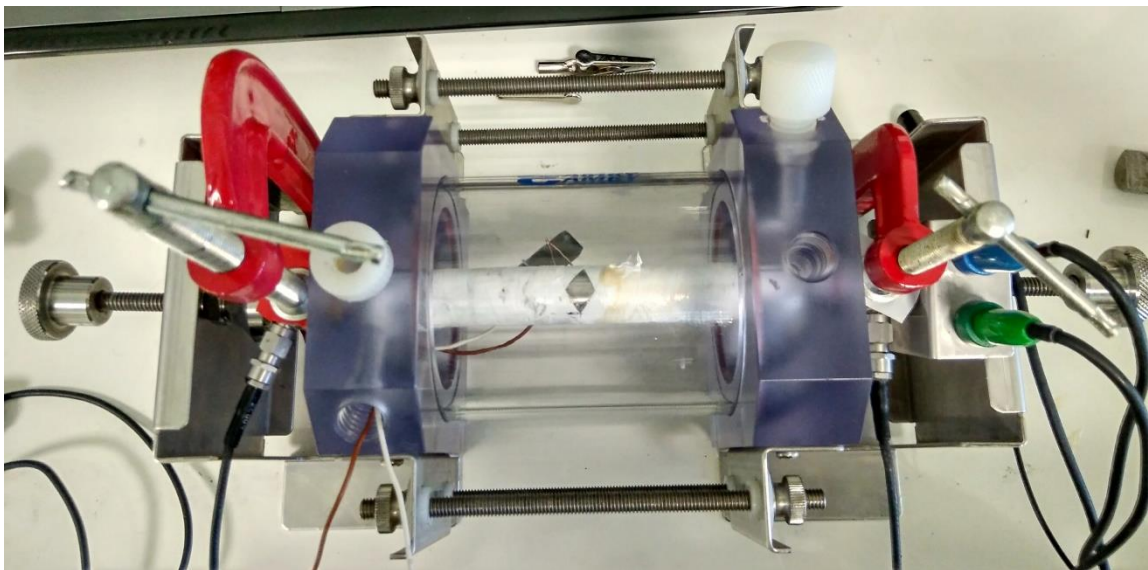
**Σχήμα 6.2** Δοκίμιο στο οποίο πραγματοποιήθηκε η δοκιμή σπασίματος μύτης μολυβιού ( με τα βέλη σημειώνονται οι θέσεις σπασιμάτων)

## **6.2 Ηλεκτροχημική (ποτενσιοδυναμική) διάβρωση**

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, στη ράβδο χάλυβα εφαρμόστηκε διάταξη ηλεκτροχημικής και συγκεκριμένα ποτενσιοδυναμικής διάβρωσης προκειμένου να αναπτυχθούν διαβρωτικές κοιλότητες στην επιφάνεια της ράβδου. Συγκεκριμένα η ράβδος χάλυβα επικαλύφθηκε με ένα καθαρό διαφανές βερνίκι νυχιών, εκτός από ένα τμήμα της σε σχήμα ρόμβου και επιφάνειας  $1 \text{ cm}^2$  στο μέσο της ράβδου . Παρέμεινε σε θερμοκρασία δωματίου προκειμένου να στεγνώσει το βερνίκι και να εξασφαλιστεί η στεγανότητα της επίστρωσης και στη συνέχεια επικαλύφθηκε με ταινία στεγανοποίησης PTFE (ταινία Teflon), προκειμένου να προστατευτεί η υπόλοιπη επιφάνεια από την επίδραση του διαβρωτικού περιβάλλοντος . Στη συνέχεια η ράβδος τοποθετήθηκε σε ηλεκτροχημικό κελί τριών ηλεκτροδίων τύπου Gamry Instruments Reference 600, όπου ηλεκτρόδιο αναφοράς αποτελεί ένα ηλεκτρόδιο καλομέλανος ενώ ως ηλεκτρόδιο αντίθετης πόλωσης χρησιμοποιήθηκε ένα στοιχείο γραφίτη.



**Σχήμα 6.3** Εργαστηριακός εξοπλισμός ποτενσιοδυναμικής διάβρωσης



**Σχήμα 6.4** Φωτογραφική απεικόνιση της επιφάνειας που υπόκειται σε ποτενσιοδυναμική διάβρωση

Στα πλαίσια των διαβρωτικών δοκιμών εφαρμόστηκαν διάφορες συνθήκες διάβρωσης, όμως, λόγω περιορισμού στον αριθμό των διαθέσιμων δοκιμίων εφαρμόστηκαν μόνο οι δύο ακόλουθες συνθήκες διάβρωσης.

**Πίνακας 6.1 Τιμές των παραμέτρων των εφαρμοσμένων συνθηκών διάβρωσης**

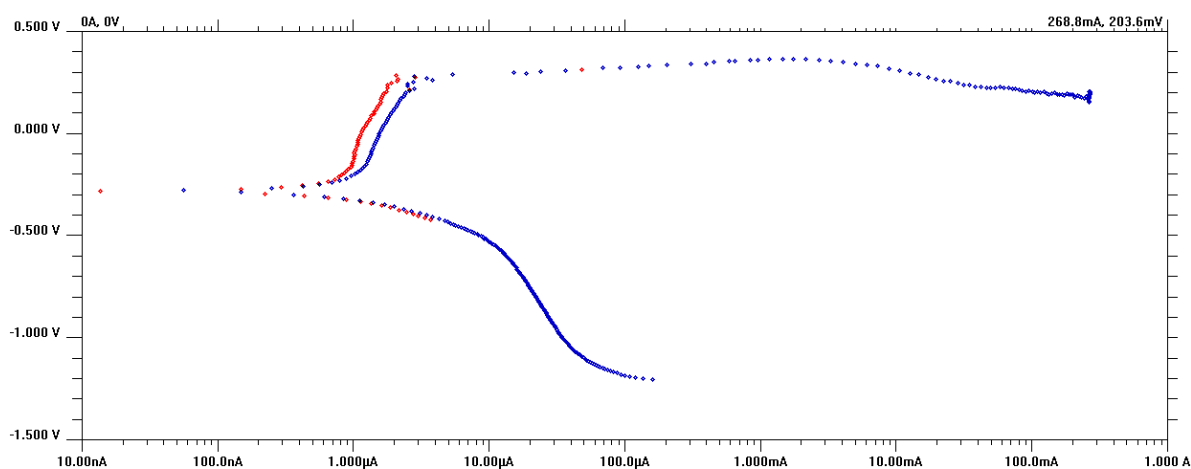
Βαθμός Διάβρωσης	$E_{init}$ (Volt)	$E_{final}$ (Volt)	SR (mV/sec)
Χαμηλός	-0,5	0,5	0,5
Υψηλός	-1	1	1

Τέλος, ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιήθηκε απιονισμένο νερό με την προσθήκη 0.6% κ.β. και 3.5 % κ.β. NaCl, προκειμένου να κλείσει το ηλεκτρικό κύκλωμα διάβρωσης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου.

Μετά το στάδιο διάβρωσης τα δοκίμια καθαρίστηκαν με ασετόν και οινόπνευμα προκειμένου να απομακρυνθεί το παραμένον βερνίκι νυχιών ενώ στη συνέχεια παρατηρήθηκαν οι σχηματιζόμενες διαβρωμένες περιοχές. Στη συνέχεια ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία μόνωσης της ράβδου και επαναλήφθηκε το πείραμα επιλέγοντας ως επιφάνεια διάβρωσης, ένα τμήμα της, ρομβοειδούς σχήματος, επιφάνειας  $1 \text{ cm}^2$  στο πάνω δεξί άκρο της. Επισημαίνεται ότι η επιλογή της επιφάνειας που θα υποστεί διάβρωση επιλέχθηκε στο άνω μέρος της ράβδου προκειμένου να μειωθούν οι πιθανότητες επίδρασης, στις μετρήσεις AE, των φυσαλίδων που παράγονται λόγω της γεωμετρίας της διάταξης.

### 6.3 Ποτενσιοδυναμική καμπύλη

Οι μετρήσεις που έγιναν παρουσιάζονται σε διαγράμματα, όπου στον άξονα x έχουμε την ένταση του ρεύματος και στον άξονα y το δυναμικό.



**Σχήμα 6.5 Ποτενσιοδυναμική καμπύλη για ράβδο χάλυβα σε διάλυμα 3,5% NaCl**



Στο διάγραμμα 6.5, παρουσιάζεται μία χαρακτηριστική ποτενσιομετρική καμπύλη της ράβδου του χάλυβα σε διάλυμα 3,5% NaCl. Το δυναμικό ισορροπίας είναι  $E_{OC} = -0.298 \text{ V}$ . Κάτω από το δυναμικό ισορροπίας διακρίνεται η καθοδική καμπύλη. Στην κάθοδο διακρίνονται τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή είναι αυτή αμέσως μετά τη μείωση δυναμικού από την τιμή ισορροπίας, η οποία οφείλεται στην πόλωση ενεργοποίησης. Στη συνέχεια συναντάμε την περιοχή πόλωσης συγκέντρωσης, όπου το ρεύμα πλησιάζει σε μία κρίσιμη τιμή  $I_t$ , όπου το δυναμικό συνεχίζει να πέφτει απότομα. Τέλος, παρατηρείται μια μεταβατική περιοχή όπου η τιμή του ρεύματος αρχίζει να αυξάνεται ενώ το δυναμικό μειώνεται. Η καμπύλη πάνω από το δυναμικό ισορροπίας είναι η ανοδική καμπύλη. Είναι διακριτές τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή ξεκινάει με την αύξηση του δυναμικού από την τιμή ισορροπίας και αποτελεί την ενεργή περιοχή, όπου ξεκινάει η διάβρωση του μετάλλου έως το πρώτο «σκαλοπάτι» που διακρίνεται στην καμπύλη. Αυτό οφείλεται σε αστοχία του επιφανειακού φιλμ που πήγε να δημιουργηθεί. Στη δεύτερη περιοχή, η τιμή του ρεύματος συνεχίζει να αυξάνεται, που σημαίνει ότι υπάρχει διάβρωση μέχρι που μειώνεται λίγο και παραμένει σταθερή για ένα μικρό διάστημα το οποίο είναι ένδειξη παθητικοποίησης και αυτή είναι η παθητική περιοχή. Στη συνέχεια το ρεύμα συνεχίζει να αυξάνεται ενώ το δυναμικό παραμένει σχεδόν σταθερό. Αυτή είναι η μεταπαθητική περιοχή.

#### 6.4 Πειραματικές δοκιμές

Η συμπεριφορά στη διάβρωση το χάλυβα μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της μη καταστροφικής μεθόδου της ΑΕ με παράλληλη εφαρμογή ηλεκτροχημικής διάβρωσης. Μέχρι σήμερα, υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός ερευνών σχετικά με τη μελέτη της διάβρωσης του χάλυβα με ΑΕ και ταυτόχρονη εφαρμογή ποτενσιοδυναμικής διάβρωσης.

Ενδεικτικά οι Junlei Tang, Junyang Li, Hu Wang, Yingying Wang, Geng Chen (2019) [44] εφάρμοσαν την τεχνική της ακουστικής εκπομπής (ΑΕ) για την παρακολούθηση της διάβρωσης του ανθρακούχου χάλυβα σε διαλύματα  $\text{NaHCO}_3 + \text{NaCl}$ . Κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης ΑΕ πραγματοποιήθηκε η μέτρηση του δυναμικού ανοικτού κυκλώματος (OCP) και η επιτόπια καταγραφή της μορφολογίας της διάβρωσης με τη χρήση οπτικού μικροσκοπίου.

Τα δοκίμια του ανθρακούχου χάλυβα που εξετάστηκαν, κόπηκαν από φύλλο χάλυβα ψυχρής έλασης πάχους 2 mm και επικαλύφθηκαν με παρέμβυσμα σιλικόνης ανθεκτικό σε υψηλές θερμοκρασίες για να διατηρηθεί η εκτεθειμένη επιφάνεια στα 15 mm × 15 mm. Τα δοκίμια λειαινόνταν σταδιακά με χαρτί καρβιδίου πυριτίου με κόκκους 180 έως 1000. Στη συνέχεια, ξεπλύθηκαν με απιονισμένο νερό και ακετόνη και στεγνώθηκαν και αποθηκεύτηκαν πριν από τη χρήση. Το διάλυμα διάβρωσης αποτελούνταν από 2000 mg/L  $\text{NaHCO}_3$  παρουσία

διαφορετικών συγκεντρώσεων NaCl, που κυμαίνονταν από 500 mg/L έως 1200 mg/L. Το κατώφλι ορίστηκε σταθερό στα 27dB. Η τιμή του pH και η θερμοκρασία που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα διάβρωσης ήταν 6,7 και 25°C, αντίστοιχα.

Επιπλέον οι Jian Xu, Xinqiang Wu, En-Hou Han (2011) [45] μελέτησαν τη συμπεριφορά της ακουστικής εκπομπής (AE) κατά την ηλεκτροχημική διάβρωση του ανοξείδωτου χάλυβα 304 (304SS) σε διαλύματα H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Αναφέρθηκαν επίσης οι κύριοι μηχανισμοί των πηγών AE που είναι η μεταβατική διάλυση και η εξέλιξη φυσαλίδων υδρογόνου. Συγκεκριμένα διαπιστώθηκε ότι τα σήματα AE που σχετίζονται με τη διαπερατή διάλυση ανιχνεύονται σε διαλύματα με χαμηλό pH και επηρεάζονται πολύ λίγο από την πυκνότητα ρεύματος και την προένταση. Κατά τη διάρκεια της εξέλιξης φυσαλίδων υδρογόνου, υπάρχει ασθενής συσχέτιση μεταξύ του πλάτους του σήματος AE και της διαμέτρου της φυσαλίδας υδρογόνου. Τα δοκίμια κόπηκαν από πλάκα AISI 304SS η οποία θερμάνθηκε σε διάλυμα για 0,5 ώρες στους 1050 °C και αποσβέστηκε σε νερό. Ορισμένα είδη προεντάθηκαν στο 30% και 50% αντίστοιχα μέσω δοκιμών εφελκυσμού.

Το δοκίμιο βυθίστηκε στον ηλεκτρολύτη και η βυθισμένη επιφάνεια ήταν 6 cm<sup>2</sup>. Όλα τα πειράματα διεξήχθησαν σε θερμοκρασία δωματίου σε διαλύματα Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,25 mol/L με διάφορες συγκεντρώσεις H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Το κατώφλι ορίστηκε στα 25 dB. Για τις δοκιμές πόλωσης χρησιμοποιήθηκαν ένα ηλεκτρόδιο αντιρροής Pt και ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς κορεσμένου καλομέλανα (SCE). Όταν το δοκίμιο (ηλεκτρόδιο εργασίας) πολώνεται ανοδικά, το αντίθετο ηλεκτρόδιο πολώνεται καθοδικά. Στο ηλεκτρόδιο αντιρροής μπορούν να δημιουργηθούν φυσαλίδες υδρογόνου οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν το δείγμα εάν δύο ηλεκτρόδια τοποθετηθούν σε ένα κελί διάβρωσης. Χρησιμοποιήθηκαν δύο κελιά διάβρωσης συνδεδεμένα με μια γέφυρα άλατος. Οι καμπύλες ανοδικής και καθοδικής πόλωσης μετρήθηκαν χωριστά από το δυναμικό ανοικτού ρεύματος (OCP) μετά από 10 λεπτά εμβάπτισης στον ηλεκτρολύτη. Επίσης τα δοκίμια πολώθηκαν ανοδικά σε προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά της AE κατά τη διάρκεια της διεργασίας της μεταβατικής διάλυσης. Έπειτα σχεδιάστηκε ένα ειδικό πείραμα για τη διερεύνηση της διαδικασίας εξέλιξης των φυσαλίδων υδρογόνου. Η πειραματική συσκευή ήταν παρόμοια με την προαναφερθείσα, εκτός από το ότι το δοκίμιο ήταν μεγαλύτερο από το προηγούμενο για να συνδεθεί ο μετατροπέας απευθείας πάνω του και σφραγίστηκε με κερί αναμεμειγμένο με ρητίνη. Η εκτεθειμένη περιοχή στο διάλυμα ήταν 2 mm x 1 mm περίπου, η οποία μπορούσε να απεικονιστεί ολόκληρη από ένα μικροσκόπιο μεγάλης απόστασης. Αυτό επέτρεψε τη λεπτομερή μελέτη των φυσαλίδων υδρογόνου και, ως εκ τούτου, δημιούργησε μια άμεση σύνδεση μεταξύ της εξέλιξης των φυσαλίδων υδρογόνου και των σημάτων AE. Το δοκίμιο



ήταν καθοδικά πολωμένο από το δυναμικό ανοικτού ρεύματος (OCP) έπειτα από 0 λεπτά εμβάπτισης σε διάλυμα 0,05 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Το κατώφλι AE ορίστηκε στα 30 dB.

Τέλος οι Volodymyr Kietov, Marcel Mandel, Lutz Krüger (2019) [46] μελέτησαν τη συμπεριφορά διάβρωσης ενός χυτοχάλυβα υψηλού κράματος αναλύεται σε διάλυμα γλωριούχου νατρίου με συνδυασμό της τεχνικής ηλεκτροχημικού θορύβου και της μεθόδου ακουστικής εκπομπής (AE).

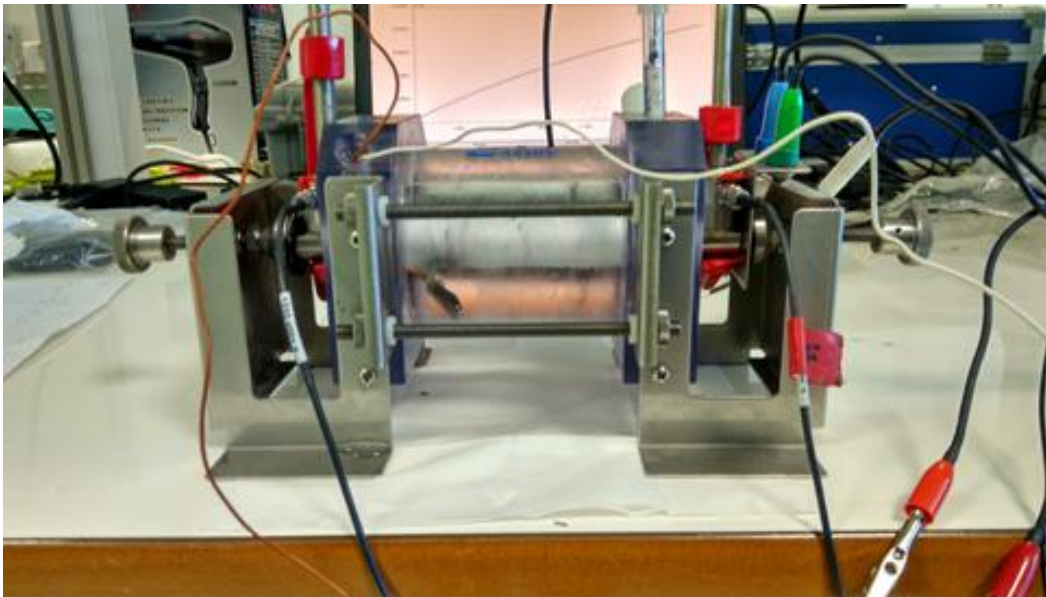
Για τις ηλεκτροχημική και ακουστική μεθόδους, χρησιμοποιήθηκαν δύο πανομοιότυπα πλακοειδή δοκίμια του υψηλής περιεκτικότητας σε κράμα οστενιτικού χυτοχάλυβα πάχους 3 mm. Ο χάλυβας χρησιμοποιήθηκε στην αρχική του κατάσταση, χωρίς να υποστεί πρόσθετη θερμική επεξεργασία. Για τη δοκιμή της ηλεκτροχημικής διάβρωσης, τα δείγματα λειάνθηκαν και γυαλίστηκαν μέχρι 1 μm, και στη συνέχεια πλύθηκαν με νερό και αιθανόλη και ξηράνθηκαν. Για τη μέτρηση της μεθόδου ηλεκτροχημικού θορύβου (EN) χρησιμοποιήθηκε η συμβατική διάταξη τριών ηλεκτροδίων με δύο δείγματα χάλυβα και το σημείο αναφοράς. Τα δείγματα χάλυβα ήταν παράλληλα τοποθετημένα στην κυψέλη διάβρωσης με απόσταση d=54 mm και εκτέθηκαν σε 5 κ.β. % διάλυμα γλωριούχου νατρίου σε θερμοκρασία δωματίου. Οι επιφάνειες των δοκιμίων που εκτέθηκαν στο μέσο ήταν 0,985 cm<sup>2</sup> για κάθε δοκίμιο και λειτούργησαν ως ηλεκτρόδια εργασίας. Ένα κορεσμένο ηλεκτρόδιο Ag/AgCl χρησίμευσε ως ηλεκτρόδιο αναφοράς και τοποθετήθηκε κεντρικά μεταξύ των χαλύβδινων δοκιμίων. Για τη δοκιμή της ακουστικής εκπομπής το κατώφλι ορίστηκε στα 30dB. Οι ηλεκτροχημικές και οι ακουστικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονα και ο χρόνος χρησιμοποιήθηκε ως κοινός άξονας για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών γεγονότων διάβρωσης. Κάθε μέτρηση διεξήχθη με νέα γυαλισμένη επιφάνεια των δοκιμίων, προκειμένου να διασφαλιστεί η ίδια κατάσταση για κάθε δοκιμή. Τέλος, η μεγαλύτερη δοκιμή είχε διάρκεια 70 ώρες και μετά το τέλος της δοκιμής τα χαρακτηριστικά στάδια στο αρχείο EN συσχετίστηκαν με το σήμα AE.

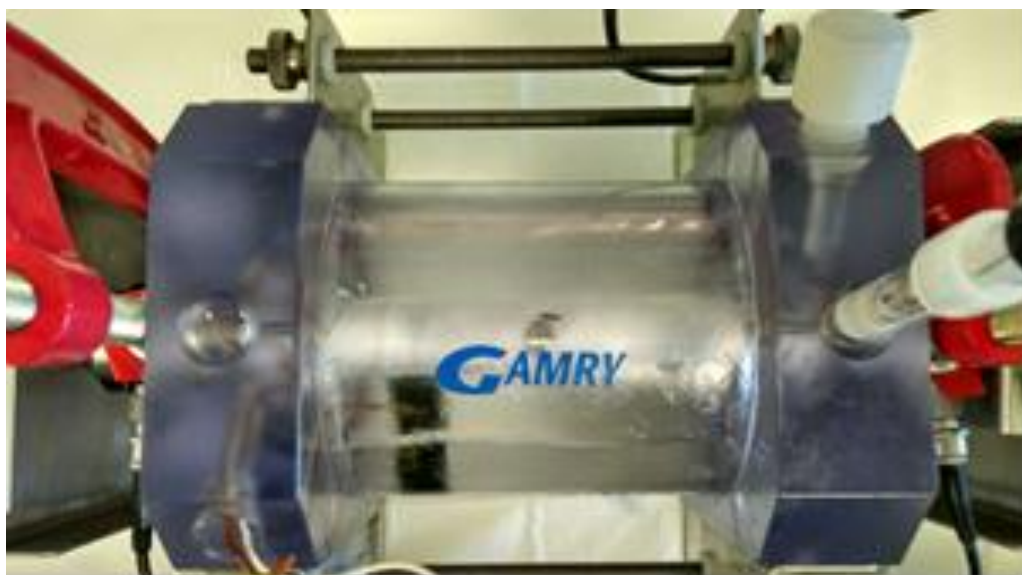
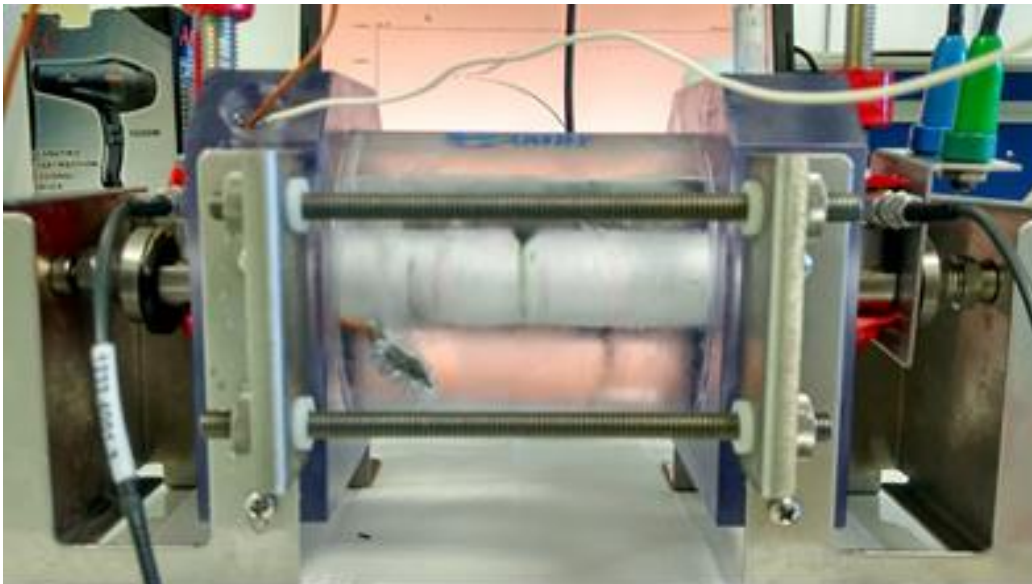
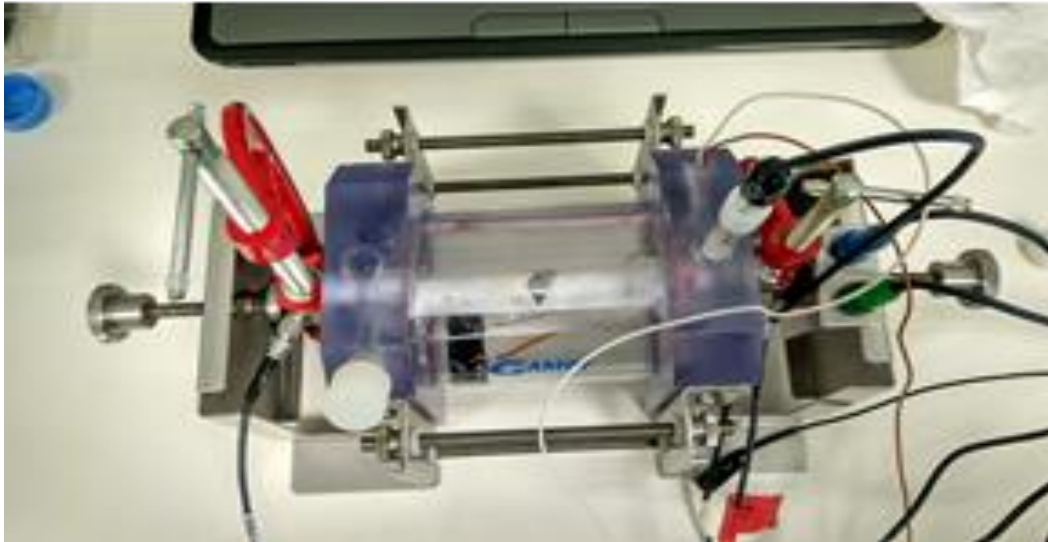
Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκε, για τον προσδιορισμό της διάβρωσης του χάλυβα, συνδυασμός της ακουστικής εκπομπής και της ποτενσιοδυναμικής διάβρωσης, οι οποίες μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν ταυτόχρονα. Η ποτενσιοδυναμική διάβρωση, όπως περιγράφηκε παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να επιταχυνθεί και να επιτευχθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα η διάβρωση του χάλυβα.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες παραγράφους, η διαδικασία διάβρωσης πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία δωματίου με τη μέθοδο της ποτενσιοδυναμικής μεθόδου. Οι δοκιμές διάβρωσης πραγματοποιήθηκαν σε διαλύματα NaCl χαμηλής (δηλ. 0,6 % κ.β.) και υψηλής συγκέντρωσης (δηλ. 3,5 % κ.β.). Η τιμή κατωφλίου καθορίστηκε στα 28 dB.

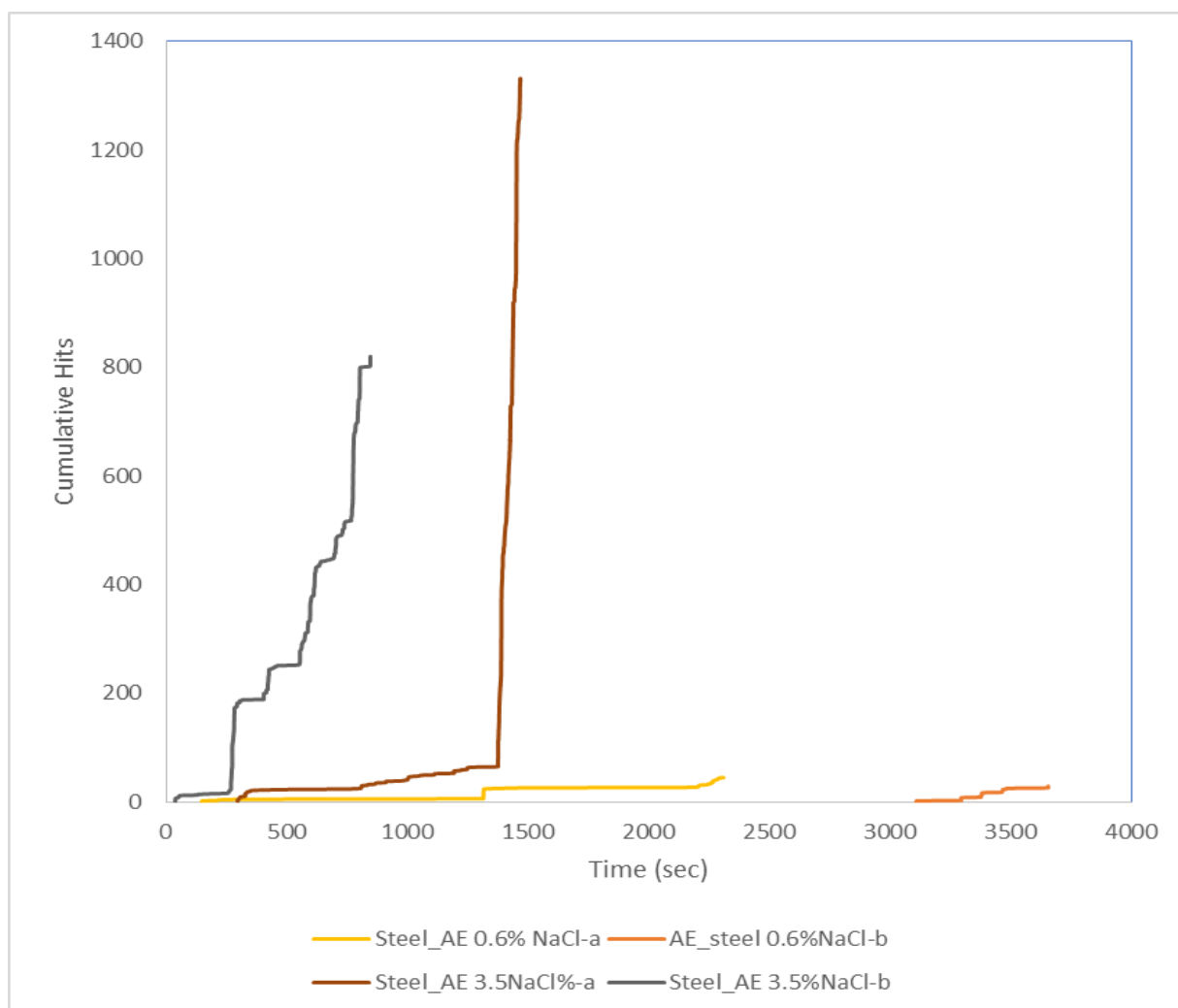
Στην παρούσα εργασία δεν επιχειρήθηκε η άμεση επιτόπια παρατήρηση των φυσαλίδων υδρογόνου. Ωστόσο, είμαστε πολύ βέβαιοι ότι οι φυσαλίδες υδρογόνου εμφανίστηκαν στον πυθμένα ενός pit (λάκκου) κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής του.

Πραγματοποιήθηκε σημαντικός αριθμός δοκιμών και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πιο χαρακτηριστικών δοκιμών.





Σχήμα 6.6 Φωτογραφική απεικόνιση πειραματικής δοκιμής



**Σχήμα 6.7 Καταγραφή με ΑΕ της pitting corrosion χάλυβα με προσθήκη 0.6% και 3.5% NaCl (αθροιστικά hits συναρτήσει του χρόνου)**

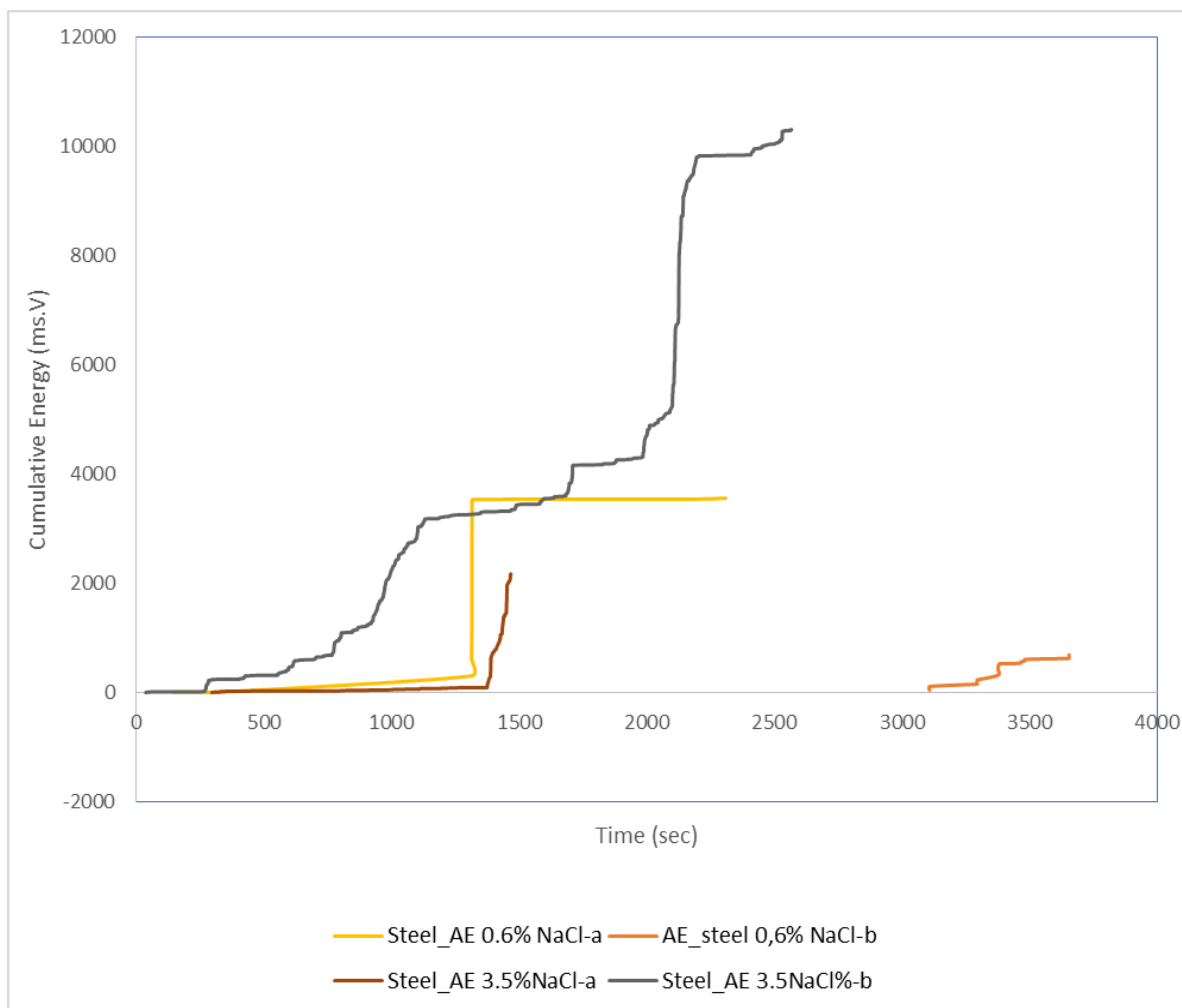
Στο σχήμα 6.7 παρουσιάζεται η επίδραση της συγκέντρωσης NaCl στα αθροιστικά χτυπήματα της ακουστικής εκπομπής. Στη συγκέντρωση των 0.6 % NaCl, τα αθροιστικά χτυπήματα παρέμειναν σε μηδενικό ή πολύ χαμηλό επίπεδο κατά τα πρώτα 1350 s για το πρώτο δείγμα, ενώ το δεύτερο δείγμα άρχισε να παρουσιάζει χτυπήματα 3100 sec, τα οποία συνέχισαν να αυξάνονται για μικρό χρονικό διάστημα, με αργό και σταθερό ρυθμό.. Στο πρώτο δείγμα ,στα 1300 sec, παρουσιάστηκε μια πολύ μικρή και απότομη αύξηση των hits ,γεγονός που υποδηλώνει ότι καταγράφηκε ένα ανεπαίσθητο γεγονός διάβρωσης. Στη συνέχεια τα hits άρχισαν να αυξάνονται ελαφρώς, υποδεικνύοντας ότι τα γεγονότα διάβρωσης που συμβαίνουν σε τέτοιες συγκεντρώσεις NaCl δεν ήταν πολύ αισθητά.

Στο (α) διάλυμα με συγκέντρωση 3.5% NaCl Τα αθροιστικά χτυπήματα αυξάνονται αργά με τον χρόνο, γεγονός που αποδεικνύει την παρουσία διαβρωτικών γεγονότων με ήπιο

ρυθμό. Αυτό συμβαίνει έως τα 1400 sec , όπου παρατηρείται μία απότομη άνοδος των αθροιστικών hits, η οποία θα μπορούσε να αποδοθεί σε διάσπαση της παθητικής μεμβράνης του χάλυβα σε κάποιο pit που είχε αρχίσει να δημιουργείται στην επιφάνειά του [47].

Στο (b) διάλυμα με συγκέντρωση 3.5% NaCl παρουσιάζεται ένας μικρός αριθμός hits κατά τα πρώτα sec, κατόπιν παραμένουν σταθερά έως τα 250 sec, όπου και παρουσιάζεται μία απότομη αύξησή τους, γεγονός που υποδεικνύει διάσπαση της παθητικής μεμβράνης σε μια τοπική περιοχή. Στη συνέχεια παρατηρείται σύντομη σταθεροποίηση των hits με τον χρόνο και κατόπιν εκ νέου μικρή αύξηση με διάσπαση της προστατευτικής μεμβράνης, όπως προηγουμένως. Κατόπιν τα αθροιστικά hits αυξάνονται συνεχώς σε σύντομο χρονικό διάστημα υποδεικνύοντας μία σχετικά σταθερή και σχετικά γρήγορη εξέλιξη της προσβολής από διάβρωση στην επιφάνεια του χάλυβα.

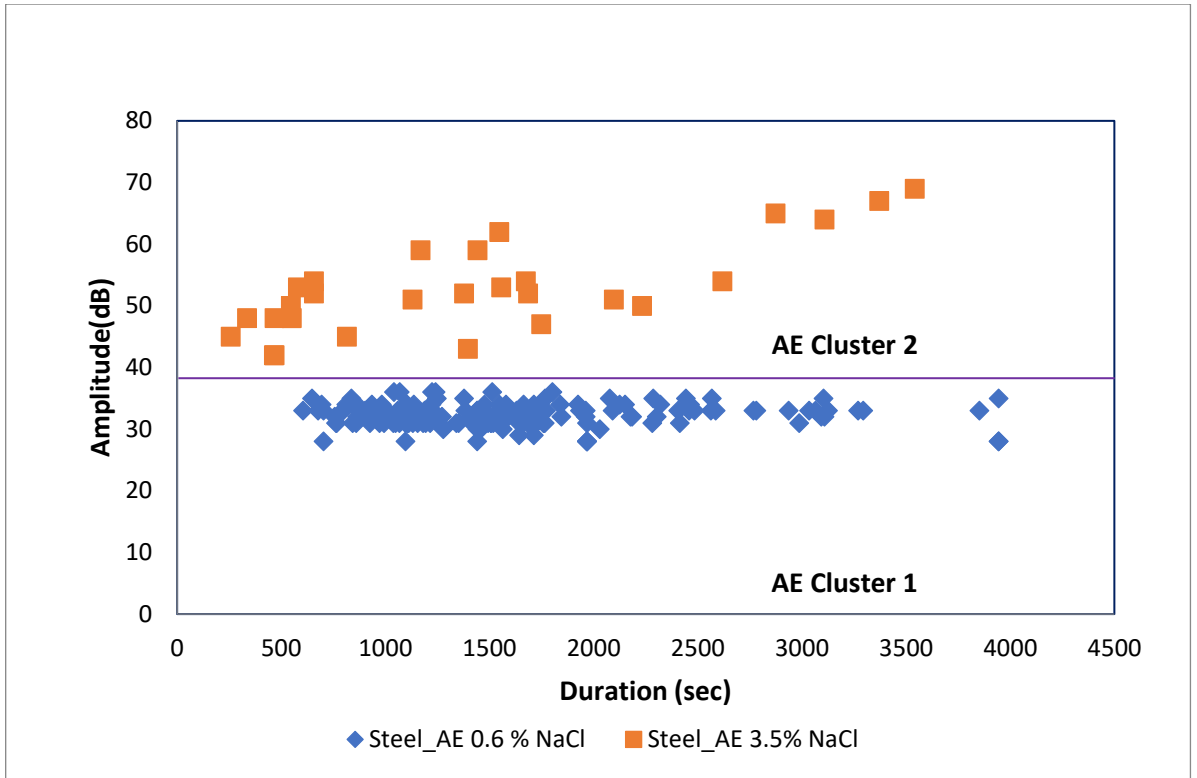
Συμπερασματικά, η αύξηση των αθροιστικών χτυπημάτων αντιπροσωπεύει τα νέα γεγονότα διάβρωσης σε κάθε τοπική περιοχή. Αυτά τα γεγονότα διάβρωσης αναφέρονται σε οποιοδήποτε γεγονός κατά την έναρξη της διάβρωσης, τη διάδοση και τη σταθερή ανάπτυξή της. Ωστόσο, μόνο το πλάτος του σήματος AE αυτών των συμβάντων υπερβαίνει το κατώφλι της διάταξης λήψης AE και μπορεί να ενεργοποιηθεί η καταγραφή δεδομένων AE. Δηλαδή, τα αθροιστικά χτυπήματα AE στο σχήμα 6.7 αυξήθηκαν μόνο για τέτοια γεγονότα διάβρωσης που μπορούν να δημιουργήσουν σήμα AE με πλάτος ίσο ή μεγαλύτερο από 28 dB.



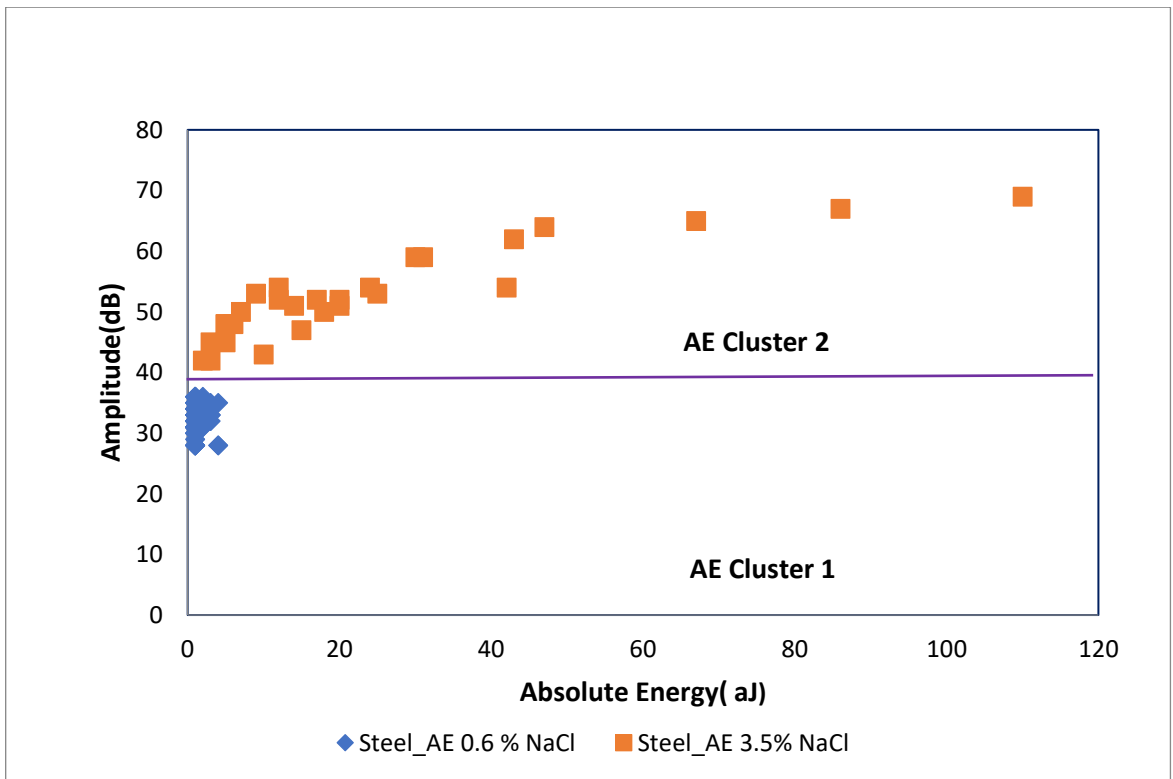
**Σχήμα 6.8 Καταγραφή με ΑΕ της pitting corrosion χάλυβα με προσθήκη 0.6% και 3.5% NaCl ( αθροιστική ενέργεια συναρτήσει του χρόνου)**

Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζονται οι σωρευτικές μεταβολές της ενέργειας κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης της ΑΕ. Βασικά, όσο υψηλότερη είναι η δραστηριότητα των χτυπημάτων ΑΕ, τόσο ταχύτερη είναι η αύξηση της απόλυτης ενέργειας σε σχέση με τα άλλα στάδια των πειραμάτων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [48] [49], αν και τα ενεργητικά σήματα ΑΕ στη διάβρωση αντιστοιχούν συνήθως στη διάδοση και τη διάρρηξη της φυσαλίδας υδρογόνου, ο σχηματισμός και η αποκόλληση προϊόντων διάβρωσης, , εάν υπάρχουν, μπορεί επίσης να δημιουργήσει ενεργητικά σήματα ΑΕ. Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, τα συμβάντα ΑΕ συνδέονται άμεσα με τα φαινόμενα διάβρωσης, όπως η διάσπαση του παθητικού φιλμ, η εξέλιξη του υδρογόνου, η διάδοση των pits κλπ.

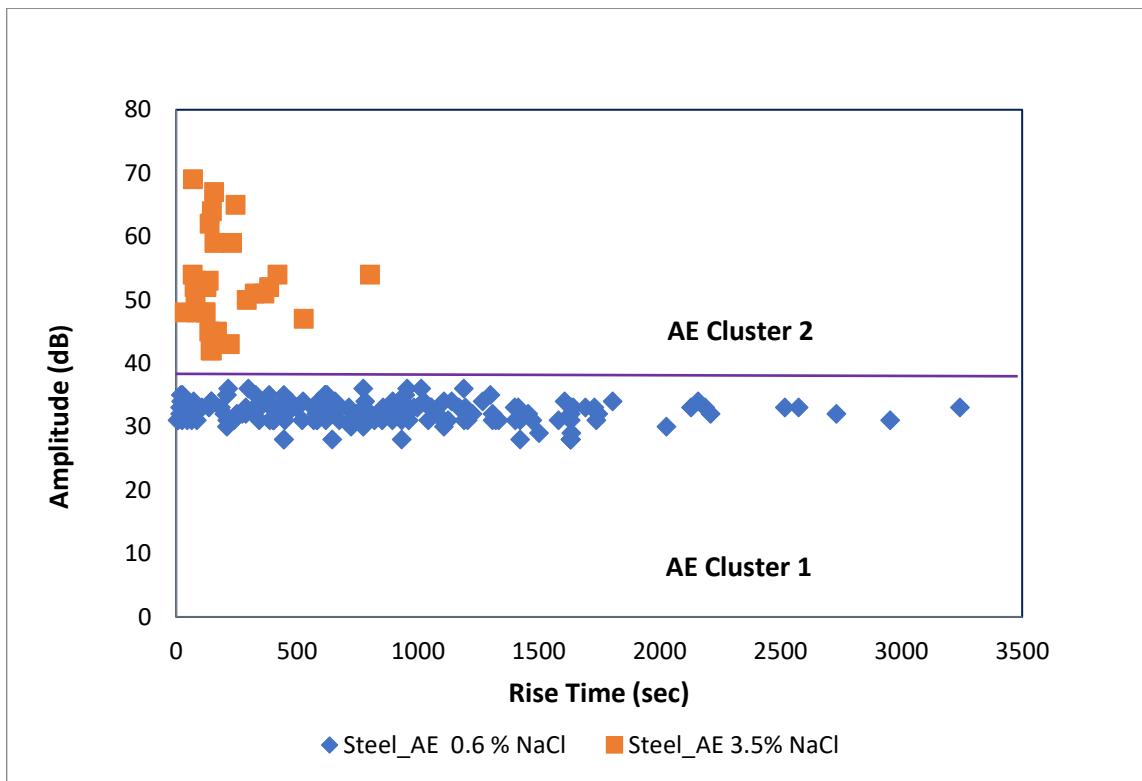
Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζονται διαγράμματα των παραμέτρων ΑΕ, συμπεριλαμβανομένης της διάρκειας, του πλάτους, του Rise Time και της απόλυτης ενέργειας των ανιχνευόμενων σημάτων ΑΕ για τον χάλυβα σε διάλυμα 0.6% και 3.5% κ.β. συγκέντρωσης NaCl.



(a)



(b)



(c)

**Σχήμα 6.9 Διαγράμματα των παραμέτρων AE α) της διάρκειας β) απόλυτης ενέργειας γ) του Rise Time των ανιχνευόμενων σημάτων και του πλάτους AE για τον χάλυβα σε διάλυμα 0.6% και 3.5% κ.β. NaCl.**

Στο σχήμα 6.8 παρουσιάζονται τα πλάτη της ακουστικής εκπομπής (amplitude) όλων των σημάτων που κατεγράφησαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών, σε διάλυμα με 0,6%NaCl και σε διάλυμα 3.5% NaCl. Στην περίπτωση του διαλύματος 0,6% NaCl , όλα τα πλάτη συγκεντρώνονται κάτω από 39 dB, ενώ στην περίπτωση του διαλύματος 3,5 % , NaCl όλα τα πλάτη παρουσιάζουν τιμές μεγαλύτερες των 39 dB. Με βάση την τιμή πλάτους της AE (amplitude), τα σήματα AE μπορούν να ταξινομηθούν σαφώς σε δύο ομάδες: συστάδα χαμηλού πλάτους AE 1 (cluster 1), με χαμηλότερες τιμές Amplitude μεταξύ 28 dB και 39 dB , και τη συστάδα υψηλού πλάτους 2 (cluster 2), με σχετικά υψηλές τιμές Amplitude μεταξύ 40dB και 71dB. Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, παρατηρείται μεγαλύτερο εύρος κυματομορφής για δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε διαλύματα με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση NaCl.

Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα, δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη διαφορά μεταξύ της διάρκειας της AE των σημάτων που εντοπίζονται στις δύο διαφορετικές συστάδες, δηλ για διαλύματα με 0.6% NaCl και για διαλύματα με 3.5% NaCl. Σε ό,τι αφορά τον Rise time των σημάτων, παρατηρείται αξιοσημείωτη διαφορά. Το Rise time των σημάτων της συστάδας 1 είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό που παρουσιάζουν τα σήματα της συστάδας 2. Τέλος σε ό,τι αφορά την απόλυτη ενέργεια, αυτή παρουσιάζει υψηλότερες τιμές για τα



διαλύματα με 3.5% NaC (cluster 2), ενώ διατηρεί χαμηλές τιμές για διαλύματα με συγκέντρωση 0.6% NaC (cluster1).

## *Μέρος IV : Συμπεράσματα & Συζήτηση*

### **Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα και προτάσεις μελλοντικής έρευνας**

Στο τελευταίο μέρος της παρούσας διατριβής παραθέτονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας καθώς γίνεται εξαγωγή και συμπερασμάτων βάση αυτών. Επίσης, αναφέρονται τρόποι βελτίωσης της παρούσας πειραματικής διαδικασίας προκειμένου να αντιμετωπιστούν μελλοντικά οι διάφορες αστοχίες που εντοπίστηκαν ενώ προτείνεται πιθανή κατεύθυνση περαιτέρω έρευνας σχετικά με το παρόν θέμα.

#### **7.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων**

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκε η διάβρωση του χάλυβα ενίσχυσης με τη μη καταστροφική μέθοδο της ακουστικής εκπομπής. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μελέτη, χρησιμοποιήθηκε ως δοκίμιο, κυλινδρική ράβδος χάλυβα (χάλυβας 4142 ή σε DIN 1.7225 σε βελτιωμένη μορφή 42CrMo4) μήκους 19 cm και διαμέτρου 18mm με εγκοπή δεξιά και αριστερά μήκους 2 cm, ώστε να είναι δυνατή η έδραση των αισθητήρων της ακουστικής εκπομπής. Η διάμετρος στην εγκοπή μειώθηκε κατά 1/3 της αρχικής διαμέτρου (12mm). Η τοποθέτηση των αισθητήρων τύπου R15 (50- 400Hz) έγινε στις ειδικά διαμορφωμένες εγκοπές των άκρων της ράβδου. Στην ράβδο χάλυβα εφαρμόστηκε διάταξη ηλεκτροχημικής και συγκεκριμένα ποτενσιοδυναμικής διάβρωσης, προκειμένου να επιτευχθεί η διάβρωση σε σύντομο χρονικό διάστημα καθώς επίσης και να δημιουργηθούν διαβρωτικές κοιλότητες στην επιφάνειά της. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, επιλέχθηκε ως επιφάνεια στην οποία εφαρμόστηκε η διάβρωση, ένα τμήμα σχήματος ρομβοειδούς και επιφάνειας 1 cm<sup>2</sup> στο μέσο της άνω επιφάνειας της ράβδου. Η υπόλοιπη ράβδος επικαλύφθηκε με ένα καθαρό διαφανές βερνίκι νυχιών και παρέμεινε σε θερμοκρασία δωματίου προκειμένου να στεγνώσει το βερνίκι και να εξασφαλιστεί η στεγανότητα της πίστρωσης και στη συνέχεια επικαλύφθηκε με ταινία στεγανοποίησης PTFE (ταινία Teflon), προκειμένου να προστατευτεί από την επίδραση του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Έπειτα η ράβδος τοποθετήθηκε σε ηλεκτροχημικό κελί τριών ηλεκτροδίων τύπου Gamry Instruments Reference 600, όπου ηλεκτρόδιο αναφοράς αποτελεί ένα ηλεκτρόδιο καλομέλανος ενώ ως ηλεκτρόδιο αντίθετης πόλωσης χρησιμοποιήθηκε ένα στοιχείο γραφίτη. Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιήθηκε απιονισμένο νερό με την προσθήκη 0.6% κ.β. και 3.5 % κ.β. NaCl, προκειμένου να κλείσει το ηλεκτρικό κύκλωμα διάβρωσης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία

δωματίου. Παράλληλα με την ποτενσιοδυναμική διάβρωση εφαρμόστηκε και η μέθοδος ΑΕ προκειμένου να εκτιμηθεί το φαινόμενο της διάβρωσης.

Πραγματοποιήθηκε σημαντικός αριθμός δοκιμών αρχικά με συγκέντρωση 0.6% κ.β NaCl, κατόπιν με 3.5 % κ.β. NaCl. Έγιναν δοκιμές με την επιφάνεια προς διάβρωση να βρίσκεται στο άνω μέρος της επιφάνειας της ράβδου, καθώς και στο κάτω μέρος της επιφάνειας της ράβδου. Η δεύτερη επιλογή απορρίφθηκε προκειμένου να μειωθούν οι πιθανότητες επίδρασης, στις μετρήσεις ΑΕ, των φυσαλίδων που παράγονται λόγω της γεωμετρίας της διάταξης. Επίσης στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν επιλέχθηκαν διάφορες τιμές κατωφλίου, από 23 dB- 30 dB, με τελική βέλτιστη επιλογή την τιμή των 28 dB. Για τιμές μεγαλύτερες των 28 dB, ήταν συχνό το φαινόμενο του θορύβου. Κατόπιν έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη διάβρωση του χάλυβα σε διάλυμα με 0.6% κ.β. NaCl και σε διάλυμα με 3.5% κ.β. NaCl όπου διαπιστώθηκε ότι τα γεγονότα διάβρωσης που συμβαίνουν σε διαλύματα με συγκέντρωση 0.6% NaCl δεν είναι πολύ αισθητά, συγκριτικά με τα διαλύματα των 3.5% NaCl. Μελετώντας την ενέργεια σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα σε NaCl προέκυψε ότι όσο υψηλότερη είναι η δραστηριότητα των χτυπημάτων ΑΕ, τόσο ταχύτερη είναι η αύξηση της απόλυτης ενέργειας. Όπως προέκυψε, τα συμβάντα ΑΕ συνδέονται άμεσα με τα φαινόμενα διάβρωσης, όπως η διάσπαση του παθητικού φιλμ, η εξέλιξη του υδρογόνου, η διάδοση των pits κλπ.

Τέλος στα διαγράμματα των παραμέτρων της ΑΕ, ( διάρκεια, πλάτος, amplitude, απόλυτης ενέργειας των σημάτων ΑΕ που ανιχνεύονται), παρατηρείται η ύπαρξη δύο συστάδων (clusters), τη συστάδα χαμηλής ενέργειας 1 και τη συστάδα υψηλής ενέργειας 2.

Εν κατακλείδι, η τεχνική ΑΕ θα μπορούσε να εφαρμοστεί για την επί τόπου παρακολούθηση της διάβρωσης κατασκευών από χάλυβα σε διάφορες βιομηχανίες και για τον οπλισμό χαλύβδινων ράβδων για κατασκευές. Ωστόσο, το κύριο εμπόδιο στη χρήση της παρακολούθησης ΑΕ είναι ο περιβαλλοντικός θόρυβος, ο οποίος δυσχεραίνει την επεξεργασία των δεδομένων.

## 7.2 Προτάσεις μελλοντικής έρευνας

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αστοχίες της παρούσας πειραματικής διαδικασίας, προτείνονται τα εξής:

- Εφαρμογή ειδικού φιλμ διάβρωσης αντί της εφαρμογής βερνικιού νυχιών, προκειμένου να επιτευχθεί ομοιόμορφη προστασία και μόνωση του δοκιμίου κατά την εφαρμογή ηλεκτροχημικής διάβρωσης
- Χρήση μικροσκοπίου για την ακριβή παρατήρηση και προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των αυλάκων που έχουν σχηματιστεί, των πιθανών προϊόντων διάβρωσης που εντοπίζονται σε αυτούς καθώς και οι φυσαλίδες υδρογόνου
- Εφαρμογή ποτενσιοδυναμικής διάβρωσης με επιπλέον διαλύματα με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις NaCl

Επιπλέον, παρατίθενται οι παρακάτω προτάσεις και κατευθύνσεις περαιτέρω έρευνας και μελέτης:

- Σύγκριση της διαφοροποίησης του εύρους των τυπικών κυματομορφών για τις συστάδες χαμηλής και υψηλής ενέργειας που ανιχνεύθηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών σε διαφορετικά διαλύματα .
- Αντιστοίχιση των ανιχνευθέντων σημάτων ΑΕ με τα διάφορα στάδια διάβρωσης, όπως αυτά προκύπτουν από την καμπύλη της ποτενσιοδυναμικής πόλωσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της συσχέτισης της ποτενσιοδυναμικής καμπύλης και της εξέλιξης της αθροιστικής ενέργειας ΑΕ για κάθε συστάδα και κάθε διάλυμα με διαφορετική συγκέντρωση NaCl.

## **Βιβλιογραφία και Σύνδεσμοι**

- [1] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- [2] ΚΕΔΕ, Κ.Τ.Χ. 2008 «Νέος κανονισμός τεχνολογίας χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος» σε ΦΕΚ 1416/Β/17-7-2008 και ΦΕΚ 2113/Β/13-10-2008. Αθήνα, τ. 2008, 2008.
- [3] Γ. Αγναντιάρη, «Τα νέα Πρότυπα του ΕΛΟΤ για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος ( ΕΛΟΤ EN 10080 , ΕΛΟΤ 1421-1 , ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3 )», 2005.
- [4] Αργυρώ Δ. Δρακακάκη « Μελέτη της επίδρασης της βλάβης διάβρωσης στη μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος», Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2017 .
- [5] Δ. Ιωάννου «Μελέτη διάβρωσης οικοδομικού χάλυβα και βελτίωση δομικής ακεραιότητας Κυπριακών κτιρίων», Τεχνολογικό πανεπιστήμιο Κύπρου, Λεμεσός 2013.
- [6] "What is Steel Reinforcement? Types and Properties of Steel Rebars" διαθέσιμο στο: [www.theconstructor.org](http://www.theconstructor.org)
- [7] Πλούταρχος Γιαννόπουλος «Απαιτήσεις για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος κατά τους Ευρωκώδικες 2&8», Ημερίδα ΤΕΕ «Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος» Αθήνα, 2008.
- [8] [www.galvanizeit.org](http://www.galvanizeit.org)
- [9] «Αντιδιαβρωτική προστασία», διαθέσιμο στο: [portal.tee.gr](http://portal.tee.gr) .
- [10] Σ. Τσούλη, Α. Γ. Λεκατου, και Σ. Κλεφτακης, «Μελέτη επιταχυνόμενης διάβρωσης οπλισμένου σκυροδέματος με χάλυβα οπλισμού ανοξείδωτο χάλυβα σε περιβάλλον όξινης βροχής με τη χρήση ιπτάμενης τέφρας ως αναστολέα διάβρωσης Corrosion study of stainless steel concrete reinforcement in acid rain simulating »
- [11] Γ. Μπατής «Χρήση νέων υλικών για την ενίσχυση των κατασκευών» σε Ενίσχυση κτιρίων με σύγχρονα υλικά, Ημερίδα ΤΕΕ, Αθήνα 2007.
- [12] ΣΠΜΕ, «ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (και δόκιμες πρακτικές για να μην επέλθει διάβρωση) » , Νοέμβριος 2016- Έκδοση 1η.
- [13] Α.Ρούτουλας «Υπολογισμός διάρκειας ζωής των κατασκευών από σκυρόδεμα και πειραματική επιβεβαίωση», ΤΕΙ Πειραιά, 2010.
- [14] J.P. Broomfield «Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair», 2007', Mater. Corros., τ. 58, τχ. 3, 2007.
- [15] Hong, K. "Cycling Wetting and Drying and its Effects on Chloride Ingress in Concrete", Toronto, 1998.
- [16] C.M.Hansson, A. Pursae, S.J.Jaffer "Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete", 2012.
- [17] Ρ. Γεωργίου «Αξιολόγηση των μεθόδων εκτίμησης της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος» Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λεμεσός , 2016.
- [18] Κ. Δημάδη, Γ. Κατσενίου «Διάβρωση χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος & τρόποι αποκατάστασης» Πάτρα, 2006 .
- [19] P.R.Vassie " The Chloride Concentration and Resistivity of eight Reinforced Concrete Bridge Decks after 50 years Service" Research Report, 1987.

- [20] K. Tuutti «Corrosion of steel in Concrete», Swedish Cement & Concrete Research Institute, Stockholm,1982.
- [21] S. Bajaj "Effect of Corrosion on Physical and mechanical Properties of Reinforced Concrete" The University of Akron, Ohio, 2012.
- [22] J.Lewis "The effects of corrosion on reinforced concrete with fiber addition" The University of Acron, Ohio,2012.
- [23] A.Elbusaefi, 'The Effect of Steel Bar Corrosion on the Bond Strength of Concrete Manufactured With Cement Replacement Materials", Thesis, 2014.
- [24] Μ. Γαλανού «Προστασία του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος από την ατμοσφαιρική διάβρωση με χρήση αναστολέων διάβρωσης» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διδακτορική διατριβή, 2009.
- [25] Θ. Ματίκας, Δ. Αγγέλης «Μη καταστροφικοί Έλεγχου», 2015. .
- [26] [www.giatecscientific.com](http://www.giatecscientific.com)
- [27] B. Elsener, C. Andrade, J. Gulikers, R. Polder, και M. Raupach, "Half-cell potential measurements - Potential mapping on reinforced concrete structures", 2003.
- [28] B. Elsener, " Half-cell potential mapping to assess repair work on RC structures", 2001.
- [29] ASTM C876-91 "Standard Test Method for Half Potential of Uncoated Reinforcing Steel I Concrete" American Societyfor Testing and Materials, West Conshohocken, Pensylvania,1999.
- [30] "Nondestructive Testing Equipment, NDT Products, Concrete Testing" διαθέσιμο στο: [www.proceq.com](http://www.proceq.com) .
- [31] A. R. Pacheco, A. J. Schokker, J. S. Volz, και H. R. Hamilton, "Linear Polarization Resistance Tests on Corrosion Protection Degree of Post-Tensioning Grouts",  
ACI Mater. J., τ. 108, τχ. 4, 2017.
- [32] Θ. Χ. Λούτας, «Μεθοδολογίες Επεξεργασίας Σημάτων Ακουστικής Εκπομπής Και Ακουστούυπερήχου Για Την Παρακολούθηση Και Την Ταυτοποίηση Της Εξέλιξης Της Βλάβης Σε Σύνθετα Κεραμικά Υλικά» Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2007.
- [33] "Acoustic Emission and Complete NDT", διαθέσιμο στο: [www.mistrasgroup.gr](http://www.mistrasgroup.gr).
- [34] Π. Μπακογεώργος «Η εφαρμογή της τεχνικής μη-καταστροφικού ελέγχου των ακουστικών εκπομπών (ΑΕ) κατά τη μονοαξονική μηχανική φόρτιση πετρωμάτων» ΤΕΙ Κρήτης, Χανιά, 2014.
- [35] "Introduction to Acoustic Emission – Integrity Diagnostics" διαθέσιμο στο: [www.idinspections.com](http://www.idinspections.com)
- [36] "AE Techniques" διαθέσιμο στο: [www.nde-ed.org](http://www.nde-ed.org)
- [37] "Acoustic Emission - an overview | ScienceDirect Topics",διαθέσιμο στο: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [38] Κ. Αλφόνσος «Ταξινόμηση φαινομένων Ακουστικής Εκπομπής σε περιβάλλον υψηλής στάθμης θορύβου», Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2016.
- [39] Pollock A.A. "Acoustic Emission Inspection, Technical Report TR-103-96-12/89" Physical Acoustic Corporation ,1989.
- [40] 'Physical Acoustics - World Leader in Acoustic Emission Equipment - Innovative AE Systems since 1968", διαθέσιμο στο:

- www.physicalacoustics.com
- [41] "Schematic diagram of a typical acoustic emission PZT sensor", διαθέσιμο στο: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)
- [42] "Acoustic emissions & xylem cavitation | Edaphic Scientific", διαθέσιμο στο: [www.edaphic.com.au](http://www.edaphic.com.au).
- [43] "Acoustic Emission Systems and NDT Products by PHYSICAL ACOUSTICS", διαθέσιμο στο: [www.physicalacoustics.com](http://www.physicalacoustics.com).
- [44] J. Tang, J. Li, H. Wang, Y. Wang, και G. Chen, 'In-situ monitoring and analysis of the pitting corrosion of carbon steel by acoustic emission', *Appl. Sci.*, τ. 9, τχ. 4, σσ 1–19, 2019.
- [45] J. Xu, X. Wu, και E. H. Han, 'Acoustic emission during the electrochemical corrosion of 304 stainless steel in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions', *Corros. Sci.*, τ. 53, τχ. 1, σσ 448–457, 2011.
- [46] V. Kietov, M. Mandel, και L. Krüger, 'Combination of Electrochemical Noise and Acoustic Emission for Analysis of the Pitting Corrosion Behavior of an Austenitic Stainless Cast Steel', *Adv. Eng. Mater.*, τ. 21, τχ. 5, σσ 2–7, 2019.
- [47] Li, W.S.; Luo, J.L. Uniformity of passive films formed on ferrite and martensite by different inorganic inhibitors. *Corros. Sci.* 2002, 44, 1695–1712.
- [48] Fregonese, M.; Idrissi, H.; Mazille, H.; Renaud, L.; Cetre, Y. Initiation and propagation steps in pitting corrosion of austenitic stainless steels: Monitoring by acoustic emission. *Corros. Sci.* 2001, 43, 627–641.
- [49] Darowicki, K.; Mirakowski, A.; Krakowiak, S. Investigation of pitting corrosion of stainless steel by means of acoustic emission and potentiodynamic methods. *Corros. Sci.* 2003, 45, 1747–1756.