

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



## Πτυχιακή εργασία

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ  
ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ρήγας Γεωργίου

Λεμεσός 2016

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## **Πτυχιακή εργασία**

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ  
ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ρήγας Γεωργίου

Σύμβουλος καθηγήτρια  
Δρ. Έλια Ταντελέ

Λεμεσός 2016

## **Πνευματικά δικαιώματα**

Copyright © Ρήγας Γεωργίου, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Σημειώνεται ότι η εν λόγω διπλωματική εργασία εντάσσεται μέσα στις ερευνητικές δραστηριότητες της Δρ. Έλιας Α. Ταντελέ στις οποίες συμμετέχει η ερευνητική ομάδα infrastructure<sup>2</sup> του Τμήματος ΠΟΜΗΓΕ του ΤΕΠΑΚ.

Για την υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της πραγματοποίησης της πτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δρ. Ρένο Βότση. Χωρίς τη συνεισφορά του, η εργασία αυτή δύσκολα θα ολοκληρωνόταν επιτυχώς. Επίσης ευχαριστίες εκφράζονται στη σύμβουλο καθηγήτρια Δρ. Έλια Τάντελε που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το θέμα της διάβρωσης του οπλισμένου σκυροδέματος.

Για τη συμβολή τους στην επιτυχή ολοκλήρωση των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου, εκφράζονται θερμές ευχαριστίες στους κυρίους Λούκα Γιαννούκο και Γιώργο Αλεξάνδρου.

Τέλος, ευχαριστώ την κα Άννα Χαραλάμπους για τη βοήθεια της σχετικά με την δημιουργία της βιβλιογραφίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πτυχιακή αυτή διατριβή ασχολείται με το θέμα της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού του σκυροδέματος και με τις βασικότερες μη καταστρεπτικές μεθόδους εκτίμησής της. Οι μέθοδοι που εξετάζονται είναι το half cell potential, το concrete resistivity και το LPR/corrosion rate.

Βασικός σκοπός της μελέτης είναι να αναπτυχθεί ένα μοντέλο εκτίμησης της πραγματικής κατάστασης διάβρωσης ενός μέλους από οπλισμένο σκυρόδεμα όταν χρησιμοποιούνται οι τρεις μέθοδοι. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει αξιολόγηση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων συγκρίνοντας τα με την πραγματική κατάσταση διάβρωσης και, βάσει της αξιολόγησης, στάθμιση των μεθόδων.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση της μελέτης αναλύει τη διάβρωση του χάλυβα οπλισμού ως ηλεκτροχημικό φαινόμενο με εκτενείς αναφορές στο μηχανισμό που τη δημιουργεί, στις αιτίες της, στα στάδιά της και στις μορφές που λαμβάνει. Επίσης επεξηγούνται οι σημαντικότερες επιπτώσεις της διάβρωσης και ο τρόπος με τον οποίο υποβαθμίζουν την ποιότητα του οπλισμένου σκυροδέματος και περιγράφονται με λεπτομέρεια οι τρεις μη καταστρεπτικές μέθοδοι.

Στη συνέχεια, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε δοκούς από οπλισμένο σκυρόδεμα με διαφορετικό ποσοστό χλωριούχου νατρίου. Ακολούθως, γίνεται σύγκριση των μετρήσεων των τριών μεθόδων με την πραγματική κατάσταση διάβρωσης, που αποκαλύφθηκε με το σπάσιμο των δοκών, από την οποία προκύπτει η στάθμιση των μεθόδων και η παραγωγή του μοντέλου. Επίσης τα αποτελέσματα των μετρήσεων προσεγγίζονται πιθανολογικά.

Τέλος, αναλύονται τα βασικότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν κατά την πραγματοποίηση της διατριβής. Το σημαντικότερο από αυτά είναι ότι, μεταξύ των τριών μεθόδων, το half cell potential είναι το πιο ακριβές όταν η διάβρωση βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της έναρξης.

**Λέξεις κλειδιά:** οπλισμένο σκυρόδεμα, διάβρωση, χάλυβας οπλισμού, επιπτώσεις διάβρωσης, εκτίμηση συνθηκών διάβρωσης, μη καταστρεπτικές μέθοδοι, half cell potential, corrosion resistivity, LPR, corrosion rate

## **ABSTRACT**

This Bachelor's Thesis aims to discuss the corrosion of the reinforcing steel in concrete and the basic non-destructive methods used for its evaluation. The methods under investigation are the half cell potential, the concrete resistivity and the LPR/corrosion rate.

The dissertation's primary goal is to design a model which evaluates the actual corrosion condition of a reinforced concrete member when the three methods are used. The procedure followed includes the evaluation of the experimental results of the three methods by comparing them with the actual corrosion condition in order to weight the methods.

In the literature review, the corrosion of reinforcing steel as an electrochemical phenomenon is analyzed while there are extended references on the mechanism that triggers corrosion and its causes, phases and forms it takes. Also the most important consequences of corrosion and the way they downgrade the quality of reinforced concrete are explained and the three methods are described in detail.

Afterwards, the experimental process is described and the results of measurements and tests undertaken in beams with different amount of sodium chloride are presented. Subsequently a comparison is made between the measurements of the three methods and the actual corrosion condition, which was revealed after breaking the beams. Using the comparison, the methods are weighted and the model is produced. Also there is a probabilistic approach of the results.

Finally, the main conclusions reached during the implementation of the dissertation are presented. The most important of them is that, between the three methods, the half cell potential is the most accurate when corrosion is still at the initiation phase.

**Keywords:** reinforced concrete, corrosion, reinforcing steel, corrosion effects, corrosion evaluation, non-destructive methods, half cell potential, concrete resistivity, LPR, corrosion rate

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	iv
ABSTRACT.....	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	vii
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ .....	xiii
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ .....	xiv
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	xv
1 Διάβρωση χάλυβα οπλισμού.....	1
1.1 Παθητικοποίηση του χάλυβα .....	1
1.2 Μηχανισμός διάβρωσης.....	3
1.3 Ηλεκτροχημεία διάβρωσης .....	5
1.4 Αιτίες διάβρωσης .....	6
1.4.1 Ενανθράκωση .....	7
1.4.2 Προσβολή χλωριόντων .....	10
1.5 Στάδια διάβρωσης .....	12
1.5.1 Στάδιο έναρξης .....	13
1.5.2 Στάδιο διάδοσης.....	14
1.6 Μορφές διάβρωσης .....	15
1.6.1 Βελονοειδής διάβρωση .....	16
1.6.2 Ομοιόμορφη διάβρωση.....	18
2 Επιπτώσεις διάβρωσης.....	21
2.1 Μείωση διατομής και εφελκυστικής αντοχής χάλυβα .....	21
2.2 Ρηγμάτωση και αποφλοίωση σκυροδέματος .....	22
2.3 Απώλεια συνάφειας χάλυβα - σκυροδέματος .....	25
2.4 Απώλεια πλαστιμότητας χάλυβα.....	27

2.5	Μείωση ακαμψίας και αύξηση βέλους κάμψης.....	28
3	Εκτίμηση συνθηκών διάβρωσης.....	29
3.1	Στάδια αξιολόγησης.....	29
3.1.1	Αρχική μελέτη.....	29
3.1.2	Προκαταρκτική επισκόπηση.....	30
3.1.3	Λεπτομερής επισκόπηση.....	30
3.2	Μέθοδοι εκτίμησης συνθηκών διάβρωσης.....	31
3.2.1	Half cell potential.....	31
3.2.2	Αντίσταση σκυροδέματος / Concrete resistivity.....	36
3.2.3	LPR / Ρυθμός διάβρωσης / Corrosion rate.....	40
4	Πειραματική διαδικασία.....	52
4.1	Παρασκευή δοκιμίων.....	52
4.2	Αποτελέσματα μετρήσεων.....	54
4.2.1	Half cell potential.....	54
4.2.2	Αντίσταση σκυροδέματος / Concrete resistivity.....	58
4.2.3	LPR / Ρυθμός διάβρωσης / Corrosion rate.....	60
4.2.4	Οπτική επιθεώρηση και κατάταξη σε κλάσεις.....	63
4.2.5	Δοκιμή εφελκυστικής αντοχής.....	69
5	Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	71
5.1	Στάθμιση τεχνικών μέτρησης και δημιουργία μοντέλου.....	72
5.1.1	Σύγκριση μοντέλου και πραγματικής διάβρωσης.....	77
5.1.2	Επαναβαθμονόμηση μοντέλου.....	79
5.2	Πιθανολογική προσέγγιση.....	80
6	Συμπεράσματα.....	87
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	89

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Κριτήρια του προτύπου ASTM C876 για τη διάβρωση του οπλισμού σκυροδέματος για ηλεκτρόδια χαλκού και αργυρού .....	36
Πίνακας 3.2: Εμπειρικός συσχετισμός της αντίστασης του σκυροδέματος που λαμβάνεται με το σύστημα Wenner Probe και του ρυθμού διάβρωσης.....	40
Πίνακας 3.3: Ερμηνεία ρυθμού διάβρωσης για συσκευές που έχουν προστατευτικό δακτύλιο.....	47
Πίνακας 3.4: Ερμηνεία ρυθμού διάβρωσης για συσκευές χωρίς προστατευτικό δακτύλιο.....	47
Πίνακας 3.5 Μετατροπή τιμών ρυθμού διάβρωσης σε ετήσια απώλεια εγκάρσιας διατομής οπλισμού και ετήσια ανάπτυξη σκουριάς .....	51
Πίνακας 4.1: Ποσότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή του κάθε δοκιμίου .....	53
Πίνακας 4.2: Half cell potential: Ελάχιστο, μέγιστο και μέσος όρο κάθε δοκού .....	56
Πίνακας 4.3: Concrete resistivity: Ελάχιστο, μέγιστο και μέσος όρο κάθε δοκού.....	59
Πίνακας 4.4: Corrosion rate: Ελάχιστο, μέγιστο και μέσος όρο κάθε δοκού.....	62
Πίνακας 4.5: Κλάσεις κατάταξης των ράβδων οπλισμού.....	63
Πίνακας 4.6: Φωτογραφίες, σχολιασμός και κατάταξη ράβδων οπλισμού σε κλάση διάβρωσης.....	64
Πίνακας 4.7: Εφελκυστική αντοχή της κάθε ράβδου οπλισμού.....	69
Πίνακας 5.1: Κατάταξη δοκιμίων με βάση τις τρεις μεθόδους και σύγκριση με την κατάταξη με βάση την πραγματική διάβρωση.....	73
Πίνακας 5.2: Αρχικοί και ανηγμένοι συντελεστές των τριών μεθόδων .....	75
Πίνακας 5.3: Κατάταξη δοκιμίων με βάση το βαθμό διάβρωσης χρησιμοποιώντας το μοντέλο που δημιουργήθηκε.....	76
Πίνακας 5.4: Πιθανότητα διάβρωσης για κάθε κλάση .....	81
Πίνακας 5.5: Πιθανότητα διάβρωσης κάθε δοκού σύμφωνα με τις τρεις μεθόδους...	82
Πίνακας 5.6: Πιθανότητα διάβρωσης της κάθε δοκού .....	84

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1.1: Απεικόνιση ράβδου χάλυβα οπλισμού με το προστατευτικό της στρώμα.....	2
Διάγραμμα 1.2: Σχηματική αναπαράσταση της ανόδου και της καθόδου .....	4
Διάγραμμα 1.3: Daniel cell .....	5
Διάγραμμα 1.4: Ποσότητα σκουριάς που δημιουργείται ως ποσοστό του βάρους του χάλυβα, σε συνάρτηση με το pH του σκυροδέματος.....	8
Διάγραμμα 1.5: Αθροιστική πιθανότητα διάβρωσης συναρτήσει της συγκέντρωσης χλωριόντων σε κατάστρωμα γέφυρας 20 ετών .....	11
Διάγραμμα 1.6: Καταστροφή προστατευτικού στρώματος και ανακύκλωση χλωριόντων .....	12
Διάγραμμα 1.7: Φαινόμενα υποβάθμισης του οπλισμένου σκυροδέματος που συμβαίνουν κατά τα στάδια έναρξης και διάδοσης.....	15
Διάγραμμα 1.8: Βελονοειδής διάβρωση σε χαλύβδινη ράβδο οπλισμού που προκλήθηκε λόγω προσβολής χλωριόντων στο σκυρόδεμα.....	16
Διάγραμμα 1.9: Πιθανά σχήματα των κοιλωμάτων που δημιουργούνται κατά τη βελονοειδή διάβρωση .....	18
Διάγραμμα 1.10: Ομοιόμορφο στρώμα από το προϊόν της διάβρωσης που δημιουργείται κατά την ομοιόμορφη διάβρωση .....	19
Διάγραμμα 1.11: Ομοιόμορφη διάβρωση κατά μήκος της ράβδου οπλισμού.....	20
Διάγραμμα 2.1: Οριζόντια ρωγμή λόγω διάβρωσης σε δοκό χώρου στάθμευσης .....	23
Διάγραμμα 2.2: Ο κύκλος της διάβρωσης του οπλισμού που οδηγεί στη αποφλοίωση του σκυροδέματος.....	24
Διάγραμμα 2.3: Αποφλοίωση δοκού λόγω διάβρωσης του οπλισμού.....	25
Διάγραμμα 2.4: Αντοχή συνάφειας συναρτήσει του βαθμού διάβρωσης .....	27
Διάγραμμα 3.1: Ηλεκτρόδιο αναφοράς χαλκού σε κορεσμένο χαλκό .....	32
Διάγραμμα 3.2: Παραστατική απεικόνιση του εξοπλισμού μέτρησης του half cell potential του χάλυβα στο σκυρόδεμα .....	33

Διάγραμμα 3.3: Συσκευή μέτρησης του half cell potential της εταιρίας Proceq.....	34
Διάγραμμα 3.4: Μετρητής αντίστασης τεσσάρων ηλεκτροδίων (Wenner probe) της εταιρίας Proceq .....	37
Διάγραμμα 3.5: Τρόπος λειτουργίας του Wenner probe .....	37
Διάγραμμα 3.6: Η συσκευή μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης Gecor 6 με τον κυλινδρικό μετρητή αντίστασης της επικάλυψης του σκυροδέματος .....	39
Διάγραμμα 3.7: Παραστατική απεικόνιση ενός απλού συστήματος γραμμικής πόλωσης αντίστασης με απεριόριστη περιοχή μέτρησης .....	43
Διάγραμμα 3.8: Συσκευή μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης που χρησιμοποιεί αγώγιμο επίθεμα αφρού ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο .....	44
Διάγραμμα 3.9: Η συσκευή Gecor 8 της Geosica που χρησιμοποιεί προστατευτικούς δακτυλίους για περισσότερη ακρίβεια.....	45
Διάγραμμα 3.10: Επίδραση της θερμοκρασίας στο ρυθμό διάβρωσης ενανθρακωμένου σκυροδέματος.....	48
Διάγραμμα 3.11: Διακύμανση του ρυθμού διάβρωσης σε σχέση με τη σχετική υγρασία σε σκυρόδεμα προσβεβλημένο από χλωριόντα.....	49
Διάγραμμα 3.12: Διακύμανση ρυθμού διάβρωσης σε σχέση με τη σχετική υγρασία σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα.....	50
Διάγραμμα 4.1: Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν.....	53
Διάγραμμα 4.2: Σημεία λήψης μετρήσεων του half cell potential .....	55
Διάγραμμα 4.3: Μέσοι όροι του half cell potential της κάθε δοκού .....	57
Διάγραμμα 4.4: Η δοκός 2b από την οποία απουσίαζαν μεγάλα τμήματα σκυροδέματος .....	57
Διάγραμμα 4.5: Διαίρεση δοκού σε έξι περιοχές για τη μέτρηση του concrete resistivity.....	58
Διάγραμμα 4.6: Μέσοι όροι του concrete resistivity της κάθε δοκού .....	60
Διάγραμμα 4.7: Διαίρεση δοκού σε τρεις περιοχές για τη μέτρηση του concrete resistivity.....	61
Διάγραμμα 4.8: Μέσοι όροι του corrosion rate της κάθε δοκού .....	62

Διάγραμμα 4.9: Κατάταξη ράβδων σε κλάση διάβρωσης με βάση την οπτική επιθεώρηση .....	68
Διάγραμμα 4.10: Εφελκυστική αντοχή της κάθε ράβδου οπλισμού .....	70
Διάγραμμα 5.1: Απόκλιση μοντέλου: Διαφορά βαθμού διάβρωσης και αριθμού κλάσης πραγματικής διάβρωσης.....	77
Διάγραμμα 5.2: Απόκλιση μοντέλου: Διαφορά βαθμού διάβρωσης μετά την επαναβαθμονόμηση και αριθμού κλάσης πραγματικής διάβρωσης.....	80
Διάγραμμα 5.3: Οι τρεις μέθοδοι ως στοιχεία ενός συστήματος αξιοπιστίας.....	83
Διάγραμμα 5.4: Πιθανότητα διάβρωσης της κάθε δοκού.....	85

## **ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ**

- ASTM: American Society for Testing and Materials (Αμερικανικός Σύλλογος Ελέγχου και Υλικών)
- NACE: National Association of Corrosion Engineers (Εθνικός Σύνδεσμος Μηχανικών Διάβρωσης)
- LPR: Linear Polarization Resistance (Αντίσταση Γραμμικής Πόλωσης)

## ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ

(Μέθοδος του) half cell potential:	Μέθοδος πρότυπου ηλεκτροδίου αναφοράς ή δυναμικού ημιστοιχείου
(Μέθοδος του) concrete resistivity:	Μέθοδος ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος
(Μέθοδος του) LPR:	Μέθοδος της γραμμικής αντίστασης πόλωσης
Corrosion rate:	Ρυθμός διάβρωσης

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι σήμερα το πιο διαδεδομένο υλικό στην κατασκευαστική βιομηχανία και χρησιμοποιείται για την κατασκευή σχεδόν κάθε είδους έργου. Είναι, ως γνωστόν, σύνθετο υλικό που αποτελείται από σκυρόδεμα στο οποίο εγκιβωτίζονται χαλύβδινες ράβδοι.

Το σκυρόδεμα είναι φθινό υλικό με μεγάλη θλιπτική αντοχή αλλά πολύ χαμηλή εφελκυστική. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο χάλυβας ο οποίος παρέχει στο σκυρόδεμα τις εφελκυστικές ιδιότητες που χρειάζεται. Ο χάλυβας όμως, ως κράμα μετάλλου που είναι, εμφανίζει χαμηλή αντοχή σε διάβρωση και αυτός είναι ένας από τους λόγους που πρέπει να καλύπτεται με ένα ελάχιστο στρώμα σκυροδέματος. Ωστόσο είναι συχνό φαινόμενο να παρουσιάζονται στο χάλυβα φαινόμενα διάβρωσης.

Σύμφωνα με τη βασική ορολογία, διάβρωση είναι η χημική ή ηλεκτροχημική αντίδραση μεταξύ ενός υλικού, συνήθως μετάλλου, και του περιβάλλοντός του που έχει ως αποτέλεσμα την αλλοίωση του υλικού και των ιδιοτήτων του (Vanretic 2008). Σύμφωνα με άλλο ορισμό (Κουλουμπή 2010), διάβρωση είναι «η φυσικοχημική αλληλεπίδραση ενός τεχνολογικού κατασκευαστικού υλικού με το περιβάλλον του, που συνεπάγεται τη χειροτέρευση των ιδιοτήτων του υλικού, του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος μέρος του οποίου αποτελεί το υλικό».

Η διάβρωση του χάλυβα που είναι ενσωματωμένος σε δομικά μέλη από σκυρόδεμα συμβαίνει λόγω διείσδυσης διοξειδίου του άνθρακα ή χλωριόντων. Οι διαβρωτικές αυτές ουσίες καταργούν την παθητικότητα του σκυροδέματος καταλύοντας το προστατευτικό στρώμα που περιβάλλει το χάλυβα, καταναλώνουν άτομα σιδήρου και παράγουν τα προϊόντα της διάβρωσης που καταλαμβάνουν πολύ περισσότερο χώρο από το χάλυβα που καταναλώθηκε.

Η δημιουργία των προϊόντων της διάβρωσης και η απώλεια του χάλυβα έχουν αλυσιδωτά αποτελέσματα που υποβαθμίζουν τη ποιότητα του οπλισμένου σκυροδέματος και θέτουν σε κίνδυνο την ασφάλεια της κατασκευής και των χρηστών της. Τα κυριότερα από αυτά τα προβλήματα σχετίζονται με τη ρηγμάτωση και το θρυμματισμό του σκυροδέματος, την απώλεια συνάφειας μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος και τη μείωση της εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα.

Λόγω της σοβαρότητας των συνεπειών της διάβρωσης, οι μηχανικοί ανέκαθεν αναζητούσαν τρόπους εντοπισμού και πρόβλεψής της που δεν επηρεάζουν τη λειτουργία και την αισθητική των δομικών μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Για το λόγο αυτό, και αξιοποιώντας της τεχνολογικές εξελίξεις, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μη καταστρεπτικές μέθοδοι εκτίμησης του υπάρχοντος βαθμού διάβρωσης και πρόβλεψης της εξέλιξης της διάβρωσης με την πάροδο του χρόνου.

Από αυτές τις μεθόδους, τρεις από τις πιο διαδεδομένες είναι το half cell potential, η αντίσταση σκυροδέματος (corrosion resistivity) και η αντίσταση γραμμικής πόλωσης (LPR) που μετρά το ρυθμό διάβρωσης (corrosion rate). Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούν διαφορετικό εξοπλισμό και μετρούν διαφορετικά μεγέθη που, με βάση την εμπειρία του παρελθόντος, ερμηνεύονται έτσι ώστε να προσδιοριστεί η κατάσταση διάβρωσης.

Για την αξιολόγηση της κατάστασης διάβρωσης, με τη χρήση μη καταστρεπτικών μεθόδων, χρησιμοποιούνται συνήθως τουλάχιστον δύο μέθοδοι, όταν αυτό είναι δυνατό, έτσι ώστε να αποφευχθούν τυχόν λανθασμένες ερμηνείες των μετρήσεων και να αυξηθεί η ακρίβεια. Για να υπάρχει ολοκληρωμένη εικόνα συνιστάται η χρήση και των τριών μεθόδων. Λαμβάνοντας υπόψιν, όμως, την πιθανότητα οι τρεις μέθοδοι να δώσουν διαφορετικά αποτελέσματα μεταξύ τους, προκύπτει ένα σημαντικό ερώτημα: Στα αποτελέσματα ποιας μεθόδου πρέπει ο μηχανικός να δώσει περισσότερη σημασία;

Στην παρούσα εργασία, αφού επεξηγηθεί η διάβρωση ως ηλεκτροχημικό φαινόμενο και αναλυθούν οι συνέπειες της, γίνεται εκτενής αναφορά στις τρεις αυτές μεθόδους και στον τρόπο λειτουργίας τους. Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν λαμβάνοντας μετρήσεις διάβρωσης με τις τρεις μεθόδους σε δοκίμια από οπλισμένο σκυρόδεμα και η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με την πραγματική κατάσταση διάβρωσης. Χρησιμοποιώντας τη στοιχεία αυτά γίνεται στάθμιση των μεθόδων για να παραχθεί ένα μοντέλο εκτίμησης του βαθμού διάβρωσης ενώ γίνεται και πιθανολογική προσέγγιση των αποτελεσμάτων έτσι ώστε από τις τρεις μεθόδους να προκύψει μια συνδυασμένη πιθανότητα διάβρωσης.

# 1 Διάβρωση χάλυβα οπλισμού

Η διάβρωση του χάλυβα του σκυροδέματος είναι ένα σύνθετο ηλεκτροχημικό φαινόμενο που συμβαίνει όταν φθαρεί ο μηχανισμός που προστατεύει το χάλυβα από τα διαβρωτικά στοιχεία. Ο μηχανισμός αυτός είναι ένα προστατευτικό παθητικό στρώμα από οξειδία του σιδήρου που δημιουργείται κυρίως λόγω της έντονης αλκαλικότητας του σκυροδέματος ενώ τα διαβρωτικά στοιχεία είναι κυρίως χλωριόντα και διοξείδιο του άνθρακα.

Η διάβρωση αποτελεί αποτέλεσμα πολλαπλών αντιδράσεων που συμβαίνουν στην επιφάνεια του χάλυβα και οι οποίες προκαλούν τη δημιουργία ενός λεπτού στρώματος σκουριάς γύρω από τον διαβρωμένο οπλισμό. Ως διαδικασία διακρίνεται συνήθως σε δύο στάδια, αυτό της έναρξης και αυτό της διάδοσης.

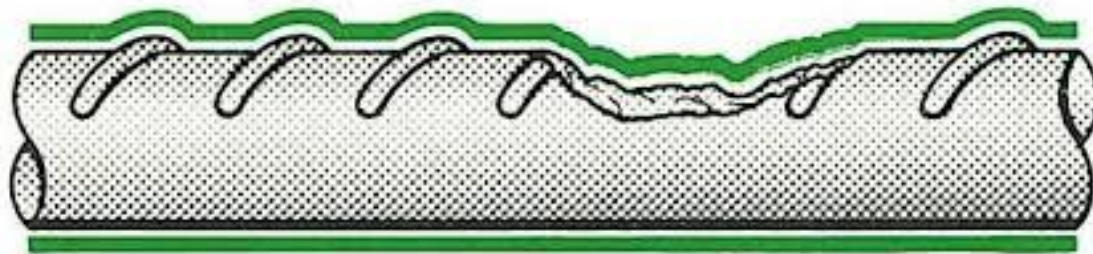
Το φαινόμενο αυτό είναι συνήθως τοπικό και εμφανίζεται υπό τη μορφή κοιλωμάτων στην επιφάνεια του οπλισμού ενώ αρκετά σπανιότερα είναι ομοιόμορφο, δηλαδή προκαλείται σε όλη την επιφάνεια του οπλισμού.

## 1.1 Παθητικοποίηση του χάλυβα

Ο οπλισμός στο σκυρόδεμα αποτελείται από χάλυβα, δηλαδή κράμα που περιέχει μεγάλα ποσοστά σιδήρου και μικρότερες ποσότητες άνθρακα και άλλων στοιχείων. Η σύνθεσή του αυτή θα καθιστούσε το χάλυβα εξαιρετικά ευάλωτο στο φαινόμενο της διάβρωσης αν ήταν εκτεθειμένος στις συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο υπάρχει νερό και οξυγόνο. Ο εγκιβωτισμός του όμως στο σκυρόδεμα καθιστά τη διάβρωση σημαντικά πιο δυσεπίτευκτη και χρονοβόρα αφού το σκυρόδεμα λειτουργεί ως προστατευτικό περιβάλλον για τις χαλύβδινες ράβδους.

Τα μέταλλα διαβρώνονται όταν βρίσκονται μέσα σε οξέα ενώ δεν διαβρώνονται όταν βρίσκονται σε αλκαλικά περιβάλλοντα (Broomfield 2007). Στο νερό των πόρων του σκληρυμένου σκυροδέματος περιέχεται μεγάλο ποσοστό ένυδρου οξειδίου του ασβεστίου  $[Ca(OH)_2]$  που είναι προϊόν της αντίδρασης της ενυδάτωσης (σκλήρυνσης) του τσιμέντου. Η υδράσβεστος, όπως αποκαλείται, έχει pH μεταξύ 12.5 και 13.9 καθιστώντας έτσι το σκυρόδεμα έντονα αλκαλικό (Μπατής 2007). Η υψηλή αλκαλικότητα του σκυροδέματος έχει σαν αποτέλεσμα να παθητικοποιείται ο χάλυβας, δηλαδή να δημιουργείται στην επιφάνειά του ένα πολύ λεπτό παθητικό

στρώμα ένυδρων οξειδίων του σιδήρου. Το στρώμα αυτό δρα ως προστατευτικός μανδύας για τις ράβδους οπλισμού και αποτρέπει τη διάβρωση και παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα στο Διάγραμμα 1.1.



**Διάγραμμα 1.1:** Απεικόνιση ράβδου χάλυβα οπλισμού με το προστατευτικό της στρώμα

**Πηγή:** Tectonica online, n.d.

Το παθητικό προστατευτικό στρώμα που δημιουργείται λόγω αυτού του έντονα αλκαλικού περιβάλλοντος είναι μια πυκνή, αδιαπέραστη μεμβράνη η οποία, αν δημιουργηθεί πλήρως και διατηρηθεί, αποτρέπει τη διάβρωση του χάλυβα. Είναι πιθανόν, ένα τμήμα του στρώματος που σχηματίζεται στο χάλυβα να είναι μεταλλικό λόγω των οξειδίων και των υδροξειδίων και ένα άλλο τμήμα να είναι ορυκτό λόγω του τσιμέντου. Στους επιστημονικούς κύκλους υπάρχει κάποια αμφιβολία για το κατά πόσον το στρώμα του χάλυβα είναι ένα πραγματικό παθητικό στρώμα καθώς είναι πιο χοντρό από άλλα παθητικά στρώματα και δεν αποτελείται μόνο από μεταλλικά οξείδια. Λόγω όμως του ότι συμπεριφέρεται σαν ένα παθητικό στρώμα, αναφέρεται συνήθως ως τέτοιο (Broomfield 2007).

Αυτό το προστατευτικό στρώμα αποτελεί την καλύτερη επένδυση που θα μπορούσε να έχει ο χάλυβας καθώς δημιουργείται μόνο του και διατηρεί και επισκευάζει τον εαυτό του όσο διατηρείται το αλκαλικό περιβάλλον που το βοηθά να αναγεννιέται αν έχει υποστεί ζημιά. Με την προϋπόθεση ότι το αλκαλικό περιβάλλον μπορεί να διατηρηθεί, το παθητικό στρώμα είναι πολύ καλύτερο από άλλες τεχνητές επενδύσεις όπως ο γαλβανισμός ή τα εποξικά που μπορεί να καταστραφούν επιτρέποντας τη διάβρωση στις κατεστραμμένες περιοχές (Broomfield 2007).

Άλλος ένας λόγος που ο χάλυβας διαβρώνεται δύσκολα εντός του σκυροδέματος είναι ότι το ίδιο το σκυρόδεμα παρεμβάλλεται μεταξύ του οπλισμού και των διάφορων διαβρωτικών συστατικών του περιβάλλοντος, όπως το οξυγόνο και το

διοξειδίο του άνθρακα, και άλλων διαβρωτικών ουσιών, όπως τα χλωριόντα, δυσχεραίνοντας τη διάβρωση (Μπατής 2007).

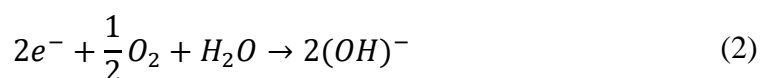
## 1.2 Μηχανισμός διάβρωσης

Λόγω του ότι η διάβρωση είναι σύνθετο χημικό και ηλεκτροχημικό φαινόμενο, για την πραγματοποίησή της απαιτείται η παρουσία ενός ηλεκτρολύτη, μέσω του οποίου διακινούνται τα ιόντα, και μιας ηλεκτρικής σύνδεσης. Στην περίπτωση του οπλισμένου σκυροδέματος, το ρόλο του ηλεκτρολύτη παίζει το σκυρόδεμα αφού είναι γεμάτο με μικρούς πόρους στους οποίους περιέχεται υγρασία. Αντίστοιχα, οι ράβδοι του χάλυβα παίζουν το ρόλο της ηλεκτρικής σύνδεσης (Δημάδη κ.ά. 2006). Οι ηλεκτροχημικές δράσεις πραγματοποιούνται στη διεπιφάνεια μετάλλου-ηλεκτρολύτη και ακολουθούνται από τη μετακίνηση των ιόντων μέσω του ηλεκτρολύτη (Μπατής 2007). Οι δύο απλές διαδικασίες που συνθέτουν την ηλεκτρόλυση, ως φαινόμενο, είναι η ανοδική και η καθοδική (Δημάδη κ.ά. 2006) και συμβαίνουν ανεξάρτητα από το αν η αιτία της διάβρωσης είναι η διείσδυση χλωριόντων ή η ενανθράκωση (Broomfield 2007).

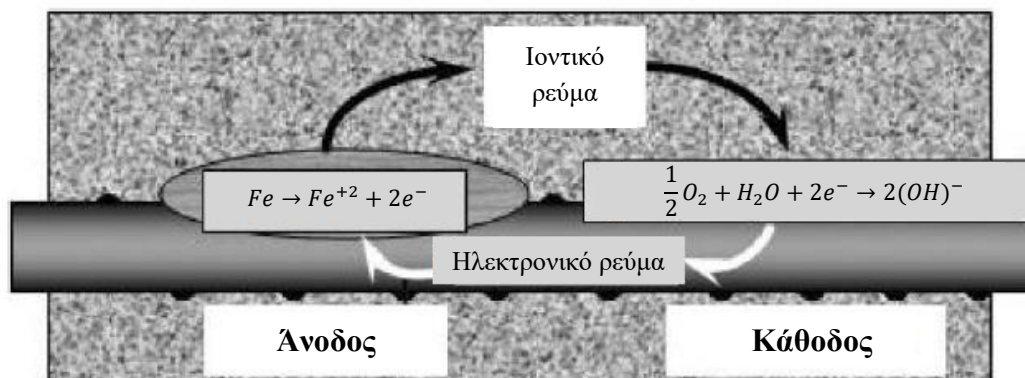
Η άνοδος δημιουργείται στην περιοχή του χάλυβα όπου έχει καταστραφεί το προστατευτικό οξειδικό στρώμα και έχει σαν αποτέλεσμα ο χάλυβας να διαβρώνεται και να διαλύεται μέσα στο νερό των πόρων και τα άτομα του σιδήρου να μετατρέπονται σε ιόντα, ελευθερώνοντας ηλεκτρόνια:



Τα ηλεκτρόνια, λόγω της διαφοράς δυναμικού που δημιουργείται και λόγω του ότι πρέπει να καταναλωθούν για να διατηρηθεί η ηλεκτρική ουδετερότητα, κατευθύνονται προς άλλο σημείο της επιφάνειας του χάλυβα, την κάθοδο. Ολόκληρη η ράβδος λειτουργεί σαν κάθοδος αφού απαιτείται μόνο να υπάρχει στην περιοχή του χάλυβα νερό και οξυγόνο ενώ δεν έχει σημασία αν το προστατευτικό στρώμα είναι κατεστραμμένο ή όχι. Στην κάθοδο τα ηλεκτρόνια που ελευθερώθηκαν αντιδρούν με το νερό και το οξυγόνο δίνοντας ιόντα υδροξυλίου:



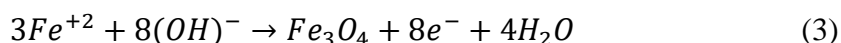
Στο Διάγραμμα 1.2 παρουσιάζονται σχηματικά οι δύο αντιδράσεις, ανοδική και καθοδική, από τις οποίες παράγονται τα προϊόντα που εν τέλει οδηγούν στη διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος.



Διάγραμμα 1.2: Σχηματική αναπαράσταση της ανόδου και της καθόδου

Πηγή: Broomfield 2007

Τα ιόντα υδροξυλίου που δημιουργήθηκαν κατά την καθοδική αντίδραση κινούνται μέσω του νερού των πόρων του σκυροδέματος, από την περιοχή της καθόδου προς την περιοχή της ανόδου, όπου ενώνονται με τα ιόντα σιδήρου, σχηματίζοντας έτσι σκουριά:



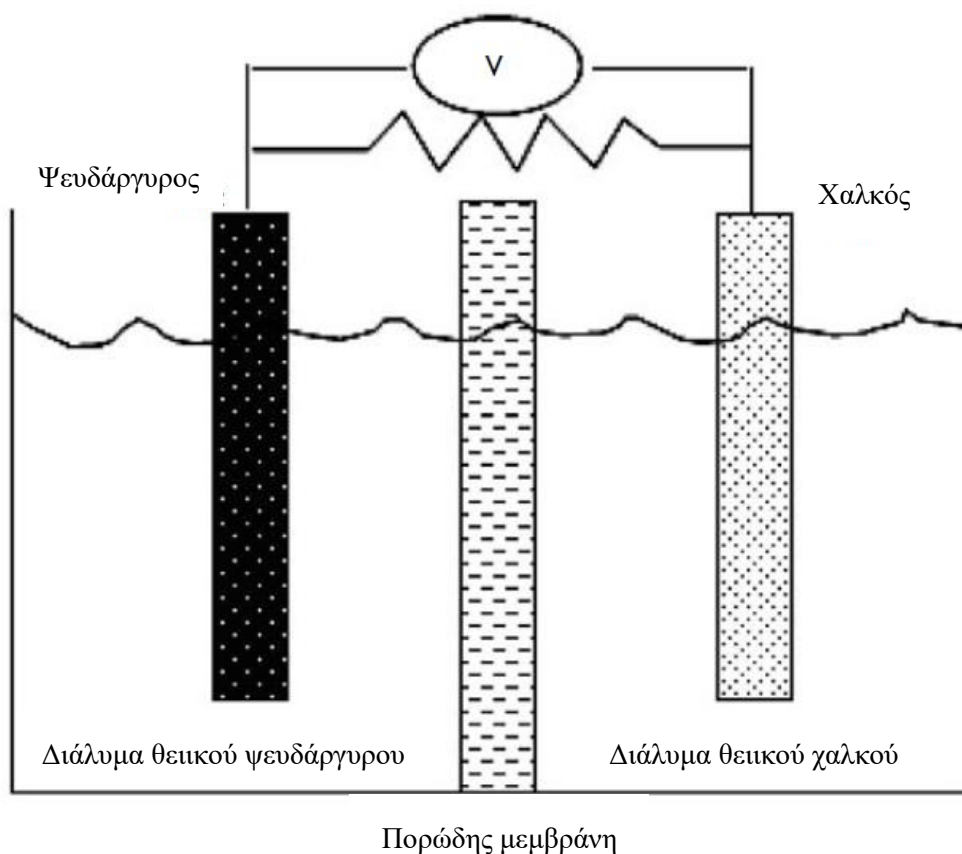
Μετά από αυτή την αντίδραση ενδέχεται να σχηματιστούν διάφορα οξειδία σιδήρου όπως  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$  και  $Fe_3O_4$ . Για τη δημιουργία των αντιδράσεων οξειδώσεως καταναλώνεται μόνο οξυγόνο. Το νερό βοηθά τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης όμως η ποσότητά του, πριν και μετά την οξείδωση, παραμένει σταθερή (Δημάδη κ.ά. 2006).

Οι ανοδικές και καθοδικές δράσεις συμβαίνουν ταυτόχρονα σε διαφορετικές περιοχές του χάλυβα ενώ αριθμός ηλεκτρονίων μετακινείται μέσω αυτού. Η δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων είναι η αιτία του ταυτόχρονου σχηματισμού ανοδικών και καθοδικών περιοχών στην επιφάνεια του χάλυβα. Τα στοιχεία αυτά σχηματίζονται κατά τη μεταλλουργική διαδικασία παραγωγής του κράματος του τυπικού χάλυβα. Συγκεκριμένα γεωμετρικές ανωμαλίες και ύπαρξη οξειδίων στην επιφάνεια του χάλυβα καθώς και ανομοιομορφίες μικρής κλίμακας στη χημική

σύσταση του κράματος οδηγούν στο σχηματισμό τοπικών γαλβανικών στοιχείων με διαφορά δυναμικού της τάξης των μερικών δεκάδων mV (Μπατής 2007).

### 1.3 Ηλεκτροχημεία διάβρωσης

Οι αντιδράσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα είναι η ανοδική και η καθοδική αντίδραση του χάλυβα στο σκυρόδεμα. Οι δύο όροι, «ανοδική» και «καθοδική» προέρχονται από την ηλεκτροχημεία που αποτελεί την επιστήμη που μελετά τη χημεία των ηλεκτρικών στοιχείων. Ο τρόπος με τον οποίο οι χημικές αντιδράσεις παράγουν ηλεκτρισμό μπορεί να επεξηγηθεί με το Daniel cell το οποίο απεικονίζεται στο Διάγραμμα 1.3.



Διάγραμμα 1.3: Daniel cell

Πηγή: Broomfield, 2007

Το Daniel cell είναι ένα πλήρες στοιχείο το οποίο αποτελείται από δύο ημιστοιχεία: χαλκό σε θεικό χαλκό και ψευδάργυρο σε θεικό ψευδάργυρο. Το ηλεκτρικό στοιχείο

έχει συνολική τάση που καθορίζεται από τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται και από το είδος και τη σύνθεση των διαλυμάτων.

Σε κάθε ημιστοιχείο το μέταλλο διαλύεται και τα ιόντα καθιζάνουν, δίνοντας τη σχέση:



Ο χαλκός είναι πιο ανθεκτικός από τον υδράργυρο σε αυτή την αντίδραση οπότε όταν τα δύο διαλύματα ενωθούν με μια ημι-διαπερατή μεμβράνη και τα δύο μέταλλα ενωθούν με ένα καλώδιο, ο ψευδάργυρος γίνεται διάλυμα και ο θεϊκός χαλκός επιμεταλλώνεται πάνω στο ηλεκτρόδιο του χαλκού.

Η τάση του κάθε ημιστοιχείου μπορεί να μετρηθεί σε σχέση με ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να υπολογιστεί η πιθανότητα διάβρωσης χρησιμοποιώντας ένα εξωτερικό ηλεκτρόδιο αναφοράς και μετρώντας τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ημιστοιχείων. Σε αυτή την μέθοδο εκτίμησης του βαθμού διάβρωσης γίνεται εκτενής αναφορά στο Κεφάλαιο 3.

Το δυναμικό του ηλεκτροδίου αναφοράς αποτελεί συνάρτηση της συγκέντρωσης του διαλύματος αλλά και του είδους του μετάλλου και του διαλύματος. Ένα πιο συμπτυκνωμένο διάλυμα είναι συνήθως πιο διαβρωτικό από ένα αραιό οπότε υπάρχει ροή ρεύματος διαμέσου ενός πλήρους στοιχείου που αποτελείται από το ίδιο μέταλλο σε δύο διαφορετικές συγκεντρώσεις του ίδιου διαλύματος. Το στοιχείο αυτό καλείται concentration cell, δηλαδή στοιχείο υπό διαφορά συγκέντρωσης. Τέτοιο στοιχείο μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι η διάβρωση του χάλυβα του σκυροδέματος (Broomfield 2007).

## 1.4 Αιτίες διάβρωσης

Οι δύο κυριότεροι λόγοι διάβρωσης των στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι η ενανθράκωση (carbonation) και η προσβολή χλωριόντων (chloride attack). Λόγω των δύο αυτών φαινομένων προσβάλλεται το αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος με αποτέλεσμα να ξεκινά η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού.

Οι δύο αυτοί μηχανισμοί δεν προσβάλλουν το σκυρόδεμα στην ακεραιότητα του. Αντιθέτως, κάποια διαβρωτικά χημικά είδη περνούν μέσα από τους πόρους και προσβάλλουν το χάλυβα ενώ άλλα οξέα και διαβρωτικά ιόντα όπως τα θεικό άλας,

για παράδειγμα, καταστρέφουν όλο το σκυρόδεμα πριν επηρεάσουν τον οπλισμό (Broomfield 2007). Οι περισσότερες, δηλαδή, μορφές της χημικής προσβολής αποτελούν προβλήματα του σκυροδέματος πριν να γίνουν προβλήματα διάβρωσης του χάλυβα.

Η ενανθράκωση είναι επίσης σπάνιο να πραγματοποιηθεί χωρίς να υπάρξουν σημαντικές ζημιές στο σκυρόδεμα αφού καθώς το διοξείδιο του άνθρακα διεισδύει σε αυτό, το καταστρέφει σε μεγάλο βαθμό. Για παράδειγμα, δεν υπάρχουν καταγεγραμμένες περιπτώσεις διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού λόγω όξινης βροχής χωρίς προηγουμένως να προηγηθεί καταστροφή του σκυροδέματος (Broomfield 2007).

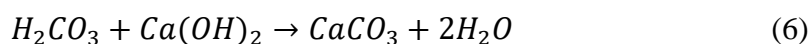
Ένα άλλο φαινόμενο που μπορεί να επιταχύνει ή ακόμα και να προκαλέσει διάβρωση, λόγω ενανθράκωσης, στον οπλισμό είναι η υποβολή των στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα σε συχνούς κύκλους διαβροχής και ξήρανσης (wet dry cycling) (Hong 1998).

#### **1.4.1 Ενανθράκωση**

Σύμφωνα με τους Ho et al (1987), η ενανθράκωση είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ του αερίου του διοξειδίου του άνθρακα που υπάρχει στην ατμόσφαιρα και των αλκαλικών υδροξειδίων που περιέχονται στο σκυρόδεμα. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), όπως και αρκετά άλλα αέρια, διαλύεται στο νερό (H<sub>2</sub>O) σχηματίζοντας ένα οξύ το οποίο, στην περίπτωση του διοξειδίου του άνθρακα, καλείται ανθρακικό οξύ (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>):

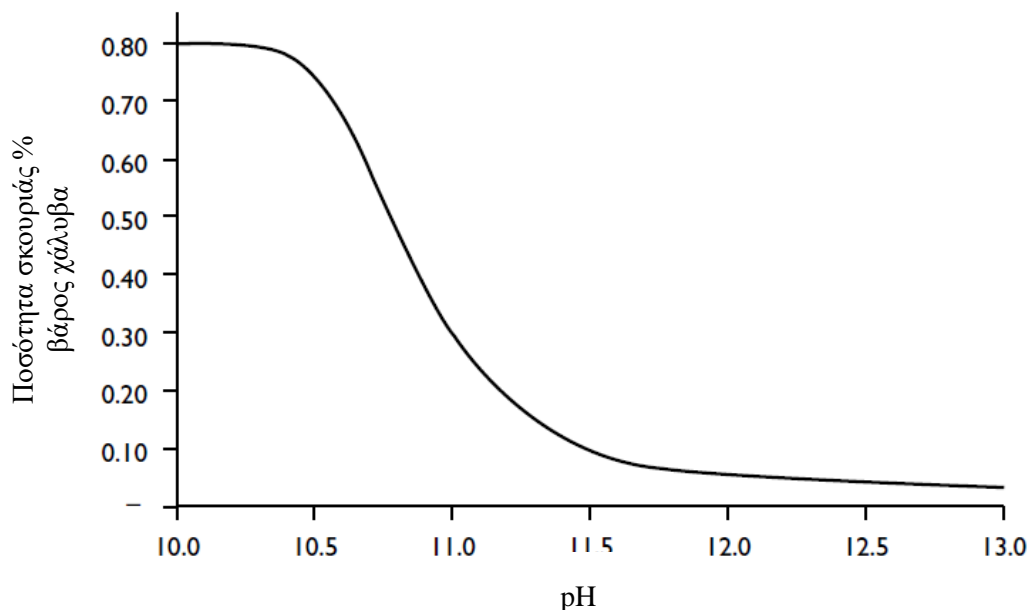


Σε αντίθεση όμως με τα άλλα οξέα, το ανθρακικό οξύ δεν προσβάλλει την τσιμεντόπαστα αλλά μόνο παθητικοποιεί τα αλκάλια του νερού των πόρων, όπως το υδροξείδιο του ασβεστίου [Ca(OH)<sub>2</sub>], δημιουργώντας κυρίως ανθρακικό ασβέστιο (CaCO<sub>3</sub>):



Καθώς εξελίσσεται η ενανθράκωση, το pH του σκυροδέματος παραμένει στα φυσιολογικά του επίπεδα, δηλαδή γύρω στο 12 με 13, αφού στους πόρους του σκυροδέματος υπάρχει πολύ περισσότερο υδροξείδιο του ασβεστίου από αυτό που μπορεί να διαλυθεί στο νερό των πόρων. Όμως η αντίδραση του διοξειδίου του

άνθρακα με το υδροξείδιο του ασβεστίου, και τα άλλα υδροξείδια, του διαλύματος προχωρά με αποτέλεσμα να προκαλείται τελικά αντίδραση όλου του υδροξειδίου του ασβεστίου. Έτσι το ανθρακικό ασβέστιο κατακρημνίζεται προκαλώντας τη μείωση του pH σε ένα επίπεδο όπου ο οπλισμός διαβρώνεται. Η επίδραση της μείωσης του pH στην αύξηση του ποσοστού των προϊόντων της διάβρωσης που δημιουργούνται φαίνεται στο Διάγραμμα 1.4.



**Διάγραμμα 1.4:** Ποσότητα σκουριάς που δημιουργείται ως ποσοστό του βάρους του χάλυβα, σε συνάρτηση με το pH του σκυροδέματος

Πηγή: NACE, 1992

Το μέτωπο της διάβρωσης, σύμφωνα με τον Broomfield (2007), προχωρά εντός του σκυροδέματος ακολουθώντας, κατά προσέγγιση, τους νόμους της διάχυσης του Fick. Οι νόμοι αυτοί κατανοούνται ευκολότερα με την ακόλουθη σχέση, σύμφωνα με την οποία ο ρυθμός ενανθράκωσης είναι αντιστρόφως ανάλογος του πάχους:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{D_o}{x} \quad (7)$$

όπου  $x$  είναι η απόσταση,  $t$  είναι ο χρόνος και  $D_o$  είναι η σταθερά διάχυσης η οποία καθορίζεται από την ποιότητα του σκυροδέματος. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι λόγω του ότι η ενανθράκωση μεταβάλλει τη δομή των πόρων του σκυροδέματος, η εξίσωση αυτή είναι προσεγγιστική. Οι ρηγματώσεις που ίσως να δημιουργηθούν, οι

αλλαγές στη σύνθεση του σκυροδέματος και οι μεταβολές στα επίπεδα υγρασίας είναι επίσης παράγοντες που οδηγούν σε απόκλιση από την εξίσωση της διάχυσης.

#### **1.4.1.1 Παράγοντες αντίστασης στην ενανθράκωση**

Τρεις είναι οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν το κατά πόσον το οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να αντισταθεί στην ενανθράκωση. Ο πρώτος από αυτούς αφορά το πάχος της κάλυψης το οποίο πρέπει να είναι ικανοποιητικό. Αυτό είναι εμφανές από τη σχέση που αναφέρθηκε πιο πάνω αφού όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση, τόσο μικρότερος είναι ο ρυθμός ενανθράκωσης.

Ο δεύτερος παράγοντας σχετίζεται με το ότι η όλη διαδικασία της ενανθράκωσης είναι διαδικασία ουδετεροποίησης της αλκαλικότητας του σκυροδέματος. Η παρουσία μεγαλύτερων ποσοτήτων αλκαλίων, που εξασφαλίζεται με τη χρήση μεγαλύτερης ποσότητας τσιμέντου, καθυστερεί την ενανθράκωση του σκυροδέματος ενώ αντίθετα εάν υπάρχει μεγάλος λόγος νερού-τσιμέντου, η ενανθράκωση επιταχύνεται.

Το ότι η διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα είναι ευκολότερη αν το σκυρόδεμα έχει ανοιχτή δομή πόρων (open pore structure) αποτελεί τον τρίτο παράγοντα που καθορίζει τη δυνατότητα ή όχι αντίστασης στην ενανθράκωση. Σε μακροσκοπική κλίμακα, το σκυρόδεμα πρέπει να έχει καλή συμπύκνωση ενώ σε μικροσκοπική, το σκυρόδεμα πρέπει να έχει μικρούς πόρους οι οποίοι να έχουν μικρή διασύνδεση με το διοξείδιο του άνθρακα. Διάφορα πρόσθετα, όπως ο μικροπυρίτης (microsilica), μπορούν να φράξουν τους πόρους ή να μικρύνουν το μέγεθός τους (Broomfield 2007).

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

Ιδιαίτερα ευαίσθητες στην ενανθράκωση είναι κατασκευές που υποβάλλονται σε συνεχείς κύκλους διαβροχής και ξήρανσης αφού έτσι επιτρέπεται στο διοξείδιο του άνθρακα να διεισδύει και του παρέχεται το νερό στο οποίο διαλύεται. Λόγω αυτού δημιουργούνται προβλήματα σε χώρες που υπάρχει εναλλαγή ξηρών και υγρών εποχών ευνοώντας έτσι την ενανθράκωση των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (Broomfield 2007).

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποτελέσει και αιτία σφαλμάτων σε δοκιμές πεδίου ή και εργαστηριακές δοκιμές σχετικές με τη διάβρωση του χάλυβα οπλισμού αφού η

διαβροχή των δομικών στοιχείων ή των δοκιμίων είναι απαραίτητη σε περίπτωση που γίνεται χρήση τεχνικών μέτρησης της διάβρωσης όπως το half cell potential και η μέτρηση του ρυθμού διάβρωσης με τη μέθοδο του LPR..

#### **1.4.1.3 Ανίχνευση ενανθράκωσης**

Η διάβρωση μπορεί εύκολα να ανιχνευθεί και να μετρηθεί χρησιμοποιώντας ένα δείκτη pH όπως η φαινολοφθαλεΐνη. Ο δείκτης αυτός, σε ένα διάλυμα νερού και οιοπνεύματος, θα εντοπίσει την αλλαγή του pH σε μία πρόσφατα εκτεθειμένη επιφάνεια σκυροδέματος. Το χρώμα της φαινολοφθαλεΐνης μεταβάλλεται από διάφανο σε περιοχές με χαμηλό pH, δηλαδή στο ενανθρακωμένο σκυρόδεμα, σε ροζ σε περιοχές με ψηλό pH, δηλαδή στο μη ενανθρακωμένο σκυρόδεμα (Broomfield 2007).

Μετρήσεις μπορούν να γίνουν σε δοκίμια σκυροδέματος, θραύσματα και διανοιγμένες οπές αφού ληφθούν μέτρα που θα αποτρέπουν την επαφή νερού και σκουριάς με την προς μέτρηση επιφάνεια.

#### **1.4.2 Προσβολή χλωριόντων**

Τα χλωριόντα που προσβάλλουν το σκυρόδεμα μπορεί να προέρχονται από διάφορες πηγές. Μπορεί είτε να προϋπάρχουν σε αυτό είτε να διεισδύσουν σε αυτό από το εξωτερικό του. Προϋπάρχουν στο μείγμα του σκυροδέματος όταν έχει γίνει σκόπιμη προσθήκη επιταχυντών που περιέχουν χλωριόντα όπως το χλωριούχο ασβέστιο (calcium chloride), το οποίο χρησιμοποιούνταν για αυτό το σκοπό μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1970. Επίσης τα χλωριόντα μπορεί να αποτελούν συστατικό του σκυροδέματος αν έχει γίνει χρήση θαλασσινού νερού ή προσθήκη μολυσμένων αδρανών στο μείγμα.

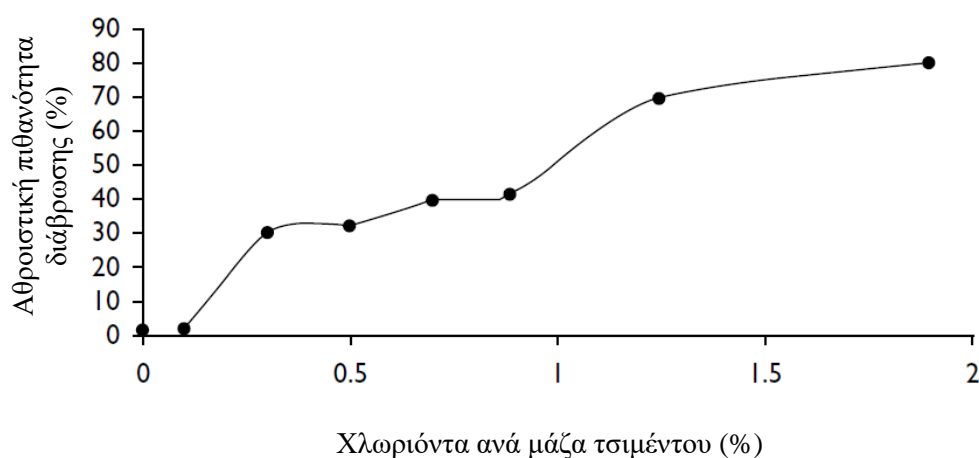
Διείσδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα μπορεί να υπάρχει λόγω της επαφής της κατασκευής με θαλασσινό νερό και λόγω των αποπαγωγικών αλάτων που χρησιμοποιούνται για το λιώσιμο του χιονιού. Ακόμη, κτίρια στα οποία γίνεται χρήση χημικών, όπως ενυδρεία και αποθήκες αλάτων, είναι επιρρεπή στη διείσδυση χλωριόντων.

Στις περισσότερες περιοχές του κόσμου, το κυριότερο πρόβλημα είναι η διείσδυση των χλωριόντων εντός του σκυροδέματος λόγω του θαλασσινού νερού και των αποπαγωγικών αλάτων. Η κατάσταση κατά την οποία τα χλωριόντα προϋπάρχουν

εντός τους σκυροδέματος είναι σπανιότερη όμως δεν πρέπει να αγνοείται. Συμβαίνει συνήθως σε θαλασσινά περιβάλλοντα όπου το νερό της θάλασσας μολύνει το αρχικό μείγμα του σκυροδέματος και στη συνέχεια διαχέεται εντός του σκληρυμένου σκυροδέματος.

Όπως και με την ενανθράκωση, ο ρυθμός εισχώρησης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα προσεγγίζεται από το νόμο του Fick. Υπάρχουν όμως επιπλοκές που καθιστούν δύσκολη την ακριβή πρόβλεψη του ρυθμού διείσδυσης τους. Αρχικά υπάρχει απορρόφηση, ειδικά αν το σκυρόδεμα είναι στεγνό, που αποτελεί τριχοειδή δράση. Στην περίπτωση του θαλασσινού νερού, η απορρόφηση του από το στεγνό σκυρόδεμα γίνεται με μεγάλη ταχύτητα. Στη συνέχεια το νερό μεταφέρει τριχοειδώς τα άλατα διαμέσου των πόρων διαχέοντας τα στο σκυρόδεμα. Η κίνηση των χλωριόντων επιβραδύνεται από διάφορους μηχανισμούς όπως η χημική αντίδραση που σχηματίζει χλωριούχα αργιλικά άλατα (chloroaluminates) και η απορρόφηση από την επιφάνεια των πόρων (Broomfield, 2007). Το άλλο πρόβλημα αναφορικά με την πρόβλεψη του ρυθμού διείσδυσης των χλωριόντων είναι ο καθορισμός της αρχικής συγκέντρωσής τους αφού η διάχυση των χλωριόντων σχετίζεται με το βαθμό συγκέντρωσης και όχι με τη μετακίνηση του μετώπου όπως στην ενανθράκωση.

Σύμφωνα με τον Vassie (1987), από το ποσοστό των χλωριόντων που υπάρχει στο σκυρόδεμα μπορεί να προκύψει η πιθανότητα διάβρωσης της κατασκευής. Στο Διάγραμμα 1.5, για παράδειγμα, φαίνεται η αθροιστική πιθανότητα διάβρωσης σε ένα κατάστρωμα γέφυρας.



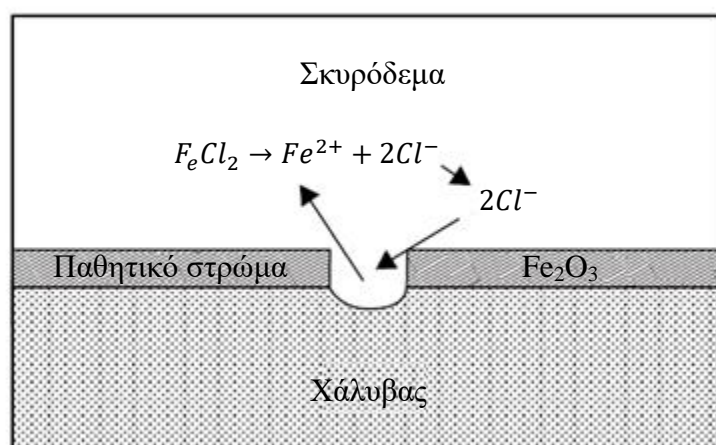
**Διάγραμμα 1.5:** Αθροιστική πιθανότητα διάβρωσης συναρτήσει της συγκέντρωσης χλωριόντων σε κατάστρωμα γέφυρας 20 ετών

Πηγή: Vassie, 1987

### 1.4.2.1 Μηχανισμός προσβολής χλωριόντων

Ο τρόπος με τον οποίο τα χλωριόντα αποπαθητικοποιούν το χάλυβα είναι κάπως διαφορετικός από αυτόν της ενανθράκωσης αφού δεν προκαλείται ουδετεροποίηση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος. Τα ιόντα χλωρίου προσβάλλουν το παθητικό στρώμα του οπλισμού και δεν μειώνουν συνολικά το pH, όπως συμβαίνει με την ενανθράκωση, αλλά δρουν ως καταλύτες για τη διάβρωση.

Τα χλωριόντα δεν καταναλώνονται κατά τη διαδικασία αλλά συμβάλλουν στη διάλυση του οξειδικού παθητικού στρώματος και επιτρέπουν την επιτάχυνση της διαδικασίας της διάβρωσης. Η αντιμετώπιση της προσβολής από χλωριόντα είναι ιδιαίτερα δύσκολη καθώς, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 1.6, ανακυκλώνονται με αποτελεσματικό τρόπο ενόσω καταστρέφουν το προστατευτικό στρώμα και είναι συνεπώς δύσκολο να εξαλειφθούν (Broomfield, 2007).



Διάγραμμα 1.6: Καταστροφή προστατευτικού στρώματος και ανακύκλωση χλωριόντων

Πηγή: Broomfield, 2007

## 1.5 Στάδια διάβρωσης

Η διάρκεια ζωής μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα διακρίνεται συνήθως σε δύο στάδια. Το πρώτο από αυτά καλείται στάδιο έναρξης (initiation phase) και κατά τη διάρκεια του ο οπλισμός διατηρεί την παθητικότητά του. Συμβαίνουν όμως φαινόμενα που ενδέχεται να οδηγήσουν σε απώλεια της παθητικότητας όπως η ενανθράκωση και η διείσδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα, που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Το στάδιο αυτό ολοκληρώνεται με την έναρξη της διάβρωσης,

δηλαδή την αποπαθητικοποίηση του οπλισμού. Στο σημείο αυτό ξεκινά το δεύτερο στάδιο που ονομάζεται στάδιο διάδοσης (propagation phase). Αυτό το στάδιο εξελίσσεται μέχρι το σημείο κατά το οποίο οι επιπτώσεις της διάβρωσης δεν είναι πλέον ανεκτές, δηλαδή υπάρχει αστοχία (Bertolini et al 2013).

### **1.5.1 Στάδιο έναρξης**

Κατά το στάδιο αυτό διεισδύουν στο σκυρόδεμα οι διαβρωτικές ουσίες, δηλαδή το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) ή και τα χλωριόντα, που αποπαθητικοποιούν τον οπλισμό.

Η διείσδυση διοξειδίου του άνθρακα έχει σαν αποτέλεσμα την ενανθράκωση του σκυροδέματος η οποία ξεκινά από την επιφάνειά του και προχωρά σταδιακά προς τις εσωτερικές περιοχές. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι το σκυρόδεμα να χάνει την αλκαλικότητά του και να ουδετεροποιείται σε σημείο που το pH του υγρού πόρων του σκυροδέματος να μειώνεται σε μια τιμή γύρω στο 9 όπου το παθητικό προστατευτικό στρώμα καθίσταται ασταθές.

Τα ιόντα χλωρίου διεισδύουν από το περιβάλλον στο σκυρόδεμα και ενδέχεται να φτάσουν τον οπλισμό. Προκαλούν τοπική καταστροφή του προστατευτικού στρώματος αν η συγκέντρωσή τους στην επιφάνεια του σκυροδέματος ξεπεράσει ένα οριακό επίπεδο.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάρκεια του σταδίου έναρξης είναι το πάχος του σκυροδέματος που καλύπτει τον οπλισμό, ο ρυθμός διείσδυσης των διαβρωτικών μέσων και το μέγεθος της συγκέντρωσής τους που απαιτείται για να αποπαθητικοποιηθεί ο οπλισμός. Το πάχος κάλυψης επηρεάζει καθοριστικά τη διάρκεια έναρξης της διάβρωσης και για τον λόγο αυτό οι κώδικες σχεδιασμού καθορίζουν ένα ελάχιστο πάχος κάλυψης ανάλογα με την περιβάλλον στο οποίο θα βρίσκεται η κατασκευή. Ο ρυθμός διείσδυσης των διαβρωτικών ουσιών εξαρτάται από την ποιότητα του σκυροδέματος και ιδιότητές του όπως το πορώδες και τη διαπερατότητα καθώς και από μικροκλιματικές συνθήκες, όπως η διαβροχή ή η ξήρανση, της επιφάνειας του σκυροδέματος.

Η διάρκεια του σταδίου της έναρξης μπορεί να επηρεαστεί και από ενδεχόμενη πόλωση του οπλισμού. Για παράδειγμα, ένα μικρό ποσό καθοδικής πόλωσης αυξάνει τη διάρκεια ενώ μια ανοδική πόλωση μπορεί να μειώσει τη διάρκεια.

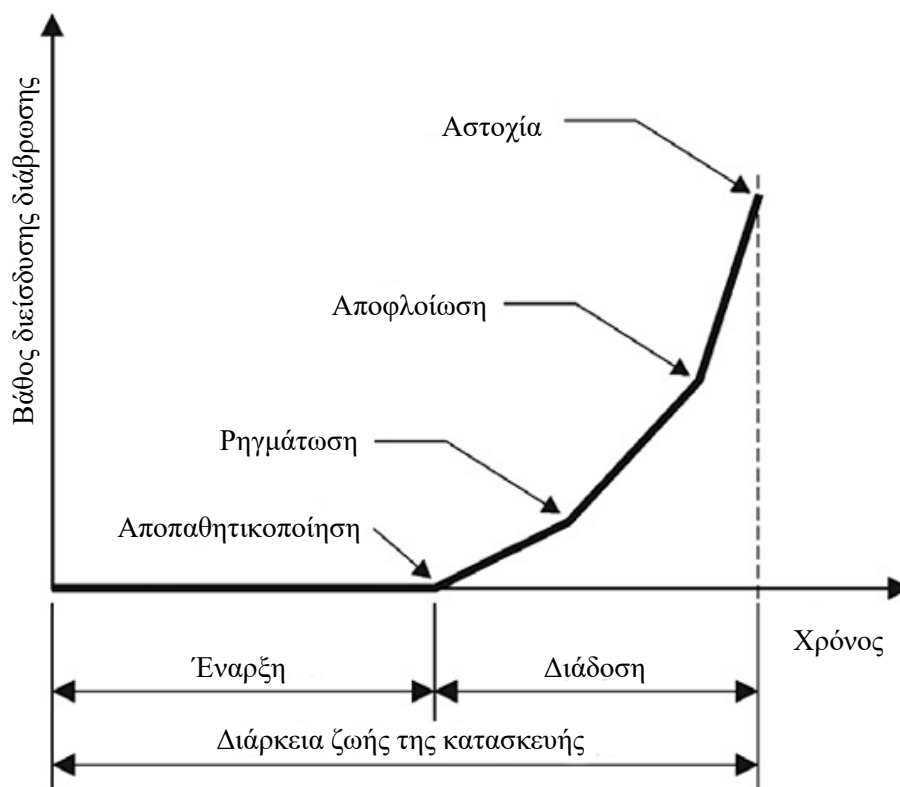
Για να παραταθεί η διάρκεια του σταδίου της έναρξης μπορούν να ληφθούν επιπρόσθετα προστατευτικά μέτρα όπως η χρήση αναστολέων διάβρωσης (corrosion inhibitors). Πρόκειται για χημικά πρόσμικτα που αναμιγνύονται με το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος έτσι ώστε να αποτραπεί η έναρξη της διάβρωσης ή να παραταθεί η διάρκειά της. Ένα από τα πρόσμικτα αυτά και το πιο εκτενώς δοκιμασμένο είναι το νιτρώδες ασβέστιο (calcium nitrite) (Bertolini et al 2013).

### **1.5.2 Στάδιο διάδοσης**

Για να ξεκινήσει η διάβρωση πρέπει πρώτα να προηγηθεί η καταστροφή του προστατευτικού στρώματος. Με το στρώμα αυτό καταστραμμένο, η διάβρωση θα εμφανιστεί μόνο όταν στην επιφάνεια του οπλισμού υπάρχει παρουσία νερού και οξυγόνου.

Το στάδιο της διάδοσης ολοκληρώνεται όταν επέλθουν στην κατασκευή διάφορα ανεπιθύμητα γεγονότα που μειώνουν σημαντικά ή ολοκληρώνουν τη διάρκεια ζωής της. Τα γεγονότα αυτά είναι η εκτεταμένη μείωση της εγκάρσιας διατομής του οπλισμού, η ρηγμάτωση του σκυροδέματος, η αποφλοιώση και αποκόλληση της επικάλυψης του σκυροδέματος και, τελικά, η κατάρρευση της κατασκευής. Στο Διάγραμμα 1.7 παρουσιάζεται ο χρόνος πραγματοποίησης των γεγονότων αυτών εντός των σταδίων έναρξης και διάδοσης, σύμφωνα με το μοντέλο του Tuutti (1982). Ο χρόνος μέχρι να συμβούν τα φαινόμενα αυτά καθορίζεται από το ρυθμό διάβρωσης (corrosion rate) που κυμαίνεται αισθητά ανάλογα με τη θερμοκρασία και την υγρασία.

Κατά το στάδιο αυτό, προκαλείται γενική καταστροφή του προστατευτικού στρώματος όταν πρόκειται για διάβρωση που προκαλείται λόγω ενανθράκωσης του σκυροδέματος αφού όλη η επιφάνεια του χάλυβα διαβρώνεται καθώς έρχεται σε επαφή με το ενανθρακωμένο σκυρόδεμα. Αντίθετα, η διάβρωση λόγω των χλωριόντων είναι τοπικής μορφής αφού δημιουργούνται διαβρωμένες κοιλότητες που περιβάλλονται από μη διαβρωμένες περιοχές. Μόνο όταν υπάρχει μεγάλη παρουσία χλωριόντων καταστρέφεται σε ευρεία περιοχή το προστατευτικό στρώμα του οπλισμού και η διάβρωση είναι γενικής μορφής.



**Διάγραμμα 1.7: Φαινόμενα υποβάθμισης του οπλισμένου σκυροδέματος που συμβαίνουν κατά τα στάδια έναρξης και διάδοσης**

Πηγή: Tuutti, 1982

Όταν η αποπαθητικοποίηση του προστατευτικού στρώματος είναι τοπικής μορφής υπάρχει η πιθανότητα να δημιουργηθεί ένα μακροκύτταρο (macrocell) μεταξύ των διαβρωμένων ράβδων και αυτών που διατηρούν την παθητικότητά τους. Το γεγονός αυτό μπορεί να αυξήσει το ρυθμό προσβολής του οπλισμού που ήδη διαβρώνεται.

Σε χάλυβες υψηλής αντοχής που χρησιμοποιούνται στο προεντεταμένο σκυρόδεμα, και κάτω από πολύ συγκεκριμένες περιβαλλοντικές, ηλεκτροχημικές, μεταλλουργικές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης, μπορεί να προκύψει ευθραυστότητα λόγω υδρογόνου (hydrogen embrittlement) που ίσως οδηγήσει σε ψαθυρή θραύση του υλικού (Bertolini et al 2013).

## 1.6 Μορφές διάβρωσης

Ο τρόπος με τον οποίο η διάβρωση εξελίσσεται και «εξαπλώνεται» επί της επιφάνειας του χάλυβα οπλισμού διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση. Η διάβρωση

μπορεί να έχει ομοιόμορφη μορφή, δηλαδή να προσβάλλει τον οπλισμό σε όλη την επιφάνεια του ή σε ένα αρκετά μεγάλο τμήμα της επιφάνειάς του, ή τοπική μορφή, δηλαδή να προσβάλλει μόνο μια περιοχή του οπλισμού.

Άλλα, αρκετά σπανιότερα, είδη διάβρωσης είναι η διάβρωση λόγω ανάπτυξης εξωτερικής διαφοράς δυναμικού, που μπορεί να είναι γαλβανική ή ηλεκτρολυτική, και η διάβρωση λόγω μηχανικής τάσης (Κουρνέτας 2010).

Από τις συνηθισμένες μορφές διάβρωσης, πιο επικίνδυνη είναι η τοπική, κυρίως λόγω του ότι δεν εντοπίζεται εύκολα. Το είδος αυτό της διάβρωσης εμφανίζεται συνήθως υπό τη μορφή της βελονοειδούς διάβρωσης.

### **1.6.1 Βελονοειδής διάβρωση**

Η τοπική διάβρωση που προσβάλλει τον οπλισμό του σκυροδέματος μπορεί να εμφανιστεί σε διάφορες μορφές, όπως η μικρορηγματώδης διάβρωση ή η διάβρωση μεταξύ των κόκκων του μετάλλου (Κουρνέτας 2010), όμως η συνηθέστερη της μορφή είναι η διάβρωση με βελονισμούς ή βελονοειδής διάβρωση (pitting corrosion). Το είδος αυτό της διάβρωσης ορίζεται από τον NACE (n.d.) ως η διάβρωση μιας μεταλλικής επιφάνειας, περιορισμένης σε ένα σημείο ή μια μικρή περιοχή, που παίρνει τη μορφή κοιλοτήτων ή τρυπών ή βελονισμών (Διάγραμμα 1.8).



**Διάγραμμα 1.8:** Βελονοειδής διάβρωση σε χαλύβδινη ράβδο οπλισμού που προκλήθηκε λόγω προσβολής χλωριόντων στο σκυρόδεμα

Πηγή: Duromac sp, 2013

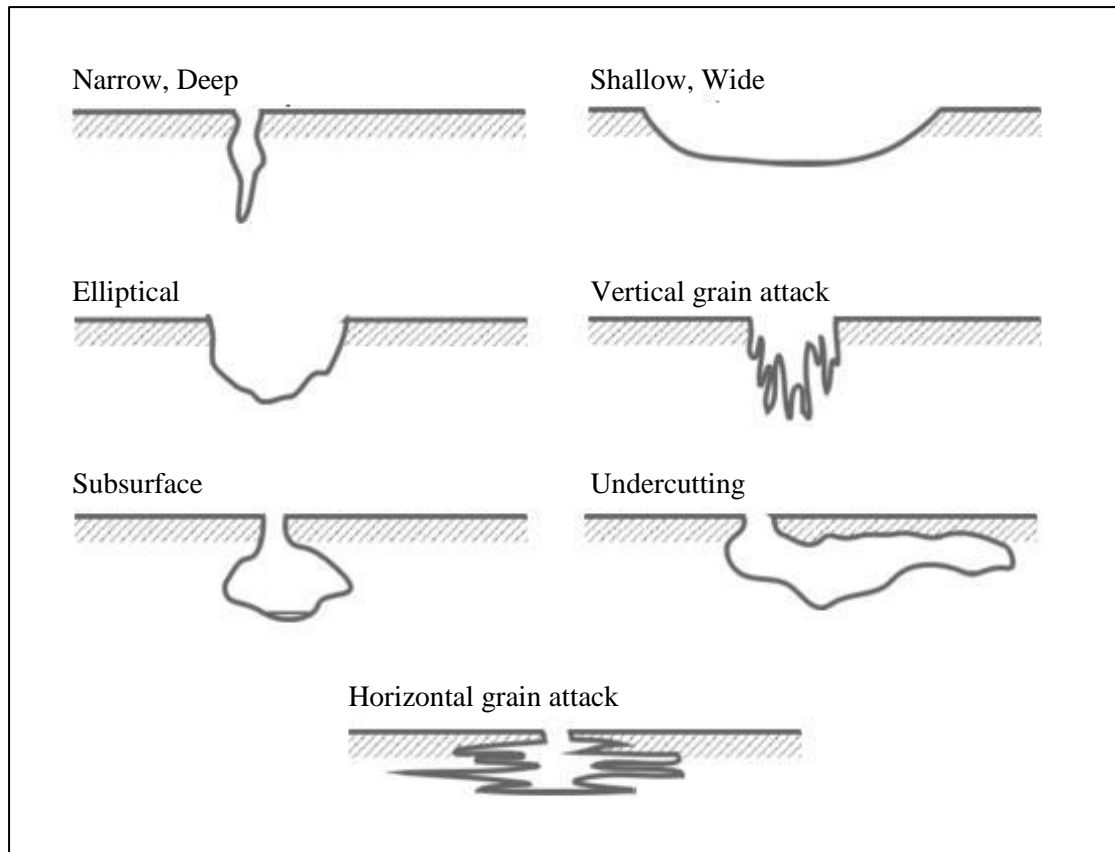
Η δημιουργία αυτών των κοιλοτήτων στο χάλυβα την καθιστούν πιο επικίνδυνη από την ομοιόμορφη διάβρωση καθώς είναι πιο δύσκολο να εντοπιστεί, να προβλεφθεί και να αντιμετωπιστεί αφού οι κοιλότητες διακρίνονται δύσκολα λόγω του μικρού τους μεγέθους αλλά και επειδή πολλές φορές καλύπτονται από τα προϊόντα της διάβρωσης (Κουλουμπή 2010), δηλαδή τη σκουριά. Ακόμη και μια μικρή και στενή κοιλότητα που μειώνει ελάχιστα τη διατομή του χάλυβα μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία ολόκληρου του μηχανικού συστήματος (NACE n.d.).

Η βελονοειδής διάβρωση μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες που σχετίζονται κυρίως με την επίδραση των ιόντων χλωρίου και την επακόλουθη τοπική μηχανική ή χημική ζημιά στην προστατευτική οξειδική μεμβράνη του χάλυβα. Συγκεκριμένα η μεμβράνη μπορεί να φθαρεί λόγω της επαφής με νερό υψηλής οξύτητας, με χαμηλά διαλυόμενες συγκεντρώσεις οξυγόνου (low dissolved oxygen concentrations) και με υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων όπως για παράδειγμα αυτές του θαλασσινού νερού (NACE n.d.). Ιδιαίτερα επικίνδυνη θεωρείται η εναλλασσόμενη διαβροχή και ξήρανση της επιφάνειας του σκυροδέματος από νερό με υψηλή περιεκτικότητα σε χλωριούχα άλατα (Κουρνέτας 2010).

Τοπική διάβρωση με βελονοειδή μορφή στον οπλισμό μπορεί να προκληθεί και από τοπική ζημιά ή προβληματική εφαρμογή της προστατευτικής επικάλυψης από σκυρόδεμα ή από παρουσία ανωμαλιών στο μεταλλικό υλικό όπως μη μεταλλικά εγκλείσματα (nonmetallic inclusions) (NACE n.d.).

Οι οριζόντιες επιφάνειες είναι πολύ πιο επιρρεπείς στο φαινόμενο της βελονοειδούς διάβρωσης, σε σχέση με τις κάθετες, καθώς σε αυτές εμφανίζονται σχεδόν πάντα πρώτα οι βελονισμοί οι οποίοι απαιτούν μεγάλο χρόνο επώασης πριν να γίνουν ορατοί. Με την έναρξη τους όμως οι βελονισμοί, αναπτύσσονται στην κατεύθυνση της βαρύτητας και διεισδύουν στο μέταλλο υποσκάπτοντας το, με μεγάλη ταχύτητα (Κουλουμπή 2010).

Οι βελονισμοί που δημιουργούνται μπορεί να πάρουν διάφορα σχήματα, τα συνηθέστερα από τα οποία παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 1.9 Σε αυτό φαίνεται ότι οι βελονισμοί μπορεί να είναι ευρείς σε επιφάνεια, να έχουν μεγάλο βάθος, να αναπτύσσονται κάθετα ή οριζόντια ή ακόμα και να δημιουργούνται κάτω από την επιφάνεια χάλυβα που δεν έχει διαβρωθεί.



**Διάγραμμα 1.9:** Πιθανά σχήματα των κοιλωμάτων που δημιουργούνται κατά τη βελονοειδή διάβρωση

Πηγή: NACE, n.d.

Το στόμιο των κοιλωμάτων που δημιουργούνται καλύπτεται σε κάποιες περιπτώσεις από μια ημι-διαπερατή μεμβράνη αποτελούμενη από το προϊόν της διάβρωσης. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις το στόμιο των κοιλωμάτων είναι ακάλυπτο (NACE n.d.).

### 1.6.2 Ομοιόμορφη διάβρωση

Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση (uniform or general corrosion) είναι η διάβρωση που συμβαίνει ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια του μετάλλου ή σε ένα μεγάλο τμήμα αυτής. Όσον αφορά το ποσοστό όγκου μετάλλου που χάνεται είναι η πιο σημαντική μορφή διάβρωσης. Παρόλα αυτά σπάνια προκαλεί καταστρεπτικές αστοχίες αφού το είδος αυτό της διάβρωσης μπορεί εύκολα εντοπιστεί και να προβλεφτεί η περαιτέρω εξέλιξή του (NACE n.d.).

Σύμφωνα με την Κουλουμπή (2010), η ομοιόμορφη διάβρωση «χαρακτηρίζεται γενικά από χημική ή ηλεκτροχημική δράση που προχωρά ομοιόμορφα στο σύνολο ή

στο μεγαλύτερο μέρος της εκτεθειμένης επιφάνειας». Το αποτέλεσμα της είναι να προκληθεί ένα ομοιόμορφο και περίπου ισόπαχο στρώμα αποτελούμενο από το προϊόν της διάβρωσης ή να προκληθεί περίπου ομοιόμορφη διάλυση της επιφάνειας (Διάγραμμα 1.10).



**Διάγραμμα 1.10: Ομοιόμορφο στρώμα από το προϊόν της διάβρωσης που δημιουργείται κατά την ομοιόμορφη διάβρωση**

**Πηγή: Κουλουμπή, 2010**

Η επίδραση της ομοιόμορφης διάβρωσης στα δομικά στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα φαίνεται ως μια λεπτή σχισμή με διεύθυνση παράλληλη προς τη διεύθυνση των ράβδων οπλισμού (Γκίβαλου κ.ά. 2007.), κάτι που την καθιστά εύκολα ορατή (Διάγραμμα 1.11). Λόγω αυτού και λόγω του ότι συμβαίνει ομοιόμορφα σε μεγάλη επιφάνεια, τα προβλήματα που προκαλεί είναι πολλές φορές μόνο αισθητικά καθώς μπορεί να ελεγχθεί με καθοδική προστασία ή χρησιμοποιώντας επικαλύψεις ή επιχρίσματα πριν να προκαλέσει σοβαρότερα προβλήματα. Αν όμως δεν αντιμετωπιστεί έγκαιρα μπορεί να οδηγήσει σε πιο επικίνδυνες μορφές διάβρωσης (NACE n.d.).

Η συνηθέστερη αιτία δημιουργίας της ομοιόμορφης διάβρωσης σε μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι η βλάβη στην επικάλυψη από σκυρόδεμα που συμβαίνει λόγω της μείωσης της αλκαλικότητας του σκυροδέματος σε μια ευρεία περιοχή. Η μείωση αυτή του PH οφείλεται συνήθως σε απόπλυση του οξειδίου του ασβεστίου  $[Ca(OH)_2]$  από το σκυρόδεμα μετά την επίδραση μαλακού νερού ή σε ενανθράκωση του σκυροδέματος (Κουρνέτας 2010).



**Διάγραμμα 1.11: Ομοιόμορφη διάβρωση κατά μήκος της ράβδου οπλισμού**

**Πηγή: Κουρνέτας, 2010**

## 2 Επιπτώσεις διάβρωσης

Η διαδικασία της διάβρωσης στον οπλισμό του σκυροδέματος έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την παραγωγή των προϊόντων της γύρω από το χάλυβα. Τα προϊόντα αυτά καθώς και η διάβρωση ως φαινόμενο προκαλούν πολυάριθμες επιπτώσεις στα μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Οι επιπτώσεις είναι αρχικά ακίνδυνες όμως τα προβλήματα που προκαλούν αυξάνονται σημαντικά όσο η φθορά λόγω της διάβρωσης αυξάνεται, σε σημείο που καθίστανται ιδιαίτερα επιζήμιες για την υγεία, την αντοχή, τη λειτουργικότητα και την αισθητική της κατασκευής.

Η διάβρωση προκαλεί τη μείωση της διατομής του οπλισμού αλλά και του σκυροδέματος λόγω θρυμματισμού, τη μείωση της εφελκυστικής και της θλιπτικής αντοχής του διαβρωμένου μέλους, σημαντική απώλεια της συνάφειας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος καθώς και μείωση της πλαστιμότητας του χάλυβα και της ακαμψίας του σκυροδέματος και αύξηση του βέλους κάμψης του μέλους. Οι επιπτώσεις αυτές δεν είναι μεμονωμένα φαινόμενα αλλά αποτελούν αλυσιδωτές συνέπειες της διάβρωσης οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

### 2.1 Μείωση διατομής και εφελκυστικής αντοχής χάλυβα

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, κατά τη διαδικασία της διάβρωσης τα άτομα του σιδήρου του χάλυβα μετατρέπονται σε ιόντα στην περιοχή της ανόδου και αντιδρούν με τα ιόντα υδροξυλίου που δημιουργήθηκαν στην περιοχή της καθόδου, δημιουργώντας τη σκουριά που είναι προϊόν της διάβρωσης. Τα άτομα αυτά δηλαδή δεν αποτελούν, πλέον, κομμάτι του χάλυβα και αποτέλεσμα αυτού είναι να μειώνεται το εμβαδόν της ενεργής διατομής του οπλισμού (Lewis 2010) με φυσικό συνεπακόλουθο τη μείωση και της εφελκυστικής αντοχής του οπλισμού.

Σε όλες τις αναλύσεις μελών οπλισμένου σκυροδέματος που έπονται της ρηγμάτωσης που προκαλεί η διάβρωση είναι ενσωματωμένο το εμβαδόν που χάνεται οπότε όλοι οι υπολογισμοί επηρεάζονται από τη βλάβη λόγω της διάβρωσης (Lewis 2010).

Η απώλεια της μάζας του χάλυβα είναι ανάλογη του τετραγώνου της απώλειας της ακτίνας της διατομής του και, με την υπόθεση ότι ο όγκος της ράβδου οπλισμού είναι κυλινδρικός, τα δύο αυτά μεγέθη συνδέονται από τη σχέση:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi \cdot r^2 \cdot L} \quad (8)$$

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

όπου  $m$  είναι η απώλεια μάζας σε g,  $r$  είναι η απώλεια ακτίνας της διατομής σε mm,  $\rho$  είναι η πυκνότητα του χάλυβα σε  $\text{g/mm}^3$  και  $L$  είναι το μήκος της ράβδου οπλισμού σε mm.

Από την πιο πάνω σχέση είναι σαφές πόσο μεγάλη επιρροή στη μάζα του οπλισμού, άρα και στις μηχανικές του ιδιότητες, έχει μια μικρή απώλεια λόγω διάβρωσης στη διάμετρό του. Η σχέση αυτή φυσικά υποθέτει ομοιόμορφη διάβρωση σε μια κυλινδρική επιφάνεια ενώ η διάβρωση του οπλισμού δεν είναι σχεδόν ποτέ πλήρως ομοιόμορφη. Η επίδραση της διάβρωσης μπορεί να είναι μεγαλύτερη σε κάποια σημεία του οπλισμού ενώ σε άλλα σημεία να διατηρείται η διατομή του χάλυβα στην πληρότητά της. Επιπρόσθετα στην επιφάνεια του οπλισμού υπάρχουν νευρώσεις που περιπλέκουν περισσότερο τον υπολογισμό της χαμένης μάζας αφού η φθορά λόγω διάβρωσης βασίζεται στο εμβαδόν της επιφάνειας που επηρεάζεται (Lewis 2010).

Το φαινόμενο της απώλειας τμήματος του χάλυβα οπλισμού επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αντοχή του μέλους αφού τα προϊόντα της διάβρωσης που δημιουργούνται δεν συμμετέχουν στη κατανομή των φορτίων. Μπορεί να υποτεθεί ότι το εφελκυστικό φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο οπλισμός μειώνεται αναλογικά με την απώλεια του χάλυβα (Stanish, 1997).

Δεν υπάρχει σχέση που να συνδέει με ακρίβεια τη μείωση της διατομής του χάλυβα με τη μείωση της εφελκυστικής του αντοχής λόγω και του ότι, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, η διάβρωση είναι συνήθως τοπικής μορφής. Η επίδραση όμως της μείωσης της αντοχής του χάλυβα ακόμα και σε μόνο ένα σημείο ενός μέλους στην ασφάλεια μιας κατασκευής είναι πολύ σημαντική, ειδικά αν η μείωση είναι μεγάλη.

## 2.2 Ρηγμάτωση και αποφλοΐωση σκυροδέματος

Σημαντικές επιπτώσεις της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού είναι αρχικά η ρηγμάτωση (cracking) του σκυροδέματος και στη συνέχεια η αποφλοΐωση ή ο θρυμματισμός (spalling) του επιφέρουν και μείωση της ικανότητάς του να παραλαμβάνει φορτία (capacitance).

Οι ρηγματώσεις σχηματίζονται λόγω της δημιουργίας των προϊόντων της διάβρωσης που καταλαμβάνουν περισσότερο όγκο από αυτόν του χάλυβα που καταναλώνεται (Lewis 2010). Όσο αυξάνεται ο όγκος τους, τόσο αυξάνεται και η ακτινική πίεση στη διεπιφάνεια χάλυβα - σκυροδέματος με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα. 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 (Bajaj 2012).

Σύμφωνα με τον Broomfield (2007), οι ρωγμές που δημιουργούνται είναι οριζόντιες κατά μήκος του οπλισμού που διαβρώνεται και γωνιακές γύρω από το σημείο όπου τελειώνει ο οπλισμός. Στο Διάγραμμα 2.1 φαίνεται μια εκτεταμένη οριζόντια ρωγμή που έχει δημιουργηθεί λόγω διάβρωσης του οπλισμού.

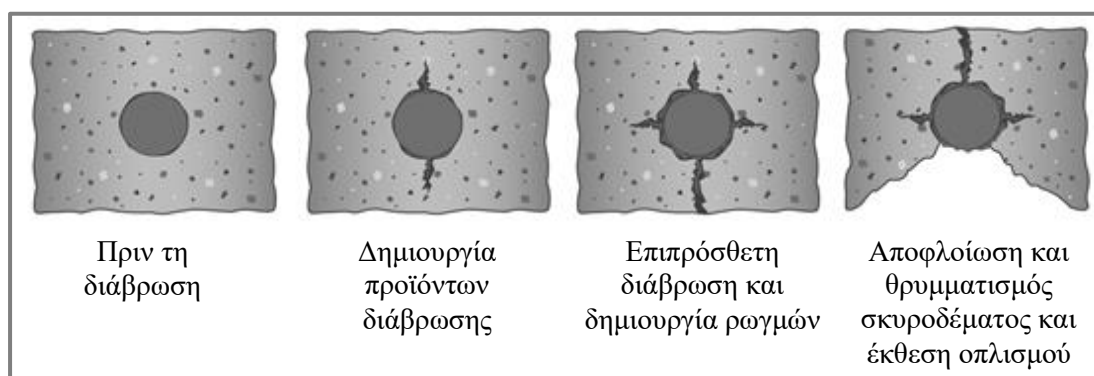


**Διάγραμμα 2.1: Οριζόντια ρωγμή λόγω διάβρωσης σε δοκό χώρου στάθμευσης**

**Πηγή: KC Ward Construction**

Εάν δεν ληφθούν μέτρα αντιμετώπισης της ρηγματώσης προκαλείται αποφλοίωση του σκυροδέματος δηλαδή απώλεια του σκυροδέματος γύρω από μια ράβδο λόγω των εκτεταμένων ρηγματώσεων. Στο Διάγραμμα 2.2 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο

τα προϊόντα της διάβρωσης προκαλούν αρχικά ρωγμές κοντά στη διεπιφάνεια χάλυβα - σκυροδέματος οι οποίες με την πάροδο του χρόνου μεγαλώνουν μέχρι να επέλθει η αποκόλληση του σκυροδέματος από τον οπλισμό.



**Διάγραμμα 2.2:** Ο κύκλος της διάβρωσης του οπλισμού που οδηγεί στη αποφλοιώση του σκυροδέματος

Πηγή: Brcocomposites, n.d.

Το φαινόμενο της αποφλοιώσης έχει δύο κύριες συνέπειες. Για την πρώτη που σχετίζεται με την απώλεια συνάφειας λόγω μείωσης της πίεσης που ασκεί το σκυρόδεμα στον οπλισμό γίνεται λεπτομερής αναφορά στο Υποκεφάλαιο 2.3.

Η δεύτερη συνέπεια σχετίζεται με την απώλεια τμήματος του σκυροδέματος, παράδειγμα της οποίας φαίνεται στο Διάγραμμα 2.3. Η απώλεια αυτή έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η αντοχή του μέλους στο οποίο έχει μειωθεί το σκυρόδεμα. Αυτό έχει αρχικά μόνο αισθητικές επιπτώσεις στο διαβρωμένο μέλος αφού όσο η απώλεια σκυροδέματος, άρα και η μείωση της αντοχής, διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα δεν κινδυνεύει η ακεραιότητα της κατασκευής λόγω των πολλαπλών συντελεστών ασφαλείας που λαμβάνονται υπόψιν κατά το σχεδιασμό.

Εάν η αποφλοιώση δεν αντιμετωπιστεί έγκαιρα μπορεί να αποδειχτεί καταστροφική για μια κατασκευή αφού τα μέλη της θα υποστούν εκτεταμένες δομικές ζημιές. Οι δοκοί που έχουν απολέσει μεγάλα τμήματα σκυροδέματος θα αστοχήσουν σε θλίψη και θα οδηγηθούν σε ψαθυρή αστοχία με ιδιαίτερα ανεπιθύμητες συνέπειες (Stanish, 1997).



**Διάγραμμα 2.3:** Αποφλοίωση δοκού λόγω διάβρωσης του οπλισμού

**Πηγή:** Civildigital

Το φαινόμενο του θρυμματισμού του σκυροδέματος είναι σημαντικά επικίνδυνο όχι μόνο για τη ίδια την κατασκευή που έχει πληγεί από τη διάβρωση αλλά και για το περιβάλλον γύρω της. Η πτώση κομματιών σκυροδέματος, ακόμα και μικρού μεγέθους, είναι πιθανό να οδηγήσει σε τραυματισμό ή ακόμη και θάνατο ανθρώπων που είναι χρήστες της κατασκευής ή απλά βρίσκονται στο σημείο της πτώσης. Επίσης λόγω της αποφλοίωσης μπορεί να προκληθεί ζημιά σε περιουσίες όπως γειτονικά σπίτια ή αυτοκίνητα.

### **2.3 Απώλεια συνάφειας χάλυβα - σκυροδέματος**

Η συνάφεια που υπάρχει μεταξύ του σκυροδέματος και του χάλυβα είναι καθοριστικής σημασίας για τη δημιουργία ενός σύνθετου υλικού με μεγάλη αντοχή, όπως είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. Όπως είναι γνωστό, ο χάλυβας χρησιμοποιείται ως οπλισμός στο σκυρόδεμα λόγω του ότι το σκυρόδεμα έχει πολύ μικρή αντοχή σε εφελκυσμό σε σχέση με την αντοχή του σε θλίψη. Σε ένα μέλος από οπλισμένο σκυρόδεμα, δηλαδή, η πλειοψηφία των εφελκυστικών τάσεων παραλαμβάνεται από το χάλυβα και οι θλιπτικές τάσεις από το σκυρόδεμα. Αυτή η δράση παραλαβής των

τάσεων είναι σύνθετη και συμβαίνει λόγω της καλής συνάφειας που υπάρχει μεταξύ του σκυροδέματος και του χάλυβα.

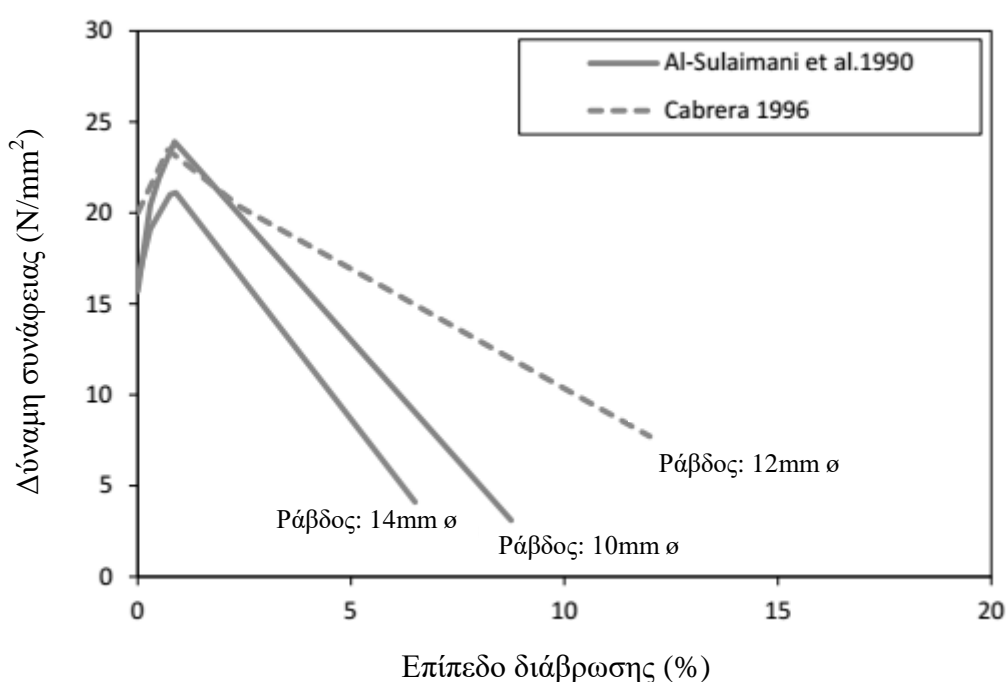
Σύμφωνα με τον Lewis (2010), η συνάφεια χάλυβα - σκυροδέματος οφείλεται κυρίως σε δύο παράγοντες. Ο πρώτος είναι η προσκόλληση και ο δεύτερος η μηχανική των υλικών. Προσκόλληση υπάρχει λόγω της χημικής συγκόλλησης μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα, λόγω της δύναμης που αναπτύσσεται μεταξύ τους και λόγω της περιοριστικής πίεσης που ασκείται από το σκυρόδεμα στον οπλισμό. Από μηχανικής άποψης συνάφεια προκύπτει λόγω των νευρώσεων του οπλισμού. Οι νευρώσεις αυτές αλληλοσυνδέονται με το σκυρόδεμα που τις περιβάλλει και αντιστέκονται σε οποιαδήποτε κίνηση.

Η διάβρωση των ράβδων οπλισμού επηρεάζει όλους τους παράγοντες που συνεισφέρουν στη συνάφεια οπλισμού - σκυροδέματος. Η χημική συγκόλληση παύει να υπάρχει αφού μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος παρεμβάλλεται, πλέον, ένα στρώμα σκουριάς. Οι δυνάμεις τριβής μεταξύ των δύο υλικών παύουν επίσης να υπάρχουν λόγω του ότι τα προϊόντα της διάβρωσης που τα διαχωρίζουν δρουν ως λιπαντικό υλικό.

Η επίδραση της διάβρωσης στη μείωση της περιοριστικής πίεσης είναι κάπως περίπλοκη αφού αρχικά επέρχεται αύξηση της και στη συνέχεια μειώνεται. Συγκεκριμένα κατά τη διάβρωση αυξάνεται η περιοριστική πίεση λόγω του ότι τα μόρια των προϊόντων της διάβρωσης καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο από τα αυθεντικά άτομα του σιδήρου και όσο δημιουργούνται νέα προϊόντα, τόσο περισσότερη πίεση εφαρμόζουν στο σκυρόδεμα και τον οπλισμό. Η πίεση αυτή συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι το σκυρόδεμα να ρηγματωθεί λόγω εφελκυσμού και, στη συνέχεια, η περιοριστική πίεση που παράγεται από το σκυρόδεμα χάνεται.

Η διάβρωση επηρεάζει επίσης και το μηχανικό δεσμό μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος. Οι νευρώσεις του παραμορφωμένου χάλυβα έχουν πολύ μεγαλύτερο λόγο εμβαδού επιφάνειας προς όγκο σε σχέση με το υπόλοιπο του οπλισμού. Άρα η διάβρωση, που συμβαίνει μόνο στην επιφάνεια του οπλισμού, έχει πολύ μεγαλύτερη επίδραση στις νευρώσεις προκαλώντας την υποβάθμισή τους με ταχείς ρυθμούς. Αποτέλεσμα αυτού είναι η περιοχή έδρασης μεταξύ του υπολοίπου των νευρώσεων και του περιβάλλοντος σκυροδέματος να μειώνεται και έτσι να μειώνεται και η μηχανική συνάφεια.

Με τον συνδυασμό των πιο πάνω παραγόντων που μεταβάλλουν τη συνάφεια προκύπτει ότι η συνάφεια μεταβάλλεται ως συνάρτηση της τρέχουσας διάβρωσης. Αρχικά υπάρχει αύξηση της συνάφειας αφού η αύξηση της περιοριστικής πίεσης υπερισχύει των μειώσεων των άλλων παραγόντων. Στη συνέχεια η αντοχή της συνάφειας φτάνει στο μέγιστό της και ακολούθως μειώνεται με πολύ ταχείς ρυθμούς (Lewis 2010). Αυτό φαίνεται και στο Διάγραμμα 2.4 που απεικονίζει την αντοχή συνάφειας ως συνάρτηση του επιπέδου διάβρωσης με στοιχεία από δύο διαφορετικές μελέτες στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν συνολικά ράβδοι τριών διαφορετικών διαμέτρων.



Διάγραμμα 2.4: Αντοχή συνάφειας συναρτήσει του βαθμού διάβρωσης

Πηγή: Elbusaefi, 2014

## 2.4 Απώλεια πλαστιμότητας χάλυβα

Η πλαστιμότητα ή ολκιμότητα (ductility) του χάλυβα σπλισμού μπορεί να οριστεί ως η ικανότητά του να επιτυγχάνει μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς να αυξάνονται οι τάσεις όταν ξεπεραστεί το όριο ελαστικότητάς του. Αυτό σημαίνει ότι ένας χάλυβας υψηλής πλαστιμότητας μπορεί πιο εύκολα να απορροφήσει ενέργεια σε σχέση με έναν χάλυβα χαμηλής πλαστιμότητας.

Σύμφωνα με τον Stanish (1997), η πλαστιμότητα του οπλισμού είναι επίσης μια μηχανική ιδιότητα του χάλυβα που επηρεάζεται αρνητικά λόγω της διάβρωσής του. Αυτή η μείωση της πλαστιμότητας είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη αφού η ικανότητα του χάλυβα να παραμορφώνεται επιτρέπει στο μηχανικό να αντιλαμβάνεται ότι ένα μέλος από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι έτοιμο να αστοχήσει.

Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι όταν ο χάλυβας έχει υψηλή πλαστιμότητα, μπορεί να αντέξει πολύ περισσότερο υπό την επίδραση των τάσεων που είναι μεγαλύτερες από το όριο ελαστικότητάς του αφού παραμορφώνεται πλαστικά. Ένας χάλυβας χαμηλής πλαστιμότητας όμως είναι πιο εύθραυστος και αστοχεί απότομα. Είναι δηλαδή ψαθυρός και η αστοχία του που συνήθως οδηγεί σε κατάρρευση κάποιου μέλους γίνεται χωρίς να υπάρχει κάποια προειδοποίηση με ότι αυτό μπορεί να συνεπάγεται για την κατασκευή και την ασφάλεια των χρηστών της.

## **2.5 Μείωση ακαμψίας και αύξηση βέλους κάμψης**

Οι ρηγματώσεις που δημιουργούνται όταν οι εφελκυστικές τάσεις που ασκούν τα προϊόντα της διάβρωσης στο σκυρόδεμα ξεπεράσουν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος έχουν ως συνεπακόλουθο να μειώνεται η ακαμψία (stiffness) του σκυροδέματος. Η μείωση αυτή της ακαμψίας προκαλεί με τη σειρά της τη δημιουργία ακόμα περισσότερων ρηγματώσεων και την αύξηση του βέλους κάμψης (deflection) του μέλους που έχει διαβρωθεί.

Ο λόγος που το βέλος κάμψης αυξάνεται είναι προφανής αφού ένα μέλος το οποίο έχει απολέσει τμήματα του σκυροδέματος του, λόγω θρυμματισμού, είναι λιγότερο άκαμπτο και άρα παραμορφώνεται πιο εύκολα. Το αυξημένο βέλος κάμψης δεν είναι παράγοντας που οδηγεί σε αστοχία της κατασκευής, είναι όμως παράγοντας που οδηγεί στην απώλεια της λειτουργικότητας της (Tapan 2007).

### **3 Εκτίμηση συνθηκών διάβρωσης**

Η αξιολόγηση ή εκτίμηση του βαθμού διάβρωσης μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα ή μεμονωμένων μελών της γίνεται, τις περισσότερες φορές, με σκοπό την επιδιόρθωσή τους. Για να είναι όμως η επιδιόρθωση αποτελεσματική και τα μέτρα που θα ληφθούν να μην είναι περιττά, σπαταλώντας πόρους χωρίς λόγο, πρέπει να κατανοηθεί πλήρως η αιτία της διάβρωσης και ο βαθμός στον οποίο αυτή έχει προχωρήσει.

Αυτό μπορεί να γίνει με την αξιοποίηση των υπάρχουσών τεχνικών εκτίμησης του βαθμού διάβρωσης των μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Με τη σωστή χρήση των τεχνικών αυτών και ακολουθώντας την ορθή διαδικασία, εξάγονται συνήθως χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά την έκταση του προβλήματος της διάβρωσης, την πιθανή διάρκεια ζωής της κατασκευής, τα πιθανά διορθωτικά μέτρα και τη χρησιμότητά τους.

#### **3.1 Στάδια αξιολόγησης**

Μια πλήρης εκτίμηση της κατάστασης στην οποία βρίσκεται η κατασκευή είναι συνήθως διαδικασία που περιλαμβάνει δύο στάδια· την προκαταρκτική επισκόπηση από την οποία προκύπτει η φύση του προβλήματος και την λεπτομερή επισκόπηση κατά την οποία επιβεβαιώνεται η αιτία της διάβρωσης και ποσοτικοποιείται η έκταση του προβλήματος. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, των δύο αυτών επισκοπήσεων είναι καλό να προηγείται μια αρχική μελέτη των διαθέσιμων σχεδίων και αναφορών που αφορούν το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη συντήρηση της κατασκευής (Broomfield 2007).

##### **3.1.1 Αρχική μελέτη**

Η αρχική μελέτη είναι το αρχικό στάδιο της διερεύνησης που αφορά την έκθεση της κατασκευής στη διάβρωση. Πρόκειται για τη μελέτη όλων των διαθέσιμων κατασκευαστικών σχεδίων, των αρχείων σχετικών με προηγούμενες επιθεωρήσεις, των αποτελεσμάτων προηγούμενων ελέγχων και των σχεδίων προηγούμενων σχετικών κατασκευαστικών εργασιών. Τα στοιχεία αυτά μπορεί να είναι από εκτενή έως ανύπαρκτα ή δυσανάγνωστα ανάλογα με το μέγεθος, την ηλικία και το καθεστώς ιδιοκτησίας της κατασκευής. Μέσω της αρχικής μελέτης μπορεί να φανεί σε ποιες

περιοχές υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης και σχεδιάζεται καλύτερα η προκαταρκτική και λεπτομερής επισκόπηση (Broomfield 2007).

### **3.1.2 Προκαταρκτική επισκόπηση**

Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει συνήθως οπτικό έλεγχο, διερεύνηση των ρηγματώσεων και των αποφλοιώσεων έτσι ώστε να φανεί το μέγεθός τους, μέτρηση της επικάλυψης οπλισμού, μετρήσεις ενανθράκωσης, μετρήσεις χρησιμοποιώντας το ηλεκτρόδιο αναφοράς (reference electrode) και λήψη δειγμάτων για περαιτέρω εργαστηριακό έλεγχο. Κατά το στάδιο αυτό πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ασφάλεια και στη δομική ακεραιότητα λόγω αποφλοιώσης του σκυροδέματος και απώλειας οπλισμού. Κομμάτια σκυροδέματος που ενδέχεται να πέσουν και θέτουν σε κίνδυνο το κοινό ή χρήστες της κατασκευής πρέπει οπωσδήποτε να αφαιρούνται. Άλλες αιτίες ρηγματώσης του σκυροδέματος, όπως θερμική μετακίνηση ή ζημιά λόγω πρόσκρουσης, δεν πρέπει να αγνοούνται (Broomfield 2007).

### **3.1.3 Λεπτομερής επισκόπηση**

Σκοπός του σταδίου αυτού είναι να αποφασιστεί η αποτελεσματικότερη λύση επισκευής του προβλήματος που θα έχει το χαμηλότερο κόστος. Αυτό γίνεται με ακριβή προσδιορισμό και μέτρηση της αίτιας, του μεγέθους και της σοβαρότητας της υποβάθμισης που έχει προκαλέσει η διάβρωση στην κατασκευή. Καθορίζεται δηλαδή με ακρίβεια το μέγεθος και η αιτία της ζημιάς.

Το δελτίο ποσοτήτων για την προσφορά επιδιόρθωσης προκύπτει συνήθως από τα στοιχεία της επισκόπησης αυτής οπότε απαιτείται πλήρης επισκόπηση όλων των επηρεαζόμενων μελών. Επίσης είναι πιθανόν να απαιτείται πλήρης οπτικός έλεγχος με επισκόπηση αποκόλλησης (delamination survey) σε όλες τις προσβάσιμες περιοχές.

Κατά τη λεπτομερή επισκόπηση λαμβάνονται δεδομένα που αφορούν συνήθως το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού, το βάθος της ενανθράκωσης, τη συγκέντρωση χλωριόντων, το δυναμικό του χάλυβα (half cell potential) και άλλα που λαμβάνονται αξιοποιώντας τις διάφορες τεχνικές μέτρησης που υπάρχουν (Broomfield 2007).

## 3.2 Μέθοδοι εκτίμησης συνθηκών διάβρωσης

Με την πάροδο το χρόνου και την πρόοδο της τεχνολογίας έχουν αναπτυχθεί διάφορες μη καταστρεπτικές μέθοδοι μέσω των οποίων εντοπίζεται ή και προβλέπεται ο βαθμός στον οποίο είναι διαβρωμένο ένα μέλος ή μια κατασκευή. Οι τεχνικές αυτές ποικίλλουν από πολύ απλές όπως η οπτική επιθεώρηση, ο έλεγχος για αποκόλληση σκυροδέματος και η μέτρηση της επικάλυψης μέχρι ιδιαίτερα σύνθετες όπως η μέτρηση του half cell potential και του ρυθμού διάβρωσης. Στο Υποκεφάλαιο αυτό θα γίνει εκτενής αναφορά στις δύο τελευταίες καθώς και στη μέθοδο μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος. Αυτές οι τεχνικές είναι οι τρεις που χρησιμοποιήθηκαν στο πειραματικό κομμάτι της εργασίας αυτής.

### 3.2.1 Half cell potential

Το πρότυπο ηλεκτρόδιο αναφοράς ή ημιστοιχείο (half cell) είναι μια απλή συσκευή (Διάγραμμα 3.1) που αποτελείται από ένα κομμάτι μετάλλου το οποίο βρίσκεται σε διάλυμα προκαθορισμένης συγκέντρωσης των δικών του ιόντων, όπως χαλκός σε κορεσμένο θεικό χαλκό (copper in saturated copper sulphate) ή άργυρος σε χλωριούχο άργυρο (silver in silver chloride). Όταν το ηλεκτρόδιο αυτό ενωθεί με ένα άλλο μέταλλο σε διάλυμα των δικών του ιόντων θα δημιουργηθεί διαφορά δυναμικού. Στην περίπτωση της μέτρησης της διάβρωσης, το δεύτερο μέταλλο είναι ο σίδηρος του χάλυβα που περιβάλλεται από τα οξείδια σιδήρου που έχουν δημιουργηθεί λόγω της διάβρωσης. Με την ένωση των δύο half cell δημιουργείται ένα απλό ηλεκτρικό στοιχείο (simple electrical cell) που παράγει τάση λόγω των διαφορετικών θέσεων των δύο μετάλλων στην ηλεκτροχημική ακολουθία και λόγω της διαφοράς των διαλυμάτων (Elsener et al 2003).

#### 3.2.1.1 Μετρούμενη ποσότητα

Με τη μετακίνηση του ηλεκτροδίου αναφοράς, το οποίο αποτελεί το ένα ημιστοιχείο, κατά μήκος της επιφάνειας του σκυροδέματος μεταβάλλεται το πλήρες στοιχείο αφού η κατάσταση της επιφάνειας του οπλισμού κάτω από το σκυρόδεμα είναι διαφορετική σε κάθε σημείο. Αν ο χάλυβας διατηρεί την παθητικότητά του, η τάση που μετριέται είναι μικρή (γύρω στα 0 έως 200 mV, ή ακόμα και μικρές θετικές τιμές) ενώ αν η παθητική στρώση είναι σε στάδιο κατάρρευσης και μεγάλες ποσότητες χάλυβα διαλύονται (ή μικρές περιοχές έχουν διαβρωθεί μειώνοντας το μέσο όρο της τάσης), η

τάση παίρνει πιο αρνητικές τιμές (γύρω στα  $-350\text{ mV}$ ). Αν η τάση παίρνει τιμές πιο αρνητικές των  $-350\text{mV}$ , ο χάλυβας συνήθως βρίσκεται σε κατάσταση ενεργούς διάβρωσης (Broomfield, 2007). Οι τιμές της τάσης είναι αρνητικές λόγω του ότι συνδέεται ο θετικός ακροδέκτης του βολτομέτρου στο χάλυβα και ο αρνητικός ακροδέκτης στο ηλεκτρόδιο αναφοράς (ASTM 1999).



**Διάγραμμα 3.1:** Ηλεκτρόδιο αναφοράς χαλκού σε κορεσμένο χαλκό

Η τεχνική αυτή είναι δυνατόν να δώσει πολύ αρνητικές τάσεις σε κορεσμένες συνθήκες όπου δεν υπάρχει οξυγόνο για να δημιουργηθεί η προστατευτική οξειδική στρώση όμως αφού δεν υπάρχει οξυγόνο δεν μπορεί να υπάρξει ούτε και διάβρωση. Η κατάσταση αυτή φανερώνει την αδυναμία της μεθόδου του half cell potential· ότι δηλαδή δεν πρόκειται για μέτρηση του ρυθμού της διάβρωσης αλλά για μέτρηση της θερμοδυναμικής της διάβρωσης. Η τάση της διάβρωσης που μετριέται μπορεί να είναι παραπλανητική και η ερμηνεία της βασίζεται σε εμπειρικές παρατηρήσεις και όχι στην ακριβή επιστημονική θεωρία. Ο λόγος που προκύπτει το πρόβλημα αυτό είναι ότι η τάση δεν αποτελεί συνάρτηση μόνο των συνθηκών διάβρωσης αλλά και

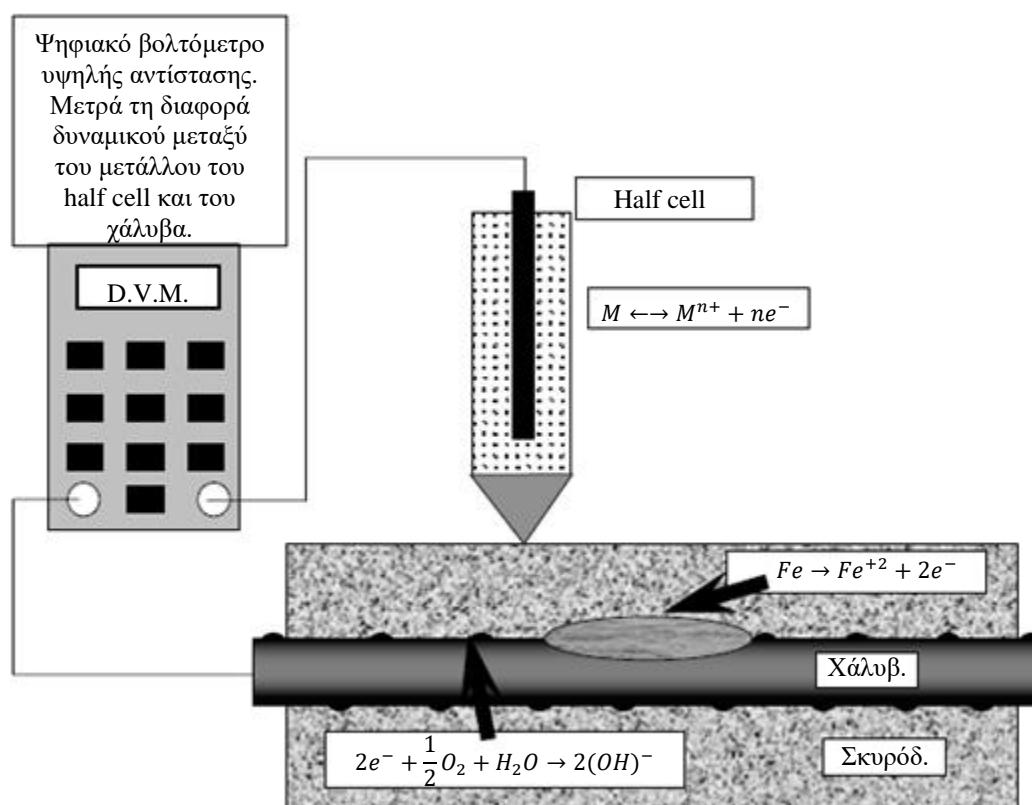
άλλων παραγόντων. Επίσης από τις συνθήκες διάβρωσης δεν προκύπτει απαραίτητα ο ρυθμός διάβρωσης.

Η μέτρηση του half cell potential δίνει μια ένδειξη του κινδύνου διάβρωσης του σκυροδέματος ενώ συνδέεται εμπειρικά, μέσω συγκρίσεων, με την πιθανότητα διάβρωσης.

Σύμφωνα με τον Broomfield (2007), οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη δραστηριότητα του σιδήρου στο διάλυμα, άρα και τις τάσεις που μετρούνται, είναι η έκταση της αποπαθητικοποίησης του χάλυβα, ο βαθμός ενανθράκωσης γύρω από το χάλυβα ή η παρουσία ικανής ποσότητας χλωριόντων για να καταστραφεί το προστατευτικό στρώμα και η παρουσία οξυγόνου για να διατηρηθεί το στρώμα αυτό.

### 3.2.1.2 Εξοπλισμός και χρήση του

Ο εξοπλισμός που απαιτείται για τη λήψη μετρήσεων του half cell potential παρουσιάζεται παραστατικά στο Διάγραμμα 3.2 στο οποίο φαίνονται και οι



Διάγραμμα 3.2: Παραστατική απεικόνιση του εξοπλισμού μέτρησης του half cell potential του χάλυβα στο σκυρόδεμα

Πηγή: Broomfield, 2007

αντιδράσεις που δημιουργούν τη σκουριά. Πρόκειται για ένα ψηφιακό βολτόμετρο υψηλής αντίστασης που συνδέεται με το χάλυβα οπλισμού και με το ηλεκτρόδιο αναφοράς μέσω καλωδίων. Μια από τις πιο συνηθισμένες συσκευές μέτρησης του half cell φαίνεται στο Διάγραμμα 3.3. Πολλαπλές μετρήσεις σε μεγάλες επιφάνειες μπορούν να ληφθούν αν αντί για το μεμονωμένο ηλεκτρόδιο χρησιμοποιηθεί ο ειδικός τροχός (wheel electrode) (Elsener et al 2003).



**Διάγραμμα 3.3:** Συσκευή μέτρησης του half cell potential της εταιρίας Proceq

**Πηγή:** Proceq, 2016

### **3.2.1.3 Διαδικασία μέτρησης**

Η διαδικασία μέτρησης με τη συγκεκριμένη τεχνική δεν παρουσιάζει συνήθως ιδιαίτερες δυσκολίες και σύμφωνα με τον Broomfield (2007) περιλαμβάνει, ανάλογα με τις συνθήκες, τα ακόλουθα βήματα:

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 αλατόνευρο.
9. Καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών, των στοιχείων του ηλεκτροδίου αναφοράς, του υγρού επαφής, της ηλεκτρικής σύνδεσης, του βάθους της επικάλυψης του οπλισμού, της κατάστασης του 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 μετρήσεων**

Το ηλεκτρόδιο αναφοράς, όπως προαναφέρθηκε, είναι ένα μέταλλο το οποίο βρίσκεται σε διάλυμα των δικών του ιόντων και μπορεί να είναι άργυρος σε χλωριούχο άργυρο, μαγγάνιο σε διοξείδιο του μαγγανίου, χαλκός σε κορεσμένο θειικό χαλκό ή άλλο μέταλλο.

Είναι πολύ σημαντικό να καταγράφεται ποιο είδος ηλεκτροδίου χρησιμοποιείται αφού από κάθε ένα από αυτά προκύπτουν διαφορετικές τιμές εξόδου. Για παράδειγμα το ηλεκτρόδιο αργυρού δίνει τιμές που εξαρτώνται από τη συγκέντρωση του χλωριούχου καλίου στο διάλυμα του και που είναι περίπου 110 mV πιο θετικές από αυτές που δίνει το ηλεκτρόδιο χαλκού. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα κριτήρια του ASTM (1999) που καθορίζουν τις συνθήκες διάβρωσης για τα ηλεκτρόδια χαλκού και αργυρού.

**Πίνακας 3.1: Κριτήρια του προτύπου ASTM C876 για τη διάβρωση του οπλισμού σκυροδέματος για ηλεκτρόδια χαλκού και αργυρού**

Κλάση διάβρωσης	Είδος ηλεκτροδίου αναφοράς		Συνθήκες διάβρωσης
	Χαλκός σε κορεσμένο θετικό χαλκό	Άργυρος 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

Πηγή: ASTM, 1999 και Broomfield, 2007

### 3.2.2 Αντίσταση σκυροδέματος / Concrete resistivity

Λόγω του ότι η διάβρωση είναι ηλεκτροχημικό φαινόμενο, η ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος σχετίζεται με το ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα. Αυτό συμβαίνει επειδή το ιοντικό ρεύμα (ionic current), δηλαδή το ηλεκτρικό ρεύμα με τη μορφή ροής φορτισμένων ιόντων στο νερό των πόρων, πρέπει να περάσει από τις ανόδους στις καθόδους για να προκληθεί διάβρωση.

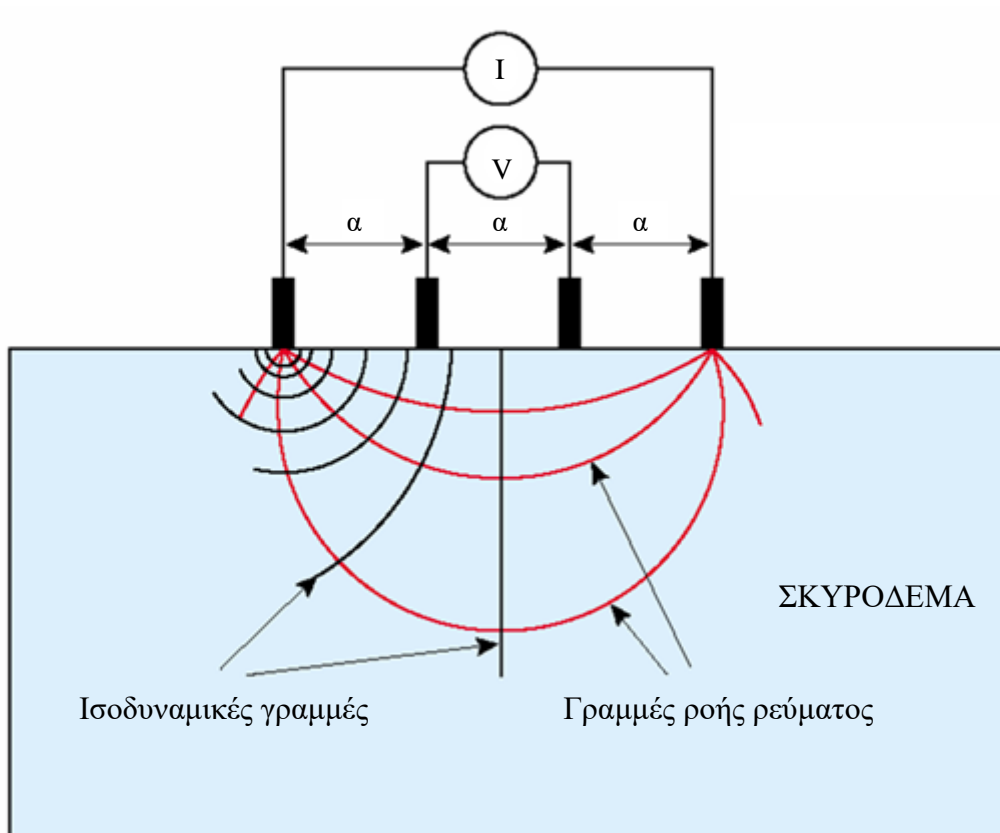
Για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης έχει αναπτυχθεί ο μετρητής αντίστασης τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων (four probe resistivity meter) ή Wenner Probe. Ο συγκεκριμένος μετρητής δημιουργήθηκε αρχικά για τη μέτρηση της αντίστασης του εδάφους όμως με κάποιες εξειδικευμένες τροποποιήσεις χρησιμοποιείται συχνά για τη μέτρηση της αντίστασης του σκυροδέματος η οποία υποδηλώνει την πιθανότητα διάβρωσης αν ο χάλυβας αποπαθητικοποιηθεί.

Τα περισσότερα συστήματα μέτρησης της αντίστασης χρησιμοποιούν τέσσερα βοηθητικά ηλεκτρόδια. Ένα συνηθισμένο τέτοιο σύστημα φαίνεται στο Διάγραμμα

3.4. Τα εξωτερικά ηλεκτρόδια περνούν το ρεύμα διαμέσου του σκυροδέματος ενώ τα εσωτερικά ανιχνεύουν τη διαφορά της τάσης. Ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.5.



Διάγραμμα 3.4: Μετρητής αντίστασης τεσσάρων ηλεκτροδίων (Wenner probe) της εταιρίας Proceq



Διάγραμμα 3.5: Τρόπος λειτουργίας του Wenner probe

Πηγή: Canin, 2016

Η αντίσταση  $\rho$  που μετράται, για ένα ημι-άπειρο ομογενές υλικό, δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (9)$$

όπου  $a$  είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων,  $I$  είναι το εφαρμοζόμενο ρεύμα διαμέσου των εξωτερικών ηλεκτροδίων και  $V$  είναι η τάση που μετρείται μεταξύ των εσωτερικών ηλεκτροδίων (Broomfield 2007).

### 3.2.2.1 Εξοπλισμός και χρήση του

Στο παρελθόν θεωρούνταν αναγκαία η διάνοιξη τρυπών στο σκυρόδεμα στις οποίες εισάγονταν τα ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια όμως στις σύγχρονες συσκευές μέτρησης είναι εφοδιασμένα με ελατήρια επαναφοράς οπότε πρέπει απλά να πιέζονται πάνω στην επιφάνεια μέτρησης. Για να εξασφαλιστεί η παρουσία υγρασίας στην περιοχή μέτρησης μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί διαβρεκτικό τζελ είτε να διαβρεχτούν τα ξύλινα βύσματα που βρίσκονται στην άκρη των ηλεκτροδίων. Υπάρχουν και συστήματα δύο ηλεκτροδίων τα οποία είναι φτηνότερα και λιγότερο ακριβή και συνήθως χρησιμοποιούνται αφού ανοιχτούν τρύπες στο σκυρόδεμα.

Σύμφωνα με τους Polder et al (2000), και στα δύο πιο πάνω συστήματα (τεσσάρων ή δύο ηλεκτροδίων) είναι κοινώς αποδεκτό ότι η απόσταση  $a$  μεταξύ των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μέγεθος του μεγαλύτερου αδρανούς. Αυτό συμβαίνει για να αποφευχθεί η μέτρηση της αντίστασης ενός μόνο αδρανούς.

Για τη μέτρηση της αντίστασης της επικάλυψης του σκυροδέματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μία εναλλακτική μέθοδος με σύστημα ενός μόνο ηλεκτροδίου (Broomfield 2007). Το συγκεκριμένο σύστημα είναι διαθέσιμο ως τμήμα μιας συσκευής μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης, στον οποίο γίνεται εκτενής αναφορά στη συνέχεια, και χρησιμοποιεί τον κλωβό οπλισμού ως το ένα ηλεκτρόδιο και ένα μικρό επιφανειακό ηλεκτρόδιο ως το άλλο ηλεκτρόδιο (Διάγραμμα 3.6). Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι μετρά την αντίσταση της επικάλυψης του σκυροδέματος μόνο ενώ μειονέκτημα είναι ότι παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα αντίστασης λόγω επαφής.



**Διάγραμμα 3.6:** Η συσκευή μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης Gecor 6 με τον κυλινδρικό μετρητή αντίστασης της επικάλυψης του σκυροδέματος

Πηγή: James Instruments, 2016

### 3.2.2.2 Μετρούμενη ποσότητα

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ποσότητα που μετράται με την τεχνική αυτή είναι η ηλεκτρική αντίσταση. Το μέγεθος αυτό αποτελεί ένδειξη της ποσότητας υγρασίας στους πόρους και του μεγέθους και της στρεβλότητας του συστήματος των πόρων. Επίσης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του σκυροδέματος που με τη σειρά της επηρεάζεται από την περιεκτικότητα σε τσιμέντο, την αναλογία νερού/τσιμέντου, τη σκλήρυνση και τα πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν.

Το επίπεδο συγκέντρωσης των χλωριόντων δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αντίσταση αφού υπάρχουν ήδη πολλά ιόντα διαλυμένα στο νερό των πόρων και η παρουσία λίγων ιόντων παραπάνω δεν διαφοροποιεί σημαντικά την κατάσταση. Ωστόσο τα χλωριόντα στο σκυρόδεμα μπορεί να είναι υγροσκοπικά, δηλαδή να προκαλούν περισσότερη συγκράτηση νερού στο σκυρόδεμα, και για το λόγο αυτό χρεώνεται συχνά στα χλωριόντα η συμβολή στη μείωση της αντίστασης του σκυροδέματος (Broomfield 2007).

### 3.2.2.3 Ερμηνεία μετρήσεων

Για τους πιο πάνω λόγους, η ερμηνεία των μετρήσεων που λαμβάνονται με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι κυρίως εμπειρική. Η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος σχετίζεται συνήθως με το ρυθμό διάβρωσης (Polder et al 2000). Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζεται ο επικρατέστερος τρόπος ερμηνείας των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης που λαμβάνεται με το σύστημα των τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων.

**Πίνακας 3.2: Εμπειρικός συσχετισμός της αντίστασης του σκυροδέματος που λαμβάνεται με το σύστημα Wenner Probe και του ρυθμού διάβρωσης**

<b>Κλάση διάβρωσης</b>	<b>Αντίσταση (Concrete resistivity)</b>	<b>Ρυθμός διάβρωσης (Corrosion rate)</b>
1	> 20 kΩcm	Χαμηλός
2	10 μέχρι 20 kΩcm	Χαμηλός μέχρι μέτριος
3	5 μέχρι 10 kΩcm	Ψηλός
4	< 5 kΩcm	Πολύ ψηλός

Πηγή: Broomfield, 2007 και Polder et al, 2000

### 3.2.3 LPR / Ρυθμός διάβρωσης / Corrosion rate

Το μέγεθος του ρυθμού διάβρωσης (corrosion rate) είναι ίσως η καλύτερη ποσότητα που μπορεί να μετρηθεί με την επί του παρόντος διαθέσιμη τεχνολογία για τον υπολογισμό του ρυθμού υποβάθμισης του οπλισμένου σκυροδέματος. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης όπως η αντίσταση εναλλασσόμενου ρεύματος (AC impedance) και η ηλεκτροχημική διακύμανση (electrochemical noise) που όμως δεν μπορούν να εφαρμοστούν στο πεδίο για τη μέτρηση της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού. Η κυριότερη μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ρυθμού διάβρωσης στο οπλισμένο σκυρόδεμα, στην οποία θα επικεντρωθεί η ενότητα αυτή, είναι η μέθοδος της γραμμικής πόλωσης που είναι επίσης γνωστή ως αντίσταση γραμμικής πόλωσης ή LPR (linear polarization resistance).

Δυστυχώς η τεχνολογία που σχετίζεται με την πρόβλεψη, την ανίχνευση και την αντιμετώπιση της διάβρωσης δεν έχει αναπτυχθεί σε βαθμό που η γνώση του ρυθμού διάβρωσης θα επιτρέπει στο μηχανικό να υπολογίζει με ακρίβεια την απώλεια εγκάρσιας διατομής του οπλισμού ή να προβλέπει το ρυθμό αποφλοιώσης του σκυροδέματος. Η γνώση του ρυθμού διάβρωσης προσφέρει όμως στο μηχανικό τη δυνατότητα να γνωρίζει πόσος χάλυβας μετατρέπεται σε σκουριά και πόσο μέταλλο χάνεται κατά τη στιγμή της μέτρησης.

Ο υπολογισμός της ποσότητας του χάλυβα που διαλύεται και των οξειδίων, δηλαδή της σκουριάς, που δημιουργείται μπορεί να γίνει με την μέτρηση του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από την ανοδική αντίδραση και καταναλώνεται από την καθοδική αντίδραση και στη συνέχεια με τη μετατροπή της ροής του ρεύματος σε απώλεια μετάλλου χρησιμοποιώντας το νόμο του Faraday:

$$m = \frac{Mit}{zF} \quad (10)$$

όπου  $m$  είναι η μάζα του χάλυβα που καταναλώνεται,  $i$  είναι το ρεύμα σε ampere,  $t$  είναι ο χρόνος σε δευτερόλεπτα,  $z$  είναι η ιοντική αλλαγή (2 για τη σχέση  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^-$ ) και  $M$  είναι η ατομική μάζα του μετάλλου (56g για το σίδηρο) (Broomfield 2007).

### 3.2.3.1 Εξοπλισμός και χρήση του

Για τη χρήση της μεθόδου της γραμμικής πόλωσης απαιτείται αρχικά η πόλωση του χάλυβα με ηλεκτρικό ρεύμα και η παρακολούθηση της επίδρασής της στο δυναμικό του ηλεκτροδίου αναφοράς. Η διαδικασία αυτή γίνεται χρησιμοποιώντας μια εξελιγμένη μορφή του ηλεκτροδίου αναφοράς στην οποία είναι ενσωματωμένα ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο και ένα τροφοδοτικό μεταβλητής τάσης συνεχούς ρεύματος. Ακολούθως μετράται το δυναμικό του ηλεκτροδίου αναφοράς και ρεύμα μικρής έντασης περνά από το βοηθητικό ηλεκτρόδιο στον οπλισμό. Η διαφορά στο δυναμικό του ηλεκτροδίου αναφοράς σχετίζεται με το ρυθμό διάβρωσης μέσω της σχέσης:

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (11)$$

όπου  $B$  είναι σταθερά (για το σκυρόδεμα 26 έως 52 mV ανάλογα με την παθητικότητα ή την ενεργή κατάσταση της επιφάνειας του χάλυβα) και  $R_p$  είναι η αντίσταση πόλωσης (σε ohms) που προκύπτει από τη σχέση:

$$R_p = \frac{\text{διαφορά δυναμικού}}{\text{εφαρμοζόμενο ρεύμα}} \quad (12)$$

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. 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.

Υπάρχουν δύο τρόποι για να γίνει η μέτρηση. Είτε εφαρμόζονται σταθερά επίπεδα ρεύματος και παρακολουθείται το δυναμικό (γαλβανοστατική μέθοδος), είτε το ρεύμα αυξάνεται μέχρι να επιτευχθεί ένα ή περισσότερα προκαθορισμένα δυναμικά (ποτενσιοστατική μέθοδος). Και στις δύο περιπτώσεις μπορεί να γίνουν προσαρμογές για αντιμετώπιση του φαινομένου του iR drop. 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 (μm/year) η οποία δίνεται από τη σχέση:

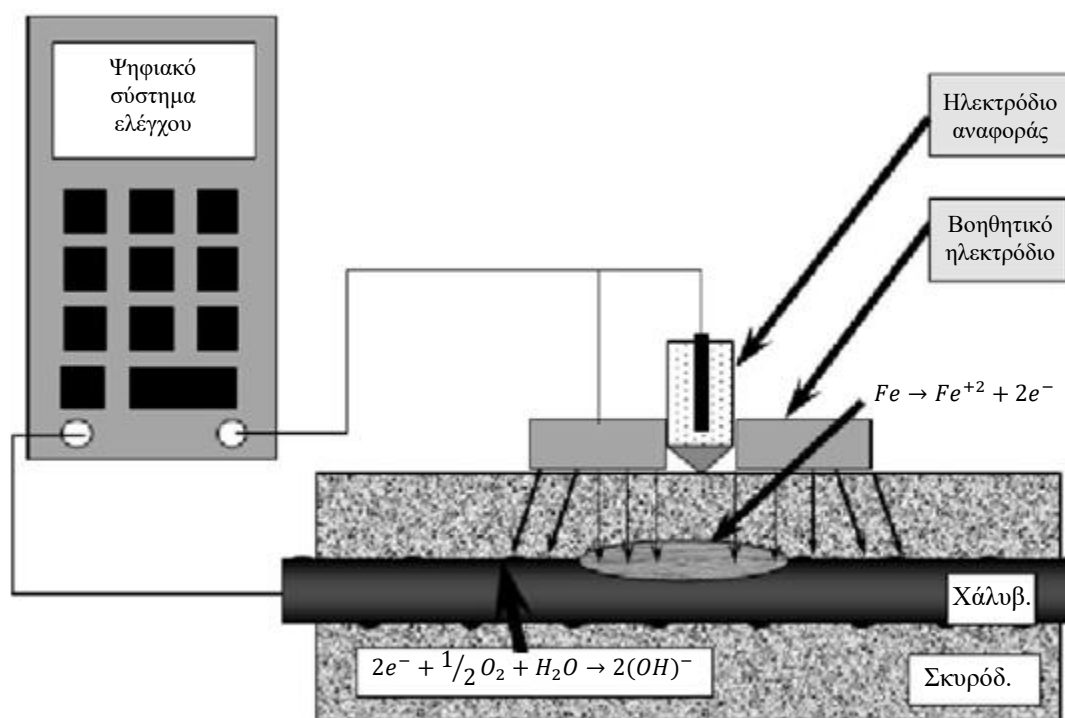
$$x = \frac{11 \times 10^6 \cdot B}{R_p \cdot A} \quad (13)$$

όπου  $A$  το εμβαδόν της επιφάνειας του χάλυβα που μετράται σε  $\text{cm}^2$ .

Ένα τυπικό σύστημα μέτρησης της γραμμικής πόλωσης παρουσιάζεται παραστατικά στο Διάγραμμα 3.7. Σε αυτό φαίνεται ότι η συσκευή, που παρουσιάστηκε στο Διάγραμμα 3.6, αποτελείται από ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς με ένα δακτυλιοειδές βοηθητικό κύκλο ο οποίος περνά το ρεύμα στο χάλυβα. Το ηλεκτρόδιο μπορεί να είναι από ανοξείδωτο ατσάλι με αγωγίμο ή διαβρεγμένο συμβατικό αφρό έτσι ώστε να εξασφαλίζεται καλή επαφή με την επιφάνεια του σκυροδέματος.

Πολύ σημαντικό για τη λήψη ορθών μετρήσεων ρυθμού διάβρωσης είναι ο καθορισμός της επιφάνειας μέτρησης. Σε άλλες εφαρμογές μη οπλισμένου σκυροδέματος, η μέτρηση της γραμμικής πόλωσης γίνεται σε δείγματα γνωστού μεγέθους. Αυτό δεν είναι εφικτό στο οπλισμένο σκυρόδεμα αφού πρέπει να ληφθούν

τιμές για το χάλυβα που βρίσκεται μέσα στο σκυρόδεμα, αποτελεί κομμάτι ενός δικτύου οπλισμών και βρίσκεται στο περιβάλλον που προκαλεί τη διάβρωση.



**Διάγραμμα 3.7:** Παραστατική απεικόνιση ενός απλού συστήματος γραμμικής πόλωσης αντίστασης με απεριόριστη περιοχή μέτρησης

Πηγή: Broomfield, 2007

Όπως είναι προφανές, η περιοχή του χάλυβα που ανιχνεύεται από τα ηλεκτρόδια είναι πολύ μικρότερη από ολόκληρο το δίκτυο των οπλισμών. Δεν μπορούμε όμως να υποθέσουμε ότι η περιοχή στην οποία γίνεται η μέτρηση είναι αυτή που βρίσκεται ακριβώς κάτω από το ηλεκτρόδιο αφού, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 3.7, το βοηθητικό ηλεκτρόδιο μεταφέρει ρεύμα και στην επιφάνεια που είναι κοντά του αλλά όχι ακριβώς από κάτω του. Η υπόθεση ότι υπάρχει σχέση 1:1 μεταξύ του μεγέθους του ηλεκτροδίου και της επιφάνειας μέτρησης είναι λανθασμένη και οδηγεί σε τεράστια σφάλματα με τιμές υπερπολλαπλάσιες των ορθών. Αυτό συμβαίνει όμως συνήθως σε περιπτώσεις χαμηλών ρυθμών διάβρωσης ενώ έχουν αναπτυχθεί και συστήματα που χρησιμοποιούν ένα μεγάλο ηλεκτρόδιο με ένα αγώγιμο επίθεμα αφρού ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο για να ελαχιστοποιηθεί η διαβροχή του

σκυροδέματος και να διασφαλιστεί ότι η περιοχή μέτρησης είναι ακριβώς κάτω από το ηλεκτρόδιο (Διάγραμμα 3.8).



**Διάγραμμα 3.8:** Συσκευή μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης που χρησιμοποιεί αγωγίμο επίθεμα αφρού ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο

**Πηγή Broomfield, 2007**

Έχουν επίσης αναπτυχθεί συσκευές που χρησιμοποιούν ένα σύστημα προστατευτικού δακτυλίου το οποίο περιορίζει την έκταση της περιοχής στην οποία εφαρμόζεται το ρεύμα και άρα καθορίζει την παράμετρο  $A$  έτσι ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η απώλεια μετάλλου. Σε κάποιες από τις συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται επιπρόσθετα ηλεκτρόδια που καθορίζουν την ποσότητα του ρεύματος που εφαρμόζεται στον προστατευτικό δακτύλιο για να εξασφαλιστεί ο περιορισμός του σήματος. Μια πρόσφατη εκδοχή τέτοιου είδους συσκευής φαίνεται στο Διάγραμμα 3.9. Οι συσκευές αυτές παρουσιάζουν αρκετά ακριβή αποτελέσματα όταν υπάρχουν

ψηλοί ρυθμοί διάβρωσης αλλά λιγότερα ακριβή αποτελέσματα όταν ο ρυθμός διάβρωσης είναι χαμηλός ή η διάβρωση είναι τοπικής μορφής. Αυτό είναι ιδιαίτερα αρνητικό καθώς συνήθως περισσότερη ακρίβεια απαιτείται όταν υπάρχουν χαμηλά επίπεδα διάβρωσης (Broomfield 2007).



**Διάγραμμα 3.9:** Η συσκευή Gecor 8 της Geosica που χρησιμοποιεί προστατευτικούς δακτυλίους για περισσότερη ακρίβεια.

Πηγή: Broomfield, 2007

### 3.2.3.2 Λήψη μετρήσεων

Η μέτρηση του ρυθμού διάβρωσης είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα σε σχέση με τις μετρήσεις που γίνονται για το δυναμικό του ηλεκτροδίου αναφοράς. Ο Broomfield (2007) αναφέρει ότι αυτό συμβαίνει για δύο λόγους. Πρώτον, λόγω του ότι το σκυρόδεμα καθυστερεί να αντιδράσει με το ηλεκτρικό πεδίο και δεύτερον, 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).

Παρ' όλα αυτά παρατηρούνται σημαντικές διακυμάνσεις στον ολικό χρόνο της μέτρησης ανάλογα με τη συσκευή που χρησιμοποιείται και τις δυνατότητές της. Υπάρχουν, για παράδειγμα, συσκευές παλαιού τύπου οι οποίες σήμερα δεν χρησιμοποιούνται σχεδόν καθόλου και χρειάζονται δέκα έως είκοσι λεπτά για να καταγράψουν μία μέτρηση. Οι συσκευές αυτές δεν δίνουν κατευθείαν την τιμή του

ρυθμού διάβρωσης αλλά πρέπει ο χρήστης τους να την υπολογίσει χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Οι γρηγορότερες συσκευές είναι αυτές που λειτουργούν με μικροεπεξεργαστή και χρειάζονται μερικά λεπτά για να δώσουν την τελική τιμή του ρυθμού διάβρωσης. Μεγάλο κομμάτι του χρόνου μέτρησης αποτελεί για όλες τις συσκευές ο αρχικός χρόνος προετοιμασίας αφού πρέπει η συσκευή να χρησιμοποιηθεί σε οπλισμό γνωστής θέσης και διαστάσεων.

Λόγω του χρόνου που απαιτείται για τη λήψη τιμών του ρυθμού διάβρωσης, συνήθως δεν είναι δυνατόν να ληφθούν τιμές από πολλά στοιχεία σε μια κατασκευή. Γι' αυτό πρέπει να γίνονται μετρήσεις σε στρατηγικά επιλεγμένα σημεία. Υποδεικνύονται από μετρήσεις δυναμικού που έχουν ληφθεί προηγουμένως με το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Μετρήσεις του ρυθμού διάβρωσης πρέπει να γίνονται στα σημεία που έχουν παρατηρηθεί οι μεγαλύτερες και οι μικρότερες τιμές δυναμικού και στις πιο απότομες κλίσεις του δυναμικού.

Εξίσου σημαντικό για τη λήψη σωστών τιμών ρυθμού διάβρωσης το γεγονός ότι οι τιμές αυτές παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση που σχετίζεται με τις καιρικές συνθήκες και πιο συγκεκριμένα με τη θερμοκρασία και την υγρασία. Ο ρυθμός διάβρωσης επιταχύνεται σε θερμές συνθήκες ενώ όταν το σκυρόδεμα είναι υγρό μειώνεται η αντίσταση με συνεπακόλουθο την αύξηση του ρυθμού διάβρωσης. Για να υπάρχει σωστή παρακολούθηση μίας κατασκευής πρέπει να λαμβάνονται μετρήσεις σε τακτά χρονικά διαστήματα μέσα στο έτος είτε την ίδια περίοδο κάθε χρόνο για να είναι τα αποτελέσματα συγκρίσιμα μεταξύ τους.

Επίσης σημαντικό κατά τη μέτρηση του ρυθμού διάβρωσης είναι ότι η μέτρηση γίνεται για μια γνωστή επιφάνεια οπλισμού. Αυτό σημαίνει ότι ο μηχανικός πρέπει να γνωρίζει την ακριβή θέση και το μέγεθος του οπλισμού έτσι ώστε να είναι γνωστή η επιφάνεια του χάλυβα κάτω από τον αισθητήρα. Για μετρήσεις που έχουν καθαρά συγκριτικό χαρακτήρα μπορεί να είναι επαρκές να πάρει τιμές μόνο από κάποιες παρόμοιες θέσεις, όπως απομονωμένα τμήματα.

Το δυναμικό πρέπει να είναι σταθερό κατά τη διάρκεια της μέτρησης έτσι ώστε να καταγραφεί η πραγματική διαφορά δυναμικού. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα σε πολύ στεγνές κατασκευές όπου οι συνθήκες αλλάζουν με γρήγορους ρυθμούς. Σε τέτοιες περιπτώσεις το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με τοπική διαβροχή και επιστροφή σε μεταγενέστερο στάδιο στην περιοχή του προβλήματος.

### 3.2.3.3 Ερμηνεία μετρήσεων

Η ερμηνεία των μετρήσεων του ρυθμού διάβρωσης είναι δύσκολο να γίνει με ορθό τρόπο αν δεν υπάρχει η απαραίτητη εμπειρία. Με τα χρόνια, και μέσα από έρευνα στον πεδίο και στο εργαστήριο, έχουν καθοριστεί γενικά κριτήρια που καθορίζουν τις συνθήκες ή την πιθανότητα διάβρωσης ανάλογα με το ρυθμό διάβρωσης. Στους Πίνακες 3.3 και 3.4 που ακολουθούν φαίνονται τα κριτήρια για συσκευές με και χωρίς προστατευτικό δακτύλιο αντίστοιχα.

**Πίνακας 3.3:** Ερμηνεία ρυθμού διάβρωσης για συσκευές που έχουν προστατευτικό δακτύλιο

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

Πηγή: Broomfield, 2007

**Πίνακας 3.4:** Ερμηνεία ρυθμού διάβρωσης για συσκευές χωρίς προστατευτικό δακτύλιο

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

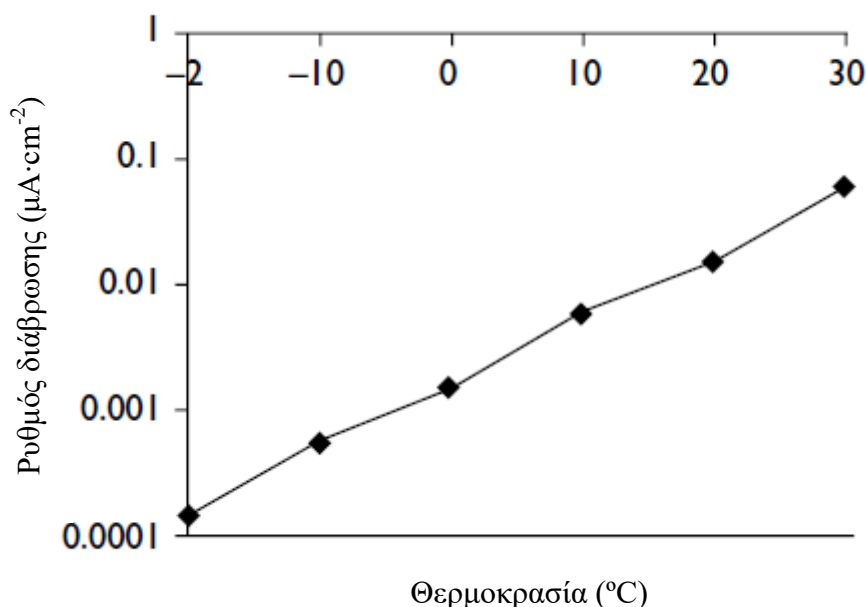
Πηγή: Broomfield, 2007

### 3.2.3.4 Επίδραση περιβάλλοντος

Οι συνθήκες όπως η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία που επικρατούν στην περιοχή που βρίσκεται η υπό διερεύνηση κατασκευή επηρεάζουν σημαντικά το ρυθμό διάβρωσης.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στο ρυθμό διάβρωσης είναι άμεση καθώς ο ρυθμός της οξείδωσης επηρεάζεται από την ποσότητα θερμικής ενέργειας που είναι διαθέσιμη για να προκαλέσει την αντίδραση. Επίσης η αντίσταση του σκυροδέματος μειώνεται σε αυξημένες θερμοκρασίες καθώς τα ιόντα αποκτούν μεγαλύτερη κινητικότητα και τα άλατα γίνονται πιο διαλυτά. Ακόμη επηρεάζεται η σχετική υγρασία του σκυροδέματος η οποία μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία.

Σύμφωνα με τον Tuutti (1982), 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. Η επίδραση της θερμοκρασίας και η αύξηση του ρυθμού διάβρωσης σε ψηλές θερμοκρασίες σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα φαίνεται στο Διάγραμμα 3.10.

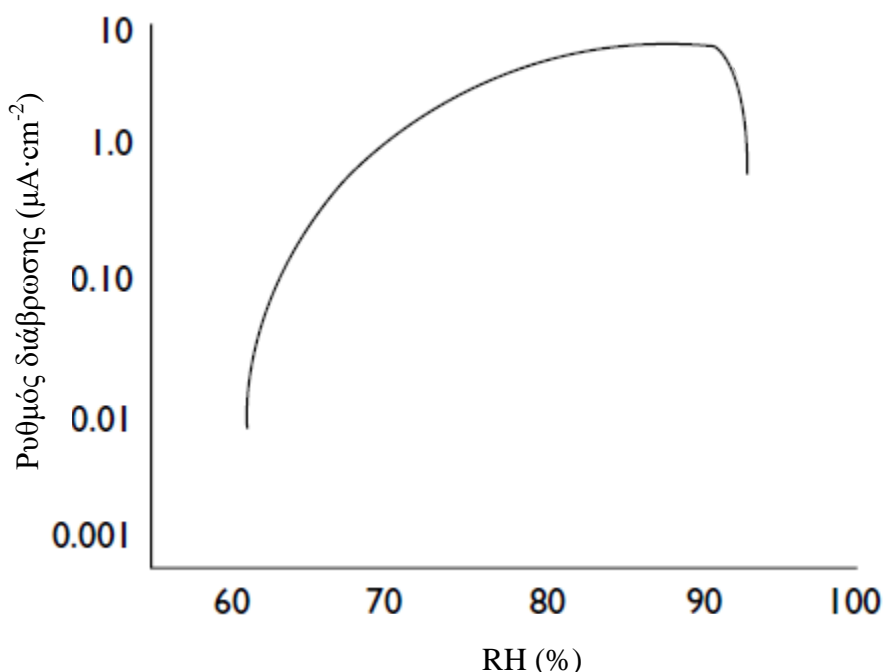


Διάγραμμα 3.10: Επίδραση της θερμοκρασίας στο ρυθμό διάβρωσης ενανθρακωμένου σκυροδέματος

Πηγή: Tuutti, 1982

Πολύ σημαντική είναι επίσης και η επίδραση της σχετικής υγρασίας [Relative humidity (RH)] καθώς από το ποσοστό της καθορίζεται πόσο νερό υπάρχει στους πόρους για να επιτραπεί στην αντίδραση της διάβρωσης να διατηρηθεί.

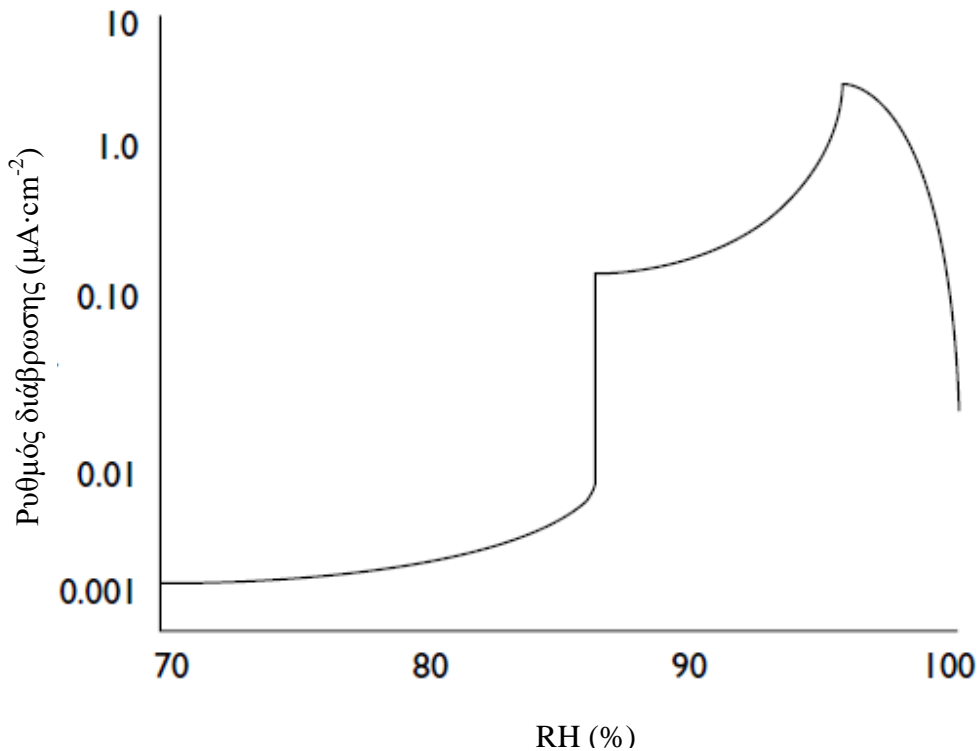
Σε σκυρόδεμα που έχει προσβληθεί από χλωριόντα πιστεύεται ότι ο υψηλότερος ρυθμός διάβρωσης υπάρχει όταν το ποσοστό της σχετικής υγρασίας του σκυροδέματος είναι γύρω στο 90-95%, κάτι που φαίνεται και στο Διάγραμμα 3.11. Για σκυρόδεμα που έχει ενανθρακωθεί το αντίστοιχο μέγιστο παρουσιάζεται για ποσοστά σχετικής υγρασίας 95-100% (Διάγραμμα 3.12) (Tuutti 1982).



**Διάγραμμα 3.11:** Διακύμανση του ρυθμού διάβρωσης σε σχέση με τη σχετική υγρασία σε σκυρόδεμα προσβεβλημένο από χλωριόντα

Πηγή: Tuutti, 1982

Είναι όμως σημαντικό να αναγνωριστεί το γεγονός ότι η σχετική υγρασία στους πόρους δεν είναι απλά συνδεδεμένη με την ατμοσφαιρική σχετική υγρασία. Παράγοντες όπως η εκτόξευση νερού (water splash), οι τριχοειδείς δράσεις, ο σχηματισμός δρόσου (dew formation), η θερμική επιβάρυνση λόγω ακτινοβολίας και η θερμική μάζα της κατασκευής μεταβάλλουν σημαντικά τη σχετική υγρασία του σκυροδέματος σε σχέση με την ατμοσφαιρική σχετική υγρασία (Broomfield 2007).



**Διάγραμμα 3.12:** Διακύμανση ρυθμού διάβρωσης σε σχέση με τη σχετική υγρασία σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα

Πηγή: Tuutti, 1982

### 3.2.3.5 Πρόβλεψη ρυθμού υποβάθμισης

Σημαντικότερη συνεισφορά των μετρήσεων του ρυθμού διάβρωσης είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλεφθεί ο ρυθμός υποβάθμισης (deterioration rate) μιας κατασκευής. Αυτό μπορεί να γίνει σε συνδυασμό με δεδομένα που σχετίζονται με τη διάχυση διαμέσου του σκυροδέματος, τη διείδυση χλωριόντων, το βαθμό ενανθράκωσης και μετρήσεις του πάχους επικάλυψης.

Ο τρέχων βαθμός υποβάθμισης είναι πολλές φορές καθοριστικής σημασίας όσον αφορά την απόφαση για καθυστέρηση ή αναβολή των έργων αποκατάστασης. Ανάλογα με το ρυθμό υποβάθμισης, μπορεί να πραγματοποιηθούν αισθητικές επιδιορθώσεις μικρής έκτασης εν αναμονή μεγαλύτερων επιδιορθωτικών εργασιών που θα γίνουν αργότερα ή να επισπευτούν οι κύριες εργασίες επιδιόρθωσης. Επίσης καθορίζει σε ποια μέλη μιας κατασκευής ή σε ποια κατασκευή πρέπει να δοθεί προτεραιότητα.

Προηγουμένως έγινε αναφορά στη σχέση από την οποία υπολογίζεται η απώλεια εγκάρσιας διατομής οπλισμού. Η σχέση αυτή αποτελεί ουσιαστικά τη μετάφραση του ρυθμού διάβρωσης σε απώλεια οπλισμού ανά έτος και δεν είναι απόλυτα ακριβής ενώ μέσω αυτής υπολογίζεται κατά προσέγγιση το αναμενόμενο τέλος της ζωής της κατασκευής. Η συγκεκριμένη σχέση βασίζεται στην παραδοχή ότι η σκουριά που παράγεται έχει όγκο τρεις φορές μεγαλύτερο από τον όγκο του οπλισμού που καταναλώνεται και ότι υπάρχει κάποιο πορώδες μέσα στη σκουριά. Στον Πίνακα 3.5 φαίνεται η πιο αποδεκτή μετατροπή των μετρήσεων του ρυθμού διάβρωσης σε ετήσια απώλεια διατομής οπλισμού και ετήσια ανάπτυξη σκουριάς.

Συνήθως όμως η απώλεια σκυροδέματος είναι που προκαλεί ανησυχία και όχι η απώλεια οπλισμού. Δυστυχώς είναι πολύ δυσκολότερο να προβλεφτούν οι ρυθμοί διάβρωσης και αποφλοιώσης του σκυροδέματος ειδικά αν προέρχονται από μια στιγμιαία μέτρηση. Η χρήση μιας ανάγωγης με την οποία υποθέτουμε ότι ο στιγμιαίος ρυθμός διάβρωσης σε μια συγκεκριμένη μέρα ισούται με τον μέσο ρυθμό διάβρωσης κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής οδηγεί σε πολύ ανακριβή αποτελέσματα όσον αφορά την πρόβλεψη του ρυθμού αποκόλλησης του σκυροδέματος. Αυτό συμβαίνει και λόγω του ότι πρέπει να γίνουν επιπρόσθετες υποθέσεις που σχετίζονται με τον όγκο των οξειδίων, όπως γίνεται για την πρόβλεψη του ρυθμού απώλειας οπλισμού, και τις τάσεις που απαιτούνται για να επέλθει ρηγμάτωση (Broomfield 2007).

**Πίνακας 3.5 Μετατροπή τιμών ρυθμού διάβρωσης σε ετήσια απώλεια εγκάρσιας διατομής οπλισμού και ετήσια ανάπτυξη σκουριάς**

<b>Ρυθμός διάβρωσης</b>	<b>Απώλεια εγκάρσιας διατομής οπλισμού</b>	<b>Ανάπτυξη σκουριάς</b>
0.1 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	1.1 $\mu\text{m}/\text{έτος}$	3.3 $\mu\text{m}/\text{έτος}$
0.5 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	5.5 $\mu\text{m}/\text{έτος}$	16.5 $\mu\text{m}/\text{έτος}$
1.0 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	11.5 $\mu\text{m}/\text{έτος}$	34.5 $\mu\text{m}/\text{έτος}$
5.0 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	57.5 $\mu\text{m}/\text{έτος}$	173 $\mu\text{m}/\text{έτος}$
10 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	115 $\mu\text{m}/\text{έτος}$	345 $\mu\text{m}/\text{έτος}$

Πηγή Broomfield, 2007

## 4 Πειραματική διαδικασία

Για το πειραματικό στάδιο της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δεκαέξι δοκίμια δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα στο μείγμα των οποίων συμπεριλήφθηκε μια ποσότητα χλωριούχου νατρίου έτσι ώστε να προκληθεί επιταχυνόμενη διάβρωση. Ανά ζεύγος, η περιεκτικότητα σε χλωριούχο νάτριο ήταν διαφορετική οπότε ο βαθμός στον οποίο αναμενόταν να προχωρήσει η διάβρωση ήταν επίσης διαφορετικός.

Για τη μέτρηση της διάβρωσης της κάθε δοκού χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις τεχνικές για τις οποίες έγινε εκτενής αναφορά στο Κεφάλαιο 3. Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων έγινε σπάσιμο των δοκών και οπτικός έλεγχος της διάβρωσης του οπλισμού τους έτσι να διαπιστωθεί κατά πόσον τα αποτελέσματα των μετρήσεων συνάδουν με την πραγματική διάβρωση. Επίσης έγινε έλεγχος της εφελκυστικής αντοχής των ράβδων οπλισμού.

### 4.1 Παρασκευή δοκιμών

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν (Διάγραμμα 4.1) είχαν διαστάσεις  $0.5 \times 0.1 \times 0.06 \text{m}$ , οπότε ο όγκος τους ήταν  $0.003 \text{m}^3$  έκαστος. Χρησιμοποιήθηκε η αναλογία υλικών με την οποία παρασκευάζεται σκυρόδεμα αντοχής C30 ενώ σε κάθε δοκό εγκιβωτίστηκε μια χαλύβδινη ράβδος διαμέτρου 10mm.

Παρασκευάστηκαν δεκαέξι δοκοί οι οποίες χωρίστηκαν σε οκτώ ζεύγη που το κάθε ένα περιείχε διαφορετική ποσότητα χλωριούχου νατρίου ως ποσοστό του τσιμέντου της κάθε δοκού. Το ποσοστό του χλωριούχου νατρίου που χρησιμοποιήθηκε ανά μάζα τσιμέντου για κάθε ένα από τα οκτώ ζεύγη είναι 0%, 1%, 2%, 3%, 5%, 10%, 15% και 25%. Μετά την παρασκευή τους, οι δοκοί παρέμειναν βυθισμένες στο νερό για 28 ημέρες.

Τα οκτώ ζεύγη ονομάστηκαν με τους αριθμούς από το 1 μέχρι το 8 κατά αύξουσα σειρά περιεκτικότητας χλωριούχου νατρίου, ενώ για κάθε ζεύγος οι δοκοί ονομάστηκαν a και b. Δηλαδή, για παράδειγμα, οι δύο δοκοί των οποίων ο λόγος χλωριούχου νατρίου προς τσιμέντο είναι 25% ονομάστηκαν 8a και 8b.

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή της κάθε δοκού.



Διάγραμμα 4.1: Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν

Πίνακας 4.1: Ποσότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή του κάθε δοκιμίου

Δοκοί	Χλ. Νάτριο / Τσιμέντο (%)	Χλ. νάτριο (kg)	Τσιμέντο (kg)	Άμμος (kg)	Αδρανή (kg)	Νερό (kg)
1a,1b	0	0.000	1.2	2.40	3.000	0.775
2a,2b	1	0.012	1.2	2.45	3.000	0.675
3a,3b	2	0.024	1.2	2.45	3.000	0.675
4a,4b	3	0.048	1.2	2.63	3.165	0.675
5a,5b	5	0.060	1.2	2.63	3.165	0.675
6a,6b	10	0.120	1.2	2.63	3.165	0.675
7a,7b	15	0.180	1.2	2.63	3.165	0.675
8a,8b	25	0.300	1.2	2.63	3.165	0.675

## 4.2 Αποτελέσματα μετρήσεων

Οι τρεις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των συνθηκών διάβρωσης του οπλισμού της κάθε δοκού είναι οι ακόλουθες:

1. Half cell potential
2. Concrete resistivity
3. LPR / Corrosion rate

Και για τις τρεις μεθόδους ακολουθήθηκαν οι προβλεπόμενες διαδικασίες μέτρησης έτσι ώστε να αποφευχθούν σφάλματα ενώ έγιναν πολλαπλές μετρήσεις για να είναι τα αποτελέσματα όσο το δυνατόν πιο ακριβή. Οι μετρήσεις και με τις τρεις μεθόδους έγιναν την ίδια χρονική περίοδο έτσι ώστε να μην υπάρχουν διαφορές στις συνθήκες μέτρησης.

Το στάδιο των μετρήσεων ακολουθήθηκε από το σπάσιμο των δοκών έτσι ώστε να αποκαλυφθεί ο οπλισμός και να γίνει οπτική επιθεώρηση του για να διαπιστωθεί η εξέλιξη της διάβρωσης σε κάθε δοκό.

Τελευταίο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας ήταν ο έλεγχος της εφελκυστικής αντοχής των ράβδων για να εξακριβωθεί το κατά πόσον η διάβρωση της κάθε ράβδου, και η πιθανή μείωση της διατομής της, είχαν ως επίδραση τη μείωση της εφελκυστικής αντοχής της.

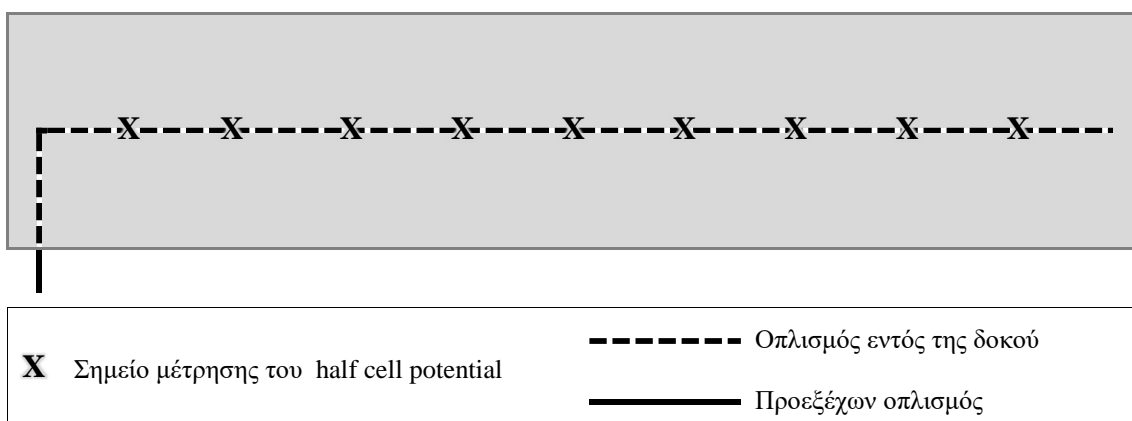
### 4.2.1 Half cell potential

Για τη μέτρηση του half cell potential των 16 δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε το όργανο ανάλυσης της διάβρωσης οπλισμού Canin+ της εταιρίας Prosec. Το συγκεκριμένο όργανο χρησιμοποιεί ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χαλκό σε κορεσμένο θειικό χαλκό (Διάγραμμα 3.1) οπότε με βάση τα κριτήρια για αυτό τον τύπο ηλεκτροδίου (Πίνακας 3.1) θα γίνει κατάταξη της κάθε δοκού σε κλάση διάβρωσης.

Οι μετρήσεις έγιναν σε διάστημα τριών μηνών και για την ορθή πραγματοποίηση τους ακολουθήθηκε η προβλεπόμενη διαδικασία. Στη διαδικασία αυτή συμπεριλαμβανόταν η εξασφάλιση άμεσης ηλεκτρικής σύνδεσης μεταξύ του οπλισμού και του μεταλλικού σφιγκτήρα του καλωδίου που τον συνδέει με το θετικό ακροδέκτη του βολτομέτρου. Για να εξασφαλιστεί η άμεση αυτή σύνδεση το τμήμα της ράβδου που προεξείχε από την κάθε δοκό, και μέσω του οποίου γινόταν η σύνδεση, καθαριζόταν προσεκτικά πριν από κάθε μέτρηση με μεταλλική βούρτσα.

Για να διασφαλιστεί η καλή επαφή μεταξύ του ηλεκτροδίου αναφοράς και του σκυροδέματος, ο φελλός του ηλεκτροδίου βυθιζόταν σε νερό για ένα διάστημα περίπου μίας ώρας πριν την έναρξη των μετρήσεων. Επίσης γινόταν διαβροχή της επιφάνειας μέτρησης μισή ώρα πριν τη λήψη των μετρήσεων και οι μετρήσεις ξεκινούσαν μόνο αν διαπιστωνόταν ότι η συσκευή έδινε για πέντε συνεχόμενα λεπτά τιμή δυναμικού που ήταν σταθερή και δεν είχε διακύμανση μεγαλύτερη των  $\pm 0.02V$ , σύμφωνα και με το πρότυπο C876 του ASTM (1999) που αφορά την πρότυπη δοκιμή μέτρησης του half cell potential. Το ηλεκτρόδιο συνδεόταν μέσω καλωδίου με τον αρνητικό ακροδέκτη του βολτομέτρου.

Σε κάθε δοκίμιο λαμβάνονταν συνολικά, κάθε φορά, μετρήσεις σε εννέα σημεία κατά μήκος της επιφάνειας του και πάνω ακριβώς από τη ράβδο οπλισμού που είχαν απόσταση 5 cm μεταξύ τους (Διάγραμμα 4.2).



**Διάγραμμα 4.2: Σημεία λήψης μετρήσεων του half cell potential**

Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι συνολικοί μέσοι όροι του half cell potential για την κάθε δοκό καθώς και οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές που καταγράφηκαν.

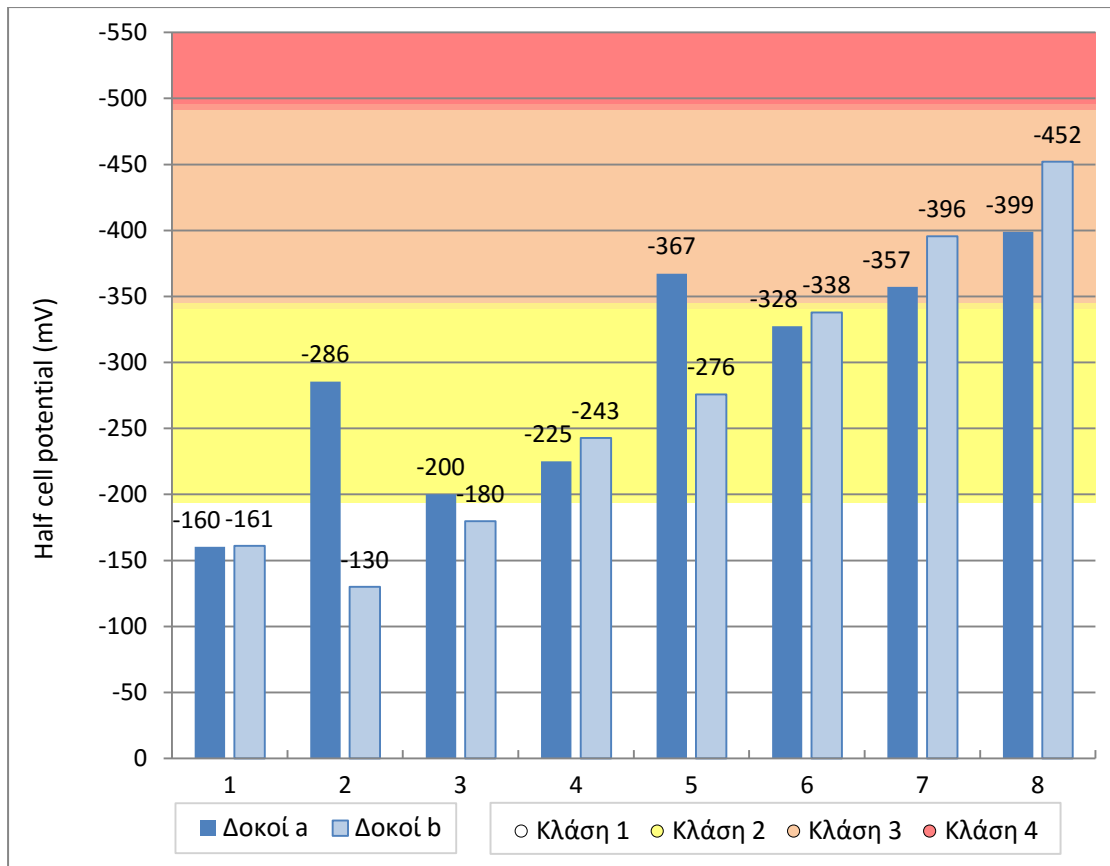
**Πίνακας 4.2: Half cell potential: Ελάχιστο, μέγιστο και μέσος όρο κάθε δοκού**

Δοκός	Half cell potential (mV)			Δοκός	Half cell potential (mV)		
	Ελάχ.	Μέγ.	Μ. όρος		Ελάχ.	Μέγ.	Μ. όρος
1a	-230	70	-160.28	5a	-405	-325	-367.22
1b	-275	15	-161.11	5b	-360	-255	-275.83
2a	-395	-145	-285.56	6a	-400	-265	-327.50
2b	-150	35	-130.00	6b	-380	-320	-337.78
3a	-375	-95	-200.00	7a	-420	-335	-357.22
3b	-370	-120	-179.72	7b	-440	-360	-395.56
4a	-285	-125	-225.00	8a	-420	-315	-398.89
4b	-295	-170	-242.78	8b	-505	-340	-451.94

Στο Διάγραμμα 4.3 παρουσιάζονται γραφικά οι μέσοι όροι του half cell potential της κάθε δοκού σε σχέση με τα όρια βάσει των οποίων οι δοκοί κατατάσσονται σε κλάση διάβρωσης. Όπως διακρίνεται σε αυτό, το half cell potential των δοκών ακολουθεί, σε γενικές γραμμές, μία αύξουσα αρνητική τάση με σημαντικότερες εξαιρέσεις τις δοκούς 2a και 5a που έχουν τιμές αρκετά μικρότερες απ' ό,τι θα έπρεπε.

Αναλυτικά, οι κλάσεις στις οποίες κατατάχτηκαν οι δεκαέξι δοκοί με βάση το half cell potential είναι:

- Κλάση 1 (μικρός κίνδυνος διάβρωσης): Δοκοί 1a, 1b, 2b και 3b
- Κλάση 2 (μεσαίος κίνδυνος διάβρωσης): Δοκοί 2a, 3a, 4a, 4b, 5b, 6a και 6b
- Κλάση 3 (μεγάλος κίνδυνος διάβρωσης): Δοκοί 5a, 7a, 7b, 8a και 8b
- Κλάση 4 (σίγουρη διάβρωση): Καμία δοκός



**Διάγραμμα 4.3: Μέσοι όροι του half cell potential της κάθε δοκού**

Οι δοκοί 2b και 5a εμφανίζουν τιμές αρκετά μικρότερες σε σχέση με αυτές που θα αναμένονταν με βάση την περιεκτικότητά τους σε χλωρίοντα και αυτό οφείλεται, πιθανώς, στο γεγονός ότι η παρασκευή τους ήταν προβληματική. Συγκεκριμένα, μεγάλο τμήμα του σκυροδέματος της δοκού 2b δεν ήταν στη θέση του (Διάγραμμα 4.4) ενώ απουσίαζε και ένα σημαντικό κομμάτι σκυροδέματος στο κέντρο της δοκού 5a.



**Διάγραμμα 4.4: Η δοκός 2b από την οποία απουσίαζαν μεγάλα τμήματα σκυροδέματος**



Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι συνολικοί μέσοι όροι του concrete resistivity για την κάθε δοκό καθώς και οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές που καταγράφηκαν.

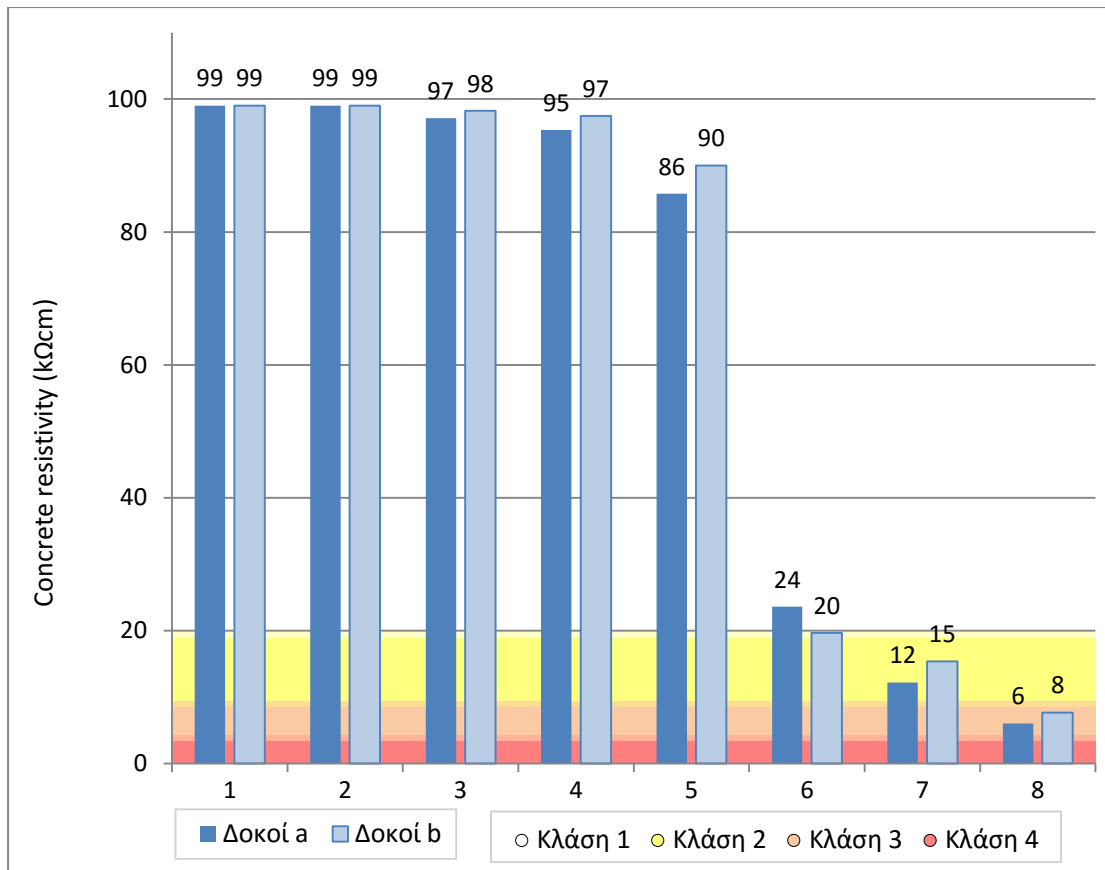
**Πίνακας 4.3: Concrete resistivity: Ελάχιστο, μέγιστο και μέσος όρο κάθε δοκού**

Δοκός	Concrete resistivity (kΩcm)			Δοκός	Concrete resistivity (kΩcm)		
	Ελάχ.	Μέγ.	Μ. όρος		Ελάχ.	Μέγ.	Μ. Όρος
1a	99	99	99.00	5a	41	99	85.73
1b	99	99	99.00	5b	61	99	90.01
2a	99	99	99.00	6a	10	60	23.62
2b	99	99	99.00	6b	10	55	19.68
3a	99	99	97.12	7a	4.2	25	12.23
3b	80	99	98.23	7b	7.4	36	15.40
4a	60	99	95.35	8a	0.5	16	6.04
4b	72	99	97.44	8b	2.3	19	7.68

Στο Διάγραμμα 4.6 στο οποίο παρουσιάζονται γραφικά οι μέσοι όροι του concrete resistivity της κάθε δοκού σε σχέση με τα όρια με βάση τα οποία γίνεται η κατάταξή τους σε κλάση διάβρωσης, φαίνεται ότι το concrete resistivity των δοκών 1 έως 5 είναι ίσο ή περίπου ίσο με τη μέγιστη τιμή μέτρησης του οργάνου που είναι 99 kΩcm. Στη συνέχεια, για τις δοκούς 6 υπάρχει απότομη μείωση του concrete resistivity η οποία συνεχίζεται σταδιακά μέχρι τις δοκούς 8.

Με βάση τη μέθοδο του concrete resistivity, οι δεκαέξι δοκοί κατατάχτηκαν σε κλάσεις διάβρωσης ως εξής:

- Κλάση 1 (χαμηλός ρυθμός διάβρωσης): Δοκοί 1a, 1b, 2a, 2b, 3a, 3b, 4a, 4b, 5a, 5b και 6a
- Κλάση 2 (χαμηλός μέχρι μέτριος ρυθμός διάβρωσης): Δοκοί 6b, 7a και 7b
- Κλάση 3 (ψηλός ρυθμός διάβρωσης): Δοκοί 8a και 8b
- Κλάση 4 (πολύ ψηλός ρυθμός διάβρωσης): Καμία δοκός



Διάγραμμα 4.6: Μέσοι όροι του concrete resistivity της κάθε δοκού

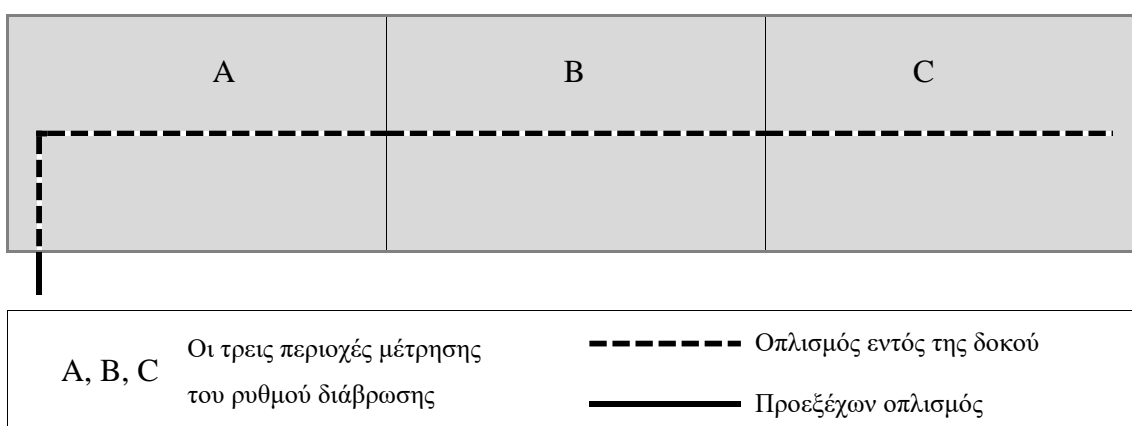
#### 4.2.3 LPR / Ρυθμός διάβρωσης / Corrosion rate

Η μέτρηση του ρυθμού διάβρωσης της κάθε δοκού έγινε χρησιμοποιώντας το όργανο μέτρησης του ρυθμού διάβρωσης Gecor 6 (Διάγραμμα 3.6) με το οποίο υπολογίζεται η γραμμική αντίσταση πόλωσης του σκυροδέματος. Το συγκεκριμένο όργανο χρησιμοποιεί προστατευτικό δακτύλιο οπότε η κατάταξη των δοκών σε κλάσεις διάβρωσης θα γίνει με βάση τον Πίνακα 3.3.

Η λήψη μετρήσεων και με τη μέθοδο αυτή έγινε σε διάστημα τριών μηνών και των μετρήσεων προηγούνταν πάντα μια χρονοβόρα διαδικασία, της οποίας πρώτο στάδιο ήταν το γέμισμα του αποθηκευτικού χώρου του κυκλικού αισθητήρα με διάλυμα θεικού χαλκού χρησιμοποιώντας σύριγγα. Οι μετρήσεις δεν ξεκινούσαν αν δεν διαπιστωνόταν ότι υπάρχει μικρή ροή διαλύματος διάμεσου των τριών ηλεκτροδίων αναφοράς που έχει ο αισθητήρας στη βάση του. Ακολούθως το προεξέχων τμήμα του οπλισμού καθαριζόταν προσεκτικά με μεταλλική βούρτσα έτσι ώστε να υπάρχει καλή ηλεκτρική επαφή μεταξύ του οπλισμού και του καλωδίου σύνδεσής του με τη

συσκευή. Η σύνδεση γινόταν με τη χρήση μεταλλικού σφικτήρα. Στη συνέχεια, και πριν τη λήψη μετρήσεων για την κάθε δοκό, η επιφάνεια της διαβρεχόταν ελαφρά με νερό και διάλυμα σαπουνιού για να υπάρχει πλήρης ηλεκτρική επαφή μεταξύ του αισθητήρα και της επιφάνειας του σκυροδέματος.

Σε κάθε δοκίμιο λαμβάνονταν τρεις συνολικά μετρήσεις σε τρεις διαφορετικές περιοχές της δοκού με διάταξη που φαίνεται στο Διάγραμμα 4.7. Ο αισθητήρας τοποθετούνταν στο σκυροδέμα με τρόπο που και τα τρία ηλεκτρόδια αναφοράς να βρίσκονται πάνω ακριβώς από τον οπλισμό. Κάθε μέτρηση χρειαζόταν περίπου πέντε λεπτά για να καταγραφεί ενώ σε πολλές περιπτώσεις παρουσιάζονταν σφάλματα που σχετίζονταν με την απουσία ικανοποιητικής επαφής μεταξύ του οπλισμού και του καλωδίου ή μεταξύ του αισθητήρα και της επιφάνειας του σκυροδέματος.

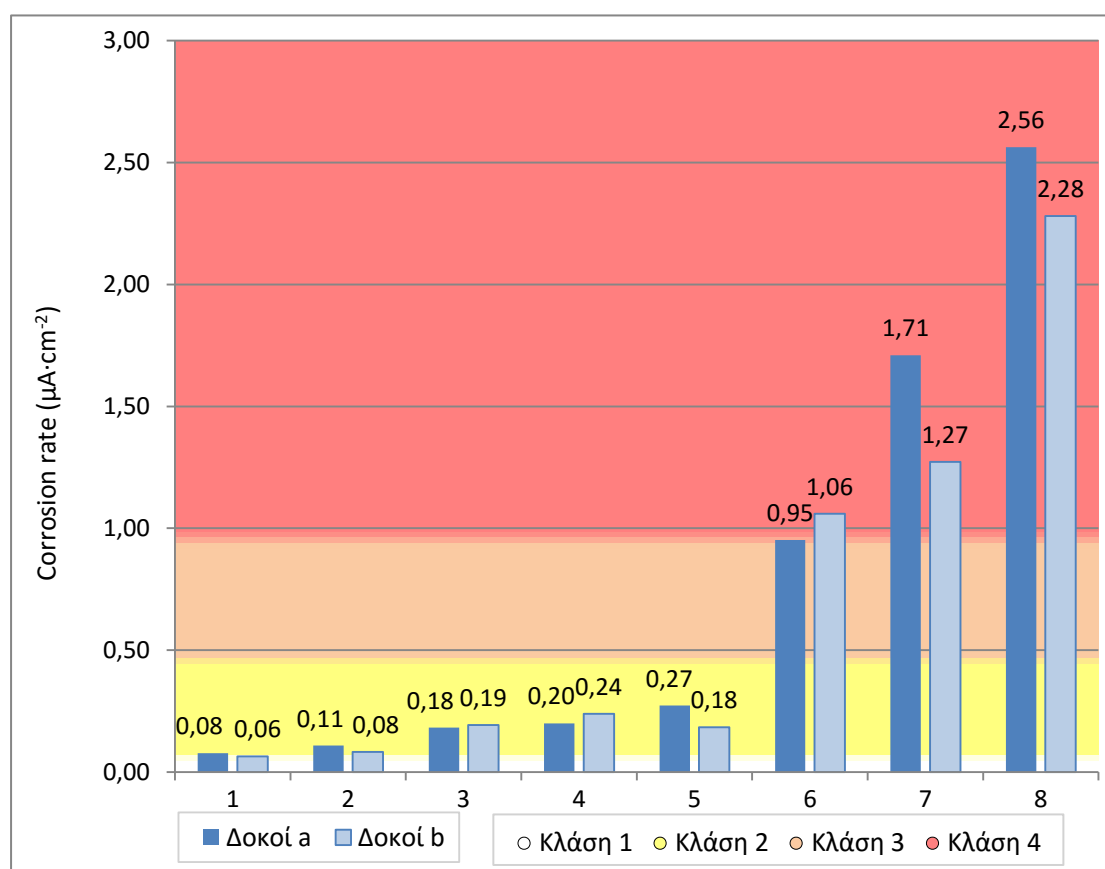


**Διάγραμμα 4.7: Διαίρεση δοκού σε τρεις περιοχές για τη μέτρηση του concrete resistivity**

Οι συνολικοί μέσοι όροι του corrosion rate για την κάθε δοκό καθώς και οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές που καταγράφηκαν παρουσιάζονται τον Πίνακα 4.4. Στο Διάγραμμα 4.8 παρουσιάζονται γραφικά οι μέσοι όροι του corrosion rate της κάθε δοκού σε σχέση με τα όρια με βάση τα οποία γίνεται η κατάταξή τους σε κλάση διάβρωσης. Είναι εμφανές ότι για τις δοκούς 1 μέχρι 5 οι τιμές είναι κοντά μεταξύ τους, υπάρχει όμως μία τάση για σταδιακή αύξηση. Ο ρυθμός διάβρωσης των δοκών 6 αυξάνεται απότομα και η αύξηση συνεχίζεται, επίσης απότομα, και για τις δοκούς 7 και 8.

Πίνακας 4.4: Corrosion rate: Ελάχιστο, μέγιστο και μέσος όρο κάθε δοκού

Δοκός	Corrosion rate ( $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ )			Δοκός	Corrosion rate ( $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ )		
	Ελάχ.	Μέγ.	Μ. όρος		Ελάχ.	Μέγ.	Μ. Όρος
1a	0.044	0.166	0.078	5a	0.135	0.352	0.273
1b	0.053	0.085	0.065	5b	0.117	0.303	0.183
2a	0.083	0.15	0.109	6a	0.611	1.63	0.951
2b	0.063	0.102	0.082	6b	0.68	1.392	1.059
3a	0.116	0.284	0.182	7a	1.071	2.685	1.709
3b	0.124	0.296	0.193	7b	0.922	1.891	1.272
4a	0.138	0.257	0.200	8a	1.871	3.997	2.563
4b	0.133	0.302	0.240	8b	1.554	3.453	2.280



Διάγραμμα 4.8: Μέσοι όροι του corrosion rate της κάθε δοκού

Η κατάταξη των δοκών σε κλάσεις που προέκυψε με τη μέτρηση του ρυθμού διάβρωσης με τη χρήση της μεθόδου γραμμικής πόλωσης είναι η εξής:

- Κλάση 1 (παθητική κατάσταση): Δοκοί 1a, 1b και 2b
- Κλάση 2 (χαμηλή έως μέτρια διάβρωση): Δοκοί 2a, 3a, 3b, 4a, 4b, 5a και 5b
- Κλάση 3 (μέτρια έως πολλή διάβρωση): Δοκός 6a
- Κλάση 4 (ψηλός ρυθμός διάβρωσης): Δοκοί 6b, 7a, 7b, 8a και 8b

#### 4.2.4 Οπτική επιθεώρηση και κατάταξη σε κλάσεις





Οι μετρήσεις με τις τρεις μεθόδους ακολουθήθηκαν από το σπάσιμο των δοκών. Οι ράβδοι, μετά την αποκάλυψή τους, καθαρίστηκαν με μεταλλική βούρτσα για να ξεκολλήσουν όσο το δυνατόν περισσότερα από τα εναπομείναντα κομμάτια σκουροδέματος καθώς και τα προϊόντα της διάβρωσης. Μετά τον καθαρισμό τους, επιθεωρήθηκε η κατάσταση των ράβδων και έγινε κατάταξή τους σε κλάσεις ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι των προϊόντων της διάβρωσης και τη μείωση ή όχι της διατομής της κάθε ράβδου. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζεται η περιγραφή των τεσσάρων κλάσεων στις οποίες κατατάχτηκαν οι δοκοί με βάση τον οπτικό τους έλεγχο.





Στο Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται φωτογραφίες των 16 ράβδων στις οποίες φαίνονται οι συνθήκες διάβρωσης της κάθε μίας καθώς και η κλάση διάβρωσης στην οποία κατατάχτηκε με βάση τον οπτικό έλεγχο της και την πραγματική ύπαρξη διάβρωσης.





**Πίνακας 4.5: Κλάσεις κατάταξης των ράβδων οπλισμού**





Κλάση	Περιγραφή
1	Καθόλου έως ελάχιστη σκουριά πολύ λεπτού στρώματος, καθόλου απώλεια διατομής
2	Ίχνη σκουριάς πορτοκαλί χρώματος που αφαιρούνται εύκολα αν σκουπιστούν με πανί, καθόλου απώλεια διατομής
3	Αύξηση όγκου και κομμάτια σκουριάς που αφαιρούνται αν χτυπηθούν με σφυρί, μικρή απώλεια διατομής
4	Μεγάλα κομμάτια σκουριάς, σημαντική απώλεια διατομής

**Πίνακας 4.6: Φωτογραφίες, σχολιασμός και κατάταξη ράβδων οπλισμού σε κλάση διάβρωσης**

Δοκός	Φωτογραφία	Σχόλια και κατάταξη
1a		<p>Καθόλου ως ελάχιστη σκουριά σε όλο το μήκος της ράβδου</p> <p>Κλάση 1</p>
1b		<p>Καθόλου ως ελάχιστη σκουριά σε όλο το μήκος της ράβδου</p> <p>Κλάση 1</p>
2a		<p>Σκουριά πορτοκαλί χρώματος σε κάποια σημεία</p> <p>Κλάση 2</p>
2b		<p>Πολύ λεπτό στρώμα σκουριάς σε όλο το μήκος της ράβδου</p> <p>Κλάση 1</p>

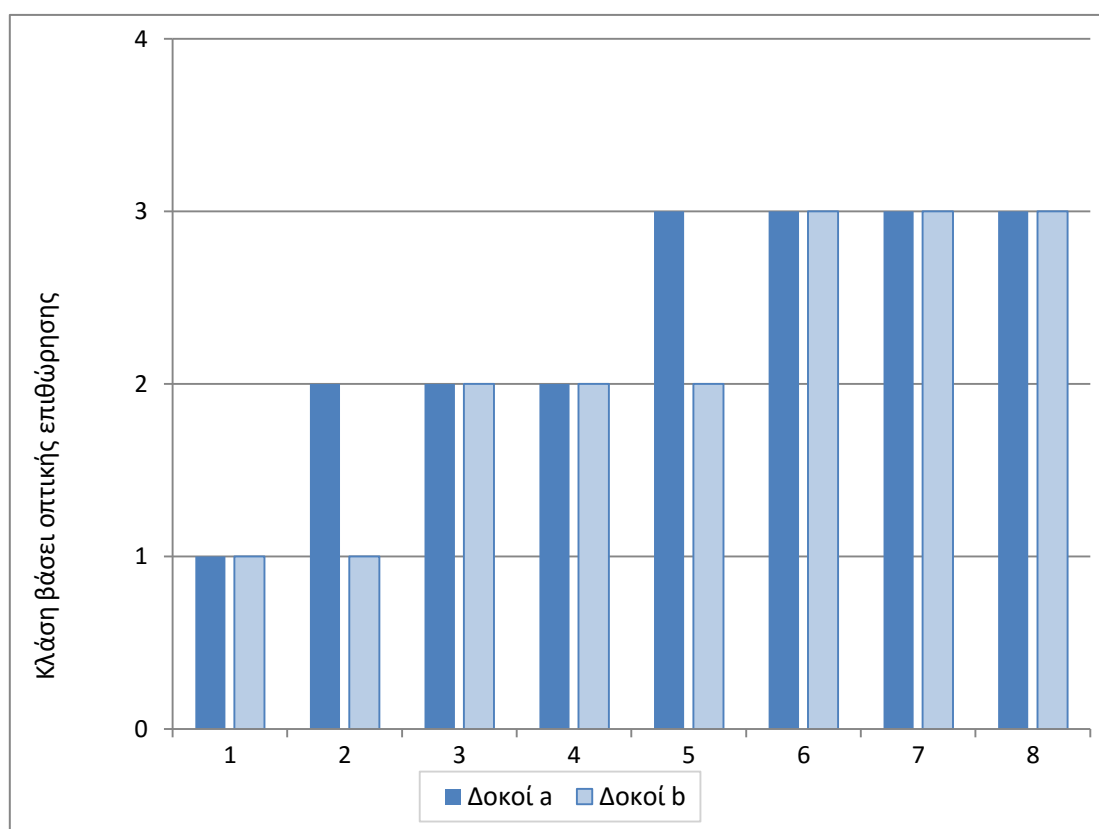
3a		<p>Ίχνη σκουριάς πορτοκαλί χρώματος ιδιαίτερα στο ένα άκρο και στο μέσο της ράβδου</p> <p>Κλάση 2</p>
3b		<p>Αρκετή σκουριά πορτοκαλί χρώματος στο μέσο της ράβδου</p> <p>Κλάση 2</p>
4a		<p>Ίχνη σκουριάς πορτοκαλί χρώματος σε όλο το μήκος της ράβδου</p> <p>Κλάση 2</p>
4b		<p>Σκουριά πορτοκαλί χρώματος σε μεγάλα τμήματα της ράβδου</p> <p>Κλάση 2</p>

5a		<p>Σκουριά αυξημένου όγκου στο μέσο της ράβδου, όπου υπήρχε φθορά στο σκυρόδεμα Κλάση 3</p>
5b		<p>Σκουριά πορτοκαλί χρώματος σε μεγάλα τμήματα της ράβδου Κλάση 2</p>
6a		<p>Άυξηση όγκου λόγω σκουριάς σε αρκετά σημεία της ράβδου και πολύ μικρές απώλειες διατομής Κλάση 3</p>
6b		<p>Σκουριά αυξημένου όγκου ειδικά στο ένα άκρο της ράβδου Κλάση 3</p>

7a		<p>Αυξημένος όγκος λόγω σκουριάς, ιδιαίτερα στο μέσο της ράβδου</p> <p>Κλάση 3</p>
7b		<p>Σκουριά αυξημένου όγκου σε σημεία της ράβδου, ειδικά στο ένα άκρο και στο μέσο</p> <p>Κλάση 3</p>
8a		<p>Ποσότητες σκουριάς αυξημένου όγκου στο μέσο και στο ένα άκρο της ράβδου και πολύ μικρές απώλειες στη διατομή</p> <p>Κλάση 3</p>
8b		<p>Αύξηση όγκου λόγω σκουριάς στο μεγαλύτερο μέρος της ράβδου και πολύ μικρές απώλειες στη διατομή</p> <p>Κλάση 3</p>

Πρέπει να σημειωθεί ότι καμία δοκός δεν κατατάχτηκε οπτικά στην χειρότερη κλάση, την κλάση 4, λόγω κυρίως του γεγονότος ότι σε καμία δεν παρατηρήθηκε σημαντική απώλεια εγκάρσιας διατομής του χάλυβα. Αυτό επιβεβαιώνεται και στο επόμενο Υποκεφάλαιο στο οποίο γίνεται αναφορά στην δοκιμή της εφελκυστικής αντοχής των ράβδων.

Η κλάση στην οποία κατατάχτηκε η κάθε ράβδος παρουσιάζεται γραφικά και στο Διάγραμμα 4.9 στο οποίο είναι εμφανές ότι η κατάταξη των ράβδων σε κλάσεις ακολουθεί αύξουσα σειρά με μοναδικές εξαιρέσεις τις ράβδους 2a και 5a που είχαν σημαντικές φθορές στην επικάλυψή τους και οι οποίες έχουν καταταγεί σε μεγαλύτερη κλάση από αυτή που θα αναμενόταν με βάση την περιεκτικότητά τους σε χλωριούχο νάτριο. Οι ράβδοι αυτοί διαβρώθηκαν περισσότερο, πιθανόν, λόγω της αυξημένης παρουσίας οξυγόνου αφού ήταν πιο εκτεθειμένες στις συνθήκες του περιβάλλοντος.



Διάγραμμα 4.9: Κατάταξη ράβδων σε κλάση διάβρωσης με βάση την οπτική επιθεώρηση

#### 4.2.5 Δοκιμή εφελκυστικής αντοχής

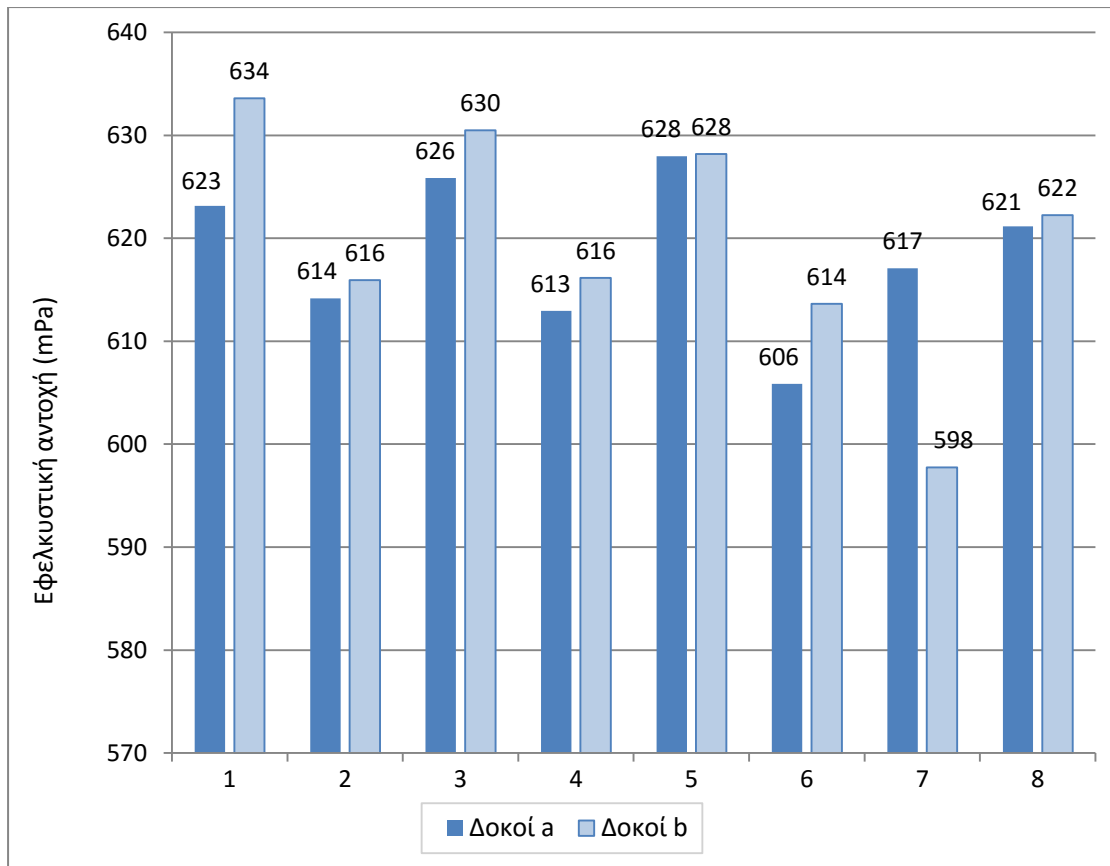
Οι ράβδοι οπλισμού, μετά την οπτική επιθεώρηση τους, υποβλήθηκαν στη δοκιμή της εφελκυστικής αντοχής για να εξακριβωθεί το κατά πόσον η διάβρωσή τους, και η πιθανή απώλεια διατομής τους, έχει οδηγήσει σε μείωση της αντοχής τους. Η δοκιμή έγινε ακολουθώντας το πρότυπο CYS EN ISO 6892-1: 2009 και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του ελέγχου μετατόπισης (displacement control).

Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται η μέγιστη εφελκυστική δύναμη της συσκευής που προηγήθηκε της θραύσης της κάθε ράβδου καθώς και η αντίστοιχη εφελκυστική τάση για ράβδο με διάμετρο 10 mm.

Πίνακας 4.7: Εφελκυστική αντοχή της κάθε ράβδου οπλισμού

Δοκός	Μέγιστη δύναμη (kN)	Εφελκυστική αντοχή (mPa)	Δοκός	Μέγιστη δύναμη (kN)	Εφελκυστική αντοχή (mPa)
1a	48,94	623,15	5a	48,39	627,97
1b	49,76	633,60	5b	49,32	628,19
2a	48,23	614,15	6a	49,34	605,87
2b	48,37	615,93	6b	47,58	613,63
3a	49,15	625,84	7a	48,19	617,07
3b	49,52	630,49	7b	48,46	597,73
4a	48,14	612,94	8a	46,94	621,16
4b	48,94	616,17	8b	48,78	622,23

Η εφελκυστική αντοχή όλων των ράβδων παρουσιάζεται γραφικά στο Διάγραμμα 4.10 στο οποίο φαίνεται ότι δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές από ράβδο σε ράβδο καθώς και ότι οι μικρές διαφορές που υπάρχουν δεν μπορεί να οφείλονται στη διάβρωση αφού δεν παρατηρείται σταδιακή μείωση της αντοχής στις ράβδους που ήταν πιο έντονα διαβρωμένες λόγω της παρουσίας χλωριόντων.



**Διάγραμμα 4.10: Εφελκυστική αντοχή της κάθε ράβδου οπλισμού**

Η μη μείωση της εφελκυστικής αντοχής αναλογικά με την παρουσία χλωριόντων είναι φυσιολογική αφού και στην οπτική επιθεώρηση δεν διαπιστώθηκε ότι σε κάποια ράβδο υπάρχει σημαντική μείωση της ενεργούς διατομής των ράβδων. Οι μικροδιαφορές που παρατηρούνται στην αντοχή είναι πιθανόν να οφείλονται σε κατασκευαστικές ανωμαλίες των ράβδων.

## 5 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Η λήψη μετρήσεων διάβρωσης με πολλές μεθόδους αποτελεί σε πολλές περιπτώσεις τη λύση για να εκτιμηθεί με περισσότερη ακρίβεια η υπάρχουσα κατάσταση διάβρωσης ενός μέλους από οπλισμένο σκυρόδεμα. Σε κάποιες περιπτώσεις όμως, όταν τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι διαφορετικά μεταξύ τους, είναι δύσκολο να αποφασιστεί ποια μέθοδος είναι η πιο αξιόπιστη έτσι ώστε να εκτιμηθεί ορθά ο βαθμός διάβρωσης.

Σε αυτό το Κεφάλαιο γίνεται στάθμιση των μεθόδων μέτρησης έτσι ώστε να παραχθεί ένα μοντέλο με το οποίο θα υπολογίζεται ο υπάρχων βαθμός διάβρωσης αν έχουν ληφθεί μετρήσεις διάβρωσης με τις τρεις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν κατά το πειραματικό στάδιο. Επίσης γίνεται μια πιθανολογική προσέγγιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, με βάση τη στάθμιση που έγινε, έτσι ώστε να προσεγγιστεί η πιθανότητα διάβρωσης αν υπάρχουν, και πάλι, μετρήσεις με τις τρεις μεθόδους.

Αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθείται είναι:

- Για κάθε μέθοδο, κατάταξη των δοκών σε κλάσεις διάβρωσης με βάση τα αποτελέσματα της μεθόδου
- Κατάταξη των δοκών σε κλάση διάβρωσης με βάση την οπτική επιθεώρηση
- Σύγκριση της κλάσης που κατατάχτηκε η κάθε δοκός βάσει κάθε μίας από τις τρεις μεθόδους με την κλάση κατάταξής της βάσει της οπτικής επιθεώρησης
- Υπολογισμός συνολικής διαφοράς κλάσης για κάθε μέθοδο
- Κατανομή συντελεστών βάρους σε κάθε μέθοδο με βάση τη συνολική διαφορά κλάσης της κάθε μεθόδου (βαθμονόμηση μοντέλου) και υπολογισμός βαθμού διάβρωσης της κάθε δοκού
- Σύγκριση βαθμού διάβρωσης με κλάση διάβρωσης βάσει της οπτικής επιθεώρησης και επαναβαθμονόμηση μοντέλου
- Για κάθε μέθοδο, αντιστοίχιση μίας πιθανότητας διάβρωσης σε κάθε δοκό με βάση τα αποτελέσματα της μεθόδου και υπολογισμός συνολικής πιθανότητας διάβρωσης κάθε δοκού λαμβάνοντας υπόψιν την αξιοπιστία των μεθόδων

## 5.1 Στάθμιση τεχνικών μέτρησης και δημιουργία μοντέλου

Η στάθμιση των μεθόδων του half cell potential, του concrete resistivity και του LPR/corrosion rate θα γίνει με τη σύγκριση της κλάσης στην οποία κατατάχτηκαν οι ράβδοι με βάση την οπτική τους επιθεώρηση και της κλάσης στην οποία κατατάχτηκαν οι δοκοί με βάση το μέσο όρο των τιμών που λήφθηκαν με τις τρεις τεχνικές σύμφωνα με τα κριτήρια που παρουσιάστηκαν στους Πίνακες 3.1, 3.2 και 3.3.

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι κλάσεις διάβρωσης του κάθε δοκιμίου με βάση τον οπτικό έλεγχο που είναι ουσιαστικά αυτές που υποδεικνύουν την υπάρχουσα κατάσταση διάβρωσης, οι κλάσεις διάβρωσης με βάση τις τρεις μεθόδους μέτρησης και η διαφορά κλάσης μεταξύ τους.

Όπως φαίνεται, η μέθοδος της οποίας η κατάταξη συμπίπτει περισσότερο με την κατάταξη της πραγματικής υπάρχουσας διάβρωσης είναι το half cell potential αφού η συνολική διαφορά κλάσης της μεθόδου αυτής είναι μόνο 3. Οι αντίστοιχες τιμές για τις μεθόδους του LPR και του concrete resistivity είναι 6 και 13 αντίστοιχα, με την τελευταία μάλιστα να παρουσιάζει διαφορά δύο κλάσεων για κάποια δοκίμια.

Η αποτυχία του concrete resistivity να αξιολογήσει σωστά την υπάρχουσα κατάσταση των δοκών οφείλεται στο ότι ουσιαστικά ομαδοποίησε τις 10 πρώτες δοκούς χωρίς να διακρίνει μεταξύ τους μεγάλες διαφορές ενώ για τις δοκούς με τα μεγαλύτερα ποσοστά χλωριόντων δεν ήταν σε θέση να εκτιμήσει την έκταση της διάβρωσης.

Πίνακας 5.1: Κατάταξη δοκιμών με βάση τις τρεις μεθόδους και σύγκριση με την κατάταξη με βάση την πραγματική διάβρωση

Δοκός	Κλάση διάβρωσης				Διαφορά κλάσης		
	Οπτική επιθεώρηση (Πραγματική διάβρωση)	Half cell potential	Concrete resistivity	LPR / Corrosion rate	Half cell potential	Concrete resistivity	LPR / Corrosion rate
1a	1	1	1	1	0	0	0
1b	1	1	1	1	0	0	0
2a	2	2	1	2	0	1	0
2b	1	1	1	1	0	0	0
3a	2	2	1	2	0	1	0
3b	2	1	1	2	1	1	0
4a	2	2	1	2	0	1	0
4b	2	2	1	2	0	1	0
5a	3	3	1	2	0	2	1
5b	2	2	1	2	0	1	0
6a	3	2	1	3	1	2	0
6b	3	2	2	4	1	1	1
7a	3	3	2	4	0	1	1
7b	3	3	2	4	0	1	1
8a	3	3	3	4	0	0	1
8b	3	3	3	4	0	0	1
<b>Συνολική διαφορά κλάσης</b>					<b>3</b>	<b>13</b>	<b>6</b>

Η μέθοδος της αντίστασης γραμμικής πόλωσης που μετρά το ρυθμό διάβρωσης, σε σημαντικό βαθμό, δεν αξιολόγησε σωστά τις συνθήκες διάβρωσης το δοκιμίων. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο ότι υπερεκτίμησε το βαθμό διάβρωσης για τις δοκούς που είχαν μεγάλα ποσοστά χλωριούχου νατρίου. Αυτό είναι πιθανόν να συμβαίνει λόγω του ότι η διάβρωση δεν ήταν σε αρκετά προχωρημένο στάδιο και δεν υπήρχαν σχεδόν καθόλου απώλειες στη διατομή των ράβδων. Η διάβρωση δηλαδή βρισκόταν στο στάδιο της έναρξης (initiation phase) και όχι στο στάδιο της διάδοσης (propagation phase) και αυτό φαίνεται και από το γεγονός ότι δεν υπήρχαν εμφανή σημάδια ρηγμάτωσης και θρυμματισμού στις δοκούς. Ίσως ο ρυθμός διάβρωσης να είναι σωστός, όμως να μην αντικατοπτρίζεται στον υπάρχων βαθμό διάβρωσης της κάθε ράβδου στο χρόνο που έγινε ο έλεγχος λόγω του ότι δεν είχε ξεκινήσει ακόμη το στάδιο της διάδοσης και δεν είχαν αρχίσει να συμβαίνουν σε μεγάλη έκταση τα αποτελέσματα της διάβρωσης.

Το half cell potential ήταν η πιο επιτυχημένη μέθοδος όσον αφορά την ταύτιση των κλάσεων με τις κλάσεις της οπτικής επιθεώρησης. Οι τιμές που έδωσε ακολουθούν μια αύξουσα αρνητική σειρά ανάλογη της περιεκτικότητας σε χλωρίοντα ενώ ήταν σε θέση να εντοπίσει τα αυξημένα ποσοστά διάβρωσης στις δοκούς 2a και 5a που οφείλονταν στις φθορές που υπήρχαν στην επικάλυψή τους. Η μέθοδος αυτή αποδείχτηκε, δηλαδή, πιο ακριβής στην πρόβλεψη του βαθμού διάβρωσης και αυτό συμβαίνει λογικά λόγω του ότι οι διάβρωση των δοκιμίων ήταν ακόμη στο στάδιο της έναρξης.

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της σύγκρισης των κλάσεων προκύπτει ότι, για την πρόβλεψη της υπάρχουσας κατάστασης διάβρωσης, περισσότερο βάρος πρέπει να δοθεί στα αποτελέσματα του half cell potential. Αν θεωρήσουμε ότι το συντελεστής βάρους που πρέπει να δοθεί στο half cell potential είναι 1, ο συντελεστής για το concrete resistivity είναι 0.23 και για το LPR/corrosion rate είναι 0.5. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από το λόγο της συνολικής διαφοράς κλάσης της κάθε μεθόδου προς τη συνολική διαφορά κλάσης του half cell potential.

Για να προκύψει όμως ένα μοντέλο που θα αξιοποιεί τα αποτελέσματα των τριών μεθόδων και θα κατατάσσει ένα στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα σε μια κλίμακα διάβρωσης με ελάχιστο το 1, όταν καταταγεί στην 1<sup>η</sup> κλάση και με τις τρεις μεθόδους, και μέγιστο το 4, όταν καταταγεί στην 4<sup>η</sup> κλάση και με τις τρεις μεθόδους πρέπει να γίνει αναγωγή. Με τους υφιστάμενους συντελεστές, για ένα στοιχείο που

έχει καταταγεί στην 1<sup>η</sup> κλάση και με τις τρεις μεθόδους ο βαθμός διάβρωσης που προκύπτει είναι 1.73. Οπότε οι τρεις συντελεστές που αναφέρθηκαν πιο πάνω πρέπει να διαιρεθούν με την τιμή αυτή και οι νέοι συντελεστές που προκύπτουν είναι 0.58, 0.13 και 0.29 αντίστοιχα. Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται οι αρχικοί συντελεστές και ο τρόπος υπολογισμού τους και οι ανηγμένοι συντελεστές.

**Πίνακας 5.2: Αρχικοί και ανηγμένοι συντελεστές των τριών μεθόδων**

Μέθοδος	Διαφορά κλάσης	Διαφ. κλάσης half cell potential / Διαφ. κλάσης μεθόδου	Αρχικός συντελεστής	Ανηγμένος συντελεστής
Half cell potential	3	3/3	1.00	0.58
Concrete resistivity	13	3/13	0.23	0.13
LPR / Corrosion rate	6	3/6	0.50	0.29

Χρησιμοποιώντας τους ανηγμένους συντελεστές, η εξίσωση που προκύπτει για τον υπολογισμό του βαθμού διάβρωσης στην κλίμακα του μοντέλου που δημιουργήθηκε είναι:

$$CD = 0.58 \times HCP + 0.13 \times CRe + 0.29 \times CRa \quad (14)$$

όπου,  $CD$  είναι ο βαθμός διάβρωσης (corrosion degree),  $HCP$  είναι ο αριθμός της κλάσης με βάση το half cell potential,  $CRe$  είναι ο αριθμός της κλάσης με βάση το concrete resistivity και  $CRa$  είναι ο αριθμός της κλάσης με βάση το LPR.

Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζεται η κατάταξη των δεκαέξι δοκιμίων με φθίνουσα σειρά χρησιμοποιώντας το πιο πάνω μοντέλο.

**Πίνακας 5.3: Κατάταξη δοκιμών με βάση το βαθμό διάβρωσης χρησιμοποιώντας το μοντέλο που δημιουργήθηκε**

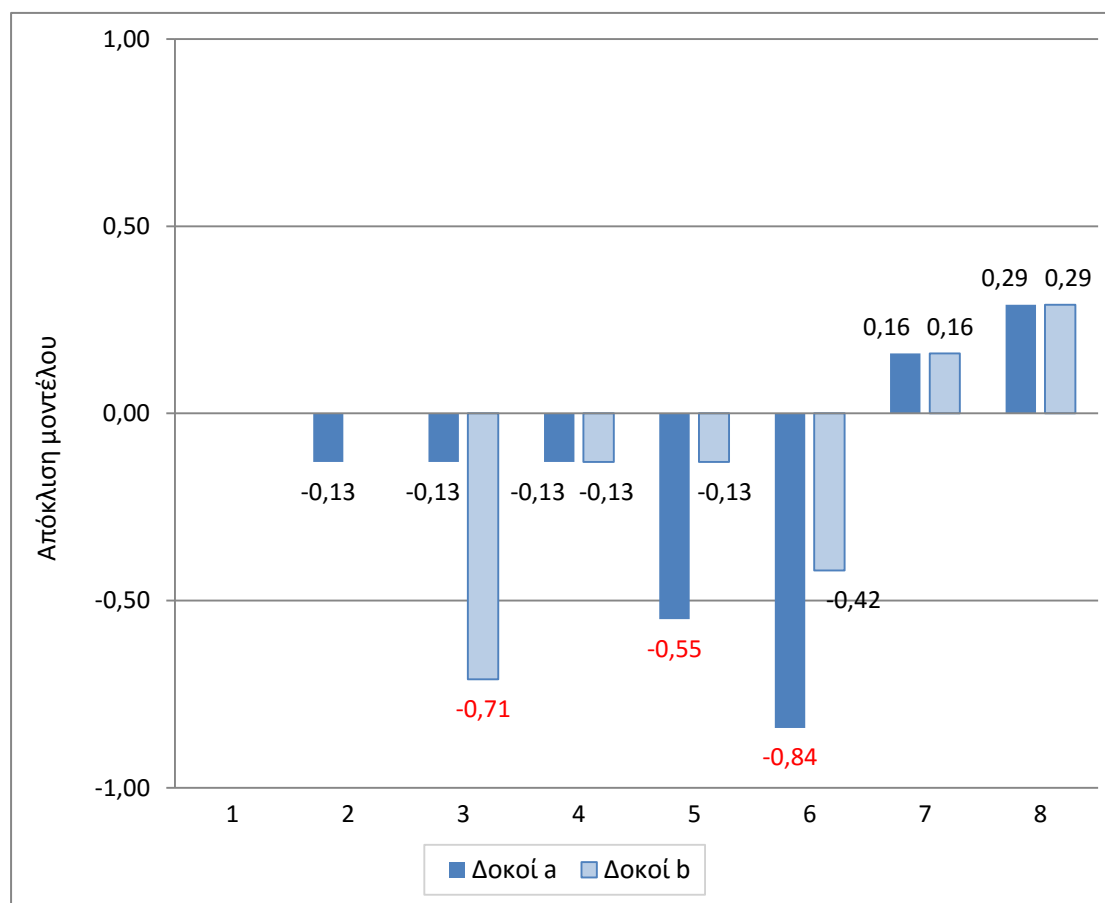
<b>Δοκός</b>	<b>0.58 x HCP</b>	<b>0.13 x CRe</b>	<b>0.29 x CRa</b>	<b>Βαθμός διάβρωσης</b>	<b>Πραγματική κλάση διάβρωσης</b>
8b	1.74	0.39	1.16	3.29	3
8a	1.74	0.39	1.16	3.29	3
7b	1.74	0.26	1.16	3.16	3
7a	1.74	0.26	1.16	3.16	3
6b	1.16	0.26	1.16	2.58	3
5a	1.74	0.13	0.58	2.45	3
6a	1.16	0.13	0.87	2.16	3
5b	1.16	0.13	0.58	1.87	2
4b	1.16	0.13	0.58	1.87	2
4a	1.16	0.13	0.58	1.87	2
3a	1.16	0.13	0.58	1.87	2
2a	1.16	0.13	0.58	1.87	2
3b	0.58	0.13	0.58	1.29	2
2b	0.58	0.13	0.29	1.00	1
1b	0.58	0.13	0.29	1.00	1
1a	0.58	0.13	0.29	1.00	1

Το μοντέλο κατατάσσει τις δοκούς ακολουθώντας σε γενικές γραμμές μια φθίνουσα σειρά που αναλογεί με την περιεκτικότητά τους σε χλωριόντα. Επίσης φαίνεται να δημιουργείται μια ομάδα δοκιμών που έχουν τον ίδιο βαθμό διάβρωσης (1.87) και στην οποία περιλαμβάνονται κάποιες εκ των δοκών 2, 3, 4 και 5, κάτι που υποδεικνύει ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δοκών που έχουν χαμηλό έως μέτριο ποσοστό χλωριούχου νατρίου. Οι δοκοί 7 και 8 έχουν ξεχωρίσει

αφού έχουν βαθμό διάβρωσης μεγαλύτερο του 3.16 ενώ στις δοκούς 1 και 2b φαίνεται να μην υπάρχει καθόλου διάβρωση αφού ο βαθμός διάβρωσης είναι 1, δηλαδή το ελάχιστο δυνατό, με τη δοκό 2a να έχει μεγαλύτερο βαθμό λόγω της φθοράς στο σκυρόδεμά της.

### 5.1.1 Σύγκριση μοντέλου και πραγματικής διάβρωσης

Χρησιμοποιώντας τις τιμές που υπολογίστηκαν με το μοντέλο που δημιουργήθηκε (Πίνακας 5.3), και υποθέτοντας ότι τα δοκίμια θα κατατάσσονταν σε μία εκ των τεσσάρων κλάσεων διάβρωσης μετά την στρογγυλοποίηση του βαθμού διάβρωσής τους, προκύπτει ότι από τα δεκαέξι δοκίμια μόνο τα τρία θα κατατάσσονταν σε κλάση διάβρωσης που διαφωνεί με την κλάση της πραγματικής υπάρχουσας διάβρωσής τους. Στο Διάγραμμα 5.1 παρουσιάζεται η απόκλιση του μοντέλου που προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ του υπολογισθέν βαθμού διάβρωσης και του αριθμού της κλάσης της πραγματικής διάβρωσης που προέκυψε από τον οπτικό έλεγχο των ράβδων.



Διάγραμμα 5.1: Απόκλιση μοντέλου: Διαφορά βαθμού διάβρωσης και αριθμού κλάσης πραγματικής διάβρωσης

Τα τρία δοκίμια που θα κατατάσσονταν σε λάθος κλάση επειδή έχουν διαφορά μεγαλύτερη του 0.5 είναι οι δοκοί 3b, 5a και 6a. Θα κατατάσσονταν και οι τρεις σε μια κλάση πιο κάτω από τη ορθή, όπως αναλύεται στη συνέχεια.

Η δοκός 3b θα έπρεπε να κατατασσόταν στην κλάση 2 όμως η μόνη μέθοδος που το εκτίμησε αυτό ορθά είναι το LPR/corrosion rate. Η συγκεκριμένη μέθοδος εκτίμησε με επιτυχία την κατάσταση διάβρωσης των δοκών 1 μέχρι 4 και ο χαμηλός συντελεστής βάρους που της δόθηκε οφείλεται, όπως αναφέρθηκε και πριν, στην υπερεκτίμηση της κατάστασης διάβρωσης στην παρούσα χρονική στιγμή για τις δοκούς που είχαν μεγάλο ποσοστό χλωριούχου νατρίου. Προκύπτει ότι η μέθοδος του corrosion rate παρουσιάζει πολύ σημαντική ακρίβεια στις περιπτώσεις που η διάβρωση είναι στο στάδιο της έναρξης και υπάρχει χαμηλή παρουσία χλωριόντων.

Η δοκός 5a θα έπρεπε να κατατασσόταν στην κλάση 3 και όμως κατατάχτηκε, οριακά, στην κλάση 2. Αυτό οφείλεται στη σημαντική αποτυχία του concrete resistivity το οποίο την κατέταξε στην κλάση 1 και δηλαδή εξίσωσε τις δοκούς με λόγο χλωριούχου νατρίου προς τσιμέντο ίσο με 5% με τις δοκούς που δεν είχαν καθόλου χλωριούχο νάτριο. Επίσης το LPR/corrosion rate υποτίμησε τη διάβρωση σε αυτή τη δοκό, πιθανόν λόγω του ότι σημαντική συνεισφορά στη διάβρωσή της είχε η προβληματική παρασκευή της.

Η δοκός 6a θα έπρεπε να κατατασσόταν στην κλάση 3 όμως αυτό εκτιμήθηκε σωστά μόνο από το LPR/corrosion rate. Το concrete resistivity έκανε μεγάλο σφάλμα και την κατέταξε, πάρα πολύ οριακά, στην κλάση 1 ενώ το half cell την κατέταξε, αρκετά οριακά, στην κλάση 2. Για το δοκίμιο αυτό παρατηρείται η μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ βαθμού διάβρωσης και κλάσης πραγματικής διάβρωσης που είναι ίση με 0.84.

Και οι τρεις δοκοί που κατατάχθηκαν σε λάθος κλάση είχαν δύο μεθόδους που εκτίμησαν λάθος τη διάβρωσή τους ενώ και για τις τρεις η μία από αυτές τις μεθόδους ήταν το concrete resistivity το οποίο στις δύο τελευταίες ήταν εσφαλμένο κατά δύο κλάσεις. Είναι εμφανές από αυτό, ότι ο συντελεστής βάρους του concrete resistivity πρέπει να μειωθεί.

Τα τέσσερα δοκίμια με το περισσότερο ποσοστό χλωριούχου νατρίου (δοκοί 7-8) κατατάσσονται στη σωστή κλάση μετά τη στρογγυλοποίηση, είναι όμως τα μοναδικά για τα οποία υπολογίστηκε βαθμός διάβρωσης μεγαλύτερος του αριθμού της κλάσης

τους. Αυτό οφείλεται στην υπερεκτίμηση των συνθηκών διάβρωσής τους από το LPR/corrosion rate.

Χρησιμοποιώντας τους ανηγμένους συντελεστές που προέκυψαν, το συνολικό σφάλμα και των δεκαέξι δοκιμίων που προκύπτει από την πρόσθεση των απόλυτων τιμών των διαφορών μεταξύ του υπολογισθέντος βαθμού διάβρωσης και του αριθμού της κλάσης της πραγματικής διάβρωσης είναι 4.07.

### 5.1.2 Επαναβαθμονόμηση μοντέλου

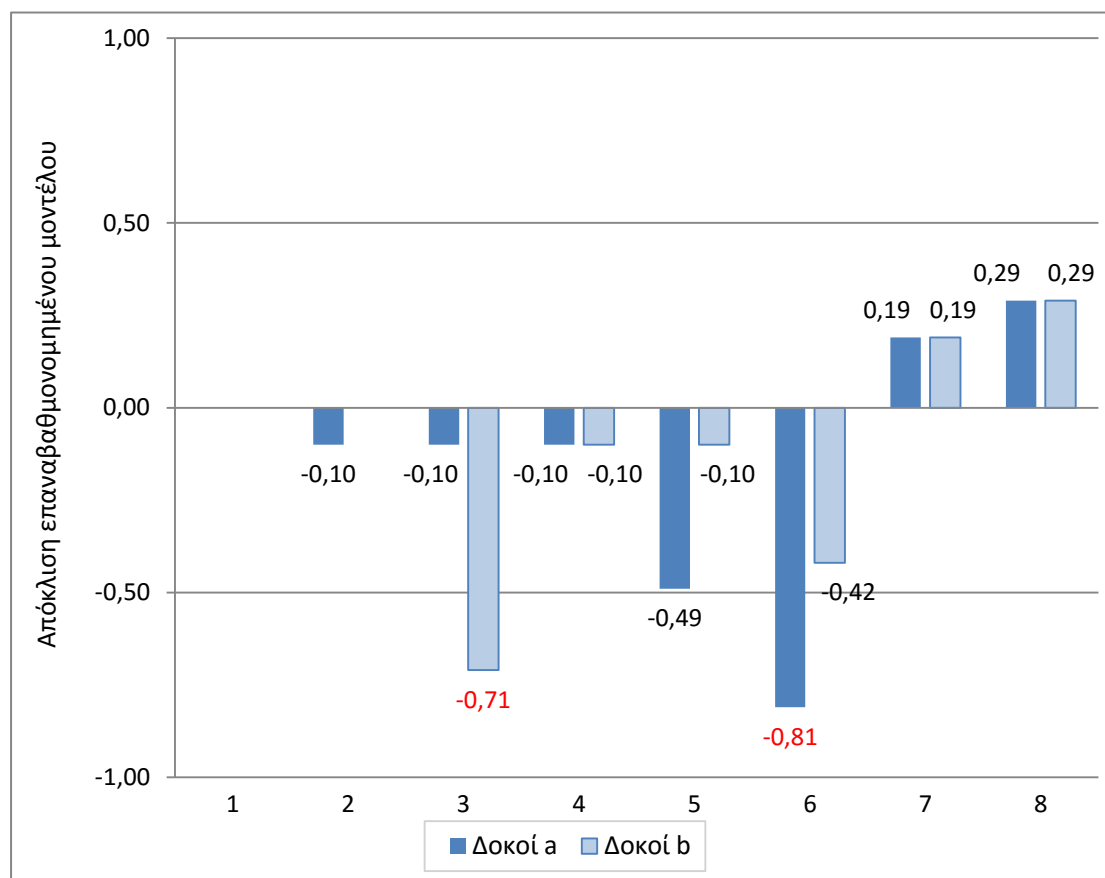
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο Υποκεφάλαιο, το μοντέλο που δημιουργήθηκε παρουσιάζει σφάλμα αφού, με βάση αυτό, τρεις δοκοί κατατάσσονται σε κλάση διάβρωσης που διαφωνεί με την πραγματική διάβρωση. Από την ανάλυση των αιτιών που οδήγησαν σε αυτό το σφάλμα προκύπτει ότι ο συντελεστής βάρους του concrete resistivity πρέπει να μειωθεί και ο συντελεστής των άλλων δύο μεθόδων να αυξηθεί ή να παραμείνει σταθερός.

Δυστυχώς δεν είναι εφικτό να μεταβληθούν οι συντελεστές με τρόπο που και οι δεκαέξι δοκοί να καταταχθούν στην ορθή κλάση διάβρωσης. Η μεταβολή των συντελεστών έτσι ώστε οι τρεις δοκοί που παρουσίαζαν διαφορά μεγαλύτερη του 0.5 να καταταγούν στην ορθή κλάση, οδηγεί στην εσφαλμένη κατάταξη άλλων δοκών. Χρησιμοποιώντας όμως την εφαρμογή Seeker της MS Excel και τη μέθοδο δοκιμής και λάθους, έχει προκύψει μια επαναβαθμονόμηση των μεθόδων με την οποία μια εκ των εσφαλμένων δοκών, η 5a, κατατάσσεται στην ορθή κλάση και το άθροισμα των απόλυτων τιμών των διαφορών μεταξύ του υπολογισθέντος βαθμού διάβρωσης και του αριθμού της κλάσης της πραγματικής διάβρωσης μειώνεται από το 4.07 στο 3.89. Οι νέοι συντελεστές που προκύψαν είναι 0.61 για το half cell potential, 0.10 για το concrete resistivity και 0.29 για το LPR/corrosion rate. Αυξάνεται δηλαδή η αξιοπιστία του half cell potential, μειώνεται η αξιοπιστία του concrete resistivity και η αξιοπιστία του LPR/corrosion rate παραμένει σταθερή. Οπότε η νέα εξίσωση του βαθμού διάβρωσης που προκύπτει είναι:

$$CD = 0.61 \times HCP + 0.10 \times CRe + 0.29 \times CRa \quad (15)$$

Στο Διάγραμμα 5.2 παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ του υπολογισθέν βαθμού διάβρωσης, χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που προέκυψαν μετά την επαναβαθμονόμηση, και του αριθμού της κλάσης της πραγματικής διάβρωσης που προέκυψε από τον οπτικό έλεγχο των ράβδων. Πλέον οι μοναδικές δοκοί που έχουν

διαφορά μεγαλύτερη του 0.5, και άρα κατατάσσονται σε λάθος κλάση, είναι οι 3b και 6a.



Διάγραμμα 5.2: Απόκλιση μοντέλου: Διαφορά βαθμού διάβρωσης μετά την επαναβαθμονόμηση και αριθμού κλάσης πραγματικής διάβρωσης

## 5.2 Πιθανολογική προσέγγιση

Στο Κεφάλαιο 3 έγινε αναφορά στα κριτήρια με βάση τα οποία γίνεται κατάταξη σε κλάση διάβρωσης σύμφωνα με τα αποτελέσματα που έδωσαν οι τρεις μη καταστρεπτικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν κατά το πειραματικό στάδιο. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάστηκαν τα κριτήρια του ASTM C876 βάσει των οποίων τα αποτελέσματα του half cell potential μεταφράζονται σε πιθανότητα διάβρωσης.

Σε αυτό το Υποκεφάλαιο θα προσεγγιστούν πιθανολογικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λήφθηκαν και με τις τρεις μεθόδους, χρησιμοποιώντας τις πιθανότητες διάβρωσης που αντιστοιχούνται σε κάθε κλάση διάβρωσης του half cell potential από το ASTM C876. Η πιθανότητα διάβρωσης που θα δοθεί για κάθε κλάση

διάβρωσης φαίνεται στον Πίνακα 5.4. Για τις κλάσεις 1,3 και 4 θα δοθούν πιθανότητες διάβρωσης ίσες με 10, 90 και 100% αντίστοιχα. Δηλαδή για την κλάση 4 η διάβρωση θεωρείται δεδομένη. Για την κλάση 2 η πιθανότητα διάβρωσης που θα δοθεί είναι μεταξύ 10 και 90%, ανάλογα με τη μέτρηση και σε σχέση με τα όρια των κλάσεων για την κάθε μέθοδο. Για παράδειγμα η δοκός 6a, με βάση το half cell potential, κατατάχτηκε στην κλάση 2 αφού είχε μέσο όρο -327.5 mV και τα όρια της κλάσης 2 είναι -200 μέχρι -350 mV. Οπότε η πιθανότητα διάβρωσης που δόθηκε σε αυτή τη δοκό για αυτή τη μέθοδο είναι 78%.

**Πίνακας 5.4: Πιθανότητα διάβρωσης για κάθε κλάση**

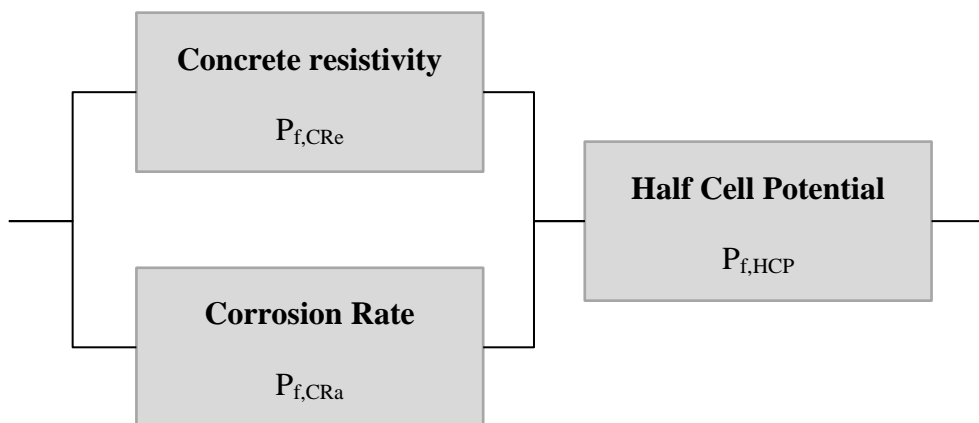
<b>Κλάση διάβρωσης</b>	<b>Πιθανότητα διάβρωσης</b>
1	10%
2	Αναλογικά μεταξύ 10 και 90%
3	90%
4	100%

Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι δοθέντες πιθανότητες διάβρωσης για κάθε δοκό και για κάθε μέθοδο. Οι μοναδικές περιπτώσεις στις οποίες εμφανίζεται πιθανότητα διάβρωσης 100% είναι οι δοκοί 7-8 αφού κατατάχθηκαν στην κλάση 4 σύμφωνα με τη μέθοδο του LPR/corrosion rate.

**Πίνακας 5.5: Πιθανότητα διάβρωσης κάθε δοκού σύμφωνα με τις τρεις μεθόδους**

Δοκός	Δοθείσα πιθανότητα διάβρωσης (%)		
	Half cell potential	Concrete resistivity	LPR/Corrosion rate
1a	10	10	10
1b	10	10	10
2a	56	10	12
2b	10	10	10
3a	10	10	26
3b	10	10	29
4a	23	10	30
4b	33	10	38
5a	90	10	45
5b	50	10	27
6a	78	10	90
6b	83	13	100
7a	90	72	100
7b	90	47	100
8a	90	90	100

Για να προκύψει μία ενιαία πιθανότητα διάβρωσης για κάθε δοκό, οι τρεις μέθοδοι θα θεωρηθούν στοιχεία ενός συστήματος αξιοπιστίας (Melchers 1999). Με βάση τη στάθμιση που έγινε στο προηγούμενο Υποκεφάλαιο, οι δύο πιο αναξιόπιστες μέθοδοι είναι το LPR/corrosion rate και το concrete resistivity. Για αυτό το λόγο οι δύο αυτές μέθοδοι θα θεωρηθούν παράλληλα στοιχεία και η τρίτη μέθοδος, το half cell potential, θα θεωρηθεί ότι βρίσκεται σε σειρά με αυτές. Αυτό αναπαρίσταται στο Διάγραμμα 5.3.



**Διάγραμμα 5.3:** Οι τρεις μέθοδοι ως στοιχεία ενός συστήματος αξιοπιστίας

Η χρήση της διάταξης αυτής υποδηλώνει ότι εάν η μέτρηση του half cell potential δείξει αυξημένη πιθανότητα διάβρωσης, τότε υπάρχει σίγουρα διάβρωση ανεξάρτητα από τα αποτελέσματα των άλλων δύο μεθόδων. Αντίθετα εάν το half cell potential δείξει πως δεν υπάρχει διάβρωση, τότε για να υπάρχει διάβρωση πρέπει και οι δύο άλλες μέθοδοι να δώσουν αυξημένες πιθανότητες διάβρωσης. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι αυτό αποτελεί απλά μια προσέγγιση καθώς ο συνδυασμός των πιθανοτήτων διάβρωσης και των τριών μεθόδων είναι αρκετά σύνθετος.

Για τη πραγματοποίηση των μετρήσεων του concrete resistivity και του half cell potential χρησιμοποιήθηκε η ίδια συσκευή αλλά διαφορετικό όργανο μέτρησης. Επίσης για τη μέτρηση του ρυθμού διάβρωσης χρησιμοποιήθηκε διαφορετική συσκευή και διαφορετικά όργανα. Οπότε ο υπολογισμός της συνολικής πιθανότητας αστοχίας, δηλαδή διάβρωσης, θα γίνει θεωρώντας ότι υπάρχει στατιστική ανεξαρτησία μεταξύ των τριών μεθόδων.

Για στατιστικά ανεξάρτητα στοιχεία που είναι παράλληλα, ο υπολογισμός της πιθανότητας αστοχίας του συστήματος γίνεται πολλαπλασιάζοντας τις πιθανότητες αστοχίας των στοιχείων μεταξύ τους. Άρα η συνδυασμένη πιθανότητα διάβρωσης για τις μεθόδους του concrete resistivity και του LPR/corrosion rate θα υπολογιστεί από τη σχέση (Schneider 2006):

$$P_{f,1} = P_{f,CRe} \times P_{f,CRa} \quad (16)$$

όπου,  $P_{f,1}$  είναι η συνδυασμένη πιθανότητα διάβρωσης για το concrete resistivity και το LPR/corrosion rate,  $P_{f,CR_e}$  είναι η πιθανότητα διάβρωσης του concrete resistivity και  $P_{f,CR_a}$  είναι η πιθανότητα διάβρωσης του LPR/corrosion rate.

Η συνδυασμένη πιθανότητα αστοχίας των δύο πρώτων μεθόδων είναι σε σειρά με την πιθανότητα διάβρωσης του half cell potential οπότε, θεωρώντας στατιστικά ανεξάρτητα στοιχεία, η συνολική πιθανότητα αστοχίας για την κάθε δοκό θα υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη σχέση (Schneider 2006):

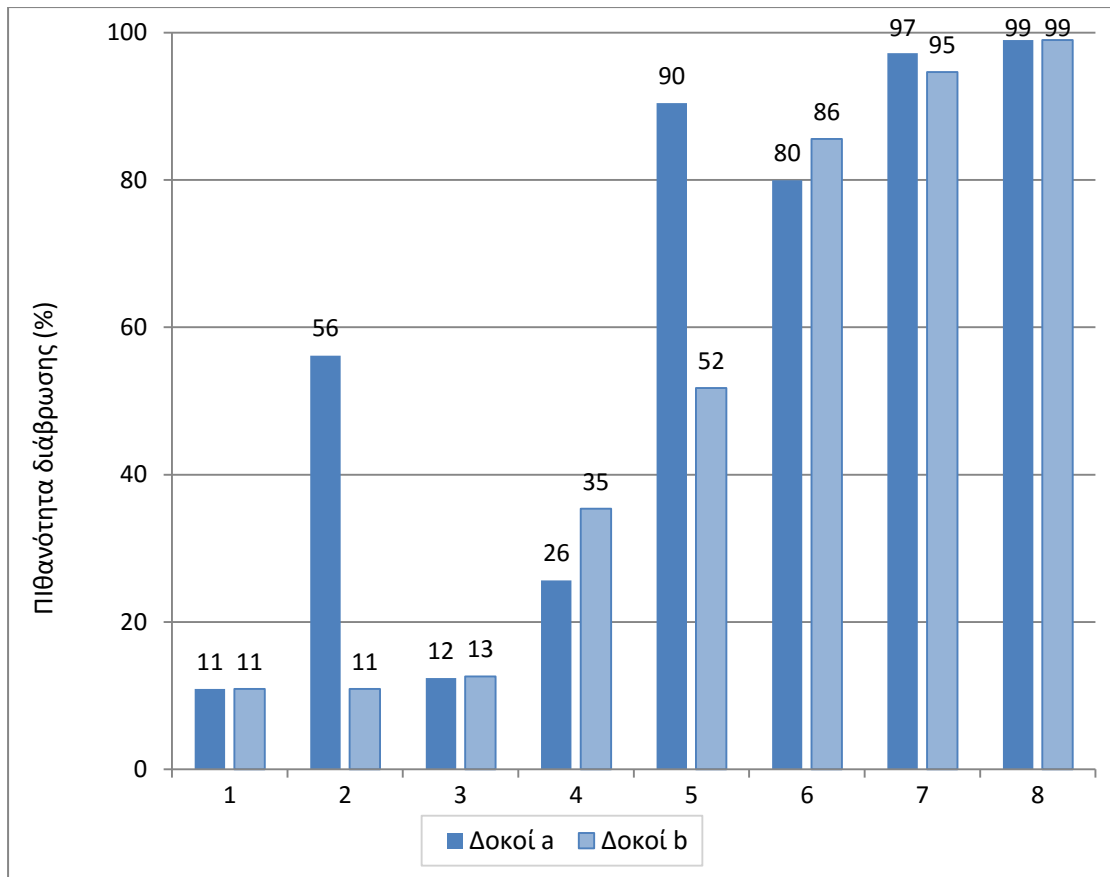
$$P_f = 1 - (1 - P_{f,1}) \times (1 - P_{f,HCP}) \quad (17)$$

όπου,  $P_f$  είναι η συνδυασμένη πιθανότητα διάβρωσης και για τις τρεις μεθόδους και  $P_{f,HCP}$  είναι η πιθανότητα διάβρωσης του half cell potential.

Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζεται η πιθανότητα διάβρωσης για την κάθε δοκό που προέκυψε από την εφαρμογή των σχέσεων 16 και 17 και χρησιμοποιώντας τα στοιχεία του Πίνακα 5.5. Οι δοκοί παρουσιάζονται κατά φθίνουσα σειρά πιθανότητας διάβρωσης. Η πιθανότητα διάβρωσης της κάθε δοκού παρουσιάζεται και γραφικά στο διάγραμμα 5.4.

**Πίνακας 5.6: Πιθανότητα διάβρωσης της κάθε δοκού**

Δοκός	Πιθανότητα διάβρωσης (%)	Δοκός	Πιθανότητα διάβρωσης (%)
8a	99.00	5b	51.77
8b	99.00	4b	35.36
7a	97.22	4a	25.63
7b	94.68	3b	12.58
5a	90.45	3a	12.37
6b	85.56	2b	10.90
6a	79.98	1a	10.90
2a	56.15	1b	10.90



**Διάγραμμα 5.4: Πιθανότητα διάβρωσης της κάθε δοκού**

Οι πιθανότητες διάβρωσης που προέκυψαν για την κάθε δοκό ακολουθούν αύξουσα σειρά ανάλογη της περιεκτικότητας σε χλωριόντα, με μοναδικές εξαιρέσεις τις προβληματικές δοκούς 2a και 5a. Η δοκός 2a εμφανίζει πιθανότητα διάβρωσης μεγαλύτερη των δοκών 3,4 και 5b ενώ η δοκός 5a εμφανίζει πιθανότητα διάβρωσης μεγαλύτερη των δοκών 6.

Για τις δοκούς 8 η πιθανότητα διάβρωσης που προέκυψε είναι ίση με 99%, δηλαδή θεωρείται σχεδόν δεδομένη η διάβρωση ενώ επίσης πολύ ψηλές πιθανότητες διάβρωσης προέκυψαν για τις δοκούς 7 (97% και 95%).

Η πιθανολογική προσέγγιση που έγινε αξιολογείται ως αρκετά κοντά στην πραγματικότητα καθώς πολύ υψηλή πιθανότητα διάβρωσης, μεγαλύτερη ή ίση του 80%, προέκυψε για τις έξι δοκούς που είχαν το μεγαλύτερο λόγο χλωριούχου νατρίου προς τσιμέντο (10% μέχρι 25%) και για τη δοκό 5a που περιείχε χλωριούχο νάτριο ίσο με 5% του τσιμέντου της και είχε σημαντική φθορά στην επικάλυψή της που επέτρεψε την περαιτέρω διάβρωση του οπλισμού της. Επιπρόσθετα πολύ χαμηλή

πιθανότητα διάβρωσης (μικρότερη του 15%) προέκυψε για τις δοκούς που είχαν καθόλου έως ελάχιστη ποσότητα χλωριόντων (μέχρι 2% του τσιμέντου τους), με εξαίρεση τη δοκό 2a της οποίας η επικάλυψη είχε πολύ σοβαρή φθορά.

## 6 Συμπεράσματα

Κατά το πειραματικό στάδιο της εργασίας αυτής διαπιστώθηκε ότι σε όλα τα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν η διάβρωση βρισκόταν στο στάδιο της έναρξης. Οπότε τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν αφορούν διάβρωση που βρίσκεται σε αυτό το στάδιο.

Από τις τρεις μεθόδους που εξετάστηκαν (half cell potential, concrete resistivity και LPR/corrosion rate), ακριβέστερη στην εκτίμηση της κατάστασης διάβρωσης, για διάβρωση σε στάδιο έναρξης, είναι το half cell potential. Η συγκεκριμένη μέθοδος εκτιμά με σημαντική ακρίβεια την κλάση διάβρωσης ενώ είναι και η μοναδική που είναι σε θέση να εντοπίσει τη σημαντική επιδείνωση των συνθηκών διάβρωσης λόγω προβληματικής παρασκευής του σκυροδέματος.

Η μέθοδος του LPR/corrosion rate είναι η μέθοδος που δίνει αποτελέσματα όσο πιο ανάλογα με την παρουσία των διαβρωτικών ουσιών, υπερεκτιμά όμως τις συνθήκες της υπάρχουσας διάβρωσης, στο παρόν στάδιο διάβρωσης, για τις περιπτώσεις που υπάρχουν μεγάλα ποσοστά χλωριόντων (10% μέχρι 25%). Η μέθοδος αυτή μπορεί να είναι παραπλανητική για την εκτίμηση της υπάρχουσας κατάστασης διάβρωσης όταν η διάβρωση βρίσκεται στα αρχικά στάδια, είναι όμως ενδεικτική του ρυθμού με τον οποίο εξελίσσεται το φαινόμενο της διάβρωσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος αναμένεται να είναι πιο αξιόπιστη στις περιπτώσεις που η διάβρωση έχει περάσει στο στάδιο της διάδοσης καθώς και όταν η διάβρωση δεν είναι τοπικής μορφής.

Η μέθοδος που αδυνατεί σε μεγαλύτερο βαθμό να εκτιμήσει τις υπάρχουσες συνθήκες διάβρωσης είναι το concrete resistivity και αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι ομαδοποιεί τις περιπτώσεις που έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε διαβρωτικές ουσίες (μέχρι 5%), χωρίς να ορίζει μεταξύ τους σημαντικές διαφοροποιήσεις. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η παρουσία λίγων περισσότερων ιόντων χλωρίου δεν διαφοροποιεί σε σημαντικό βαθμό την αντίσταση του σκυροδέματος καθώς και λόγω του ότι οι περιπτώσεις αυτές λαμβάνουν τιμές αντίστασης που ισούνται, ή σχεδόν ισούνται, με τις μέγιστες δυνατές. Επίσης το σκυρόδεμα των δοκιμίων ήταν φρέσκο και αυτό δυσχέρανε την εκτίμηση της κατάστασης διάβρωσης με βάση τη μέθοδο αυτή.

Η στάθμιση και ο συνδυασμός των τριών μεθόδων είναι σύνθετη διαδικασία. Για να γίνει ορθά πρέπει να ληφθεί υπόψιν η πιθανότητα η αξιοπιστία κάθε μεθόδου να επηρεάζεται από το περιβάλλον στο οποίο γίνεται η μέτρηση. Επίσης το στάδιο στο οποίο βρίσκεται η διάβρωση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο καθώς είναι πιθανό στο στάδιο διάδοσης, για το οποίο δεν υπάρχουν στοιχεία σε αυτή την εργασία, να είναι πιο αξιόπιστη κάποια άλλη μέθοδος, διαφορετική από το half cell potential.

Σε κάθε περίπτωση, ακόμα και όταν μόνο μία εκ των μεθόδων εκτίμησης των συνθηκών διάβρωσης δώσει αυξημένη πιθανότητα διάβρωσης, ο μηχανικός πρέπει να ανησυχήσει και να διερευνήσει το κατά πόσον υπάρχουν ενδείξεις διάβρωσης που εντοπίστηκαν μόνο από μία μέθοδο ή υπάρχει κάποιο σφάλμα.

Σε σχέση με την πειραματική διαδικασία, διαπιστώθηκε ότι σε πειράματα διάβρωσης στα οποία πραγματοποιούνται συχνοί κύκλοι διαβροχής και ξήρανσης για τη λήψη μετρήσεων, είναι πιθανόν να προκύψει αλλοίωση των αποτελεσμάτων και επιδείνωση της διάβρωσης.

Το μοντέλο εκτίμησης της κατάστασης διάβρωσης που σχεδιάστηκε στα πλαίσια αυτής της μελέτης αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο που επιτρέπει στο μηχανικό να αξιολογεί τα αποτελέσματα και των τριών μη καταστρεπτικών μεθόδων για να προσδιορίζει την υπάρχουσα κατάσταση διάβρωσης του οπλισμένου σκυροδέματος. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτή τη μελέτη αποτελούν βάση για περαιτέρω έρευνα στον τομέα αυτό που πρέπει να συνεχιστεί. Η αξιολόγηση των μεθόδων εκτίμησης της διάβρωσης είναι κομβικής σημασίας καθώς για έναν μηχανικό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο να γνωρίζει ποια μέθοδο πρέπει να εμπιστευτεί περισσότερο. Στα επόμενα στάδια της έρευνας πρέπει να διερευνηθεί η αξιοπιστία των μεθόδων όταν η διάβρωση του χάλυβα βρίσκεται στο στάδιο της διάδοσης, κάτι που δεν μπορούσε να γίνει σε αυτή τη μελέτη καθώς όλα τα δοκίμια βρίσκονταν στο στάδιο της έναρξης. Επίσης πρέπει να διερευνηθεί τα ενδεχόμενα η αξιοπιστία των μεθόδων να επηρεάζεται από το περιβάλλον μέτρησης ή από την αιτία της διάβρωσης.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

ASTM C876-91 (1999). "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.

Bajaj, S. (2012). "Effect of Corrosion on Physical and Mechanical Properties of Reinforced Concrete." M.S. thesis, The University of Akron, Akron, Ohio.

Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaeli, E., Polder, R. B. (2013). "Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, 2<sup>nd</sup> Ed.", John Wiley and Sons, New York.

Broomfield, J. P. (2007). "Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, 2<sup>nd</sup> Ed.", Taylor and Francis, London and New York.

Elsenerer, B., Andrade, C., Gulikers, J., Polder, R., Raupach, M. (2003). "Half-cell Potential Measurements – Potential Mapping on Reinforced Concrete Structures." *Materials and Structures*, 36, 461-471.

Ho, D. W. S., Lewis, R. K.. (1987). "Carbonation of Concrete and its Prediction." *Cement and Concrete Research*, 17(3), 489-504.

Hong, K. (1998). "Cyclic Wetting and Drying and its Effects on Chloride Ingress in Concrete." M.S. thesis, University of Toronto, Toronto.

Lewis, J. (2012). "The Effects of Corrosion on Reinforced Concrete with Fiber Addition." M.S. thesis, The University of Akron, Akron, Ohio.

Melchers, R. E. (1999). "Structural Reliability Analysis and Prediction, 2<sup>nd</sup> Ed.", John Wiley and Sons, New York.

National Association of Corrosion Engineers (NACE) (n.d.). "Pitting Corrosion." NACE International, <<http://www.nace.org>> (Mar. 21, 2016).

National Association of Corrosion Engineers (NACE) (n.d.). "Uniform Corrosion." NACE International, <<http://www.nace.org>> (Mar. 21, 2016).

- Polder, R., Andrade, C., Elsener, B., Vennesland, O., Gulikers, J., Weidert, R., Raupach, M. (2000). "Test Methods for On Site Measurement of Resistivity of Concrete." *Materials and Structures*, 30, 603-611.
- Schneider, J. (2006). "Introduction to Safety and Reliability of Structures.", John IABSE, Zurich.
- Stanish, K. (1997). "Corrosion Effects in Bond Strength in Reinforced Concrete." M.S. thesis, University of Toronto, Toronto.
- Tapan, M. (2007). "Strength Evaluation of Deteriorated Reinforced Concrete Bridge Columns." Dissertation, Syracuse University, Syracuse, New York.
- Tuutti, K. (1982). "Corrosion of Steel in Concrete.", Swedish Cement & Concrete Research Institute, Stockholm.
- Vaspetic, P., (2008). "Corrosion in Steel Concrete." Seminar, University of Ljubljana, Kamnik.
- Vassie, P. R. (1987). "The Chloride Concentration and Resistivity of Eight Reinforced Concrete Bridge Decks after 50 years Service.". Research Report, Transport and Road Research Laboratory, Wokingham.
- Γκίβαλου, Λ., Μιτζήθρα Μ., Ε. (2007). "Διάβρωση και Προστασία Οπλισμένου Σκυροδέματος.", Αθήνα.
- Δημάδη, Κ., Κατσένιου, Γ. (2006). "Διάβρωση Χάλυβα Οπλισμένου Σκυροδέματος και Τρόποι Αποκατάστασης.", Πάτρα.
- Κουλουμπή, Ν., (2010). "Διάβρωση και Προστασία." Σημειώσεις Μαθήματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κουρνέττας, Δ. (2010). "Διάβρωση Οπλισμένου Σκυροδέματος – Μέτρα Επέμβασης.", Πάτρα.
- Μπατής, Γ., (2007). "Χρήση Νέων Υλικών για την Αύξηση της Ανθεκτικότητας των Κατασκευών." Ημερίδα "Ενίσχυση Κτιρίων με Σύγχρονα Υλικά", Αθήνα.