

# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



## ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

### ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΜΕ ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

#### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΤΟΥ ΙΩΑΝΝΗ

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

Σ. ΠΟΛΥΜΕΝΗΣ

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ  
Ιούλιος 2015

# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



## ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

### ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΜΕ ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

#### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΤΟΥ ΙΩΑΝΝΗ

#### ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

##### Υπεύθυνος:

Σ. ΠΟΛΥΜΕΝΗΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

##### Μέλη:

Δ. ΔΗΜΟΤΙΚΑΛΗ, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Λ. ΖΟΥΜΠΟΥΛΑΚΗΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ  
Ιούλιος 2015

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο «Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών» της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., από τον Μάρτιο του 2014 έως και τον Μάιο του 2015.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω για την βοήθεια και την συμβολή τους στην εργασία αυτή τον κο Πολυμένη Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ που μου ανέθεσε την εργασία, τον Ομότιμο καθηγητή κο Γεώργιο Μπατή για τις συμβουλές του και την υποστήριξή του για την εκπόνηση της εργασίας, την κα Αγγελική Ζαχαροπούλου, Δρ. Χημικό Μηχανικό, τον κο Αντώνη Καραντώνη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., την Ιρένα Αργύρη, Αρχιτέκτων Μηχανικό Ε.Μ.Π. MSc και όλους όσοι με οποιονδήποτε τρόπο συνέβαλαν στην προσπάθεια αυτή.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το οπλισμένο σκυρόδεμα, χάριν στις ιδιότητές του, την δυνατότητα εύκολης κατασκευής και μορφοποίησής του σε καλούπια, σε συνδυασμό με το σχετικά χαμηλό κόστος του, βρίσκει παγκοσμίως ευρύτατη χρήση και εφαρμογή στις διάφορες κατασκευές. Παρά την ανθεκτικότητα όμως του συγκεκριμένου σύνθετου υλικού, η έκθεση των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος σε διαβρωτικό περιβάλλον οδηγεί στην πρόκληση βλαβών και φθορών στις κατασκευές. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι προστασίας έναντι της διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα, μεταξύ των οποίων διακρίνεται η χρήση αναστολέων διάβρωσης.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης συγκεκριμένου αναστολέα διάβρωσης στην διάβρωση του οπλισμού χάλυβα σε δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος.

Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας αναλύεται η σύνθεση του οπλισμένου σκυροδέματος, περιγράφεται το φαινόμενο της διάβρωσης στα μέταλλα και ειδικότερα στον χαλύβδινο οπλισμό του σκυροδέματος, αναφέρονται οι συνέπειες της διάβρωσης και τέλος αναπτύσσονται οι διάφορες μέθοδοι προστασίας του οπλισμού σκυροδέματος απέναντι στην διάβρωση.

Στο πειραματικό μέρος της εργασίας αναφέρονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των προς μελέτη δοκιμίων οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος και περιγράφεται η διαδικασία παρασκευής τους. Ακολούθως, αναλύονται οι μέθοδοι εκτίμησης της διάβρωσης του οπλισμού και παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης των χαλύβδινων οπλισμών, προσδιορισμός της αντίστασης πόλωσης, της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης και της ηλεκτροχημικής (θεωρητικής) απώλειας μάζας μέσω της μεθόδου της γραμμικής πόλωσης, καθώς και μέτρηση της (βαρυμετρικής) απώλειας μάζας των οπλισμών. Τέλος, αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων αυτών.

## **ABSTRACT**

Reinforced concrete due to its properties, its easy construction and its shaping ability, in addition to its relatively low cost, has seen a worldwide use and a broad application in several constructions. Despite the durability of this composite material, the exposure of reinforced concrete constructions to corrosive environment leads to damage and deterioration of constructions. In order to address this problem, a wide spectrum of protection methods against corrosion of reinforcement in concrete has been developed during the past years. The use of corrosion inhibitors stands out among them.

Aim of this thesis is the study of the effect of a specific corrosion inhibitor on the corrosion rate of the steel rebar that is embedded in cement mortar specimens.

The theoretical part of this study consists of the analysis of the composition of reinforced concrete as well as the description of the phenomenon of corrosion in metals and particularly in the steel reinforcement of concrete. Moreover, a reference to the impact of corrosion is made. Finally, various methods that are used to protect concrete's steel reinforcement against corrosion are developed.

The experimental part of this study constitutes of the description of the materials that have been used in order to construct the cement mortar specimens that were studied, and also of their manufacturing process. Furthermore, the assessment methods of corrosion of reinforcement are analyzed and afterwards the experimental results are presented. In particular, corrosion of the steel rebar within the specimens in which the inhibitor was applied, was examined by measuring its corrosion potential, by calculating the polarization resistance, the corrosion current density and the theoretical mass loss by the use of linear polarization technique and finally by measuring its mass loss. Last but not least, conclusions based on the processing of the results of these measurements are developed.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	2
2.1. Σκυρόδεμα .....	2
2.1.1. Σύσταση σκυροδέματος .....	2
2.1.1.1. Τσιμέντο .....	2
2.1.1.1.1. Τύποι τσιμέντου .....	3
2.1.1.1.2. Τσιμέντο Πόρτλαντ (Portland Cement) .....	3
2.1.1.1.3. Κατηγορίες αντοχής τσιμέντων .....	4
2.1.1.1.4. Ανάμιξη τσιμέντου – νερού .....	4
2.1.1.1.4.1. Αντίδραση ενυδάτωσης του τσιμέντου (Μηχανισμός δημιουργίας πορώδους στο σκυρόδεμα) .....	4
2.1.1.1.5. Επίδραση λόγου νερού προς τσιμέντο (W/C ratio) στην αντοχή και το πορώδες του σκυροδέματος .....	6
2.1.1.2. Νερό για παρασκευή σκυροδέματος .....	8
2.1.1.3. Αδρανή .....	8
2.1.1.3.1. Κατηγορίες αδρανών υλικών .....	9
2.1.1.3.2. Προδιαγραφές αδρανών υλικών .....	10
2.1.2. Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος .....	12
2.1.3. Κατηγορίες σκυροδέματος .....	12
2.1.4. Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος .....	13
2.1.5. Χάλυβας οπλισμένου σκυροδέματος .....	14
2.1.5.1. Διάκριση των ράβδων οπλισμού .....	14
2.1.5.2. Χαρακτηριστική αντοχή – Κατηγορίες χάλυβα .....	14
2.2. Διάβρωση .....	15
2.2.1. Ορισμός της διάβρωσης .....	15
2.2.2. Συστήματα διάβρωσης .....	16
2.2.3. Διαβρωτικό περιβάλλον .....	16
2.2.4. Συμπεριφορά μετάλλου σε διαβρωτικό περιβάλλον .....	17
2.2.5. Παράγοντες που επιδρούν στην ταχύτητα διάβρωσης .....	17
2.2.6. Θερμοδυναμική της διάβρωσης .....	19
2.2.7. Είδη διάβρωσης .....	20
2.2.7.1. Ομοιόμορφη ή Γενική Διάβρωση (Uniform or General Corrosion) .....	21
2.2.7.2. Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting Corrosion) .....	22
2.2.7.3. Διάβρωση σε σχισμές (Crevice Corrosion) .....	22
2.2.7.4. Γαλβανική ή Διμεταλλική Διάβρωση (Galvanic or Two Metal Corrosion) .....	23

2.2.7.5. Περικρυσταλλική Διάβρωση (Intergranular Corrosion) .....	23
2.2.7.6. Εκλεκτική Προσβολή (Selective attack or Selective Leaching or Dealloying) .....	23
2.2.7.7. Τύποι διάβρωσης που επηρεάζονται από μηχανικούς παράγοντες .....	24
2.2.7.7.1. Διάβρωση εκτριβής ή Ρευστομηχανική διάβρωση (Erosion Corrosion) .....	24
2.2.7.7.2. Σπηλαιώδης διάβρωση (Cavitation damage).....	25
2.2.7.7.3. Διάβρωση από τριβή (Fretting Corrosion).....	26
2.2.7.7.4. Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (Stress corrosion cracking) .....	26
2.2.7.7.5. Βλάβη από υδρογόνο (Hydrogen damage).....	27
2.2.7.7.6. Διάβρωση κόπωσης (Corrosion fatigue).....	27
2.2.7.8. Θερμογαλβανική διάβρωση (Thermogalvanic corrosion) .....	28
2.2.7.9. Βιολογική ή Μικροβιολογική διάβρωση (Biological or Microbiological Corrosion) ....	28
2.2.7.10. Διάβρωση από ρεύματα διαφυγής (Stray Current Corrosion).....	29
2.3. Διάβρωση σκυροδέματος και οπλισμού στο οπλισμένο σκυρόδεμα .....	29
2.3.1. Φθορά – Διάβρωση του σκυροδέματος.....	29
2.3.1.1. Είδη διάβρωσης σκυροδέματος.....	30
2.3.2. Διάβρωση οπλισμού στο οπλισμένο σκυρόδεμα – Περιγραφή φαινομένου .....	31
2.3.2.1. Ενανθράκωση.....	33
2.3.2.1.1. Περιγραφή φαινομένου ενανθράκωσης .....	33
2.3.2.1.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την ενανθράκωση .....	34
2.3.2.2. Δράση χλωριούχων αλάτων .....	34
2.3.2.2.1. Διείσδυση χλωριόντων .....	35
2.3.2.2.2. Μηχανισμός διάβρωσης λόγω επίδρασης χλωριόντων .....	36
2.3.2.3. Σχηματισμός μακροστοιχείων.....	37
2.4. Συνέπειες της διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα.....	38
2.4.1. Οικονομικές επιπτώσεις της διάβρωσης των μετάλλων.....	39
2.5. Προστασία οπλισμού σκυροδέματος από διάβρωση .....	40
2.5.1. Γενικά στοιχεία για την προστασία των μετάλλων .....	40
2.5.1.1. Εισαγωγή.....	40
2.5.1.2. Προκατεργασία της επιφάνειας.....	40
2.5.1.3. Επιψευδαργύρωση (Γαλβανισμός) .....	41
2.5.1.4. Βαφή με οργανικές επικαλύψεις ή χρώματα.....	42
2.5.2. Μέθοδοι προστασίας από διάβρωση .....	43
2.5.2.1. Τροποποιήσεις του μετάλλου .....	43
2.5.2.2. Τροποποιήσεις του περιβάλλοντος .....	43
2.5.2.2.1. Χρήση αναστολέων διάβρωσης.....	44
2.5.2.2.1.1. Κατηγορίες αναστολέων διάβρωσης .....	45
2.5.2.2.1.2. Ιδιότητες αναστολέα διάβρωσης – Βαθμός προστασίας Z .....	47

2.5.2.2.1.3. Διαδικασία εφαρμογής αναστολέα διάβρωσης .....	48
2.5.2.3. Τροποποιήσεις του ηλεκτροδιακού δυναμικού μετάλλου – περιβάλλοντος.....	49
2.5.2.3.1. Καθοδική προστασία .....	49
2.5.2.3.2. Ανοδική προστασία.....	50
2.5.2.3.3. Χρήση επιστρωμάτων .....	50
2.5.2.3.4. Συνδυασμός καθοδικής προστασίας και μονωτικού επιστρώματος.....	51
2.5.3. Επιλογή των μέτρων προστασίας .....	51
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	53
3.1. Σκοπός.....	53
3.2. Παρασκευή δοκιμών.....	53
3.2.1. Κατηγορίες δοκιμών .....	53
3.2.2. Υλικά .....	54
3.2.2.1. Χάλυβας .....	54
3.2.2.2. Τσιμέντο .....	54
3.2.2.3. Αδρανή .....	55
3.2.2.4. Νερό .....	55
3.2.2.5. Αναστολέας διάβρωσης .....	56
3.2.3. Διαδικασία παρασκευής δοκιμών .....	57
3.3. Μέθοδοι εκτίμησης της διάβρωσης του οπλισμού .....	61
3.3.1. Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης.....	61
3.3.2. Μέθοδος γραμμικής πόλωσης .....	63
3.3.3. Μέτρηση της απώλειας μάζας.....	67
3.4. Αποτελέσματα μετρήσεων.....	68
3.4.1. Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα .....	69
3.4.2. Μέθοδος γραμμικής πόλωσης .....	80
3.4.2.1. Προσδιορισμός αντίστασης πόλωσης.....	82
3.4.2.2. Προσδιορισμός πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης .....	90
3.4.2.3. Προσδιορισμός ηλεκτροχημικής (θεωρητικής) απώλειας μάζας .....	92
3.4.3. Μέτρηση (βαρυμετρικής) απώλειας μάζας.....	95
3.4.3.1. Μέτρηση απώλειας μάζας στις 10/11/2014: 210 ημέρες.....	95
3.4.3.2. Μέτρηση απώλειας μάζας στις 22/5/2015: 403 ημέρες.....	99
3.4.4. Οπτικές παρατηρήσεις.....	103
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	110
4.1. Συζήτηση αποτελεσμάτων .....	110
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	112



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Κατηγορίες σκυροδέματος και αντίστοιχες θλιπτικές αντοχές .....	13
Πίνακας 2: Χημική σύσταση (%) δομικού χάλυβα S500s Tempcore .....	54
Πίνακας 3: Ακριβής σύσταση τσιμέντου Portland CEM II .....	55
Πίνακας 4: Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου .....	55
Πίνακας 5: Χημική σύσταση άμμου .....	55
Πίνακας 6: Ιδιότητες της πρώτης στρώσης του προς μελέτη αναστολέα διάβρωσης.....	56
Πίνακας 7: Ιδιότητες της δεύτερης στρώσης του προς μελέτη αναστολέα διάβρωσης.....	57
Πίνακας 8: Συσχέτιση των τιμών του δυναμικού διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού και της κατάστασής του μέσα στο σκυρόδεμα, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87 .....	63
Πίνακας 9: Συσχέτιση πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης με την κατάσταση του χαλύβδινου οπλισμού του σκυροδέματος .....	66
Πίνακας 10: Συσχέτιση πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης με την πιθανότητα διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού του σκυροδέματος.....	67
Πίνακας 11: Αποτελέσματα μετρήσεων δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 1ης ομάδας - Μέση τιμή Ecorr .....	70
Πίνακας 12: Αποτελέσματα μετρήσεων δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 2ης ομάδας - Μέση τιμή Ecorr .....	72
Πίνακας 13: Αποτελέσματα μετρήσεων δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 3ης ομάδας - Μέση τιμή Ecorr .....	74
Πίνακας 14: Αποτελέσματα μετρήσεων δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 4ης ομάδας - Μέση τιμή Ecorr .....	76
Πίνακας 15: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την μέση τιμή της αντίστασης πόλωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμών .....	79
Πίνακας 16: Αποτελέσματα μετρήσεων αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 1ης ομάδας - Μέση τιμή R <sub>p</sub> .....	82
Πίνακας 17: Αποτελέσματα μετρήσεων αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 2ης ομάδας - Μέση τιμή R <sub>p</sub> .....	84
Πίνακας 18: Αποτελέσματα μετρήσεων αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 3ης ομάδας - Μέση τιμή R <sub>p</sub> .....	86
Πίνακας 19: Αποτελέσματα μετρήσεων αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 4ης ομάδας - Μέση τιμή R <sub>p</sub> .....	88
Πίνακας 20: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την μέση τιμή της αντίστασης πόλωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμών .....	89
Πίνακας 21: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την μέση τιμή της πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμών .....	91
Πίνακας 22: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την ηλεκτροχημική (θεωρητική) απώλεια μάζας και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμών .....	94
Πίνακας 23: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 4 και 5 της 1ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης.....	96
Πίνακας 24: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 9 και 14 της 2ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης.....	96
Πίνακας 25: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 17 και 19 της 3ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης.....	97
Πίνακας 26: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 23 και 27 της 4ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης.....	97

Πίνακας 27: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 1, 2, 3, 6 και 7 της 1ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης.....	100
Πίνακας 28: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 8, 10, 11, 12 και 13 της 2ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης.....	100
Πίνακας 29: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 15, 16, 18, 20 και 21 της 3ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης.....	101
Πίνακας 30: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 22, 24, 25 και 26 της 4ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης.....	101

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Μηχανισμός ενυδάτωσης του τσιμέντου.....	5
Σχήμα 2: Επίδραση της σχέσης νερού - τσιμέντου (N/T) στην αντοχή και το πορώδες του σκυροδέματος .....	6
Σχήμα 3: Ογκομετρική απεικόνιση της σχέσης νερού - τσιμέντου (N/T) στην αντοχή και το πορώδες του σκυροδέματος .....	7
Σχήμα 4: Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση .....	20
Σχήμα 5: Σημειακή διάβρωση ανοξείδωτου χάλυβα 304 .....	21
Σχήμα 6: Σχηματική απεικόνιση της δράσης του διαχεόμενου αναστολέα διάβρωσης για προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα ( <a href="http://www.cortecmci.com">www.cortecmci.com</a> ).....	47
Σχήμα 7: Διαδικασία ζύγισης οπλισμών χάλυβα σε ζυγό ισορροπίας.....	58
Σχήμα 8: Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού με ηλεκτρονικό πολύμετρο .....	69
Σχήμα 9: Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 1ης ομάδας συναρτήσει του χρόνου	71
Σχήμα 10: Διάγραμμα μέσης τιμής δυναμικού διάβρωσης για την 1η ομάδα δοκιμών συναρτήσει του χρόνου .....	71
Σχήμα 11: Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 2ης ομάδας συναρτήσει του χρόνου .....	73
Σχήμα 12: Διάγραμμα μέσης τιμής δυναμικού διάβρωσης για την 2η ομάδα δοκιμών συναρτήσει του χρόνου .....	73
Σχήμα 13: Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 3ης ομάδας συναρτήσει του χρόνου .....	75
Σχήμα 14: Διάγραμμα μέσης τιμής δυναμικού διάβρωσης 3ης ομάδας δοκιμών συναρτήσει του χρόνου .....	75
Σχήμα 15: Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 4ης ομάδας συναρτήσει του χρόνου .....	77
Σχήμα 16: Διάγραμμα μέσης τιμής δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 4ης ομάδας συναρτήσει με τον χρόνο .....	77
Σχήμα 17: Διάγραμμα μέσης τιμής δυναμικού διάβρωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμών συναρτήσει του χρόνου .....	80
Σχήμα 18: Ποτενσιοστάτης / γαλβανοστάτης της EG&G Princeton Applied Research Model 263A .....	81
Σχήμα 19: Διάγραμμα αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 1ης ομάδας συναρτήσει του χρόνου	82
Σχήμα 20: Διάγραμμα μέσης τιμής αντίστασης πόλωσης για την 1η ομάδα δοκιμών συναρτήσει του χρόνου .....	83
Σχήμα 21: Διάγραμμα αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 2ης ομάδας συναρτήσει του χρόνου	84
Σχήμα 22: Διάγραμμα μέσης τιμής αντίστασης πόλωσης για την 2η ομάδα δοκιμών συναρτήσει του χρόνου .....	85
Σχήμα 23: Διάγραμμα αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 3ης ομάδας συναρτήσει του χρόνου	86
Σχήμα 24: Διάγραμμα μέσης τιμής αντίστασης πόλωσης για την 3η ομάδα δοκιμών συναρτήσει του χρόνου .....	87
Σχήμα 25: Διάγραμμα αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 4ης ομάδας δοκιμών συναρτήσει του χρόνου .....	88
Σχήμα 26: Διάγραμμα μέσης τιμής αντίστασης πόλωσης για την 4η ομάδα δοκιμών συναρτήσει του χρόνου .....	89
Σχήμα 27: Διάγραμμα μέσης τιμής αντίστασης πόλωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμών συναρτήσει του χρόνου .....	90
Σχήμα 28: Διάγραμμα μέσης τιμής πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμών συναρτήσει του χρόνου.....	92

Σχήμα 29: Διάγραμμα ηλεκτροχημικής (θεωρητικής) απώλειας μάζας και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμών συναρτήσει του χρόνου.....	94
Σχήμα 30: Συγκριτικό διάγραμμα της μέσης απώλειας μάζας των τεσσάρων ομάδων δοκιμών στις 210 ημέρες του πειράματος.....	98
Σχήμα 31: Συγκριτικό διάγραμμα του μέσου ρυθμού διάβρωσης των τεσσάρων ομάδων δοκιμών στις 210 ημέρες του πειράματος .....	98
Σχήμα 32: Συγκριτικό διάγραμμα της μέσης απώλειας μάζας των τεσσάρων ομάδων δοκιμών στις 403 ημέρες του πειράματος.....	102
Σχήμα 33: Συγκριτικό διάγραμμα του μέσου ρυθμού διάβρωσης των τεσσάρων ομάδων δοκιμών στις 403 ημέρες του πειράματος .....	102
Σχήμα 34: Διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4 (επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) έξι μήνες μετά από την έναρξη του πειράματος .....	104
Σχήμα 35: Διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 1 και 3 (χωρίς επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) έξι μήνες μετά από την έναρξη του πειράματος.....	104
Σχήμα 36: Διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4 (επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) τρεις μήνες μετά από την ανανέωση του διαλύματος.....	105
Σχήμα 37: Διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 1 και 3 (χωρίς επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) τρεις μήνες μετά από την ανανέωση του διαλύματος .....	105
Σχήμα 38: Διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4 (επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) έξι μήνες μετά την ανανέωση του διαλύματος (λήξη πειράματος).....	106
Σχήμα 39: Διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 1 και 3 (χωρίς επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) έξι μήνες μετά την ανανέωση του διαλύματος (λήξη πειράματος).....	107
Σχήμα 40: Κόκκινο αποτύπωμα επάνω στο τσιμεντοκονίαμα από τον αναστολέα διάβρωσης επάνω στον οπλισμό στο δοκίμιο 16 της ομάδας 3 .....	108
Σχήμα 41: Απουσία κόκκινου αποτυπώματος επάνω στο τσιμεντοκονίαμα λόγω της μη εφαρμογής αναστολέα διάβρωσης στον οπλισμό του δοκίμιου 12 της ομάδας 2 .....	108
Σχήμα 42: Έντονος αφρισμός των οπλισμών των δοκιμών των ομάδων 3 και 4 (επάλειψη οπλισμών με αναστολέα διάβρωσης) κατά τον καθαρισμό τους μέσα στο διάλυμα HCl με αναστολέα διάβρωσης.....	109
Σχήμα 43: Ελάχιστος αφρισμός των οπλισμών των δοκιμών των ομάδων 1 και 2 (οπλισμοί χωρίς επάλειψη με αναστολέα διάβρωσης) κατά τον καθαρισμό τους μέσα στο διάλυμα HCl με αναστολέα διάβρωσης.....	109

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διάβρωση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην ανθεκτικότητα των υλικών και των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος.

Στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, ο οπλισμός είναι γενικά παθητικοποιημένος (μη δραστικός) και συνεπώς προστατευμένος, χάριν στο εξαιρετικά αλκαλικό περιβάλλον που του προσφέρει το σκυρόδεμα. Όταν όμως διεισδύσουν βλαβερές ουσίες από το περιβάλλον μέσω των πόρων και των μικρορωγμών του σκυροδέματος, τότε αυτές μπορούν να φθάσουν στην επιφάνεια του χαλύβδινου οπλισμού, καταστρέφοντας με αυτόν τον τρόπο το προστατευτικό του φιλμ, αποπαθητικοποιώντας τον και εκκινώντας παράλληλα το φαινόμενο της διάβρωσης. Συγκεκριμένα, περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως η επίδραση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας, η διείσδυση των χλωριόντων, του διοξειδίου του άνθρακα, καθώς και άλλων αέριων ρύπων, προκαλούν φθορά στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, η οποία οφείλεται στην διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού του κατά κύριο λόγο.

Η διάβρωση οδηγεί, κατά συνέπεια, σε μείωση του χρόνου ζωής των κατασκευών, γεγονός που ενδέχεται να θέσει σε κίνδυνο τόσο τους ανθρώπους, όσο και το περιβάλλον. Επιπλέον, οι οικονομικές επιπτώσεις της διάβρωσης των μετάλλων και ιδίως του χάλυβα χαρακτηρίζονται ως εξαιρετικά υψηλές, δημιουργώντας μεγάλες δαπάνες για αποκατάσταση και συντήρηση των κατασκευών.

Για την αποτροπή του φαινομένου της διάβρωσης ή έστω τον περιορισμό των επιπτώσεων που αυτή προκαλεί στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος απαιτείται η μελέτη και η ανάπτυξη μεθόδων προστασίας, μεταξύ των οποίων διακρίνεται η χρήση διαφόρων τύπων αναστολέων διάβρωσης. Οι αναστολείς διάβρωσης είναι χημικές ενώσεις, οι οποίες όταν προστεθούν στο οπλισμένο σκυρόδεμα σε μικρές συγκεντρώσεις, έχουν την ικανότητα να επιβραδύνουν τον ρυθμό διάβρωσης των οπλισμών. Στην Ελλάδα η εφαρμογή αναστολέων διάβρωσης ως μέθοδος προστασίας έναντι της διάβρωσης του οπλισμένου σκυροδέματος είναι αρκετά πρόσφατη.

## 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1. Σκυρόδεμα

#### 2.1.1. Σύσταση σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα (concrete) είναι ένα τεχνητό υλικό (τεχνητός λίθος) που παρασκευάζεται με την ανάμιξη σε κατάλληλες αναλογίες τσιμέντου, χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών (άμμος, σκύρα, κτλ) και νερού (με ή χωρίς την ενσωμάτωση των υλικών που χαρακτηρίζονται πρόσθετα<sup>1</sup> και βελτιωτικά<sup>2</sup>). Τα τρία επιμέρους υλικά αναμιγνύονται με κατάλληλες αναλογίες και στη συνέχεια το νωπό σκυρόδεμα<sup>3</sup> που προκύπτει συμπυκνώνεται<sup>4</sup> και συντηρείται ούτως ώστε να έρθει στην τελική του μορφή (στερεό σώμα) με την σκλήρυνση<sup>5</sup> της πάστας του τσιμέντου<sup>6</sup> και να αποκτήσει τις προδιαγεγραμμένες ιδιότητες αντοχής και ανθεκτικότητας. (Παναγόπουλος & Κίρτας, 2005) (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)

#### 2.1.1.1. Τσιμέντο

Το τσιμέντο (cement) που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος είναι ένα βιομηχανικό κοκκώδες υλικό, το οποίο παρουσιάζει υδραυλικές ιδιότητες. Υδραυλικές ιδιότητες (hydraulic properties) είναι οι ιδιότητες που έχουν ορισμένα υλικά όπως το τσιμέντο να σχηματίζουν κάτω από την επίδραση νερού σταθερές ένυδρες ενώσεις, οι οποίες είναι ελάχιστα υδατοδιαλυτές και έχουν μεγάλη συνάφεια μεταξύ τους και με τα αδρανή. Οι ενώσεις αυτές με την πάροδο του χρόνου αυξάνουν την συνοχή των πολτών και των κονιαμάτων που προέρχονται από αυτές, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη αντοχών. Το τσιμέντο, από αρχαιοτάτων χρόνων, αποτελεί μία εξαιρετική υδραυλική κονία με εξαιρετικές ιδιότητες. Εκτός από υδραυλικές ιδιότητες, συνδυάζει και υψηλές αντοχές. (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)

---

<sup>1</sup> Πρόσθετο συστατικό (addition) είναι το λεπτομερώς διαμερισμένο ανόργανο υλικό που χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα στοχεύοντας είτε να βελτιώσει κάποιες ιδιότητές του, είτε να πετύχει συγκεκριμένες ιδιότητες. (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)

<sup>2</sup> Βελτιωτικό πρόσθετο (admixture) είναι το υλικό που προστίθεται, σε μικρές ποσότητες σε σχέση με την μάζα του τσιμέντου, κατά την διάρκεια της ανάμιξης του σκυροδέματος με σκοπό να τροποποιήσει τις ιδιότητες του φρέσκου ή του σκληρυμένου σκυροδέματος. (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)

<sup>3</sup> Νωπό ή φρέσκο σκυρόδεμα (fresh concrete) είναι το σκυρόδεμα που μόλις έχει παρασκευασθεί περιέχοντας όλα τα συστατικά του και το οποίο είναι ακόμα σε πλαστική κατάσταση, δυνάμενο να συμπυκνωθεί και να μορφοποιηθεί στα καλούπια. (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)

<sup>4</sup> Πήξη (setting) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ο τσιμεντοπολτός παύει να έχει πλαστικές ιδιότητες. (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)

<sup>5</sup> Σκλήρυνση (hardening) είναι η ανάπτυξη των αντοχών που λαμβάνει χώρα μετά την πήξη. (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)

<sup>6</sup> Πάστα (paste) καλείται η παχύρρευστη μάζα που προέρχεται από ανάμιξη ενός υδραυλικού τσιμέντου με νερό σε αναλογίες τέτοιες που να μπορεί να λάβει χώρα η πήξη. (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)

#### 2.1.1.1.1. Τύποι τσιμέντου

Κάθε χώρα παρασκευάζει τσιμέντο, χρησιμοποιώντας τις πηγές πρώτων υλών που διαθέτει. Τα κοινά τσιμέντα που προδιαγράφονται στο ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 υποδιαιρούνται στους πέντε παρακάτω κύριους τύπους:

- CEM I (Τσιμέντα Portland)  
Αμιγή τσιμέντα Portland CEM I χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ και γύψου.
- CEM II (Σύνθετα τσιμέντα Portland)  
Σύνθετα τσιμέντα Portland CEM II χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ Portland, της απαραίτητης γύψου και φυσικής ή τεχνητής ποζολάνης<sup>7</sup> σε ποσοστό από 6% έως 35% κατά μέγιστο.
- CEM III (Σκωριοτσιμέντα)  
Σκωρικά τσιμέντα ή σκωριοτσιμέντα CEM III χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από την συνάλεση κλίνκερ, γύψου και σκωρίας<sup>8</sup> σε ποσοστό από 36% έως 95% κατά μέγιστο.
- CEM IV (Ποζολανικά τσιμέντα)  
Ποζολανικά τσιμέντα CEM IV χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από την συνάλεση κλίνκερ Portland, γύψου και ποζολάνης, η οποία μπορεί να είναι φυσική ή ψημένη, πυριτική ή ασβεστούχα ιπτάμενη τέφρα και πυριτική παιπάλη. Δεν μπορεί να περιέχει σκωρία.
- CEM V (Σύνθετα τσιμέντα)  
Σύνθετα τσιμέντα CEM V χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από την συνάλεση κλίνκερ, γύψου, σκωρίας και σε ίσο ποσοστό ποζολάνη φυσική ή ψημένη ή πυριτική ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστά από 36% έως 50% κατά μέγιστο. Δεν μπορεί να περιέχει πυριτική παιπάλη.

Στο τσιμέντο συμμετέχουν επίσης το απαραίτητο θειικό ασβέστιο και τα ενδεχόμενα πρόσθετα.

Από τους πέντε τύπους τσιμέντου, τον χαρακτηρισμό του Portland έχουν οι δύο πρώτοι τύποι, όπου το κλίνκερ, που είναι και το βασικό συστατικό του τσιμέντου, συμμετέχει τουλάχιστον κατά 65%. (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)

#### 2.1.1.1.2. Τσιμέντο Πόρτλαντ (Portland Cement)

Ως τσιμέντο Πόρτλαντ (Portland cement) ορίζεται το προϊόν που προκύπτει μετά από έψηση σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης<sup>9</sup> (1380°C - 1420°C) ενός κατάλληλα αλεσμένου και πλήρους ομογενοποιημένου μίγματος, το οποίο αποτελείται

---

<sup>7</sup> Ποζολάνη (pozzolana) είναι ένα πυριτικό ή αργιλικό υλικό, το οποίο, αν και μόνο του δεν έχει υδραυλικές ιδιότητες, όταν αλεσθεί αντιδρά παρουσία νερού με την υδράσβεστο που προκύπτει από τις αντιδράσεις ενυδάτωσης των κύριων συστατικών του τσιμέντου σε συνήθη θερμοκρασία και σχηματίζει ενώσεις που έχουν υδραυλικές ιδιότητες. (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)

<sup>8</sup> Σκωρία υψικαμίνων (blast furnace slag) είναι το μη μεταλλικό υλικό που κατά κανόνα συνίσταται από πυριτικές και αργιλοπυριτικές ενώσεις του ασβεστίου και άλλων βασικών οξειδίων και δημιουργείται στις συνθήκες τήξης του σιδήρου μέσα στην υψικάμινο. (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)

<sup>9</sup> Η κλινκεροποίηση (clinkerization) περιλαμβάνει το σύνολο των αντιδράσεων που συμβαίνουν στις περιστροφικές καμίνους σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1150 °C τόσο στην υγρή φάση, όσο και κατά την οριακή επίτευξη των κόκκων που οδηγούν τελικά στην παραγωγή του κλίνκερ. (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)

περίπου από 75% ασβεστολιθικά υλικά και 25% αργιλοπυριτικά υλικά και κατόπιν συνάλεση του προκύπτοντος προϊόντος που καλείται κλίνκερ με την κατάλληλη ποσότητα γύψου ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Το τσιμέντο Πόρτλαντ και οι διάφοροι τύποι του, που κύρια χρησιμοποιούνται σε δομικές κατασκευές, είναι υδραυλικές κονίες, αφού δεν απαιτούν τη χρησιμοποίηση ποζολανικού υλικού για να αναπτύξουν αντοχές κάτω από το νερό. Όταν χρησιμοποιούνται διάφορες ποζολάνες ή άλλα κύρια συστατικά<sup>10</sup> για την παραγωγή διαφόρων τύπων τσιμέντου, αυτό γίνεται για να αποκτήσουν οι τύποι αυτοί ορισμένες επιπρόσθετες ιδιότητες. (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)

#### 2.1.1.1.3. Κατηγορίες αντοχής τσιμέντων

Οι κανονικές αντοχές του τσιμέντου (standard strength) είναι οι θλιπτικές αντοχές που προσδιορίζονται σε συμφωνία με το EN 196-1 στις 28 ημέρες συντήρησης. Έχουν θεσπισθεί τρεις κατηγορίες αντοχών: 32,5 MPa, 42,5 MPa και 52,5 MPa. Οι τιμές αυτές είναι χαρακτηριστικές, δηλαδή εξασφαλίζονται με ασφάλεια 95%.

Οι πρώιμες αντοχές μετρώνται στις δύο ημέρες, εκτός από την κατηγορία 32,5, όπου και μετρώνται στις επτά ημέρες. Για κάθε κατηγορία προβλέπονται δύο τάξεις πρώιμων αντοχών: η πρώτη αναφέρεται στις κανονικές πρώιμες αντοχές (συμβολισμός με το γράμμα N) και η άλλη στις μεγάλες πρώιμες αντοχές (συμβολισμός με το γράμμα R), η οποία και αντιστοιχεί σε τσιμέντα ταχείας ανάπτυξης αντοχών. Αποτέλεσμα είναι να δημιουργούνται συνολικά έξι κατηγορίες αντοχής. (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)

#### 2.1.1.1.4. Ανάμιξη τσιμέντου – νερού

Με την ανάμιξη του τσιμέντου Portland με το νερό αρχίζουν οι αντιδράσεις ενυδάτωσης, οι οποίες δίνουν την πήξη και την σκλήρυνσή του. Οι αντιδράσεις του τσιμέντου με το νερό είναι αρκετά πολύπλοκες. Το σύστημα νερού – τσιμέντου είναι ετερογενές και συμμετέχουν τρεις φάσεις:

- Η στερεή (κόκκοι τσιμέντου)
- Η υγρή (νερό και στη συνέχεια ενδιάμεσο διάλυμα)
- Η αέρια (φουσαλίδες αέρα)

(Μοροπούλου & Μπατής, 2012)

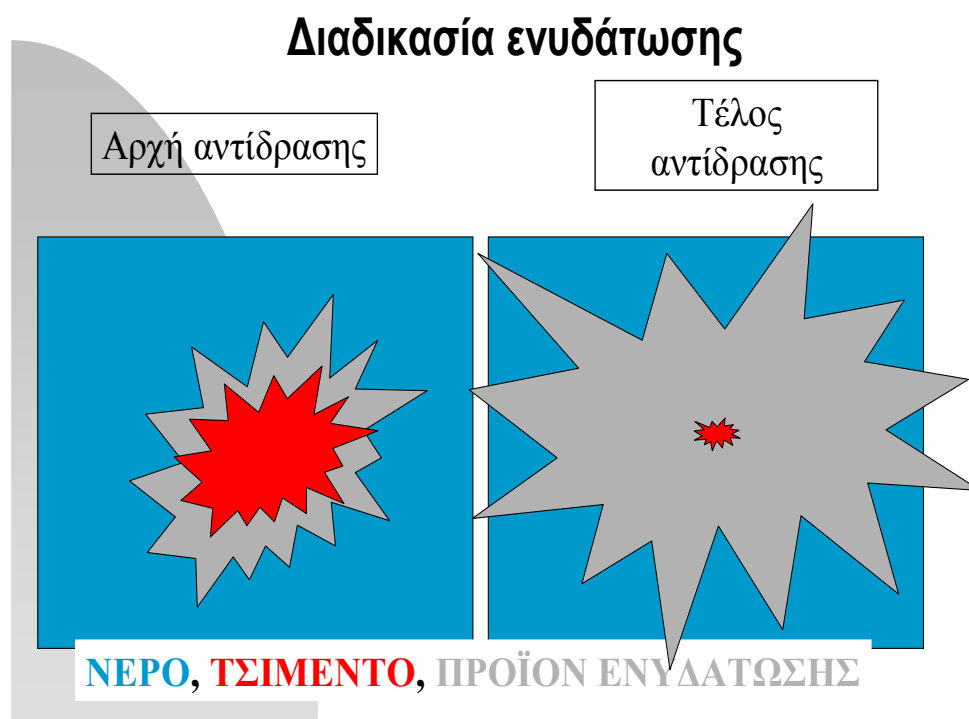
##### 2.1.1.1.4.1. Αντίδραση ενυδάτωσης του τσιμέντου (Μηχανισμός δημιουργίας πορώδους στο σκυρόδεμα)

Το πορώδες, δηλαδή ο μηχανισμός δημιουργίας ρηγματώσεων και μικρορηγματώσεων στο σκυρόδεμα, σχετίζεται με τον βασικό μηχανισμό σκλήρυνσης και ενυδάτωσης του σκυροδέματος, δηλαδή αύξησης της αντοχής του

<sup>10</sup> Κύρια συστατικά (main constituents) είναι ειδικά επιλεγμένα ανόργανα υλικά που προστίθενται σε κάποια φάση της παραγωγικής του διαδικασίας στο τσιμέντο (συνήθως κατά την τελική άλεση), σε αναλογία που ξεπερνά το 5% κατά βάρος της συνολικής ποσότητας κύριων και δευτερευόντων συστατικών (αυτά αντίθετα δεν ξεπερνούν το 5% κατά βάρος της συνολικής ποσότητας κύριων και δευτερευόντων συστατικών). (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)



μέσω της χημικής αντίδρασης του τσιμέντου με το νερό. Στην εικόνα του ακόλουθου σχήματος φαίνεται ενδεικτικά ο μηχανισμός ενυδάτωσης του τσιμέντου.



Σχήμα 1: Μηχανισμός ενυδάτωσης του τσιμέντου

Η περιγραφή της αντίδρασης ενυδάτωσης του τσιμέντου έχει ως εξής:

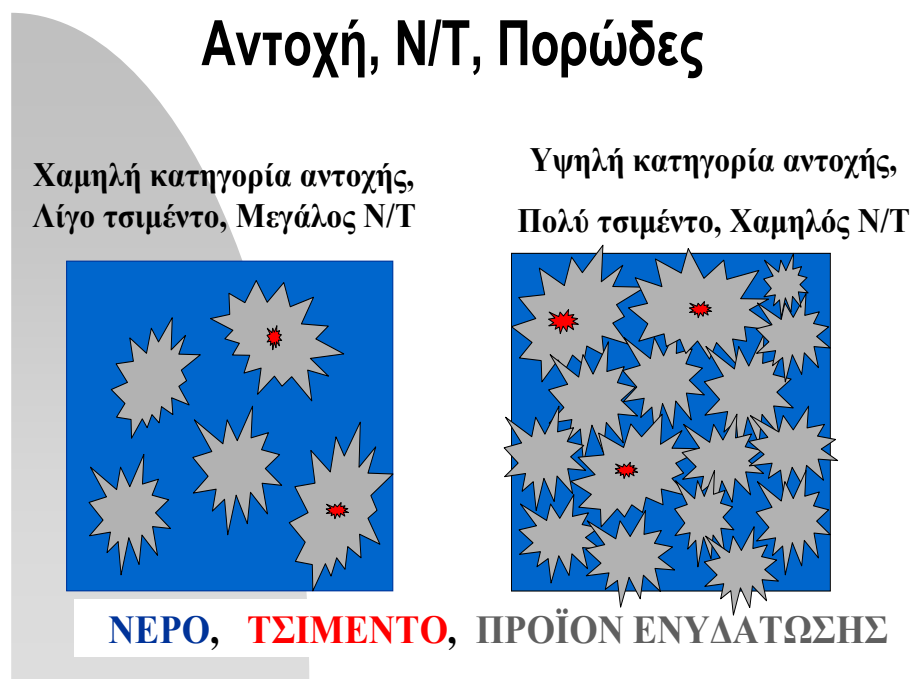
- Στην αρχή της αντίδρασης ο κόκκος του τσιμέντου που περιβάλλεται από νερό, αντιδρά με το νερό δημιουργώντας σύμπλοκα άλατος σε μορφή βελόνας. Αρχικά αντιδρά η εξωτερική επιφάνεια του κόκκου και όσο προχωράει η αντίδραση προς το εσωτερικό του κόκκου, τόσο πιο πολλά άλατα δημιουργούνται καταλαμβάνοντας και μεγαλύτερο όγκο.
- Η αντίδραση ενυδάτωσης προχωράει με την πάροδο του χρόνου, οπότε ο όγκος των αλάτων καταλαμβάνει τον μέγιστο όγκο που μπορεί να καταλάβει. Η πρόοδος της αντίδρασης με τον χρόνο είναι ασυμπτωτική και ποτέ δεν πραγματοποιείται πλήρης ενυδάτωση του τσιμέντου.
- Οι «βελόνες» των συμπλόκων αλάτων (προϊόντων αντίδρασης του τσιμέντου με το νερό) των κόκκων που γειτνιάζουν, «μπλέκονται» μεταξύ τους, δημιουργώντας ένα στερεό σύμπλεγμα, το οποίο αποτελεί την στερεή τσιμεντόπαστα. Η σκληρυμένη τσιμεντόπαστα μαζί με τα περιεχόμενα αδρανή αποτελούν το σκληρυμένο σκυρόδεμα.

Το σύνολο των κενών που απομένει μεταξύ των προϊόντων ενυδάτωσης αποτελεί το πορώδες του σκυροδέματος, το οποίο ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες και την απόσταση του κάθε τμήματος του σκυροδέματος από ελεύθερη επιφάνεια μπορεί να είναι πλήρες νερού ή αέρα. (Γεωργίου)

#### 2.1.1.1.5. Επίδραση λόγου νερού προς τσιμέντο (W/C ratio) στην αντοχή και το πορώδες του σκυροδέματος

Αναλογία νερού προς τσιμέντο (W/C ratio) είναι η κατά βάρος αναλογία του δραστικού νερού<sup>11</sup> προς το τσιμέντο στο φρέσκο σκυρόδεμα. Αναφορικά με το πόσο νερό χρειάζεται το τσιμέντο για να ενυδατωθεί πλήρως, έχει προσδιορισθεί από θεωρητικούς υπολογισμούς ότι ο λόγος νερού προς τσιμέντο πρέπει να είναι 0,225-0,250 για την πλήρη ενυδάτωσή του. Στην περίπτωση όμως αυτή δεν υπάρχει περίσσεια νερού για τις υπόλοιπες ιδιότητες που πρέπει να έχει το σκυρόδεμα, όπως είναι η εργασιμότητα, η αντλησιμότητα, ώστε να είναι δυνατόν να μορφοποιηθεί σε καλούπια. Για να αποκτήσει το σκυρόδεμα αυτές τις ιδιότητες, εκτός των άλλων, απαιτείται περίσσεια νερού. Η ελάχιστη τιμή του λόγου νερού προς τσιμέντο θεωρείται ότι είναι 0,40, αλλά για ειδικά σκυροδέματα η τιμή του λόγου N/T μπορεί να φτάσει ακόμα και τις τιμές 0,30-0,35. Οι συνήθεις όμως τιμές του λόγου αυτού κυμαίνονται στο εύρος 0,45-0,65.

Η τιμή του λόγου νερού προς τσιμέντο έχει επίδραση στο πορώδες του σκυροδέματος και επομένως η τιμή του λόγου αυτού πρέπει να είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ καλής εργασιμότητας και μικρού πορώδους. Στην εικόνα του ακόλουθου Σχήματος φαίνεται ενδεικτικά η επίδραση της σχέσης νερού – τσιμέντου (N/T) στην αντοχή, καθώς και το πορώδες του σκυροδέματος.

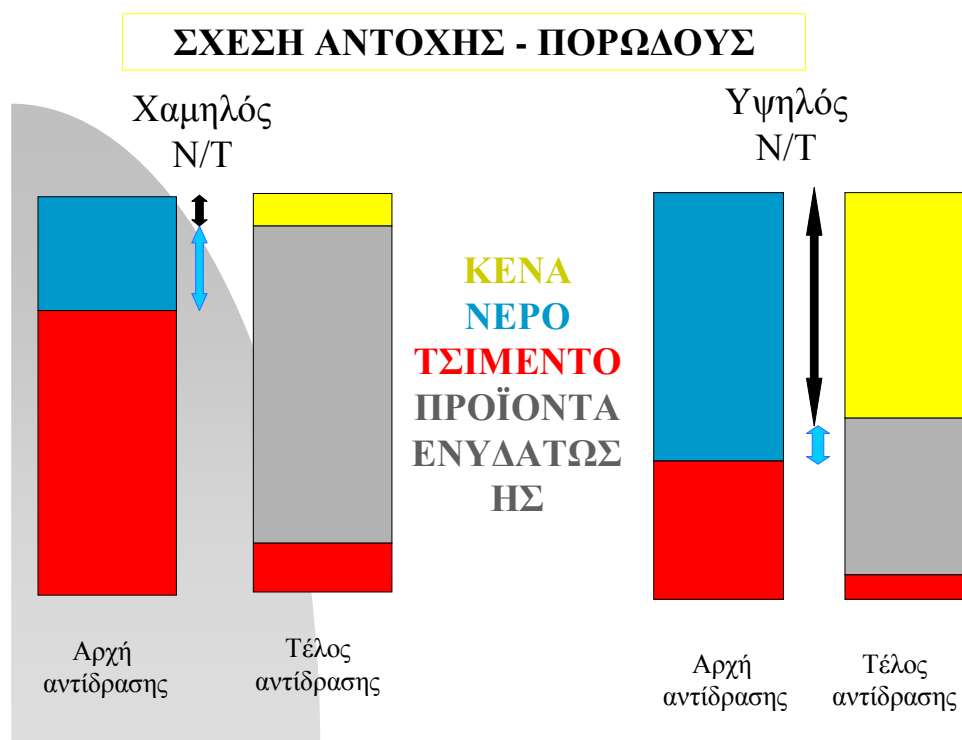


Σχήμα 2: Επίδραση της σχέσης νερού - τσιμέντου (N/T) στην αντοχή και το πορώδες του σκυροδέματος

<sup>11</sup> Δραστικό περιεχόμενο νερό (effective water content) είναι αυτό που προκύπτει από την διαφορά μεταξύ του συνολικού νερού που υπάρχει στο φρέσκο σκυρόδεμα και του νερού που απορροφάται από τα αδρανή. Ως συνολικό νερό θεωρείται το άθροισμα εκείνου που προστίθεται με την φυσική υγρασία των αδρανών και των πάσης φύσεως προσθέτων, καθώς και εκείνο που εισέρχεται με τα πρόσθετα εάν αυτά χρησιμοποιούνται με την μορφή πολτού. (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010)

Όπως φαίνεται στο αριστερό εικονίδιο του παραπάνω Σχήματος, όσο περισσότερο είναι το νερό σε σχέση με το τσιμέντο (μεγάλος λόγος N/T), οι «βελόνες» των προϊόντων ενυδάτωσης «μπλέκονται» λίγο μεταξύ τους, τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ των προϊόντων ενυδάτωσης (πορώδες) των διπλανών κόκκων είναι σχετικά μεγάλα, με αποτέλεσμα η τάση που απαιτείται για να «σπάσει» αυτός ο δεσμός να είναι σχετικά μικρή, οπότε και η αντοχή του σκυροδέματος είναι μικρή. Αντίθετα, όπως φαίνεται στο δεξί εικονίδιο του παραπάνω Σχήματος όταν το νερό σε σχέση με το τσιμέντο είναι λιγότερο (μικρός λόγος N/T), οι «βελόνες» των προϊόντων ενυδάτωσης είναι σφιχτά «μπλεγμένες» μεταξύ τους, τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ τους (πορώδες) είναι σχετικά μικρά, με αποτέλεσμα η τάση που απαιτείται για να «σπάσει» αυτός ο δεσμός να είναι μεγαλύτερη, οπότε και η αντοχή του σκυροδέματος να είναι πιο μεγάλη.

Στο διάγραμμα του ακόλουθου Σχήματος απεικονίζονται ογκομετρικά οι δύο ανωτέρω περιπτώσεις.



Σχήμα 3: Ογκομετρική απεικόνιση της σχέσης νερού - τσιμέντου (N/T) στην αντοχή και το πορώδες του σκυροδέματος

\*Το μπλε βέλος δείχνει το μέρος του νερού που αντιδρά με το τσιμέντο. Το υπόλοιπο νερό είτε παραμένει εντός, είτε εξατμίζεται όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν.

Η επίπτωση στο πορώδες, το οποίο αποτελεί την «δίοδο» μέσω της οποίας εισέρχονται στο σκυρόδεμα οι παράγοντες που προσβάλλουν τον σπλισμό, των διαφόρων παραμέτρων (λόγος N/T, ποσότητα τσιμέντου), για σταθερά όλα τα υπόλοιπα, είναι η εξής:

- Μεγάλη ποσότητα τσιμέντου → μικρό πορώδες
- Μικρός λόγος N/T → μικρό πορώδες
- Μεγάλη αντοχή → μικρό πορώδες

Το πορώδες όμως του σκυροδέματος δεν εξαρτάται μόνο από τον λόγο νερού προς τσιμέντο, αλλά και από την κοκκομετρία των αδρανών, την συμπύκνωση στα καλούπια, καθώς και τη συντήρηση ιδιαίτερα τις επτά πρώτες ημέρες μετά την παρασκευή του.

(Γεωργίου) (Τσίμας & Τσιβιλής, 2010) (Μοροπούλου & Μπατής, 2012)

#### **2.1.1.2. Νερό για παρασκευή σκυροδέματος**

Για την παρασκευή σκυροδέματος απαιτείται νερό κατάλληλης ποιότητας. Γενικά κάθε είδους νερό (βρόχινο, ποταμίσιο, λιμναίο, υπόγειο) μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αρκεί μόνο να μην περιέχει ουσίες βλαπτικές για το σκυρόδεμα. Εξαιρέση αποτελούν τα ανθρακούχα νερά τα οποία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Νερά με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα και με χαμηλό pH επίσης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Το θαλασσινό νερό έχει συχνά χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του σκυροδέματος, όμως η υψηλή περιεκτικότητά του σε χλωριόντα διευκολύνει τη διάβρωση του οπλισμού και συνεπώς η χρήση του πρέπει να αποφεύγεται για την παραγωγή οπλισμένου σκυροδέματος.

Το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή σκυροδέματος θα πρέπει να πληροί τις εξής προϋποθέσεις:

- Να έχει περιεκτικότητα σε άλατα μικρότερη από 3,5%
- Να έχει περιεκτικότητα σε θειικά μικρότερη από 0,5%
- Το pH του να είναι μεγαλύτερο από 4 ( $pH > 4$ )
- Η περιεκτικότητά του σε νάτριο να είναι μικρότερη από 3% (υπολογισμένο σαν  $Na_2O$ )
- Να παρουσιάζει πλήρη έλλειψη σε λίπη και έλαια
- Να έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένες οργανικές ουσίες
- Να έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε αιωρούμενες οργανικές ουσίες

Η χρήση βιομηχανικών αποβλήτων πρέπει να αποφεύγεται. Το νερό οποιασδήποτε προέλευσης πρέπει να ελέγχεται πριν από την χρήση του, εκτός κι αν είναι πόσιμο. Νερό χρησιμοποιείται επίσης και για τη συντήρηση του σκυροδέματος. Το νερό αυτό θα πρέπει να μην περιέχει ουσίες που προσβάλλουν την άσβεστο. Το πλέον κατάλληλο νερό είναι αυτό που ανταποκρίνεται στην ποιότητα του πόσιμου. (Μοροπούλου & Μπατής, 2012)

#### **2.1.1.3. Αδρανή**

Ως αδρανή υλικά (aggregates) ορίζονται τα βοηθητικά δομικά υλικά που προέρχονται από φυσικούς λίθους με μηχανικό τεμαχισμό ή ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας. Τα αδρανή δεν παρουσιάζουν χημικές συνδετικές ιδιότητες μεταξύ τους, παρά μόνο φυσική συνοχή λόγω της γεωμετρικής ταξινόμησης των κόκκων τους και του βάρους τους. Έτσι, τα αδρανή όταν αναμιχθούν με το τσιμέντο, που αποτελεί πολύ συγκολλητικής ύλης, προκύπτει το σκυρόδεμα, δηλαδή ένα σύνθετο δομικό υλικό. Κατά τη διάρκεια της

πήξης και της σκλήρυνσης των μιγμάτων αυτών, τα λίθινα προϊόντα δεν συμμετέχουν ενεργά και για τον λόγο αυτό καλούνται αδρανή υλικά. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι επειδή τα αδρανή υλικά προέρχονται κυρίως από τεμαχισμό φυσικών λίθων, διατηρούνται σε αυτά οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του μητρικού υλικού. (Λεγάκης, 1997)

Στην περίπτωση του σκυροδέματος με τον όρο αδρανή χαρακτηρίζονται τα προστιθέμενα υλικά διαφόρου μεγέθους, που δεν αντιδρούν με την άσβεστο και το μίγμα τσιμέντου – νερού. Τα αδρανή αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του όγκου του σκυροδέματος και συγκεκριμένα το (60-70)%. Αρκετές από τις φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος, καθώς και η αντοχή του σε διάβρωση εξαρτώνται από τα αδρανή. Πρέπει να τονισθεί ότι η κακή εκλογή των αδρανών, για παράδειγμα αυτά που αντιδρούν με την άσβεστο, ενδέχεται να έχει σαν συνέπεια την καταστροφή του σκυροδέματος, χωρίς καν την επενέργεια διαβρωτικού περιβάλλοντος. (Μοροπούλου & Μπατής, 2012)

#### 2.1.1.3.1. Κατηγορίες αδρανών υλικών

Τα αδρανή υλικά ανάλογα με την προέλευσή τους μπορούν να διαιρεθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Φυσικής προέλευσης  
Τα αδρανή υλικά φυσικής προέλευσης έχουν ληφθεί από το φυσικό περιβάλλον και έχουν υποστεί μηχανική επεξεργασία θραύσης, πλύσιμο και διαλογή (για παράδειγμα θραυστά πετρώματα, ποταμίσιες, λιμναίες ή θαλάσσιες αποθέσεις, αποθέσεις άμμων ή χαλικιών, λάβα, λατομικά προϊόντα).
- Τεχνητά ή βιομηχανικά  
Τα τεχνητά ή βιομηχανικά αδρανή υλικά έχουν προκύψει ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας από χημική ή θερμική επεξεργασία πρώτων υλών ορυκτής ή άλλης προέλευσης (για παράδειγμα τέφρες, σκωρίες, υπολείμματα καύσεων, άργιλοι κ.ά.).

Επιπρόσθετα, υπάρχουν και τα ανακυκλωμένα αδρανή υλικά, τα οποία προκύπτουν από την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση δομικών υλικών από υφιστάμενες κατασκευές (υλικά κατεδαφίσεως σκυροδέματος, τοιχοποιίας, ασφαλικών έργων κ.ά.)

Με βάση την πηγή λήψης τα αδρανή υλικά κατηγοριοποιούνται σε:

- «Φυσικά» ή Συλλεκτά αδρανή  
Προέρχονται από φυσικές αποθέσεις (ποτάμια, ορυχεία κ.ά.).
- Αδρανή λατομείων<sup>12</sup>  
Προκύπτουν από εξόρυξη και θραύση όγκων πετρώματος και αποτελούν την συνηθέστερη κατηγορία αδρανών υλικών.

Με βάση το ειδικό βάρος τους, τα αδρανή υλικά κατηγοριοποιούνται σε:

- Κανονικού ειδικού βάρους

<sup>12</sup> Στην Ελλάδα λειτουργούν περισσότερα από 230 λατομεία

Έχουν μέγεθος από 2 έως 3 Mg/m<sup>3</sup> και αποτελούν τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα αδρανή για τεχνικά έργα (ασφαλτικά, οδοστρωσίας, παραγωγή σκυροδέματος, κονιαμάτων κ.ά.).

- Ελαφροβαρή  
Ελαφρά αδρανή με ειδικό βάρος μικρότερο από 2 Mg/m<sup>3</sup>, τα οποία παρουσιάζουν πορώδη δομή και χρησιμοποιούνται σε κονιάματα ή θερμομονωτικά σκυροδέματα.
- Βαρέα  
Συμπαγή αδρανή με ειδικό βάρος μεγαλύτερο από 3 Mg/m<sup>3</sup>.

Με βάση το μέγεθος των κόκκων, τα αδρανή υλικά κατηγοριοποιούνται σε:

- Λεπτόκοκκα  
Τα λεπτόκοκκα αδρανή έχουν μέγιστο μέγεθος κόκκου μικρότερο από 4 mm (άμμος).
- Χονδρόκοκκα  
Τα χονδρόκοκκα αδρανή έχουν μέγιστο μέγεθος κόκκου μεγαλύτερο από 4 mm και ελάχιστο μέγεθος κόκκου μεγαλύτερο από 2 mm (ογκόλιθοι, κροκάλες, έρμα, χαλίκι, γαρμπίλι, ρυζάκι).
- Filler  
Filler είναι το διαβαθμισμένο λεπτομερές αδρανές υλικό με μέγιστο μέγεθος κόκκου 2 mm και το οποίο διέρχεται σε ποσοστό (70-100)% από το κόσκινο 0,063 mm.

Στα αδρανή υλικά με μικρό μέγεθος κόκκων, αυτό προσδιορίζεται με χρήση ειδικών κοσκίνων με γνωστή διάμετρο τρύπας, ενώ με χρήση σειράς τέτοιων κοσκίνων είναι δυνατή η αποκάλυψη της κατανομής του μεγέθους των κόκκων.

Με βάση την χρήση τους και σύμφωνα με τις απαιτήσεις της Οδηγίας 89/106 (ΠΔ 344/94) «Προϊόντα Δομικών Κατασκευών», τα αδρανή κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Αδρανή για σκυρόδεμα (ΕΛΟΤ EN 12620)
- Σκύρα έρματος σιδηροδρομικών γραμμών (ΕΛΟΤ EN 13450)
- Αδρανή για ασφαλτομίγματα (ΕΛΟΤ EN 13043)
- Αδρανή με ή χωρίς συνδετικά υλικά για βάσεις και υποβάσεις (ΕΛΟΤ EN 13242)
- Ελαφρά αδρανή (ΕΛΟΤ EN 13055-1)
- Αδρανή για κονιάματα (ΕΛΟΤ EN 13139)

(Λεγάκης, 1997) (ΤΕΕ, 2008) (Μοροπούλου & Μπατής, 2012)

#### 2.1.1.3.2. Προδιαγραφές αδρανών υλικών

Ανεξάρτητα από το είδος και την προέλευσή τους τα αδρανή πρέπει να εκπληρούν ορισμένες απαιτήσεις ώστε να είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στην παρασκευή σκυροδέματος. Οι απαιτήσεις αυτές αναφέρονται:

- Στο μέγεθος και το σχήμα των κόκκων  
Όσον αφορά στο μέγεθος των κόκκων των αδρανών για ένα σκυρόδεμα ορισμένης αντοχής πρέπει να χρησιμοποιηθούν αδρανή ορισμένης κοκκομετρικής σύνθεσης. Το επιθυμητό σχήμα των κόκκων των αδρανών

είναι σφαιρικό ή κυβικό. Ανεπιθύμητοι κόκκοι θεωρούνται αυτοί που έχουν σχέση μήκος/πάχος μικρότερη από 3/1.

- Στην αντοχή τους – κατά κύριο λόγο – σε θλίψη  
Η μηχανική αντοχή των κόκκων των αδρανών πρέπει να είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο πιο ανθεκτικό σκυρόδεμα απαιτείται. Συνήθως όμως μία αντοχή σε θλίψη της τάξης των 100 N/mm<sup>2</sup> είναι αρκετή.
- Στην αντοχή τους σε θερμοκρασιακές μεταβολές, στα όρια που καθορίζει η χρήση της εκάστοτε κατασκευής  
Επειδή κατά τη διάρκεια της ζωής του το σκυρόδεμα υφίσταται μεταβολές θερμοκρασιών πρέπει τα αδρανή παρουσία υγρασίας να παρουσιάζουν ανθεκτικότητα μέσα στα όρια αυτά.

Μεγάλη σημασία έχει όμως και η περιεκτικότητα των αδρανών σε ουσίες που μπορούν να παρεμποδίσουν την πήξη του τσιμέντου και γενικότερα να μειώσουν την αντοχή του. Οι ουσίες αυτές μπορούν να διακριθούν σε:

- Πολύ λεπτά συστατικά  
Πρόκειται για ουσίες κυρίως αργιλικές που υπάρχουν στα αδρανή είτε στην επιφάνειά τους, είτε μεταξύ των κόκκων με διάμετρο κόκκου μικρότερη από 0,06 mm. Η παρουσία τους μειώνει την αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος. Το ανώτερο επιτρεπόμενο ποσό σε πολύ λεπτά συστατικά που μπορεί να περιέχεται στα αδρανή εξαρτάται από την τάξη μεγέθους των κόκκων και κυμαίνεται μεταξύ (0,4-0,5)%.
- Οργανικές ουσίες  
Πρόκειται για οργανικές ουσίες, οι οποίες είναι λεπτά διαμερισμένες και εμποδίζουν την σκλήρυνση του σκυροδέματος ή διογκούμενες κατακρατούν το νερό (για παράδειγμα σκόνη ξύλου). Η παρουσία τους διαπιστώνεται με ειδικές δοκιμές. Ανώτατο ποσό των οργανικών ουσιών στα αδρανή θεωρείται το 0,5%.
- Ουσίες που εμποδίζουν την σκλήρυνση του σκυροδέματος  
Πρόκειται για οργανικές, διαλυτές ουσίες, όπως για παράδειγμα ζάχαρη ή άλατα, που σε μικρές ποσότητες εμποδίζουν την ανάπτυξη αντοχών στο σκυρόδεμα. Η παρουσία τους διαπιστώνεται με την αντοχή καθορισμένης διάστασης κύβων σκυροδέματος σε θλίψη.
- Ενώσεις του θείου  
Οι ενώσεις του θείου είναι γενικά επιβλαβείς για το σκυρόδεμα. Κατά πρώτο λόγο πρόβλημα δημιουργούν τα θειικά άλατα στην πήξη του τσιμέντου. Αλλά και άλλες ενώσεις του θείου – εάν οξειδωθούν – δίνουν θεικές ενώσεις. Για τον λόγο αυτό το ποσό του θείου, υπολογιζόμενο σαν SO<sub>3</sub>, δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1%.
- Ουσίες επιβλαβείς για τον οπλισμό του σκυροδέματος  
Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή οπλισμένου σκυροδέματος δεν πρέπει να περιέχουν ουσίες που επιταχύνουν τη διάβρωση του οπλισμού. Κατά κύριο λόγο τέτοιες ουσίες θεωρούνται τα χλωριούχα άλατα. Επίσης, τα νιτρικά, τα βρωμιούχα και τα ιωδούχα άλατα ανήκουν στην κατηγορία αυτή. Ειδικότερα, τα χλωριόντα πρέπει να

περιέχονται στα αδρανή σε ποσοστό μικρότερο από 0,04% προκειμένου για οπλισμένο σκυρόδεμα και 0,02% για προεντεταμένο<sup>13</sup> σκυρόδεμα.

(Μοροπούλου & Μπατής, 2012)

### 2.1.2. Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

Η σημαντικότερη ίσως ιδιότητα του σκυροδέματος είναι η θλιπτική του αντοχή. Το σκυρόδεμα, ακόμα και το άοπλο, εμφανίζει μεγάλη αντοχή σε θλίψη, γεγονός στο οποίο οφείλεται σε μεγάλο βαθμό η εκτεταμένη χρήση του υλικού στις κατασκευές.

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος συμβολίζεται ως  $f_c$  (c: concrete) στους κανονισμούς οπλισμένου σκυροδέματος και αναφέρεται στην μονοαξονική θλιπτική αντοχή. Η αντοχή αυτή μετράται στις 28 ημέρες συντήρησης για κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm ή για κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm, σύμφωνα με τις διατάξεις του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος.

Ο κανονισμός οπλισμένου σκυροδέματος ορίζει σαν βάση τη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή  $f_{ck}$ . Χαρακτηριστική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου  $f_{ck}$  ή κυβικού δοκιμίου  $f_{ck,cube}$  θεωρείται εκείνη η τιμή αντοχής κάτω της οποίας υπάρχει 5% πιθανότητα να βρεθεί η τιμή αντοχής ενός τυχαίου δοκιμίου.

Όπως είναι φυσικό, η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος  $f_{cm}$  (m: mean), δηλαδή η μέση τιμή των αντοχών δύο ή περισσότερων δοκιμών από το ίδιο δείγμα σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη από την χαρακτηριστική αντοχή  $f_{ck}$ . Ο κανονισμός συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη με την ακόλουθη σχέση:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)}$$

(Παναγόπουλος & Κίρτας, 2005)

### 2.1.3. Κατηγορίες σκυροδέματος

Οι κατηγορίες σκυροδέματος ορίζονται με βάση την χαρακτηριστική τιμή (σε MPa) της θλιπτικής αντοχής. Συχνά στην ονομασία μίας κατηγορίας σκυροδέματος η αντοχή των κυβικών δοκιμών παραλείπεται. Συνεπώς, η ονομασία «σκυρόδεμα C16» αναφέρεται σε σκυρόδεμα του οποίου η χαρακτηριστική τιμή της κυλινδρικής αντοχής του είναι 16 MPa.

Στον ακόλουθο Πίνακα, στον οποίο παρουσιάζονται οι κατηγορίες σκυροδέματος και οι αντίστοιχες θλιπτικές αντοχές τους, παρατηρείται ότι η χαρακτηριστική τιμή της θλιπτικής αντοχής των κυβικών δοκιμών είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή των αντίστοιχων κυλινδρικών. Στην πράξη όλοι οι υπολογισμοί για τις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος γίνονται με βάση την χαρακτηριστική τιμή της θλιπτικής

<sup>13</sup> Στο προεντεταμένο σκυρόδεμα γίνεται προσπάθεια αναίρεσης των εφελκυστικών τάσεων με την προσθήκη μίας κατάλληλης θλιπτικής δύναμης, ενώ στο οπλισμένο σκυρόδεμα η ανάληψη των εφελκυστικών τάσεων γίνεται από τον ενσωματωμένο οπλισμό.  
(<http://www.businessdictionary.com/definition/prestressed-concrete.html>)



αντοχής κυλινδρικών δοκιμών  $f_{ck}$ , εκτός αν ο κανονισμός σε κάποιους ελέγχους ορίζει κάτι διαφορετικό.

Πίνακας 1: Κατηγορίες σκυροδέματος και αντίστοιχες θλιπτικές αντοχές

	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
$f_{ck}$ (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60

Η χρήση της κατηγορίας C12/15 σε οπλισμένο σκυρόδεμα επιτρέπεται μόνο για κτίρια χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας<sup>14</sup> με τρεις το πολύ ορόφους. Στην ουσία η κατηγορία αυτή χρησιμοποιείται για απλές κατασκευές, όπως για παράδειγμα για την κατασκευή πεζοδρομίων.

Η χρήση της κατηγορίας C16/20 σε οπλισμένο σκυρόδεμα επιτρέπεται μόνο για:

- κτίρια χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας, ανεξαρτήτως του αριθμού των ορόφων
- κτίρια με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας, με τρεις το πολύ ορόφους

Για προεντεταμένο σκυρόδεμα δεν επιτρέπονται οι κατηγορίες C12/15, C16/20 και C20/25. (Παναγόπουλος & Κίρτας, 2005)

#### 2.1.4. Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος

Ο όρος εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αναφέρεται στη μέγιστη τάση την οποία μπορεί να παραλάβει το (άοπλο) σκυρόδεμα όταν υποβάλλεται σε μονοαξονικό εφελκυσμό μέχρι να ρηγματωθεί. Συμβολίζεται ως  $f_{ct}$  (t: tension) και όπως είναι αναμενόμενο η τιμή της είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη αντοχή σε θλίψη.

Η μικρή τιμή της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος είναι ίσως το σημαντικότερο πρόβλημά του ως δομικό υλικό. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού τοποθετούνται στο σκυρόδεμα οπλισμοί από χάλυβα, οι οποίοι καλούνται να παραλάβουν τις εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στα δομικά στοιχεία.

Ως τάξη μεγέθους η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος είναι περίπου το 1/10 της αντίστοιχης θλιπτικής του αντοχής. Ακριβέστερα, ο κανονισμός υπολογίζει τη μέση εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος  $f_{ctm}$  βάσει της χαρακτηριστικής τιμής της θλιπτικής αντοχής μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (f_{ctm}, f_{ck} \text{ σε MPa}) \quad (\text{Παναγόπουλος \& Κίρτας, 2005})$$

<sup>14</sup> Πλαστιμότητα είναι η ιδιότητα ενός φορέα ή μίας κρίσιμης περιοχής στοιχείου από οπλισμένο σκυρόδεμα να αποκρίνεται με μεγάλες παραμορφώσεις, χωρίς σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητάς του.

### 2.1.5. Χάλυβας οπλισμένου σκυροδέματος

Οι χάλυβες συνιστούν κράματα σιδήρου – άνθρακα, με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη ή ίση του 1,5% κατά βάρος. Για τον οπλισμό του σκυροδέματος χρησιμοποιείται ο λεγόμενος δομικός χάλυβας. (Χρυσουλάκης & Παντελής, 2008)

Τα μηχανικά και τεχνολογικά χαρακτηριστικά των χαλύβων που χρησιμοποιούνται στο οπλισμένο σκυρόδεμα καθορίζονται από πρότυπα και/ή εγκριτικές αποφάσεις ή πιστοποιητικά συμμόρφωσης (ΕΛΟΤ 959 και ΕΛΟΤ 971).

#### 2.1.5.1. Διάκριση των ράβδων οπλισμού

Οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται ως ράβδοι οπλισμού στο σκυρόδεμα μπορούν να διακριθούν:

α. Σύμφωνα με τη μέθοδο παραγωγής

Οι ακολουθούμενες μέθοδοι παραγωγής είναι οι εξής:

- Θερμή έλαση, δίχως καμία περαιτέρω επεξεργασία
- Θερμή έλαση, η οποία ακολουθείται από μία άμεση εν σειρά θερμική κατεργασία
- Ψυχρή κατεργασία με στρέψη ή με όλκηση (συρματοποίηση) του αρχικού προϊόντος, το οποίο προέρχεται από θερμή έλαση

β. Σύμφωνα με την μορφή της επιφάνειας σε:

- Λείες κυλινδρικές ράβδους ή σύρματα (και συγκολλητικά δομικά πλέγματα)
- Ράβδους ή σύρματα υψηλής συνάφειας (και συγκολλητικά δομικά πλέγματα), με νευρώσεις (νευροχάλυβες)

γ. Σύμφωνα με τη συγκολλησιμότητα σε:

- Χάλυβες συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις
- Χάλυβες συγκολλησίμους

Το πρότυπο ΕΛΟΤ 959 αναφέρεται στους χάλυβες συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις και το ΕΛΟΤ 971 στους συγκολλησίμους χάλυβες.

(Παναγόπουλος & Κίρτας, 2005) (Μοροπούλου & Μπατής, 2012)

#### 2.1.5.2. Χαρακτηριστική αντοχή – Κατηγορίες χάλυβα

Η αντοχή του χάλυβα σε εφελκυσμό είναι σημαντική (πολύ κοντά στην αντοχή του σε θλίψη) και μπορεί να βοηθήσει στην παραλαβή των εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται στα δομικά στοιχεία οπλισμού – σκυροδέματος.

Ως χαρακτηριστική αντοχή  $f_{yk}$  ( $\gamma$ : yield = διαρροή) θεωρείται εκείνη η τιμή του ορίου διαρροής  $f_y$  ή του συμβατικού ορίου διαρροής  $f_{0,2}$  (που αντιστοιχεί σε παραμένουσα παραμόρφωση 0,2%) κάτω της οποίας υπάρχει 5% πιθανότητα να βρεθεί η τιμή αντοχής ενός τυχαίου δοκιμίου. Εάν ο παραγωγός χάλυβα εγγυάται μία ελάχιστη τιμή για το  $f_y$  ή  $f_{0,2}$  τότε η τιμή αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως χαρακτηριστική.

Οι κατηγορίες χάλυβα που χρησιμοποιούνται συνήθως ως ράβδοι οπλισμού στο σκυρόδεμα, οι οποίες ορίζονται από τα πρότυπα ΕΛΟΤ 959 και 971, είναι οι εξής: S220, S400, S500, S400s, S500s (όπου, οι αριθμοί αυτοί αντιστοιχούν στη χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής μετρούμενη σε MPa).

Ο χαρακτηρισμός s υποδηλώνει συγκολλησιμο χάλυβα και άρα οι τρεις πρώτες κατηγορίες αναφέρονται σε χάλυβες συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις (σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 959), ενώ οι υπόλοιπες δύο σε συγκολλησίμους χάλυβες (σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 971). Η ποιότητα S220 αντιστοιχεί σε λείες ράβδους θερμής ελάσεως, ενώ οι υπόλοιπες σε ράβδους και σύρματα υψηλής συνάφειας, συνήθως νευροχάλυβες. Οι χάλυβες S500 και S500s μορφής λείας ή με νευρώσεις χρησιμοποιούνται για την παραγωγή δομικών πλεγμάτων.

Τα δύο ανωτέρω πρότυπα καθορίζουν τις ιδιότητες των χαλύβων κάθε κατηγορίας. Με εξαίρεση την ιδιότητα της συγκολλησιμότητας, οι υπόλοιπες ιδιότητες που εξετάζονται είναι κοινές. Η συγκολλησιμότητα των χαλύβων αποδεικνύεται από την χημική τους ανάλυση. Για τους χάλυβες του προτύπου ΕΛΟΤ 959 δεν απαιτείται χημική ανάλυση παρά μόνο διαπίστωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. (Παναγόπουλος & Κίρτας, 2005) (Μοροπούλου & Μπατής, 2012)

## 2.2. Διάβρωση

### 2.2.1. Ορισμός της διάβρωσης

Στον όρο «διάβρωση» (corrosion) αποδίδονται διάφοροι ορισμοί είτε ως συναφή έκφραση της Επιστήμης της Διάβρωσης (Corrosion Science), σύμφωνα με την οποία διάβρωση θεωρείται η αντίδραση ενός στερεού με το περιβάλλον του, είτε ως συναφή έκφραση της Μηχανικής της Διάβρωσης (Corrosion Engineering), σύμφωνα με την οποία διάβρωση είναι η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του μετάλλου, του περιβάλλοντος ή του συστήματος που αυτά αποτελούν τμήμα. (ISO8044-99)

Ο όρος «διάβρωση» αφορά στην διεργασία και όχι το αποτέλεσμα, που είναι η «βλάβη από διάβρωση», η φθορά, η ζημιά. Με την έννοια της διάβρωσης, η ταχύτητα της διαβρωτικής δράσης της προκαλούμενης φθοράς είναι συνυφασμένη με την έκταση και την φύση της φθοράς σε σχέση με την λειτουργία του σχετικού συστήματος. Ως επιφάνεια που διαβρώνεται δεν εννοείται μόνο η γεωμετρική επιφάνεια, αλλά η πραγματική επιφάνεια, δηλαδή η γεωμετρική που σε αυτήν ανήκουν και οι επιφανειακές ανωμαλίες, οι πόροι, τα ενεργά κέντρα και οι ενεργοί δρόμοι από αταξίες δομής. Τονίζεται ότι μόνο αυτή η επιφάνεια είναι έδρα των φαινομένων της διάβρωσης και όχι όλη η μάζα του σώματος το οποίο διαβρώνεται.

Θα πρέπει επίσης να διευκρινιστεί ότι η απώλεια υλικού ως συνέπεια της διάβρωσης δεν σημαίνει πάντα ότι η μάζα του σώματος ελαττώνεται. Αντίθετα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο σχηματισμός ενώσεων στην επιφάνεια ενός υλικού με έντονη πρόσφυση σε αυτήν, έχει ως συνέπεια την αύξηση της μάζας του υλικού αυτού. Ως απώλεια υλικού εννοείται η απώλεια της μάζας του ως προς την αρχική του μάζα. (Σκουλικίδης, Διάβρωση και Συντήρηση των Δομικών Υλικών Μνημείων, 2000)

### 2.2.2. Συστήματα διάβρωσης

Το υλικό και το περιβάλλον ή το διαβρωτικό μέσο αποτελούν ένα σύστημα διάβρωσης. Στη βιβλιογραφία υπάρχει πλήθος χαρακτηρισμών του διαβρωτικού συστήματος και κατά συνέπεια της διάβρωσης με κριτήριο:

- Το διαβρωτικό περιβάλλον (ατμοσφαιρική διάβρωση, βιολογική διάβρωση)
- Το υλικό (διάβρωση σιδήρου, αλουμινίου)
- Την μορφολογία της προσβολής (ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση, τοπική διάβρωση, κ.ά.)
- Τις ηλεκτροχημικές δράσεις μεταξύ υλικού και περιβάλλοντος (διάβρωση με μηχανισμό υδρογόνου)
- Την επιπλέον ύπαρξη μηχανικών τάσεων στο σύστημα ή την παρουσία εσωτερικών τάσεων στο υλικό, γεγονός που οδηγεί στην ύπαρξη ρωγμών (διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση)

(Υφαντής, 1995)

### 2.2.3. Διαβρωτικό περιβάλλον

Η διάβρωση ως αποτέλεσμα της ισχύος του 2<sup>ου</sup> θερμοδυναμικού νόμου είναι ανεξάρτητη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος. Η ταχύτητα όμως της διάβρωσης και η συγκεκριμένη πορεία που θα ακολουθήσει εξαρτάται και από την φύση του μετάλλου ή κράματος, καθώς και από τους διαβρωτικούς παράγοντες του περιβάλλοντος. Διαβρωτικά περιβάλλοντα αποτελούν:

- Ο ατμοσφαιρικός αέρας, ο οποίος περιέχει οξυγόνο, υγρασία, οξείδια αζώτου και θείου, σκόνη, αλάτι κοντά στην θάλασσα, κ.ά.
- Το υδατικό περιβάλλον, για παράδειγμα το θαλάσσιο, το οποίο είναι εξόχως διαβρωτικό εξαιτίας κυρίως των περιεχόμενων αλάτων και ιόντων και κατά κύριο λόγο των χλωριόντων. Επίσης, σε μικρότερο βαθμό, πρόβλημα διάβρωσης προκαλούν το λιμναίο και το ποταμίσιο υγρό περιβάλλον.
- Το έδαφος με τα άλατά του, την υγρασία, τους μικροοργανισμούς, κ.ά.
- Τα καυσαέρια και γενικά τα αέρια τους, η διαβρωτικότητα των οποίων εξαρτάται από την θερμοκρασία τους, την ταχύτητα ροής τους και την σύστασή τους. Μπορούν να διακριθούν και άλλα διαβρωτικά περιβάλλοντα (βιομηχανικό, αστικό, κ.ά.)

(Σκουλικίδης, Διάβρωση και Συντήρηση των Δομικών Υλικών Μνημείων, 2000)

Στην πράξη υπάρχει τεράστια ποικιλία διαβρωτικού περιβάλλοντος και στις τρεις καταστάσεις της ύλης. Συγκεκριμένα,

- α. Σε αέρια μορφή με ή χωρίς παρουσία υγρασίας (ατμοσφαιρική διάβρωση, διάβρωση σε ξηρή ατμόσφαιρα απουσία υγρασίας “dry corrosion”, διάβρωση από καυσαέρια)
- β. Σε υγρή μορφή (θαλασσινό, φυσικό, βιομηχανικό νερό, νερό ύδρευσης, νερό αποχέτευσης, χημικά υγρά, βιολογικά υγρά όπως για παράδειγμα σάλιο στην στοματική κοιλότητα, κ.ά.)

γ. Σε στερεά μορφή (έδαφος, σκυρόδεμα)

(Υφαντής, 1995)

#### 2.2.4. Συμπεριφορά μετάλλου σε διαβρωτικό περιβάλλον

Όταν ένα μέταλλο βρεθεί σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον μπορεί να συμπεριφερθεί με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

- Αδρανής συμπεριφορά  
Η αδρανής συμπεριφορά συναντάται στα ευγενή μέταλλα (χρυσός, άργυρος, πλατίνα). Η συμπεριφορά αυτή είναι αποτέλεσμα της θερμοδυναμικής σταθερότητας των μετάλλων σε αυτό το περιβάλλον, δηλαδή η αντίδραση της διάβρωσης δεν πραγματοποιείται αυθόρμητα.
- Ενεργή συμπεριφορά  
Όταν ένα μέταλλο διαβρώνεται, τότε παρουσιάζει ενεργή συμπεριφορά. Η συμπεριφορά ενός μετάλλου σε ένα διάλυμα χαρακτηρίζεται ως ενεργή όταν το μέταλλο διαβρώνεται εντός του διαλύματος αυτού, δηλαδή όταν διαλύεται μέσα στο διάλυμα και σχηματίζει διαλυτά μη προστατευτικά προϊόντα διάβρωσης. Τα προϊόντα αυτά δεν εμποδίζουν την συνέχιση της διάβρωσης και παρατηρείται μεγάλη απώλεια μάζας του υλικού.
- Παθητική συμπεριφορά  
Το μέταλλο διαβρώνεται με την βύθισή του σε διάλυμα, αλλά παράλληλα σχηματίζεται ένα αδιάλυτο προϊόν (ένα λεπτό προστατευτικό φιλμ), το οποίο δρα προστατευτικά και επιβραδύνει την αντίδραση της διάβρωσης οδηγώντας την σε χαμηλά επίπεδα. Η αντίσταση στην διάβρωση εξαρτάται από την σταθερότητα του προστατευτικού στρώματος. Αν το προστατευτικό στρώμα διαλυθεί μέσα στο διάλυμα ή παρουσιάσει ρωγμές σε κάποια σημεία, τότε το μέταλλο μπορεί να αποκτήσει ενεργή συμπεριφορά. Μερικά μέταλλα που εμφανίζουν παθητική συμπεριφορά είναι ο σίδηρος, το χρώμιο, το τιτάνιο, το νικέλιο, καθώς και κράματά τους.

(Davis & Associates, 2004)

#### 2.2.5. Παράγοντες που επιδρούν στην ταχύτητα διάβρωσης

Η διάβρωση δεν εξελίσσεται σε όλες τις περιπτώσεις με την ίδια ταχύτητα. Υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες, οι οποίοι ευνοούν την ταχύτερη εξέλιξή της. Η γνώση των παραγόντων αυτών είναι πολύ σημαντική, αφού η αποφυγή τους οδηγεί σε μείωση της διάβρωσης. Οι παράγοντες, οι οποίοι επιδρούν στην ταχύτητα διάβρωσης, είναι οι εξής:

- Η παρουσία υγρασίας στην ατμοσφαιρική διάβρωση  
Είναι γενικά γνωστό ότι στην ξηρή ατμόσφαιρα η διάβρωση των μετάλλων ή κραμάτων παρουσιάζει πολύ μικρή εξέλιξη. Αντίθετα, παρουσία υγρασίας η ταχύτητά της αυξάνει σε μεγάλο βαθμό. Από την άποψη της ατμοσφαιρικής διάβρωσης το σημαντικό μέγεθος είναι η σχετική υγρασία. Για τον χάλυβα

σε περιβάλλον με ποσοστό υγρασίας πάνω από 60%, η ταχύτητα διάβρωσης αυξάνεται ταχύτατα.

- Η τιμή της θερμοκρασίας  
Η αύξηση της θερμοκρασίας γενικά αυξάνει την ταχύτητα της διάβρωσης. Η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10 βαθμούς αυξάνει στο διπλάσιο την ταχύτητα διάβρωσης. Η επίδραση αυτή οφείλεται στην γενική αύξηση της κινητικότητας των ατόμων και μορίων με την αύξηση της θερμοκρασίας.
- Η ύπαρξη τριεπιφάνειας  
Γενικά η ύπαρξη τριεπιφάνειας επιτείνει την διάβρωση. Αυτό παρατηρείται στην επιφάνεια νερού – αέρα – μετάλλου, χάλυβα – σκυροδέματος – αέρα, κ.ά.
- Η τιμή του pH  
Όσο μικρότερη είναι η τιμή του pH, τόσο μεγαλύτερη είναι η διάβρωση. Η διάβρωση του χάλυβα είναι μικρή σε περιβάλλον με pH μεγαλύτερο ή ίσο με 7, ενώ για τιμές pH μικρότερες από 7 η διάβρωση λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές. Για pH μικρότερο από 4,5 η ταχύτητα διάβρωσης είναι πλέον μεγάλη. Για μία σαφή και πλήρη εκτίμηση της επίδρασης του pH στην ταχύτητα διάβρωσης, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι σήμερα το pH της βροχής στην κεντρική Ευρώπη έχει την τιμή 4,5 και σε βιομηχανικές περιοχές (τοπικά) παίρνει ακόμα και την τιμή 2,5 (φαινόμενο της όξινης βροχής). Η όξινη βροχή έχει προκαλέσει σημαντική αύξηση της διάβρωσης των μεταλλικών κατασκευών, αλλά και των κατασκευών από σκυρόδεμα. Τελικά η βροχή καταλήγει στο έδαφος, οπότε τα χαρακτηριστικά του εδάφους (τουλάχιστον τα επιφανειακά) μεταβάλλονται με άμεση συνέπεια την αύξηση της διάβρωσης.
- Η ύπαρξη μηχανικών τάσεων  
Γενικά η ύπαρξη μηχανικών τάσεων αυξάνει την ταχύτητα της διάβρωσης. Κάτω από ορισμένες συνθήκες μπορεί να προκαλέσει ακόμα και την θραύση του μεταλλικού στοιχείου (διάβρωση με μηχανική καταπόνηση που οδηγεί σε ψαθυρή θραύση).
- Η ύπαρξη μηχανικών ανωμαλιών στην επιφάνεια της μεταλλικής κατασκευής  
Γενικά οι προεξοχές, οι γωνίες, τα τσακίσματα υφίστανται μεγαλύτερη διάβρωση από τα γειτονικά τους σημεία. Για τον λόγο αυτό τα κομμάτια των μεταλλικών κατασκευών θα πρέπει να έχουν το κατάλληλο σχήμα.
- Η ύπαρξη διαφυγόντων ρευμάτων  
Έχει παρατηρηθεί ότι η ύπαρξη διαφυγόντων ρευμάτων αυξάνει γενικά την διάβρωση. Καταρχήν το συνεχές ρεύμα προκαλεί αύξηση της διάβρωσης, ενώ το εναλλασσόμενο όχι. Συχνά όμως τα προϊόντα της διάβρωσης είναι ημιαγωγοί και προκαλούν μερική ανόρθωση του ρεύματος με συνέπεια την αύξηση της διάβρωσης.

([http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL\\_GUIDES/METAL\\_KATASK/me4\\_2t](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/METAL_KATASK/me4_2t).)

### 2.2.6. Θερμοδυναμική της διάβρωσης

Τα περισσότερα μέταλλα δεν βρίσκονται στη φύση ως στοιχεία<sup>15</sup>, αλλά ως ενώσεις (ορυκτά / μεταλλεύματα), όπως οξείδια, θειούχες ενώσεις, ανθρακικά άλατα (ορυκτά / μεταλλεύματα), θειικά άλατα, πυριτικά άλατα κ.ά. Από την ορυκτή τους μορφή τα μεταλλεύματα μετατρέπονται σε μέταλλα με μεθόδους εξαγωγικής μεταλλουργίας.

Τα μέταλλα τείνουν να επιστρέφουν με το πέρασμα του χρόνου στην πρώιμη μορφή τους, τα οξείδια. Για ένα μέταλλο η μορφή του οξειδίου είναι συνήθως σταθερότερη, οπότε το μέταλλο έχει φυσιολογικά την τάση να δημιουργεί οξείδια μέσω ενός πολύπλοκου ηλεκτροχημικού μηχανισμού. Όλα τα μέταλλα μετατρέπονται από οξείδια σε μέταλλα μέσω αναγωγικών μεθόδων και δράσεων. Οι δράσεις αυτές απαιτούν ενέργεια, η οποία μετά την μετατροπή εγκλωβίζεται στα μέταλλα, τα οποία την αποβάλλουν σιγά σιγά, επιστρέφοντας τελικά στην αρχική τους μορφή. Η ταχύτητα με την οποία επιτυγχάνεται αυτή η διαδικασία εξαρτάται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και τον βαθμό υγρασίας. (Υφαντής, 1995)

Η μετατροπή αυτή επομένως, όπως προαναφέρθηκε, δεν είναι διαδικασία αυθόρμητη, αλλά απαιτεί δαπάνη ενέργειας. Μέρος της ενέργειας αυτής, με την μορφή εντροπίας ( $\Delta S$ ) και ελεύθερης ενέργειας Gibbs ( $\Delta G$ ), παραμένει στα μέταλλα που παρασκευάστηκαν και έτσι αποκτούν μεγαλύτερη ενθαλπία<sup>16</sup> ( $\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S$ ) – το ολικό ποσό θερμότητας που περιέχει ένα θερμοδυναμικό σύστημα – από την αντίστοιχη του αρχικού μεταλλεύματος. Αυτό έχει ως συνέπεια τα μέταλλα να έχουν την προδιάθεση, σύμφωνα με τον 2<sup>ο</sup> νόμο της θερμοδυναμικής, προς αυθόρμητη ενεργειακή υποβάθμιση, με σχηματισμό των αρχικών – ενεργειακά χαμηλής στάθμης – μορφών τους. Αυτό σημαίνει ότι η μεταλλική κατάσταση θεωρείται μετασταθής, δηλαδή τα μέταλλα έχουν την τάση ελευθερώνοντας ενέργεια να επιστρέφουν στην κατάσταση της σταθερής χημικής ένωσης από την οποία έχουν προέλθει (διάβρωση). (Κουλουμπή, Διάβρωση και Προστασία, 2010) (Scully, 1990) (Mattsson, 1989) (Μασαβέτας, 2005)

Θερμοδυναμικά η αυθόρμητη μετατροπή από μία μορφή σε μία άλλη προαπαιτεί την απελευθέρωση ενέργειας κατά την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης δράσης. Ταυτόσημα αυτό σημαίνει ότι αναφορικά με την μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας κατά Gibbs  $\Delta G$  ισχύει η σχέση:

$$\Delta G_{ολ} < 0$$

Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την διάβρωση είναι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, δηλαδή εμπεριέχουν μεταφορά φορτίου στην διεπιφάνεια μεταξύ ενός ηλεκτρονικού αγωγού (μέταλλο) και ενός ιοντικού αγωγού (στερεός ή υγρός ηλεκτρολύτης). Έχουν ως αποτέλεσμα την οξείδωση του μετάλλου (M) και την αναγωγή ενός οξειδωτικού (Ox) σύμφωνα με τις αντιδράσεις:

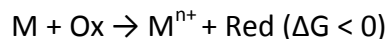


<sup>15</sup> Εξαιρέση αποτελούν ο χρυσός Au, το αυτοφυές κράμα Ag-Au (ήλεκτρο), ο υδράργυρος Hg, ο λευκόχρυσος Pt και ο χαλκός Cu σε πολύ μικρές ποσότητες

<sup>16</sup> Η ενθαλπία ισούται με το άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας ενός σώματος και του γινομένου της εξωτερικής πίεσης επί τον όγκο ( $H = U + p \cdot V$ ) (Μασαβέτας, 2005)



Συνολικά:



Η διάβρωση καλείται επομένως και οξείδωση των μετάλλων (οξειδοαναγωγή).

Γενικά, η διάβρωση των μετάλλων σε υγρό περιβάλλον είναι ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο και εκδηλώνεται με την εμφάνιση κελιών διάβρωσης, τα οποία δημιουργούνται είτε από επαφή διαφορετικών μεταλλικών επιφανειών, είτε από επαφή μεταξύ δύο τμημάτων της ίδιας επιφάνειας, τα οποία βρίσκονται σε ηλεκτρική ή ηλεκτρολυτική επαφή, αλλά το δυναμικό του καθενός απουσία σύνδεσης είναι διαφορετικό.

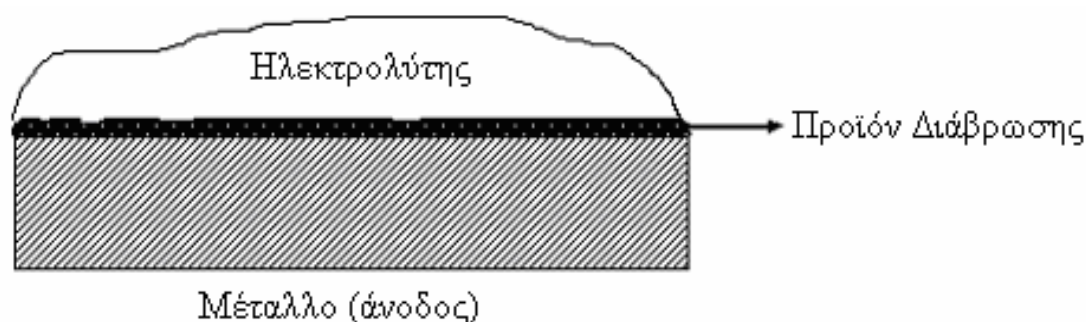
(Κουλουμπή, Διάβρωση και Προστασία, 2010) (Fontana, 1978)

### 2.2.7. Είδη διάβρωσης

Σε γενικές γραμμές με κριτήριο τη γεωμετρική κατανομή της διάβρωσης στην επιφάνεια ενός μετάλλου χωρίς μηχανική καταπόνηση διακρίνονται δύο τύποι διάβρωσης:

- Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση (uniform, general corrosion) αν η επιφάνεια του μετάλλου καλύπτεται από ομοιόμορφο στρώμα διάβρωσης, όπως στην αμαύρωση (tarnishing) ή αν η μεταλλική επιφάνεια διαλύεται ομοιόμορφα, δηλαδή αν έχει σταθερή ταχύτητα διάβρωσης σε όλη την επιφάνειά του, όπως για παράδειγμα κατά τη διάλυση μετάλλων σε οξέα
- Τοπική ή εντοπισμένη διάβρωση (localized corrosion) όταν η προσβολή είναι εντοπισμένη σε ορισμένες περιοχές της επιφάνειας, δηλαδή όταν υπάρχουν διαφορετικές ταχύτητες διάβρωσης στην επιφάνεια του μετάλλου

Στην εικόνα του ακόλουθου Σχήματος απεικονίζεται η ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση.



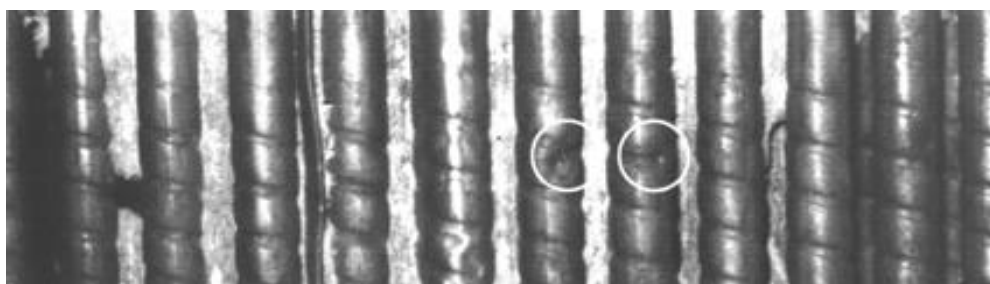
Σχήμα 4: Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση

Η σημαντικότερη μορφή διάβρωσης που εμφανίζεται σε επιφανειακά προστατευμένες μεταλλικές κατασκευές είναι η τοπική. Τοπική διάβρωση παρατηρείται για παράδειγμα σε θερμοσίφωνες ή σε θερμοδοχεία προστατευμένα με επισμάλτωση εξαιτίας διαφόρων ατελειών (πόρων) της προστατευτικής



επικάλυψης. Έχουν επίσης παρατηρηθεί τοπικές διαβρώσεις σε υπόγειες σωληνώσεις (αερίων, υγρών καυσίμων κ.ά.) εξαιτίας ελαττωμάτων της επένδυσης (ασφαλτούχα υλικά), οι οποίες εξαρτώνται από τη διαβρωτικότητα του εδάφους. Τοπικές διαβρώσεις έχουν συχνά διαπιστωθεί στις υδραυλικές εγκαταστάσεις οικιών, στις σωληνώσεις/συνδέσεις των ηλιακών θερμοσιφώνων, στα δίκτυα θερμού/ψυχρού βιομηχανικού νερού, καθώς και σε εξοπλισμό χημικών βιομηχανιών, όπως σε εναλλάκτες θερμότητας. Στην εικόνα του ακόλουθου Σχήματος φαίνεται η τοπική διάβρωση (οπή) σε εναλλάκτη θερμότητας κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα 304.

Σε αντίθεση με την ομοιόμορφη διάβρωση, στην τοπική διάβρωση δεν έχει σημασία η συνολική απώλεια μάζας του υλικού, αλλά παράμετροι όπως ο αριθμός οπών ανά μονάδα επιφάνειας, το βάθος και το σχήμα της οπής ή της ρωγμής.



Σχήμα 5: Σημειακή διάβρωση ανοξείδωτου χάλυβα 304

Η τοπική διάβρωση είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη για πολύ σημαντικά κατασκευαστικά υλικά, όπως το αλουμίνιο, ο σίδηρος ανοξείδωτος ή και μη, διότι μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή ή αχρήστευση μίας κατασκευής, όπως για παράδειγμα σε τρύπημα μίας σωλήνωσης ή μίας δεξαμενής. Η οικονομική ζημία που προκύπτει από τη διάβρωση στις περιπτώσεις αυτές είναι αξιοσημείωτη και αφορά στη δαπάνη αντικατάστασης του υλικού, στα έξοδα τοποθέτησης, σε απώλεια παραγωγικού χρόνου (αν η βλάβη λάβει χώρα σε παραγωγική μονάδα). Για τους λόγους αυτούς η προστασία από τη διάβρωση δεν πρέπει να θεωρείται πολυτέλεια. (Υφαντής, 1995)

#### 2.2.7.1. Ομοιόμορφη ή Γενική Διάβρωση (*Uniform or General Corrosion*)

Η ομοιόμορφη ή αλλιώς γενική διάβρωση αποτελεί το πιο κοινό είδος διάβρωσης. Χαρακτηρίζεται γενικά από χημική ή ηλεκτροχημική δράση που προχωράει ομοιόμορφα στο σύνολο ή στο μεγαλύτερο μέρος της εκτεθειμένης επιφάνειας, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ενός ομοιόμορφου και περίπου ισοπαχούς στρώματος προϊόντος διάβρωσης ή μίας περίπου ομοιόμορφης διάλυσης της επιφάνειας του μετάλλου.

Ομοιόμορφη διάβρωση εμφανίζεται συνήθως όταν το μέταλλο είναι σε επαφή με οξύ ή με άλλο διάλυμα, οπότε είτε με τη μία είτε με την άλλη μορφή προκαλεί λέπτυνση του μετάλλου που σε ορισμένες περιπτώσεις οδηγεί μέχρι την τελική καταστροφή του, όπως για παράδειγμα χάλυβας ή ψευδάργυρος σε αραιό διάλυμα  $H_2SO_4$ . Εμφανίζεται όμως και σε ξηρή ατμόσφαιρα (οξειδωση σε υψηλές θερμοκρασίες), οπότε το προϊόν της διάβρωσης μπορεί να είναι είτε προστατευτικό είτε όχι.

Από τεχνικής πλευράς το είδος αυτό της διάβρωσης είναι μάλλον από τα απλούστερα γιατί ο χρόνος ζωής των εγκαταστάσεων μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια με χρήση σχετικά απλών δοκιμών.

#### **2.2.7.2. Διάβρωση με βελονισμούς (Pitting Corrosion)**

Στη διάβρωση με βελονισμούς παρουσιάζεται εκλεκτική τοπική διάλυση της επιφάνειας του μετάλλου ή κράματος ή εκλεκτικός τοπικός σχηματισμός προϊόντος διάβρωσης, ακόμα και όταν το μέταλλο ή κράμα έχει καλυφθεί με προστατευτικό επίστρωμα (οξειδίο με ελεγχόμενες συνθήκες, χρώμα, επιμετάλλωση).

Ακόμα και αν η διάβρωση έχει σαν αρχικό στάδιο τον εκλεκτικό τοπικό σχηματισμό προϊόντος διάβρωσης, εξελίσσεται σε τοπική εκλεκτική διάλυση, δηλαδή τελικά σχηματίζονται εσοχές και κρατήρες.

Το είδος αυτό της διάβρωσης είναι ένα από τα πιο απατηλά και καταστρεπτικά είδη διάβρωσης επειδή προκαλεί καταστροφή των υλικών λόγω διάτρησης ακόμα και για πολύ μικρό εκατοστιαίο ποσοστό απώλειας βάρους της κατασκευής. Οι βελονισμοί είναι συχνά δύσκολο να διακριθούν είτε λόγω του μικρού τους μεγέθους, είτε γιατί κάποιες φορές καλύπτονται από προϊόντα διάβρωσης.

Επιπρόσθετα είναι δύσκολο να μετρηθεί ποσοτικά η έκταση του βελονισμού και να συγκριθεί με ανάλογες περιπτώσεις λόγω του μεταβαλλόμενου βάθους, καθώς και του αριθμού των βελονισμών που εμφανίζονται σε πανομοιότυπες συνθήκες. Επίσης, είναι δύσκολη η πρόβλεψη του φαινομένου με εργαστηριακές δοκιμές.

Συνήθως οι βελονισμοί εμφανίζονται πρώτα στις οριζόντιες επιφάνειες και πολύ λιγότερο στις κάθετες. Απαιτούν μεγάλο χρόνο επώασης (μήνες ή και χρόνια ανάλογα με το σύστημα μέταλλο – περιβάλλον) πριν γίνουν ορατοί. Όταν όμως τελικά ξεκινήσουν, αναπτύσσονται στην κατεύθυνση της βαρύτητας και διεισδύουν στο μέταλλο με μεγάλη ταχύτητα, υποσκάπτοντας το. Από πρακτική άποψη το περιβάλλον που κυριότερα δημιουργεί απώλειες από βελονισμούς είναι τα διαλύματα χλωριόντων.

#### **2.2.7.3. Διάβρωση σε σχισμές (Crevice Corrosion)**

Το φαινόμενο της διάβρωσης σε σχισμές είναι συχνά πολύ σοβαρό και εμφανίζεται όταν οι ανοδικές ή οι καθοδικές περιοχές βρίσκονται σε κάποια περιορισμένα τμήματα της μεταλλικής κατασκευής. Έτσι στην περίπτωση που γεωμετρικοί παράγοντες ελέγχουν την ευκολία κίνησης ενός ή περισσότερων από τα συστατικά του διαβρωτικού περιβάλλοντος, για παράδειγμα ύπαρξη μίας σχισμής ή μίας προφυλαγμένης περιοχής της μεταλλικής κατασκευής, μπορεί να προκληθεί συχνά έντονη εντοπισμένη διάβρωση εξαιτίας της εμφάνισης διαφορετικής συγκέντρωσης μέσα και έξω από αυτή.

Το είδος αυτό της διάβρωσης συνήθως συνδυάζεται με παρουσία μικρών όγκων στάσιμων διαλυμάτων ή στερεών σε οπές, κάτω από φλάντζες ή παρεμβύσματα (από ξύλο, πλαστικά, γυαλί, σκυρόδεμα, κερί, αμίαντο, υφάσματα κ.ά.). Εμφανίζεται επίσης σε συγκολλήσεις με υπέρθεση, επιφανειακές αποθέσεις (σκόνη, άμμος, προϊόντα διάβρωσης και άλλα στερεά), σε σχισμές κάτω από μπουλόνια και κάτω από επιφανειακά χρώματα που έχουν υποστεί μερική αποκόλληση.

Ο μηχανισμός διάβρωσης με βελονισμούς εμφανίζει πανομοιότητες με αυτόν της διάβρωσης σε σχισμές και για τον λόγο αυτό πολλοί ερευνητές θεωρούν την διάβρωση με βελονισμούς ειδική περίπτωση της διάβρωσης σε σχισμές. Αυτό είναι μερικώς ορθό γιατί όλα τα συστήματα που εμφανίζουν διάβρωση με βελονισμούς είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε διάβρωση σε σχισμές (για παράδειγμα ανοξείδωτοι χάλυβες σε θαλασσινό νερό ή σε  $FeCl_3$ ). Το αντίστροφο όμως δεν ισχύει πάντοτε, δηλαδή πολλά συστήματα που παρουσιάζουν διάβρωση σε σχισμές δεν υποφέρουν από διάβρωση με βελονισμούς. Έτσι οι βελονισμοί, παρά τις ομοιότητες με την διάβρωση σε σχισμές, θέλουν ιδιαίτερη αντιμετώπιση γιατί αποτελούν ένα αυτό-δημιουργούμενο τύπο διάβρωσης, δηλαδή δεν απαιτούν την ύπαρξη σχισμής, αλλά αντίθετα την δημιουργούν.

#### **2.2.7.4. Γαλβανική ή Διμεταλλική Διάβρωση (Galvanic or Two Metal Corrosion)**

Μεταξύ δύο σε επαφή ανόμοιων μετάλλων που βρίσκονται σε διαβρωτικό ή γενικά αγώγιμο περιβάλλον υφίσταται διαφορά δυναμικού που προκαλεί τη δημιουργία γαλβανικού στοιχείου και τη ροή ρεύματος στο σύστημά τους. Αυτό συνεπάγεται την αύξηση της ταχύτητας διάβρωσης του λιγότερο ανθεκτικού στη διάβρωση μετάλλου και την ελάττωση της ταχύτητας διάβρωσης του περισσότερο ανθεκτικού. Οι ταχύτητες αυτές συγκρίνονται με τις αντίστοιχες εάν δεν ήταν τα μέταλλα σε επαφή. Το λιγότερο ανθεκτικό υλικό γίνεται άνοδος και το περισσότερο ανθεκτικό κάθοδος. Αυτό το τελευταίο πρακτικά διαβρώνεται πολύ λίγο ή και καθόλου.

#### **2.2.7.5. Περικρυσταλλική Διάβρωση (Intergranular Corrosion)**

Κατά τη χύτευση των μετάλλων, η στερεοποίηση ξεκινά από τυχαία κατανεμημένες περιοχές με συνέπεια όταν δύο κόκκοι συναντώνται να δημιουργείται ένα ακανόνιστο (ασύμμετρο) περατωτικό όριο κόκκων, που κατέχει υψηλότερη κρυσταλλική ενέργεια από το υπόλοιπο σώμα και που συχνά διαβρώνεται κατά προτίμηση λόγω δημιουργίας γαλβανικού στοιχείου. Συγχρόνως όμως ο διαχωρισμός και η συγκέντρωση ακαθαρσιών ή στοιχείων κραματοποίησης στα όρια των κόκκων είναι ένα κοινό φαινόμενο στη μεταλλουργία. Αυτές οι κατακρημνίσεις λόγω διαφορετικής σύνθεσης από αυτήν του εσωτερικού των κόκκων έχουν διαφορετικό δυναμικό και οδηγούν στην εμφάνιση τοπικών γαλβανικών στοιχείων και στην επιταχυνόμενη τοπική διάβρωση στα όρια των κόκκων (περικρυσταλλική διάβρωση), που έχει επιβλαβείς επιδράσεις στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Αν μάλιστα το μέταλλο υφίσταται και μηχανική τάση μπορούν να προκληθούν περικρυσταλλικές ρηγματώσεις, ακόμα και αν το φορτίο είναι μακριά από το αντίστοιχο της αντοχής του σε εφελκυσμό.

Στην κατηγορία αυτή το πιο γνωστό φαινόμενο είναι η περικρυσταλλική διάβρωση στην περιοχή των συγκολλήσεων (weld decay) των ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων. Το φαινόμενο αποδεικνύει τη σημασία που παίζουν οι μεταλλουργικοί παράγοντες (στη συγκεκριμένη περίπτωση η θερμική κατεργασία) και η χημική σύσταση.

#### **2.2.7.6. Εκλεκτική Προσβολή (Selective attack or Selective Leaching or Dealloying)**

Μέσα στο ίδιο κομμάτι ενός ετερογενούς κράματος υπάρχουν διαφορετικές φάσεις, δηλαδή περιοχές διαφορετικής σύνθεσης και επομένως διαφορετικού ηλεκτροδιακού δυναμικού. Εκλεκτική διάβρωση είναι η απομάκρυνση ενός μόνο

στοιχείου από το στερεό κράμα. Εμφανίζεται μόνο σε κράματα όπου δύο ή περισσότερα μέταλλα δημιουργούν στερεό διάλυμα. Κατά τη διαβρωτική διαδικασία διαλύεται μόνο το λιγότερο ευγενές μέταλλο, ενώ το υπόλοιπο διατηρεί τη μεταλλική του μορφή αλλά με μεγάλη μείωση της μηχανικής του αντοχής. Η αντίσταση στη διάβρωση των κραμάτων εξαρτάται από την σύνθεσή τους και αυξάνει με αύξηση της συγκέντρωσης του ευγενέστερου συστατικού. Αν μάλιστα η συγκέντρωση του συστατικού αυτού ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή (parting limit), τότε η αντίσταση του κράματος στη διάβρωση γίνεται περίπου ίση με αυτήν του ευγενέστερου συστατικού στην καθαρή του μορφή.

Η πιο κοινή περίπτωση είναι η αποψευδαργύρωση (dezincification) ή εκλεκτική απομάκρυνση του ψευδαργύρου από τον ορείχαλκο. Ο κοινός (κίτρινος) ορείχαλκος περιέχει περίπου 30% ψευδάργυρο και 70% χαλκό. Η αποψευδαργύρωση παρατηρείται και με το μάτι αφού το κράμα αποκτά ένα κοκκινωπό ή χάλκινο χρώμα.

Η αποψευδαργύρωση εμφανίζεται είτε ως ομοιόμορφη σε στρώσεις, είτε ως εντοπισμένη. Γενικά, αφού υπάρχουν και εξαιρέσεις, η ομοιόμορφη αποψευδαργύρωση εμφανίζεται συνήθως σε ορείχαλκο με υψηλό περιεχόμενο σε Zn και απολύτως όξινα διαλύματα, ενώ η εντοπισμένη σε ορείχαλκο με χαμηλό περιεχόμενο σε Zn και σε ουδέτερα αλκαλικά ή ελαφρώς όξινα διαλύματα. Η αποψευδαργύρωση χωρίς να μεταβάλλει το πάχος του υλικού οδηγεί σε υλικό ασθενές, διαπερατό, πορώδες και εύθραυστο.

Η αύξηση της περιεκτικότητας του διαβρωτικού περιβάλλοντος σε χλωριόντα και διοξείδιο του άνθρακα, η υψηλή θερμοκρασία και η χαμηλή ταχύτητα του νερού μαζί με ρωγμές και αδρανείς αποθέσεις στο μέταλλο αυξάνουν την ευαισθησία του ορείχαλκου σε αυτό το είδος της διάβρωσης.

#### **2.2.7.7. Τύποι διάβρωσης που επηρεάζονται από μηχανικούς παράγοντες**

Στην πράξη υπάρχουν τύποι διάβρωσης που προκαλούνται από τη συνδυασμένη δράση χημικών και μηχανικών παραγόντων. Ανάλογα με τη φύση των μηχανικών δυνάμεων διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

- α. Μηχανική δράση ενός υγρού πάνω στο μέταλλο
  - Διάβρωση εκτριβής ή ρευστομηχανική διάβρωση
  - Σπηλαιώδης διάβρωση
- β. Μηχανική δράση ενός στερεού σώματος στο μέταλλο
  - Διάβρωση από τριβή
- γ. Μηχανικές δυνάμεις πάνω στο μέταλλο
  - Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση
  - Βλάβη από υδρογόνο
  - Διάβρωση κόπωσης

##### **2.2.7.7.1. Διάβρωση εκτριβής ή Ρευστομηχανική διάβρωση (Erosion Corrosion)**

Η διάβρωση εκτριβής ή ρευστομηχανική διάβρωση αφορά στην αύξηση της ταχύτητας φθοράς ή προσβολής ενός μετάλλου λόγω της σχετικής κίνησης μεταξύ του υγρού διαβρωτικού μέσου και της μεταλλικής επιφάνειας. Δηλαδή ουσιαστικά αναφέρεται είτε στην μηχανική δράση των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων στο

ρευστό το οποίο κινείται με μεγάλη ταχύτητα, είτε στην μηχανική δράση αυτού του ίδιου του ρευστού.

Αυτός ο τύπος διάβρωσης έχει σαν συνέπεια την εκδορά του μετάλλου ή την τοπική καταστροφή του επιφανειακού προστατευτικού στρώματος και την αύξηση της ταχύτητας διάβρωσης λόγω της δημιουργίας τοπικών γαλβανικών στοιχείων μεταξύ των περιοχών που έχουν υποστεί φθορά από εκτριβή και του υπόλοιπου μετάλλου. Τελικώς η επιφάνεια εμφανίζει αυλάκια, κυματισμούς και στρογγυλεμένες οπές.

Πολλά είδη διαβρωτικού περιβάλλοντος μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση εκτριβής, όπως για παράδειγμα υδατικά διαλύματα, αέρια, οργανικά συστήματα, υγρά μέταλλα.

#### 2.2.7.7.2. Σπηλαιώδης διάβρωση (Cavitation damage)

Η σπηλαιώδης διάβρωση αποτελεί ουσιαστικά ειδική περίπτωση της διάβρωσης εκτριβής. Οφείλεται στον σχηματισμό φυσαλίδων ατμού, μέσα σε ένα ρευστό που κινείται με μεγάλη ταχύτητα, οι οποίες σπάνε κοντά στη μεταλλική επιφάνεια προκαλώντας κύματα σύγκρουσης με αυτήν. Τα κύματα αυτά αντιστοιχούν σε τοπικές πιέσεις μέχρι και 4000 atm με συνέπεια την τοπική καταστροφή της επιφάνειας και την επιτάχυνση της διάβρωσης. Η επιτάχυνση προκαλείται από την σπογγώδη, ανώμαλη και γεμάτη βελονισμούς επιφάνεια που δημιουργείται, η οποία διευκολύνει τον σχηματισμό νέων φυσαλίδων και την επανάληψη του φαινομένου.

Για να σχηματιστούν φυσαλίδες πρέπει η τοπική στατική πίεση να γίνει μικρότερη από την τάση ατμών του υγρού. Για κάθε σύστημα δίνεται μία παράμετρος  $\sigma$ , που είναι ο αριθμός σπηλαίωσης και δείχνει το όριο κάτω από το οποίο θα συμβεί σπηλαίωση. Η παράμετρος  $\sigma$  δίνεται από την σχέση:

$$\sigma = \frac{P - P_v}{1/2 \cdot \rho \cdot u^2}$$

όπου,

P: η πίεση του μη διαταραχθέντος ρευστού

P<sub>v</sub>: η τάση ατμών του ρευστού

$\rho$ : η πυκνότητα

u: η ταχύτητα αναφοράς έξω από τη γειτονιά της διαταραγμένης περιοχής

Είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πίεση του ρευστού, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ταχύτητα που μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς εμφάνιση σπηλαίωσης.

Το είδος αυτό της διάβρωσης εμφανίζεται κυρίως σε υδραυλικές τουρμπίνες, προπέλες πλοίων, φτερωτές αντλιών και γενικά σε επιφάνειες όπου συνδυάζεται γρήγορη ροή υγρών και μεταβολές πίεσης. Επηρεάζεται ιδιαίτερα από το διεσπαρμένο και όχι τόσο από το διαλυμένο περιεχόμενο αέρα στο υγρό, γιατί αυτό διευκολύνει τον σχηματισμό φυσαλίδων και το φαινόμενο είναι πιο έντονο σε νερό με άλατα από ότι σε μαλακό νερό.

#### 2.2.7.7.3. Διάβρωση από τριβή (Fretting Corrosion)

Διάβρωση από τριβή ορίζεται η προσβολή που συμβαίνει στην διεπιφάνεια δύο σε επαφή επιφανειών, η μία εκ των οποίων ή και οι δύο είναι μεταλλικές, όταν υπό φορτίο υφίστανται ελαφριά σχετική ολίσθηση η μία προς την άλλη. Η ολίσθηση είναι συνήθως παλμική όπως αυτή που προκαλείται από δόνηση. Η σχετική κίνηση που είναι απαραίτητη για την πρόκληση διάβρωσης από τριβή είναι ιδιαίτερα μικρή, δηλαδή αρκεί μία μετατόπιση μικρότερη των 25 μm. Επομένως, οι ίδιες περιοχές της επιφάνειας μένουν σε επαφή και κατά συνέπεια τα τρίμματα από την τριβή δύσκολα απομακρύνονται από την περιοχή δημιουργώντας σαν τελική εικόνα των μετάλλων βελονισμούς ή αυλακώσεις που περιβάλλονται από προϊόντα διάβρωσης. Εξαιτίας των προϊόντων αυτών μπορεί να εμφανιστεί βούλωμα, σχεδόν κόλλημα των μεταλλικών στοιχείων, ελάττωση των αντοχών ή χαλάρωση των συνδυασμένων μεταλλικών στοιχείων που μπορεί να αυξήσει την κόπωση από τριβή.

Συνηθισμένες περιπτώσεις εμφάνισης αυτού του είδους διάβρωσης είναι σε στοιχεία μηχανών, σε πλάκες με μπουλόνια, στις σιδηροτροχιές των σιδηροδρόμων, στην διεπιφάνεια μεταξύ του εσωτερικού δακτυλίου ενός ρουλεμάν εφαρμοσμένου με πρεσάρισμα σε έναν άξονα και του άξονα, σε προσαρμογές με στένωση ή με πρεσάρισμα, σε γρανάζια με σφήνα, σε ηλεκτρικές επαφές κ.ά.

#### 2.2.7.7.4. Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (Stress corrosion cracking)

Είναι γενικά αποδεκτό ότι η αντίσταση σε εφελκυσμό είναι μία ιδιότητα του υλικού. Στην πράξη όμως παρατηρείται ότι είναι δυνατόν να μεταβληθεί σημαντικά η συμπεριφορά θραύσης ανάλογα με το περιβάλλον. Αν δηλαδή στην επιφάνεια τμήματος μηχανής ή εγκατάστασης που βρίσκεται μέσα σε διαβρωτικό περιβάλλον δημιουργηθεί εσοχή από διάβρωση με βελονισμούς ή από μηχανική κάκωση είναι δυνατόν να επέλθει ψαθυρή θραύση ολόκληρου του τμήματος, αν αυτό καταπονείται εφελκυστικά με φορτίο έστω και μικρότερο από το 10% του ορίου θραύσης του τμήματος αυτού. Η συνδυασμένη δράση μίας τοπικής διαβρωτικής προσβολής και εσωτερικών ή εξωτερικών εφελκυστικών τάσεων αποτελεί τη διάβρωση με μηχανική καταπόνηση.

Τα αποτελέσματα της διάβρωσης αυτής είναι πολύ σοβαρά και επικίνδυνα, γιατί ενώ το μέταλλο είναι σχεδόν απρόσβλητο στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειάς του, λεπτές ρωγμές προχωρούν στο εσωτερικό του, με αποτέλεσμα να προκαλούνται συχνά εκρήξεις λεβήτων από καυστική ευθραυστοποίηση, κατάρρευση κατασκευών λόγω θραύσης συνδέσμων ή σιδηροπλισμού, αποκοπή τμημάτων αεροσκαφών ή πλοίων κ.ά. Η ρωγμή που προκαλεί τη θραύση προωθείται συνήθως κάθετα στη διεύθυνση της μηχανικής τάσης, ακολουθώντας περικρυσταλλικό ή ενδοκρυσταλλικό (ευθύ ή διακλαδιζόμενο) δρόμο. Το ποιο δρόμο θα ακολουθήσει η ρωγμή εξαρτάται από το κράμα και/ή από το διαβρωτικό περιβάλλον, τη θερμοκρασία, την εν θερμώ ή εν ψυχρώ κατεργασία του κράματος (δευτερεύουσα δομή), τον τρόπο διάταξης των αταξιών και το μέγεθος των

κρυστάλλων. Σε πολλά συστήματα δεν ακολουθείται αποκλειστικά ένας δρόμος, αλλά ένας υπερέχει.

#### 2.2.7.7.5. Βλάβη από υδρογόνο (Hydrogen damage)

Στην κατηγορία της διάβρωσης που επηρεάζεται από μηχανικούς παράγοντες περιλαμβάνεται η βλάβη από υδρογόνο, δηλαδή η ρηγμάτωση ενός υλικού η οποία προκαλείται από την ρόφηση υδρογόνου από το μέταλλο χωρίς να υπάρχει δράση διάβρωσης στα σημεία της επιφάνειας που εκλύεται το υδρογόνο. Σε αντίθεση με την κανονική διάβρωση όπου η αποσάθρωση συμβαίνει στην άνοδο, στη βλάβη από υδρογόνο η αποσάθρωση πραγματοποιείται στην κάθοδο όπου εκλύεται το υδρογόνο. Είναι ένα φαινόμενο που συναντάται συχνά σε διυλιστήρια πετρελαίου.

Διακρίνεται σε ευθραυστοποίηση από υδρογόνο (hydrogen embrittlement) και σε δημιουργία φλυκταινών από υδρογόνο (hydrogen blistering). Η ευθραυστοποίηση από υδρογόνο προκαλείται από διείσδυση ατομικού υδρογόνου μέσα στο μέταλλο, το οποίο είτε ροφάται στις διαταραχές ελαττώνοντας τη δυνατότητα πλαστικής παραμόρφωσης, είτε σχηματίζει εύθραυστα υδρίδια.

Γενικά προτείνονται διάφοροι μηχανισμοί όχι απόλυτα σαφείς. Εάν ένα μέταλλο που ευθραυστοποιείται από υδρογόνο υφίσταται εφελκυστικές τάσεις πάνω από μία κρίσιμη τιμή τελικά θα υποστεί θραύση από υδρογόνο. Η κρίσιμη τιμή είναι τόσο μικρότερη όσο μεγαλύτερο είναι το περιεχόμενο σε υδρογόνο. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι εφελκυστικές τάσεις εξασκούνται από το ίδιο το υδρογόνο και η θραύση επέρχεται ανεξάρτητα από την ύπαρξη εξωτερικού φορτίου.

Εάν το μέταλλο ή το κράμα έχει κοιλότητες ή κενά, τότε ορισμένα άτομα υδρογόνου μπορούν να διαχυθούν μέσα στις ατέλειες αυτές του μετάλλου και να δημιουργήσουν μοριακό υδρογόνο. Επειδή το μοριακό υδρογόνο δεν μπορεί να διαχυθεί, αυξάνεται η συγκέντρωση και η πίεσή του μέσα στις κοιλότητες, προκαλώντας τη δημιουργία φλυκταινών από υδρογόνο και τελικά θραύση.

Το ατομικό υδρογόνο μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές όπως για παράδειγμα από μία διαδικασία διάβρωσης του ίδιου του μετάλλου ή ενός άλλου μετάλλου σε επαφή με το πρώτο, από διαδικασίες όπως οι επιμεταλλώσεις, οι καθαρισμοί με οξέα, οι συγκολλήσεις, η εφαρμογή καθοδικής προστασίας ή καθοδικού καθαρισμού κ.ά.

#### 2.2.7.7.6. Διάβρωση κόπωσης (Corrosion fatigue)

Η διάβρωση κόπωσης προκαλείται από τη συνδυασμένη δράση διαβρωτικής προσβολής και κυκλικών τάσεων, δηλαδή γρήγορα εναλλασσόμενων εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων.

Σε αντίθεση με την καθαρά μηχανική κόπωση που εντοπίζεται σε μη διαβρωτικό περιβάλλον μόνο πάνω από μία ορισμένη κρίσιμη τιμή κυκλικής τάσης που καλείται

όριο κόπωσης, η διάβρωση κόπωσης μπορεί να συμβεί σε πολύ χαμηλές τάσεις, μικρότερες του ορίου κόπωσης.

Η φθορά του υλικού είναι σχεδόν πάντοτε μεγαλύτερη από το άθροισμα της φθοράς από διάβρωση και της φθοράς από κόπωση αν δράσουν χωριστά.

Η διάβρωση κόπωσης είναι λιγότερο εξειδικευμένη ως προς τον συνδυασμό μέταλλο – περιβάλλον συγκριτικά με τη διάβρωση με μηχανική καταπόνηση. Εμφανίζεται στους χάλυβες σε πόσιμο νερό, θαλασσινό νερό, συμπυκνώματα προϊόντων καύσης, σε γενικά χημικά περιβάλλοντα και ειδικότερα στη βιομηχανία πετρελαίου κ.ά. Πιστεύεται δε ότι είναι τόσο πιο σημαντική όσο η γενική διάβρωση του συγκεκριμένου μετάλλου μέσα στο συγκεκριμένο διαβρωτικό περιβάλλον είναι μεγαλύτερη. Σε αντίθεση με τη διάβρωση με μηχανική καταπόνηση, στη διάβρωση κόπωσης οι βελονισμοί δεν αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση ύπαρξής της. Επηρεάζεται επίσης από τη θερμοκρασία, την περιεκτικότητα σε οξυγόνο και το pH.

Ο σίδηρος, ο χάλυβας, ο ανοξείδωτος χάλυβας και ο μπρούντζος αλουμινίου μέσα σε νερό παρουσιάζουν καλή αντίσταση στη διάβρωση κόπωσης, σε θαλασσινό νερό όμως όλοι οι χάλυβες έχουν χαμηλότερη αντοχή. Συγκεκριμένα, οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες κρατούν το (70-80)% της κανονικής τους αντίστασης κόπωσης, ενώ τα υψηλού περιεχομένου σε χρώμιο κράματα κρατούν το (30-40)%. Γενικά οι μέσης κραματοποίησης χάλυβες έχουν ελάχιστα μόνο ψηλότερη αντοχή σε διάβρωση κόπωσης από τους κοινούς χάλυβες.

#### **2.2.7.8. Θερμογαλβανική διάβρωση (Thermogalvanic corrosion)**

Θερμογαλβανική διάβρωση είναι η διάβρωση που προκαλείται από την εμφάνιση διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ δύο τμημάτων της ίδιας κατασκευής. Οι διαφορές προκαλούνται συνήθως από ανομοιόμορφη θέρμανση ή διασκορπισμό της θερμότητας ή απευθείας σύνδεση θαμμένων σωλήνων θερμού και ψυχρού νερού του συστήματος οικιακής ύδρευσης.

Λόγω των διαφορών αυτών προκαλείται όπως και στη γαλβανική διάβρωση, διαφορετική πόλωση του μετάλλου, οπότε δημιουργούνται ανοδικές και καθοδικές περιοχές που οδηγούν σε τοπική προσβολή.

#### **2.2.7.9. Βιολογική ή Μικροβιολογική διάβρωση (Biological or Microbiological Corrosion)**

Ως βιολογική ή μικροβιολογική διάβρωση ορίζεται η διάβρωση που ξεκινά ή επιταχύνεται από την παρουσία μικροοργανισμών (βακτηρίδια) ή μακροοργανισμών (πεταλίδες, φύκια κ.ά.). Ποικιλίες των οργανισμών αυτών αναπτύσσονται στο νερό (φυσικό, υφάλμυρο, θαλασσινό), στο έδαφος, στα φυσικά προϊόντα πετρελαίου και στα διαλύματα πλύσης μεταλλευμάτων. Έχουν παρατηρηθεί σοβαρές ζημιές από τα βακτηρίδια αυτά ειδικά σε προστατευτικά περιβλήματα στις γεωτρήσεις πετρελαίου, σε υπόγειες σωληνώσεις, σε υδρόψυκτους κυλίνδρους εξέλασης, σε σωλήνες από βαθιές γεωτρήσεις νερού, καθώς και σε συστήματα ζεστού νερού όπου η θερμοκρασία σε στάσιμα τμήματα έχει την ικανότητα να προάγει την ανάπτυξη τέτοιων οργανισμών.



Τα βακτηρίδια είναι μονοκύτταροι οργανισμοί που σχηματίζουν αποικίες, αφομοιώνουν θρεπτικές ουσίες από το περιβάλλον τους μέσω χημικών αντιδράσεων και αποβάλλουν τα παραπροϊόντα των δράσεων αυτών. Αυτό προκαλεί τοπικές μεταβολές στο σύστημα και επηρεάζει τη διάβρωση είτε με απευθείας επίδραση στις ανοδικές και καθοδικές δράσεις (μεταβολή της ταχύτητας διάβρωσης), είτε με προσβολή των προστατευτικών επιστρωμάτων ή/και των αναστολέων, είτε με παραγωγή διαβρωτικών ουσιών, είτε με παραγωγή αποθέσεων με την μορφή σωρών και εξογκωμάτων.

#### **2.2.7.10. Διάβρωση από ρεύματα διαφυγής (Stray Current Corrosion)**

Ρεύματα διαφυγής ονομάζονται τα συνεχή ρεύματα που ακολουθούν δρόμο διαφορετικό από τον προβλεπόμενο. Τα ρεύματα διαφυγής μέσα στο έδαφος προέρχονται συχνά από διάφορες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, όπως είναι για παράδειγμα οι σιδηρόδρομοι, οι διατάξεις συγκολλήσεων, οι εγκαταστάσεις επιμεταλλώσεων, ηλεκτρικά συστήματα γείωσης, καθώς και συστήματα καθοδικής προστασίας ή και από διεργασίες εξόρυξης. Στην περίπτωση ενός θαμμένου σωλήνα νερού τα ρεύματα αυτά στο σημείο εισόδου τους στον σωλήνα τον προστατεύουν καθοδικά, ενώ στο σημείο εξόδου τους από τον σωλήνα προκαλούν γρήγορη ανοδική διάλυση.

Μπορεί να διαπιστωθεί σχετικά εύκολα αν υπάρχουν προβλήματα από ρεύματα διαφυγής σε μία εγκατάσταση με μετρήσεις του δυναμικού της κατασκευής γιατί τα ρεύματα αυτά υφίστανται διακύμανση ανάλογα με τη μεταβολή του φορτίου της πηγής, ενώ τα γαλβανικά ρεύματα ή τα ρεύματα καθοδικής προστασίας είναι σχετικά σταθερά. Επομένως με εικοσιτετράωρη καταγραφή του δυναμικού ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς μπορούν αν ανιχνευθούν τα ρεύματα διαφυγής και να διαπιστωθεί και η πηγή προέλευσής τους.

(Κουλουμπή & Μοροπούλου, Φθορά και Προστασία Υλικών, 2010)

## **2.3. Διάβρωση σκυροδέματος και οπλισμού στο οπλισμένο σκυρόδεμα**

### **2.3.1. Φθορά - Διάβρωση του σκυροδέματος**

Οι κατασκευές από σκυρόδεμα και οπλισμένο σκυρόδεμα είναι γενικά ανθεκτικές στην φθορά. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου έχουν παρατηρηθεί σημαντικές φθορές, οι οποίες οφείλονται στην επίδραση του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Η δράση του διαβρωτικού περιβάλλοντος μπορεί να προκαλέσει διάβρωση του σκυροδέματος ή του οπλισμού. Τα δύο αυτά είδη διάβρωσης δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, το ένα αργά ή γρήγορα προκαλεί την εμφάνιση και του άλλου. Για παράδειγμα ένα σκυρόδεμα που έχει υποστεί ενανθράκωση, έχει πλέον χαμηλό pH, το οποίο όμως ευνοεί την διάβρωση και του οπλισμού.

Η διάβρωση του σκυροδέματος είναι ένα σύνθετο φαινόμενο, η εμφάνιση της οποίας οφείλεται συνήθως σε περισσότερα του ενός αίτια. Το διαβρωτικό

περιβάλλον μπορεί να είναι αέριο (ατμόσφαιρα), υγρό (μαλακό νερό), στερεό (έδαφος), όξινο ή αλκαλικό ή να περιέχει διάφορα άλατα. Τα ιόντα που μπορούν να οδηγήσουν σε διάβρωση του σκυροδέματος είναι τα εξής:  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $H^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $OH^-$  και  $HCO_3^-$ .

### 2.3.1.1. Είδη διάβρωσης σκυροδέματος

Στη γενικότερη περίπτωση η διάβρωση του σκυροδέματος μπορεί να είναι:

- Φυσική  
Με τον όρο φυσική διάβρωση εννοούνται οι φθορές από καθαρά μηχανικούς λόγους (τριβή, ψύχος).
- Χημική  
Η χημική διάβρωση σχετίζεται με φαινόμενα χημικά ή φυσικοχημικά, χωρίς να αποκλείεται η συνέργεια μηχανικών αιτιών.

Η χημική διάβρωση μπορεί να διακριθεί σε τρία είδη:

- α. Διάβρωση λόγω εκχύλισης ιόντων από το σκυρόδεμα στο υγρό περιβάλλον. Τέτοιου είδους διάβρωση προκαλούν τα μαλακά νερά που διαλύουν το υδροξείδιο του ασβεστίου.
- β. Διάβρωση λόγω ανταλλαγής ιόντων μεταξύ διαβρωτικού περιβάλλοντος και σκυροδέματος. Παράδειγμα αποτελεί η επίδραση του χλωριούχου μαγνησίου στο σκυρόδεμα:  $Ca(OH)_2 + MgCl_2 \rightarrow CaCl_2 + Mg(OH)_2$   
Με αυτόν τον τρόπο χάνονται οι υδραυλικές ιδιότητες του σκυροδέματος και η αντοχή του σε θλίψη μειώνεται με την πρόοδο της ανωτέρω αντίδρασης.
- γ. Διάβρωση μέσω σχηματισμού μεγαλομοριακών ενώσεων. Στο πρώτο στάδιο αυτού του είδους της διάβρωσης σχηματίζονται νέες κρυσταλλικές ενώσεις στους πόρους του σκυροδέματος, χωρίς το σκυρόδεμα να έχει υποστεί σημαντική βλάβη. Εν συνεχεία όμως δημιουργούνται μεγαλομοριακοί κρύσταλλοι καινούργιων ενώσεων, που δημιουργούν ρωγμές στο σκυρόδεμα. Παράδειγμα αυτού του είδους της διάβρωσης είναι η επίδραση των θεικών ιόντων στο σκυρόδεμα. Αρχικά σχηματίζεται γύψος και ύστερα ο μεγαλομοριακός εντριγκίτης.

Στην πράξη είναι δυνατόν να παρατηρηθεί συνδυασμός και των τριών αυτών ειδών της διάβρωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η επίδραση του θεικού μαγνησίου στο σκυρόδεμα. Τα ιόντα  $Mg^{2+}$  προκαλούν διάβρωση λόγω ανταλλαγής ιόντων μεταξύ διαβρωτικού περιβάλλοντος και σκυροδέματος, ενώ τα ιόντα  $SO_4^{2-}$  προκαλούν διάβρωση μέσω σχηματισμού μεγαλομοριακών ενώσεων.

Εκτός των ιόντων μαγνησίου και των θεικών, τα ιόντα του αμμωνίου, καθώς και τα νιτρικά έχουν διαβρωτική δράση. Παρόμοια είναι η επίδραση των νιτρικών αλάτων που μετατρέπουν το υδροξείδιο του ασβεστίου σε νιτρικό ασβέστιο.

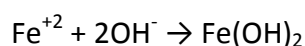
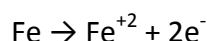
Διαλύματα όξινα με pH μικρότερο του 4 ( $pH < 4$ ) προσβάλλουν το υδροξείδιο του ασβεστίου. Διαλύματα ισχυρών βάσεων με περιεκτικότητα μέχρι 10% δεν έχουν διαβρωτική επίδραση, με περιεκτικότητα μέχρι 20% έχουν μικρή σχετικά επίδραση, ενώ με περιεκτικότητα πάνω από 20% η επίδρασή τους είναι σημαντική. Μάλιστα

όσο αυξάνει η περιεκτικότητα σε βάση, τόσο παρουσιάζεται ο κίνδυνος να προσβληθεί όχι μόνο το τσιμέντο, αλλά και τα αδρανή. Το είδος αυτό της διάβρωσης είναι το πλέον επικίνδυνο. Σε περίπτωση όπου το σκυρόδεμα έρχεται σε επαφή με διαλύματα διαλυμένων αλάτων ή με βάσεις, τότε υπάρχει ο κίνδυνος διάβρωσης του σκυροδέματος από τα διαλυτά συστατικά που κρυσταλλώνονται στους πόρους του, όταν εξατμίζεται το νερό. (Μοροπούλου & Μπατής, 2012)

### 2.3.2. Διάβρωση οπλισμού στο οπλισμένο σκυρόδεμα - Περιγραφή φαινομένου

Το κύριο πρόβλημα που μειώνει την ανθεκτικότητα του οπλισμένου σκυροδέματος είναι η διάβρωση του σιδηρού οπλισμού του. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των μετάλλων είναι πολλοί γι' αυτό και το φαινόμενο της διάβρωσης είναι πολύπλοκο και συχνά μη προβλέψιμο. Η διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα είναι μία ηλεκτροχημική δράση, η οποία λαμβάνει χώρα κάτω από ορισμένες συνθήκες. Η ηλεκτροχημική δράση απαιτεί την ύπαρξη ανόδου, καθόδου και ηλεκτρολύτη μέσω του οποίου διακινούνται τα ιόντα. Η διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών δράσεων πραγματοποιείται στην διεπιφάνεια μετάλλου-ηλεκτρολύτη και η μετακίνηση των ιόντων γίνεται μέσω του ηλεκτρολύτη. Το φαινόμενο της διάβρωσης του οπλισμού στο οπλισμένο σκυρόδεμα οφείλεται στην μικροσκοπική και μακροσκοπική ανομοιογένεια της επιφάνειας του χάλυβα σε συνδυασμό με το υγρό των πόρων του σκυροδέματος. (Τάσιος & Αλιγιζάκη, 1993) (Μπατής, Χρήση νέων υλικών για την αύξηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών)

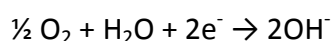
Η ανοδική και η καθοδική (ηλεκτροχημική) δράση πραγματοποιούνται ταυτόχρονα σε διαφορετικές περιοχές του χάλυβα, ενώ ένας αριθμός ηλεκτρονίων μετακινείται μέσα στον χάλυβα. Η ανοδική δράση στην περίπτωση της διάβρωσης του οπλισμού είναι η ανοδική διάλυση του σιδήρου. Η δράση αυτή είναι μία οξειδωτική αντίδραση με απόδοση ηλεκτρονίων κατά την αντίδραση:



Ως άνοδος συμπεριφέρεται το τμήμα του χάλυβα όπου έχει καταστραφεί το προστατευτικό στρώμα οξειδίων. Σε αυτήν την περιοχή, τα άτομα σιδήρου μετατρέπονται σε ιόντα, ενώ ελευθερώνονται ηλεκτρόνια. Το σχηματιζόμενο  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  είναι αδιάλυτο και σχηματίζει μικρής συνάφειας, πορώδες και ογκώδες στρώμα (σκουριά) επάνω στην επιφάνεια του χάλυβα.

Η τάση προς οξείδωση είναι αυξανόμενη στους χάλυβες κατά τη σειρά: S220, S400, S500s. Η ταχύτητα της δράσης αυτής είναι πολύ μικρή στην περίπτωση δημιουργίας παθητικού στρώματος. Όταν όμως το pH πέσει κάτω από το 9, τότε η ταχύτητα της δράσης αυξάνει σημαντικά. Το ίδιο θα συμβεί και όταν το παθητικό στρώμα καταστραφεί από ικανό αριθμό χλωριόντων.

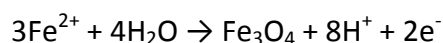
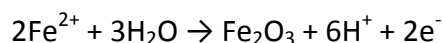
Η καθοδική δράση είναι συνυφασμένη με την πρόσληψη ηλεκτρονίων σύμφωνα με την αναγωγική αντίδραση:



Ως κάθοδος συμπεριφέρεται εκείνη η περιοχή του χάλυβα, όπου υπάρχει νερό και οξυγόνο, χωρίς να είναι απαραίτητο να έχει καταστραφεί το λεπτό στρώμα των οξειδίων.

Ο ρυθμός της παραπάνω δράσης καθορίζεται από τον ρυθμό διάχυσης του οξυγόνου. Το διαλυμένο στο νερό οξυγόνο φθάνει στην καθοδική περιοχή μέσω των τριχοειδών πόρων και των ρωγμών του σκυροδέματος και οδηγεί στην διάβρωση του σιδηροπλισμού, όταν η τιμή του pH βρίσκεται μεταξύ 4 και 10. Το σχηματιζόμενο στρώμα του  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  δεν προσφέρει καμία προστασία στον οπλισμό, καθώς είναι πορώδες και ελάχιστα συμπαγές, με αποτέλεσμα η διάβρωση να προχωρά μέχρι την ολοσχερή μετατροπή του σιδήρου σε υδροξείδιο. Απαραίτητη προϋπόθεση για την συνέχιση της δράσης αυτής είναι η παρουσία οξυγόνου.

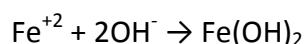
Όταν η τιμή του pH είναι μεγαλύτερη από 10 οι δράσεις που πραγματοποιούνται στην ανοδική περιοχή είναι οι ακόλουθες:



Σύμφωνα με τις παραπάνω αντιδράσεις είναι δυνατόν να συμβεί οξείδωση, δηλαδή διάβρωση, ακόμα και όταν η τιμή του pH είναι μεγαλύτερη από 10. Η διαφορά όμως είναι ότι τα προϊόντα των αντιδράσεων αυτών ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) σχηματίζουν ένα συμπαγές και αδιαπέραστο στρώμα που παθητικοποιεί τον οπλισμό και τον απομονώνει από το διαβρωτικό περιβάλλον.

(<http://ikaros.teipir.gr/phyche/Subjects/Routoulas/Petyl/%D0%C5%D4%D5%CB%20%CA%C5%D63%C1.pdf>)

Συνοψίζοντας τα μεταλλοίοντα από την ανοδική αντίδραση και τα υδροξυλιόντα από την καθοδική αντίδραση μετακινούνται μέσα στον ηλεκτρολύτη και τελικά αντιδρούν προς σχηματισμό στερεών προϊόντων οξείδωσης:



Το σχηματιζόμενο υδροξείδιο του δισθενούς σιδήρου παρουσία οξυγόνου μετατρέπεται σε υδροξείδιο του τρισθενούς σιδήρου  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Ανάλογα με το είδος του ηλεκτρολύτη ο σχηματισμός του υδροξειδίου του σιδήρου πραγματοποιείται στην επιφάνεια του χάλυβα ή σε μεγαλύτερη απόσταση από αυτόν. Η σκουριά εναποτίθεται στη ράβδο στις περιοχές των καθόδων και επειδή είναι διαπερατή τόσο από το νερό όσο και από τα αέρια, η διαδικασία οξείδωσης συνεχίζεται. Νέα προϊόντα σκουριάς παράγονται με περαιτέρω αντιδράσεις με το διαλυμένο οξυγόνο. Ο όγκος των παραγόμενων προϊόντων σκουριάς διαρκώς αυξάνει και οι συνοδευτικές αυξανόμενες εσωτερικές τάσεις προκαλούν ρηγματώσεις, αποτινάξεις και αποκολλήσεις ολόκληρων κομματιών σκυροδέματος. Οι διαδικασίες αυτές μπορούν να επιταχυνθούν από την παρουσία χλωριούχων αλάτων. (Παπαδόπουλος, 2007)

Στη γενική περίπτωση το σκυρόδεμα αποτελεί ένα προστατευτικό περιβάλλον για τον σιδηροπλισμό για δύο λόγους:

- Το υδατικό διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος είναι έντονα αλκαλικό λόγω της υδρασβέστου  $\text{Ca(OH)}_2$ , που αποτελεί προϊόν της αντίδρασης ενυδάτωσης (σκλήρυνσης) του τσιμέντου, με pH μεταξύ 12,5 και 13,9. Κάτω από αυτές τις συνθήκες ο χάλυβας καλύπτεται επιφανειακά από ένα παθητικό στρώμα οξειδίων σιδήρου, το οποίο παρεμποδίζει την διάβρωσή του.
- Το σκυρόδεμα αποτελεί ένα φυσικό εμπόδιο στην επαφή του οπλισμού με τα διάφορα διαβρωτικά συστατικά του περιβάλλοντος, καθώς και άλλων ουσιών που οδηγούν σε διάβρωση, όπως είναι τα χλωριόντα  $\text{Cl}^-$ .

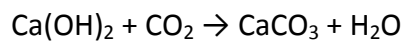
Με την πάροδο του χρόνου το σκυρόδεμα μπορεί να χάσει την προστατευτική του ικανότητα εξαιτίας της διείδυσης χλωριόντων ή άλλων παραγόντων που οδηγούν σε ενανθράκωση.

Οι κυριότεροι μηχανισμοί που απαξιώνουν το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι οι εξής:

- Ενανθράκωση
- Προσβολή χλωριούχων αλάτων
- Σχηματισμός μακροστοιχείων

### **2.3.2.1. Ενανθράκωση**

Η ενανθράκωση είναι μία χημική αντίδραση του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας με το υδροξείδιο του ασβεστίου, το οποίο παράγεται κατά την ενυδάτωση στο σκυρόδεμα, προς σχηματισμό ανθρακικού ασβεστίου. Το φαινόμενο, επομένως, της ενανθράκωσης οφείλει την ονομασία του στο ανθρακικό ασβέστιο που δημιουργείται. Η εν λόγω αντίδραση περιγράφεται ως εξής:



#### **2.3.2.1.1. Περιγραφή φαινομένου ενανθράκωσης**

Κατά την πήξη του τσιμέντου παράγεται υδροξείδιο του ασβεστίου  $\text{Ca(OH)}_2$ . Το υδροξείδιο του ασβεστίου αυτό πλεονάζει στο σκυρόδεμα. Μπορεί να θεωρηθεί ότι το 25% περίπου του βάρους του τσιμέντου μετά την κρυστάλλωση βρίσκεται υπό μορφή υδροξειδίου του ασβεστίου. Αποτέλεσμα αυτού του πλεονάσματος, καθώς και της ύπαρξης και άλλων υδροξειδίων σε μικρότερες ποσότητες, είναι η εξασφάλιση ενός προστατευτικού, έντονα αλκαλικού περιβάλλοντος για τους σιδηροοπλισμούς στο σκυρόδεμα με  $\text{pH} \geq 12,5$ . Σε αυτό το περιβάλλον ένα λεπτό φιλμ οξειδίων και υπεροξειδίων προστατεύει τον οπλισμό από τη διάβρωση. Το φιλμ αυτό δεν σταματά τη διάβρωση, αλλά περιορίζει σημαντικά τον ρυθμό εξέλιξής της.

Αντιδράσεις όμως με διεισδύουσες όξινες ουσίες μειώνουν διαρκώς την τιμή του pH του σκυροδέματος. Ειδικότερα μέγιστη σημασία πρέπει να δοθεί στην επίδραση του διοξειδίου του άνθρακα  $\text{CO}_2$ . Το διοξείδιο του άνθρακα αφομοιώνεται τριχοειδώς από την επιφάνεια του σκυροδέματος, διαλυμένο στο νερό της βροχής, συχνά μαζί και με διοξείδιο του θείου  $\text{SO}_2$  σε βιομηχανικές και μολυσμένες περιοχές. Το αποτέλεσμα της απορρόφησης του διοξειδίου του άνθρακα είναι η σταδιακή εξουδετέρωση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος. Το pH μειώνεται, σε πλήρως

δε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα παίρνει περίπου την τιμή 8,3. (Τάσιος & Αλιγιζάκη, 1993)

#### 2.3.2.1.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την ενανθράκωση

Για την πραγματοποίηση της αντίδρασης ενανθράκωσης απαιτούνται μικρές ποσότητες νερού. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενανθράκωσης παρατηρείται σε αέρα με σχετική υγρασία (60–70)%. Το ξηρό σκυρόδεμα δε θα ενανθρακωθεί λόγω απουσίας της απαιτούμενης υγρασίας, ενώ σε κορεσμένο με νερό σκυρόδεμα εμποδίζεται η διάχυση του αερίου διοξειδίου του άνθρακα στους πόρους του σκυροδέματος. (Τάσιος & Αλιγιζάκη, 1993)

Η ύπαρξη πόρων και φωλιών στο σκυρόδεμα, πιθανές κακοτεχνίες, καθώς και ανομοιογενής κακή δόνηση επιταχύνουν σημαντικά το φαινόμενο της ενανθράκωσης. Όταν έχει χρησιμοποιηθεί μικρό πάχος επικάλυψης των οπλισμών ή κακή ποιότητα σκυροδέματος επικάλυψης, τότε το μέτωπο ενανθράκωσης φτάνει στους οπλισμούς πιο γρήγορα.

Αξιοσημείωτο μάλιστα είναι ότι η ενανθράκωση μπορεί να μείνει απαρατήρητη για πολλά χρόνια και μόνο όταν οξειδωθεί ο οπλισμός θα παρατηρηθούν αρχικά τριχοειδείς ρωγμές στο σκυρόδεμα, λόγω της αύξησης του όγκου του. Ένα βίαιο φαινόμενο, όπως για παράδειγμα ένας σεισμός, αποκαλύπτει πολλές φορές, λόγω αποκολλήσεων, την κατάσταση της οξείδωσης.

#### 2.3.2.2. Δράση χλωριούχων αλάτων

Όταν τα διαλύματα που έρχονται σε επαφή με το σκυρόδεμα περιέχουν σημαντική ποσότητα σε χλωριόντα (Cl<sup>-</sup>), τότε θα πρέπει να αναμένεται αύξηση των χλωριόντων στο εσωτερικό του λόγω διάχυσης ή μεταφοράς με το νερό. Τα χλωριόντα δεν έχουν αξιόλογη δυνατότητα διάβρωσης του σκυροδέματος, αλλά παρουσιάζουν μεγάλη διαβρωτική ικανότητα στον οπλισμό. (Τάσιος & Αλιγιζάκη, 1993)

Τα χλωριόντα διαπερνούν το παθητικό στρώμα των οξειδίων στους οπλισμούς και προκαλούν διάβρωση με βελονισμούς. Συγκεκριμένα, η διάβρωση με βελονισμούς οφείλεται αποκλειστικά στην επίδραση των χλωριόντων. Τα χλωριόντα μπορεί να βρεθούν στο σκυρόδεμα με τους εξής δύο τρόπους:

α. Εξαρχής κατά την παρασκευή του σκυροδέματος. Αρχικά τα χλωριόντα μπορεί να βρεθούν στο σκυρόδεμα ως:

- τυχαίο συστατικό σε αδρανή (για παράδειγμα άμμος που προέρχεται από την θάλασσα)
- μέσα σε πρόσθετο για επιτάχυνση της σκλήρυνσης του σκυροδέματος (για παράδειγμα χλωριούχο ασβέστιο)
- στο νερό ανάμιξης (για παράδειγμα θαλασσινό νερό ανάμιξης)

Η αρχική παρουσία των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μπορεί να περιορισθεί αν γίνει κατάλληλη επιλογή και έλεγχος των υλικών σύνθεσης του σκυροδέματος.

β. Αργότερα με την διείσδυσή τους από το περιβάλλον. Τα χλωριόντα μπορούν να διεισδύσουν από το περιβάλλον στο σκυρόδεμα από:

- χρήση αλάτων στους δρόμους και τις γέφυρες για λόγους αποπαγοποίησης

- βιομηχανικά αλμυρά ύδατα
- άμεση επαφή θαλασσινού νερού με κατασκευές
- σταγονίδια θαλασσινού νερού, τα οποία μεταφέρονται με τον αέρα (έχει παρατηρηθεί ότι τα σταγονίδια μπορούν να επηρεάσουν μία κατασκευή σε απόσταση μέχρι 10 χιλιομέτρων από την θάλασσα)
- μετά από πυρκαγιά στην οποία κάηκαν αντικείμενα από το πολυμερές πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC). Το πολυβινυλοχλωρίδιο διασπάται και δίνει αέριο HCl, το οποίο διεισδύει στο σκυρόδεμα και αντιδρά με την άσβεστο, ελευθερώνοντας τελικώς ιόντα χλωρίου.

(<http://ikaros.teipir.gr/phychyche/Subjects/Routoulas/Petyl/%D0%C5%D4%D5%CB%20%CA%C5%D63%C1.pdf>)

Όταν τα χλωριόντα υπερβούν μία ορισμένη τιμή, η οποία συνήθως εκφράζεται σε γραμμάρια χλωριόντων ανά 100 γραμμάρια τσιμέντου, τότε αρχίζει η διαβρωτική τους δράση. Στην πράξη έχει επικρατήσει το Κριτήριο Ritzard, σύμφωνα με το οποίο ποσότητες χλωριόντων μεγαλύτερες από 4 g Cl<sup>-</sup> / 100 g τσιμέντου μπορούν να μετατρέψουν την παθητική κατάσταση του χάλυβα στο σκυρόδεμα σε ενεργή, έστω και με υψηλή τιμή pH. Ποσότητες χλωριόντων μεγαλύτερες από 1 g Cl<sup>-</sup> / 100 g τσιμέντου απαιτούν άμεση λήψη μέτρων προστασίας της κατασκευής. (Τάσιος & Αλιγιζάκη, 1993) (Μοροπούλου & Μπατής, 2012)

#### 2.3.2.2.1. Διείσδυση χλωριόντων

Η διείσδυση χλωριόντων γίνεται μέσω του υγρού των πόρων του σκυροδέματος και η χρονική εξέλιξή της είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου. Ιδιαίτερα επικίνδυνη είναι η εναλλασσόμενη διαβροχή και ξήρανση της επιφάνειας του σκυροδέματος από νερό που περιέχει χλωριούχα άλατα. Κατά την διάρκεια της διαβροχής μεγάλες ποσότητες νερού με διαλυμένα άλατα διεισδύουν στο σκυρόδεμα, ενώ κατά την διάρκεια της ξήρανσης το νερό εξατμίζεται, αλλά τα άλατα παραμένουν στο σκυρόδεμα. Η επανάληψη αυτής της διαδικασίας δημιουργεί μεγάλες συγκεντρώσεις χλωριόντων στην περιοχή του σκυροδέματος που διαβρέχεται και ξηραίνεται.

Από τα χλωριόντα που υπάρχουν στο σκυρόδεμα, μία ποσότητα δεσμεύεται χημικά από τον τσιμεντοπολτό, ενώ τα υπόλοιπα παραμένουν ελεύθερα. Η διάβρωση του χάλυβα προκαλείται από τα ελεύθερα χλωριόντα. Το τσιμέντο μπορεί να δεσμεύσει ποσότητα χλωριόντων μέχρι 0,4% κατά βάρος τσιμέντου. Σχηματίζεται έτσι το άλας Friedell ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), το οποίο είναι αβλαβές για τον σιδηροπλισμό. Για μεγαλύτερες όμως ποσότητες χλωριόντων, επιτυγχάνεται μία κατάσταση ισορροπίας, ώστε να υπάρχουν πάντα ελεύθερα χλωριόντα. Όταν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές, αυτά τα ελεύθερα χλωριόντα θα προκαλέσουν διάβρωση του οπλισμού. Η αντίδραση για τον σχηματισμό του άλατος Friedell γίνεται πιο δύσκολα αν τα χλωριόντα βρεθούν σε σκληρυμένο σκυρόδεμα.

Έχει βρεθεί πειραματικά ότι σε σκυρόδεμα το οποίο περιέχει εξαρχής χλωριόντα, ο χάλυβας διαβρώνεται λιγότερο από ότι θα συνέβαινε αν ο χάλυβας βρισκόταν σε σκυρόδεμα στο οποίο η ίδια ποσότητα χλωριόντων διείσδυε από το περιβάλλον. Αυτό οφείλεται στην ευκολότερη χημική δέσμευση των χλωριόντων που βρίσκονται στο σκυρόδεμα πριν την σκλήρυνσή του.

(<http://ikaros.teipir.gr/phycbe/Subjects/Routoulas/Petyl/%D0%C5%D4%D5%CB%20%CA%C5%D63%C1.pdf>)

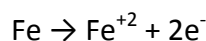
#### 2.3.2.2.2. Μηχανισμός διάβρωσης λόγω επίδρασης χλωριόντων

Ο μηχανισμός διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού λόγω επίδρασης χλωριόντων δεν έχει διασαφηνισθεί πλήρως. Αρχικά οι ερευνητές είχαν θεωρήσει ότι τα χλωριόντα μειώνουν το pH των πόρων, καταστρέφοντας έτσι την παθητική προστασία την οποία παρέχει το σκυρόδεμα στον χάλυβα. Πρόσφατες έρευνες όμως έδειξαν ότι η τιμή του pH στο σκυρόδεμα μετά την προσθήκη χλωριούχου άλατος εξαρτάται από το κατιόν του χλωριούχου άλατος. Επί παραδείγματι με την προσθήκη χλωριούχου νατρίου στο σκυρόδεμα, το pH δεν μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου, ενώ με την προσθήκη χλωριούχου ασβεστίου το pH μειώνεται.

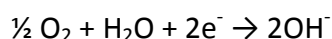
Έχει διατυπωθεί η άποψη ότι σημασία έχει ο λόγος  $[Cl^-]/[OH^-]$  και όχι το pH του νερού στους πόρους του σκυροδέματος. Σε σκυρόδεμα που περιέχει χλωριούχο ασβέστιο, ο λόγος  $[Cl^-]/[OH^-]$  είναι μεγαλύτερος από το αντίστοιχο λόγο σκυροδέματος που περιέχει χλωριούχο νάτριο χωρίς βλαπτικό αποτέλεσμα. Ο Hausmann διατύπωσε την άποψη ότι διάβρωση του χάλυβα συμβαίνει όταν ο λόγος  $[Cl^-]/[OH^-]$  πάρει τιμή μεγαλύτερη από 0,6. Χαρακτηριστικό της διάβρωσης με βελονισμούς είναι ότι ο χάλυβας διαβρώνεται σε πολύ μικρές περιοχές της επιφάνειάς του. Λόγω της διατήρησης της αλκαλικότητας του σκυροδέματος σε υψηλά επίπεδα και λόγω της τοπικής διάβρωσης, ο μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα λόγω επίδρασης χλωριόντων είναι διαφορετικός από τον μηχανισμό της γενικής διάβρωσης του χάλυβα.

Σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές, τα χλωριόντα δρουν ως καταλύτες στην αντίδραση του σιδήρου με τα υδροξύλια. Η άποψη αυτή φαίνεται σωστή, αν εξεταστεί ο χάλυβας που βρισκόταν σε σκυρόδεμα, το οποίο έχει υποστεί την επίδραση των χλωριούχων αλάτων. Ο χάλυβας στην αρχή έχει πράσινο χρώμα. Το αρχικό πράσινο χρώμα οφείλεται σε κάποιο σύμπλοκο μόριο σιδήρου και χλωριόντων, το οποίο με την παρουσία του οξυγόνου της ατμόσφαιρας μετατρέπεται σε κοινό οξείδιο. Εφόσον η ποσότητα των χλωριόντων υπερβεί κάποιο όριο, τότε υπάρχουν ελεύθερα χλωριόντα, τα οποία διαχεόμενα φθάνουν στην επιφάνεια του σιδηροπλισμού και προκαλούν την αποπαθητικοποίησή του. Και στην περίπτωση αυτή η διάβρωση πραγματοποιείται με την λειτουργία ενός τοπικού γαλβανικού στοιχείου.

Στην άνοδο πραγματοποιείται η διάλυση του σιδήρου σύμφωνα με την οξειδωτική αντίδραση:

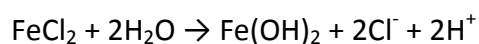
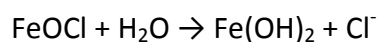


Στην κάθοδο πραγματοποιείται η αναγωγική αντίδραση:



Τα ιόντα του σιδήρου αρχικά σχηματίζουν με τα χλωριόντα χλωριούχο σίδηρο ( $FeCl_2$ ). Στην συνέχεια όμως ένα μέρος του  $FeCl_2$  με την βοήθεια του οξυγόνου μετατρέπεται σε  $FeOCl$  (οξείδωση του σιδήρου σε τρισθενή σίδηρο). Τέλος, με την παρουσία του νερού συμβαίνει υδρόλυση των προϊόντων της διάβρωσης ως εξής:





Με την υδρόλυση τα χλωριόντα που είχαν δεσμευθεί στα προϊόντα διάβρωσης επιστρέφουν πάλι στο διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος με ταυτόχρονη τοπική οξίνιση του διαλύματος. Επιβεβαιώνεται έτσι ότι η δράση του χλωριόντων είναι μία αυτοαναλυόμενη αντίδραση. Ακόμη κι αν η περαιτέρω είσοδος χλωριόντων παρεμποδιστεί, η διάβρωση συνεχίζεται, γιατί η ποσότητα των χλωριόντων στην επιφάνεια του οπλισμού παραμένει σταθερή. Η αναγκαία ροή των ηλεκτρονίων πραγματοποιείται μέσω του χάλυβα, ενώ η μετακίνηση των ιόντων διαμέσου των πόρων του σκυροδέματος. Κατά τους D. Darwin et al., για την επίδραση των χλωριόντων απαιτούνται ταυτόχρονα οξυγόνο και υγρασία.

(<http://ikaros.teipir.gr/phycbe/Subjects/Routoulas/Petyl/%D0%C5%D4%D5%CB%20%CA%C5%D63%C1.pdf>)

### **2.3.2.3. Σχηματισμός μακροστοιχείων**

Ένα κράμα όπως ο δομικός χάλυβας από την μεταλλουργική διαδικασία παραγωγής του εμφανίζει αιτίες σχηματισμού τοπικών γαλβανικών στοιχείων. Ανομοιομορφίες μικρής κλίμακας στη χημική σύσταση του κράματος, γεωμετρικές ανωμαλίες στην επιφάνεια, καθώς και η ύπαρξη οξειδίων στην επιφάνεια οδηγούν στον σχηματισμό τοπικών γαλβανικών στοιχείων με μία διαφορά ηλεκτρικού συνεχούς δυναμικού της τάξης των μερικών δεκάδων mV. Οι διαφορές αυτές του δυναμικού είναι αρκετές για να οδηγήσουν στον σχηματισμό ανοδικών και καθοδικών περιοχών. Η δημιουργία των τοπικών αυτών γαλβανικών στοιχείων είναι αποτέλεσμα της παραγωγικής διαδικασίας του χάλυβα. Εάν υπήρχε μόνο αυτή η διαδικασία διάβρωσης μέσω των τοπικών γαλβανικών στοιχείων, τότε οι αστοχίες από τη διάβρωση θα ήταν σημαντικά μικρότερες από αυτές που έχουν παρατηρηθεί. (Μπατής, Χρήση νέων υλικών για την αύξηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών)

Τα μακροστοιχεία σε αντίθεση με τα τοπικά γαλβανικά στοιχεία εμφανίζονται σε μεγάλες περιοχές του οπλισμού. Οφείλονται δε στην όλη συγκρότηση και λειτουργία του οπλισμένου σκυροδέματος και όχι μόνο στον χάλυβα. Στην περίπτωση όμως του οπλισμένου σκυροδέματος η δημιουργία μακροστοιχείων οφείλεται σε επιδράσεις του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, τα χλωριόντα φθάνουν μετά από ένα χρονικό διάστημα στους πρώτους εξωτερικούς οπλισμούς, ενώ οι ευρισκόμενοι προς το εσωτερικό τμήμα του κτιρίου οπλισμοί δεν έχουν γύρω τους χλωριόντα. Μεταξύ των εσωτερικών και των εξωτερικών χαλύβων δημιουργείται – μέσω των συνδετήρων – μακροστοιχείο. Οι οπλισμοί που έχουν ήδη γύρω τους χλωριόντα αποτελούν την άνοδο, ενώ οι οπλισμοί χωρίς χλωριόντα αποτελούν την κάθοδο του γαλβανικού στοιχείου. Η ταχύτητα διάβρωσης εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος του γαλβανικού μακροστοιχείου. Η ένταση του ρεύματος με τη σειρά της εξαρτάται από το δυναμικό του μακροστοιχείου, την ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος και τον λόγο μεταξύ της ανοδικής προς την καθοδική επιφάνεια. (Τάσιος & Αλιγιζάκη, 1993)

Γαλβανικά μακροστοιχεία επίσης εμφανίζονται όταν υπάρχουν:

- αεριζόμενες περιοχές οπλισμένου σκυροδέματος δίπλα σε μη αεριζόμενες
- υγρές περιοχές οπλισμένου σκυροδέματος δίπλα σε στεγνές
- περιοχές οπλισμένου σκυροδέματος με χαμηλό pH (λόγω εναθράκωσης) δίπλα σε περιοχές με υψηλό pH

Η ύπαρξη και λειτουργία γαλβανικών μακροστοιχείων οδηγεί σε διάβρωση μεγάλης έκτασης και ταχύτητας. (Μπατής, Ρακαντά, & Μελετίου, Προβλήματα διάβρωσης οπλισμού κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος στην Ελλάδα, 2004)

## 2.4. Συνέπειες της διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα

Η διάβρωση του σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα προκαλεί αύξηση του όγκου του με αποτέλεσμα τη δημιουργία εσωτερικών τάσεων και ρηγματώσεων. Η ζημιά που προκαλείται είναι διπλή:

- Από την μία, με την οξείδωση του χάλυβα μειώνεται η ενεργός διατομή του και άρα μειώνεται και η στατική επάρκεια της κατασκευής.
- Από την άλλη, οι ρηγματώσεις αυξάνουν τη διαπερατότητα του σκυροδέματος σε διοξείδιο του άνθρακα δημιουργώντας έτσι τις προϋποθέσεις για νέες ρηγματώσεις και γρήγορη διάβρωση του οπλισμού.

(Μαυροειδής)

Η αντιμετώπιση της διάβρωσης επιβάλλεται για λόγους οικονομικούς, βελτίωσης της ασφάλειας του βιομηχανικού εξοπλισμού και προστασίας πλουτοπαραγωγικών πηγών. Από οικονομική άποψη το ετήσιο κόστος λόγω διάβρωσης φτάνει σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα. Συνήθως οι υπολογισμοί αφορούν στο άμεσο κόστος, δηλαδή στο κόστος για την προστασία και την αντικατάσταση των κατασκευών που έχουν υποστεί διάβρωση. Πρέπει όμως να λαμβάνεται υπ' όψιν και το έμμεσο κόστος, δηλαδή το κόστος από:

- την μόλυνση προϊόντων παραγωγής (βιομηχανία τροφίμων, σαπουνιού, χρωμάτων κ.ά)
- την απώλεια παραγωγής από τα διαβρωμένα τμήματα πριν την συντήρησή τους ή από την αναστολή των εργασιών των εγκαταστάσεων, καθώς και τους μεγάλους χρόνους συντήρησης και αντικατάστασης των διαβρωμένων τμημάτων
- την μείωση της απόδοσης της εγκατάστασης από συσσώρευση προϊόντων διάβρωσης με συνέπεια συχνά ενεργειακές απώλειες
- τις αυξημένες ανάγκες συνεχούς συντήρησης για αποφυγή αναστολής της παραγωγής
- γενικές απώλειες μη υπολογίσιμου πάντοτε κόστους, αφού μπορεί να αφορούν σε μικρά μεν αλλά κρίσιμα τμήματα εγκαταστάσεων ή μπορεί να είναι μέχρι και αιτίες πρόκλησης ατυχημάτων

(Υφαντής, 1995)

#### 2.4.1. Οικονομικές επιπτώσεις της διάβρωσης των μετάλλων

Η σημασία της διάβρωσης των μετάλλων είναι μεγάλη και καθορίζεται από τις συνέπειές της στην οικονομία των χωρών.

Συχνά παραδείγματα διάβρωσης αποτελούν η διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος σε γέφυρες, σήραγγες και αυτοκινητόδρομους, αλλά και η καταστροφή μεταλλικών κατασκευών σε χημικά και πυρηνικά εργοστάσια. Η διάβρωση είναι επίσης συχνό φαινόμενο κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στους εναλλάκτες θερμότητας των ψυγείων, στην ναυπηγική βιομηχανία, στην βιομηχανία τροφίμων, στις μεταφορές, στα αμυντικά συστήματα, στην εξερεύνηση του διαστήματος.

Το κόστος της διάβρωσης είναι ιδιαίτερα υψηλό. Συγκεκριμένα, εκτιμάται κατά μέσο όρο στο 3,5% (από 2% έως 4,5%) του Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος ή στα (50-100) δολάρια ανά κάτοικο χώρας με πολύ υψηλό δείκτη εκβιομηχάνισης. Οι υπολογισμοί αυτοί αφορούν μόνο στο άμεσο κόστος διάβρωσης και προστασίας, δηλαδή το κόστος για την προστασία και την αποκατάσταση των κατασκευών που έχουν διαβρωθεί. Η ποσότητα του σιδήρου που καταστρέφεται από διάβρωση κάθε χρόνο εκτιμάται στο 1/4 ή 1/3 της ετήσιας παραγωγής, δηλαδή στο ύψος των 150.106 τόνων τον χρόνο ή πέντε τόνων το δευτερόλεπτο.

Μία οικονομική ανάλυση του κύκλου ζωής σχετικά με το κόστος επισκευής μίας γέφυρας έδειξε ότι το κόστος της χαμένης παραγωγικότητας λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης είναι δέκα φορές μεγαλύτερο από το άμεσο κόστος επισκευής. Έχει εκτιμηθεί ότι τα έμμεσα κόστη διάβρωσης είναι τουλάχιστον το ίδιο μεγάλα με τα άμεσα κόστη.

Για την Ελλάδα δεν υπάρχει στατιστική οικονομικών επιπτώσεων του φαινομένου της διάβρωσης. Οι επιπτώσεις όμως αυτές είναι εξαιρετικά μεγάλες σε πολλούς τομείς όπως στις μεταφορές, στην βιομηχανία, στις κατασκευές και αυτό εξαιτίας των εξής παραγόντων:

- Η Ελλάδα βρίσκεται σε θαλασσινό περιβάλλον και έχει τον μεγαλύτερο λόγο μήκους ακτών προς την επιφάνειά της, οι πόλεις της δεν απέχουν πολλά χιλιόμετρα από την θάλασσα και σε οποιοδήποτε σημείο της ανιχνεύεται στην ατμόσφαιρα χλωριούχο νάτριο, το οποίο μεταφέρεται με τους ανέμους με την μορφή κολλοειδών διαστάσεων σταγονιδίων θαλασσινού νερού. Η διάβρωση από θαλασσινό νερό ή κοντά σε αυτό είναι επομένως ιδιαίτερα έντονη.
- Τα περισσότερα εργοστάσια στην Ελλάδα βρίσκονται κοντά στις ακτές έτσι ώστε να χρησιμοποιούν τις θαλάσσιες συγκοινωνίες και πολλές φορές ακόμα και θαλασσινό νερό, όχι επαρκώς επεξεργασμένο, για θέρμανση ή ψύξη και άλλες βοηθητικές λειτουργίες.
- Η ρύπανση της ατμόσφαιρας σε πολλές πόλεις είναι μεγάλη.

(Κουλουμπή, Διάβρωση και Προστασία, 2010)

Είναι συνεπώς σαφές ότι το να παρθούν στοιχειώδη μέτρα προστασίας με εφαρμογή της υπάρχουσας γνώσης και τεχνικής είναι οικονομικότερο από το να

αφεθεί η διάβρωση στη φυσιολογική της πορεία. Για ορθολογιστική αντιμετώπιση του προβλήματος είναι απαραίτητο όχι μόνο να εφαρμοστεί κάποια προστασία, αλλά και να ληφθούν μέτρα για την πρόληψη της διάβρωσης. Τα μέτρα αυτά ξεκινούν από τον σχεδιασμό της εγκατάστασης και της παραγωγικής διαδικασίας και προχωρούν στην επιλογή των υλικών και την επίβλεψη των κατασκευών, στο συστηματικό έλεγχο και τη συντήρηση της εγκατάστασης κατά τη λειτουργία της, ιδιαίτερα στις κρίσιμες για διάβρωση περιοχές, στην εφαρμογή και παρακολούθηση της απόκρισης διαφόρων μεθόδων προστασίας. Το τελευταίο στάδιο θεωρείται ιδιαίτερης σπουδαιότητας γιατί κάθε πρόβλημα διάβρωσης εμφανίζει ιδιαιτερότητες και κατά συνέπεια η επιλογή λανθασμένων μεθόδων προστασίας ή λανθασμένων συνθηκών εφαρμογής μπορεί όχι απλώς να μην προστατεύει, αλλά και να κάνει πολύ εντονότερη την διάβρωση. (Υφαντής, 1995)

## **2.5. Προστασία οπλισμού σκυροδέματος από διάβρωση**

### **2.5.1. Γενικά στοιχεία για την προστασία των μετάλλων**

#### **2.5.1.1. Εισαγωγή**

Η αντιδιαβρωτική προστασία μίας μεταλλικής κατασκευής αρχίζει από τον σχεδιασμό της. Ο σχεδιασμός πρέπει να φροντίζει ώστε οι παράγοντες που ευνοούν την διάβρωση να έχουν ελαχιστοποιηθεί. Πολλές φορές όμως αυτό μόνο δεν αρκεί και άρα πρέπει να ληφθούν μέτρα αντιδιαβρωτικής προστασίας. Τα μέτρα της αντιδιαβρωτικής προστασίας εξαρτώνται από το είδος του μετάλλου ή κράματος, καθώς και από το περιβάλλον του. Στην περίπτωση των μεταλλικών κατασκευών κτιρίων τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται είναι χάλυβας, αλουμίνιο και χαλκός. Το περιβάλλον είναι το ατμοσφαιρικό (φυσικό ή τεχνητό).

Όσον αφορά στον χάλυβα δύο είναι οι συνηθισμένοι μέθοδοι προστασίας. Η πρώτη μέθοδος είναι η ανόργανη επικάλυψη με ψευδάργυρο και η δεύτερη είναι η μέθοδος των οργανικών επικαλύψεων (βερνίκια ή χρώματα). Δεν αποκλείεται όμως και ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να προηγηθεί επιψευδαργύρωση και να ακολουθήσει η επικάλυψη με οργανικές επικαλύψεις. Και στις δύο περιπτώσεις πριν την εφαρμογή των επιστρωμάτων (οργανικών ή ανόργανων) πρέπει απαραίτητως να έχει προηγηθεί η προκατεργασία της επιφάνειας του χάλυβα, ώστε αυτός να μην έχει οξειδία, λίπη, λάδια ή άλλες ουσίες που μπορούν να παρεμποδίσουν την επικάλυψη.

([http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL\\_GUIDES/METAL\\_KATASK/me4\\_2t](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/METAL_KATASK/me4_2t).)

#### **2.5.1.2. Προκατεργασία της επιφάνειας**

Οι επιφάνειες του χάλυβα που πρόκειται να προστατευθούν πρέπει να έχουν καθαρισθεί επιμελώς από οξειδία, λίπη, έλαια, παλαιότερες βαφές και γενικά από κάθε ουσία η οποία μπορεί να ελαττώσει την συνάφεια του χάλυβα με την αντιδιαβρωτική επικάλυψη.

Ο καθαρισμός της επιφάνειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους:

- Μηχανικός τρόπος (συρματόβουρτσες, δίσκοι με γυαλόχαρτα, αμμοβολή)
- Χημικός τρόπος (εμβάπτιση του μετάλλου ή κράματος σε κατάλληλο λουτρό ή λουτρά)

Συνήθως για μικρές επιφάνειες ο καθαρισμός γίνεται με μηχανικό τρόπο (συρματόβουρτσες, γυαλόχαρτα), ενώ για μεγάλες επιφάνειες γίνεται αμμοβολή. Η αμμοβολή πραγματοποιείται με εκτόξευση ειδικών άμμων στην επιφάνεια του μετάλλου με την βοήθεια πεπιεσμένου αέρα και ειδικών επιστομίων. Ανάλογα με την κοκκομετρία της άμμου επιτυγχάνεται και διαφορετικό αποτέλεσμα. Η όλη διαδικασία της αμμοβολής χαρακτηρίζεται από σημαντικά προβλήματα υγιεινής και ασφάλειας, αλλά και από προβλήματα ρύπανσης του περιβάλλοντος. Για τον λόγο αυτό πρέπει να πραγματοποιείται από εξειδικευμένα συνεργεία.

Ο χημικός καθαρισμός της επιφάνειας του χάλυβα γίνεται με εμβάπτιση σε ειδικά λουτρά συνήθως από οξέα (υδροχλωρικό οξύ), όπου το χαλύβδινο στοιχείο παραμένει για κάποιο χρονικό διάστημα που εξαρτάται από το απαιτούμενο βάθος καθαρισμού. Δεν αποκλείεται η εμβάπτιση και σε δεύτερο λουτρό ανάλογα με το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα.

Μία ενδιαφέρουσα παραλλαγή είναι η εμβάπτιση σε διάλυμα φωσφορικού οξέος, όπου πραγματοποιείται η λεγόμενη φωσφάτωση, κατά την οποία η επιφάνεια του χάλυβα καλύπτεται από λεπτό στρώμα φωσφορικών ενώσεων. Το λεπτό αυτό στρώμα συνεισφέρει σημαντικά στην πολύ καλή συνάφεια μεταξύ χάλυβα και επιστρώματος.

Η επιφάνεια του χάλυβα μετά τον καθαρισμό είναι ευαίσθητη στην διάβρωση. Για τον λόγο αυτό μετά τον καθαρισμό πρέπει να ακολουθήσει μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα η επιψευδαργύρωση ή η κάλυψη με κάποιο οργανικό επίστρωμα. Πολλές φορές μετά τον καθαρισμό εφαρμόζεται ένα πρώτο χέρι χρώματος (αστάρι), το οποίο προστατεύει τον χάλυβα ικανοποιητικά για τον χρόνο αποθήκευσής του μέχρι και την τοποθέτησή του και στην συνέχεια μετά την τοποθέτηση εφαρμόζονται ακόμη δύο χέρια χρώματος.

([http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL\\_GUIDES/METAL\\_KATASK/me4\\_2t](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/METAL_KATASK/me4_2t).)

### **2.5.1.3. Επιψευδαργύρωση (Γαλβανισμός)**

Αφού προηγηθεί ο καθαρισμός της επιφάνειας του χάλυβα, ακολουθεί η επιψευδαργύρωση ή αλλιώς γαλβανισμός, που πραγματοποιείται με εμβάπτιση σε λουτρό λειωμένου ψευδαργύρου σε θερμοκρασία υψηλότερη των 520 °C. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα πάχους (5-15) μm από κράμα σιδήρου – ψευδαργύρου πάνω από το οποίο σχηματίζεται στρώμα καθαρού ψευδαργύρου. Ανάλογα με τον χρόνο εμβάπτισης, μεταβάλλεται και το πάχος του στρώματος ψευδαργύρου. Γενικά το πάχος του στρώματος ψευδαργύρου δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 80 μm, ενώ για τα πιο διαβρωτικά περιβάλλοντα μπορεί να φτάσει και τα 180 μm.

Εκτός της εν θερμώ επιψευδαργύρωσης ή γαλβανισμού υπάρχει επίσης και η μέθοδος της επικάλυψης της επιφάνειας του χάλυβα με εξάχνωση ψευδαργύρου υπό κενό. Στην μέθοδο αυτή ο χάλυβας δεν θερμαίνεται.

Πολλές φορές ο χάλυβας καλύπτεται μετά τον καθαρισμό με χρώμα (αστάρι), το οποίο περιέχει σκόνη ψευδαργύρου. Η μέθοδος αυτή συχνά ονομάζεται και «ψυχρό γαλβάνισμα». Στην πραγματικότητα όμως η μέθοδος αυτή συμπεριλαμβάνεται στην μέθοδο με οργανικές επικαλύψεις.

([http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL\\_GUIDES/METAL\\_KATASK/me4\\_2t](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/METAL_KATASK/me4_2t).)

#### **2.5.1.4. Βαφή με οργανικές επικαλύψεις ή χρώματα**

Εναλλακτική λύση στην επιψευδαργύρωση ή γαλβανισμό αποτελεί η βαφή με οργανικές επικαλύψεις ή χρώματα. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την εφαρμογή ενός χεριού χρώματος, που ονομάζεται αστάρι ή πράιμερ. Έπειτα, εφαρμόζονται δύο χέρια χρώματος. Το αστάρι μπορεί να εφαρμοσθεί στο εργοστάσιο των χαλύβδινων εξαρτημάτων, ενώ τα υπόλοιπα δύο χέρια χρώματος μπορούν να γίνουν στο εργοτάξιο. Ακόμα υπενθυμίζεται ότι η κάλυψη με αστάρι που περιέχει σκόνη ψευδαργύρου στην πράξη ονομάζεται «ψυχρό γαλβάνισμα» και αυτό το αστάρι πρέπει να καλυφθεί με δύο χέρια χρώματος.

Τονίζεται ότι συχνά τα χρώματα απαιτείται να καλύψουν τόσο την αντιδιαβρωτική προστασία, όσο και την καλή αισθητική εμφάνιση. Στην περίπτωση αυτή η επιλογή των χρωμάτων επιβάλλεται να είναι ιδιαίτερα επιμελημένη.

Πρέπει επίσης να λεχθεί ότι τα χρώματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Τα χρώματα ενός συστατικού  
Τα χρώματα ενός συστατικού βρίσκονται σε ένα μόνο δοχείο. Κατά την εφαρμογή τους μπορεί να αραιωθούν με κατάλληλο διαλυτικό. Ο σχηματισμός του στερεού στρώματος χρώματος πραγματοποιείται με εξάτμιση των διαλυτικών.
- Τα χρώματα δύο συστατικών  
Τα χρώματα δύο συστατικών βρίσκονται σε δύο δοχεία. Το ένα δοχείο περιέχει το χρώμα καθαυτό και το δεύτερο περιέχει τον σκληρυντή. Για να εφαρμοσθεί το χρώμα απαιτείται ανάμιξη και των δύο δοχείων. Το χρώμα χωρίς τον σκληρυντή δεν στεγνώνει. Μόλις τα δύο δοχεία αναμιχθούν, το χρώμα πρέπει να χρησιμοποιηθεί εντός ορισμένου χρόνου, ο οποίος ανέρχεται στις έξι ώρες για τους 25 °C. Υψηλότερες θερμοκρασίες μειώνουν τον χρόνο αυτό, ενώ χαμηλότερες τον αυξάνουν. Ο σχηματισμός του στερεού στρώματος του χρώματος πραγματοποιείται με χημική αντίδραση.

Μεταξύ των δύο κατηγοριών χρωμάτων υπάρχει σημαντική διαφορά ως προς την αντοχή στην διάβρωση και την αντοχή στις επιδράσεις διαβρωτικών χημικών. Η αντοχή των χρωμάτων δύο συστατικών είναι σαφώς καλύτερη και τα χρώματα αυτά πρέπει να προτιμώνται σε περιπτώσεις έντονα διαβρωτικού περιβάλλοντος.

([http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL\\_GUIDES/METAL\\_KATASK/me4\\_2t](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/METAL_KATASK/me4_2t).)

### 2.5.2. Μέθοδοι προστασίας από διάβρωση

Η εφαρμογή μεθόδων προστασίας απέναντι στην διάβρωση επιβάλλεται τόσο για οικονομικούς λόγους, όσο και για την ενίσχυση της ασφάλειας των κατασκευών και των εξοπλισμών, καθώς και για την διαφύλαξη της σπατάλης των πλουτοπαραγωγικών πηγών. Λόγω των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα, αλλά και της ευκολίας του στην μορφοποίηση, την βαφή, την ανακύκλωση και το χαμηλό του κόστος, χρησιμοποιείται κατά κόρον στις κατασκευές και τον βιομηχανικό εξοπλισμό. Όμως η επιδεκτικότητά του στην διάβρωση παρουσία υγρασίας και στην οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες προϋποθέτει απαραίτητα κάποια μορφή προστασίας.

Η εφαρμογή της κατάλληλης μεθόδου προστασίας ή ο συνδυασμός των μεθόδων αποβλέπουν στην μείωση της ταχύτητας διάβρωσης μέσω της μεταβολής των θερμοδυναμικών ή των κινητικών στοιχείων της διαβρωτικής δράσης.

(Chandler & Bayliss, 1985)

Οι κυριότερες μέθοδοι προστασίας, που συνίστανται στην ελάττωση της ταχύτητας διάβρωσης, αφορούν:

- α. Τροποποιήσεις του μετάλλου
- β. Τροποποιήσεις του περιβάλλοντος
- γ. Τροποποιήσεις του ηλεκτροδιακού δυναμικού μετάλλου – περιβάλλοντος
- δ. Τροποποιήσεις της παραγωγικής διαδικασίας

(Κουλουμπή, Διάβρωση και Προστασία, 2010)

#### 2.5.2.1. Τροποποιήσεις του μετάλλου

Ο κυριότερος παράγοντας για την επιλογή ενός μετάλλου είναι η αντίστασή του απέναντι στην διάβρωση. Η αντίστασή του μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με προσθήκες ή και διεργασίες που τροποποιούν την σύστασή του (κραματοποίηση ή καθαρισμός), την δομή του (θερμική κατεργασία), τις εσωτερικές του τάσεις (θερμική κατεργασία ή κατεργασία διαμόρφωσης εν ψυχρώ). Ο σκοπός των προσθηκών είναι να παθητικοποιήσουν ή να διευκολύνουν την παθητικοποίηση του μετάλλου, καθώς και να μειώσουν τις κρυσταλλικές του ατέλειες. Η διαδικασία καθαρισμού και οι θερμικές κατεργασίες επιλέγονται βάσει της φύσης του υλικού.

(Trethewey & Champerlain, 1998)

#### 2.5.2.2. Τροποποιήσεις του περιβάλλοντος

Οι κυριότεροι τρόποι επέμβασης στο περιβάλλον με σκοπό την προστασία από την διάβρωση είναι οι εξής:

- Απομάκρυνση του οξυγόνου ή των οξειδωτικών από το νερό με κατεργασία υπό κενό, με κορεσμό με αδρανές αέριο ή με προσθήκη ουσιών που δεσμεύουν το οξυγόνο (για παράδειγμα υδραζίνη). Η απαέρωση με αδρανές αέριο έχει ευρύτατη εφαρμογή, στα παθητικά όμως μέταλλα δεν συνίσταται γιατί παρεμποδίζει τον σχηματισμό προστατευτικών οξειδίων.
- Απομάκρυνση των οξέων με εξουδετέρωση για παράδειγμα του HCl με προσθήκη Ca(OH)<sub>2</sub>. Για μέτριες θερμοκρασίες όμως το H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> και το H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

είναι αδρανής σε υψηλές συγκεντρώσεις, οπότε η διάβρωση ελαττώνεται με αύξηση της συγκέντρωσής τους.

- Ελάττωση της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος αέρα
- Ελάττωση της θερμοκρασίας (στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μειώνει τον ρυθμό διάβρωσης)
- Απομάκρυνση των αλάτων με ιοντοεναλλαγή
- Απομάκρυνση του νερού από τον αέρα με αφύγρανση.
- Απομάκρυνση των στερεών σωματιδίων από το νερό ή τον αέρα με φιλτράρισμα ή άλλη κατάλληλη τεχνική.
- Χρήση αναστολέων διάβρωσης

(Κουλουμπή, Διάβρωση και Προστασία, 2010) (Jones, 1996)

#### 2.5.2.2.1. Χρήση αναστολέων διάβρωσης

Η χρήση αναστολέων διάβρωσης ως πρόσμικτα στο σκυρόδεμα είναι μία δημοφιλής και εύκολη μέθοδος. Τα χημικά πρόσθετα αναστολής διάβρωσης στο σκυρόδεμα έχουν σαν στόχο τον περιορισμό της διάβρωσης του οπλισμού διαμέσου της δράσης τους στην επιφάνειά του. Παρόλα αυτά στην Ελλάδα η εφαρμογή τους ως μέθοδος προστασίας από την διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος είναι πρόσφατη.

Η χρονική αυτή υστέρηση οφείλεται κυρίως σε λόγους δυσπιστίας και επιφύλαξης από την πλευρά των κατασκευαστών, αλλά και σε οικονομικούς παράγοντες. Η επιφύλαξη ως προς την χρήση αναστολέων διάβρωσης οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η προσθήκη τους στο σκυρόδεμα είναι μόνιμη και δεν αλλάζει εάν αυτοί αποδειχθούν μη αποτελεσματικοί, ενώ εάν αποδειχθεί ότι ασκούν αρνητική δράση στις ιδιότητες του σκυροδέματος δεν είναι δυνατόν να απομακρυνθούν από αυτό. Η προσθήκη του αναστολέα διάβρωσης δεν πρέπει να επηρεάζει σημαντικά άλλες ωφέλιμες ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως την θλιπτική του αντοχή και γενικότερα τις μηχανικές του ιδιότητες. Οι αναστολείς διάβρωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως πρόσμικτοι, είτε ως ψεκαζόμενοι στις κατασκευές.

Οι αναστολείς διάβρωσης είναι χημικές ενώσεις, που όταν προστεθούν στο σκυρόδεμα σε μικρές συγκεντρώσεις, έχουν την ικανότητα να επιβραδύνουν τον ρυθμό διάβρωσης των οπλισμών. Οι αναστολείς διάβρωσης είναι γενικά ενεργοί σε μικρές συγκεντρώσεις και ο μηχανισμός της δράσης τους έχει διευκρινιστεί πλήρως σε λίγες μόνο περιπτώσεις. Μπορούν να επηρεάσουν είτε τις ανοδικές αντιδράσεις, είτε τις καθοδικές, είτε και τις δύο. Θα πρέπει να γίνεται σαφής διάκριση μεταξύ των αναστολέων διάβρωσης και άλλων προσθέτων του σκυροδέματος, τα οποία βελτιώνουν την αντοχή του σε διάβρωση. Οι αναστολείς διάβρωσης θα πρέπει να παρέχουν προστασία στον οπλισμό για μεγάλο χρονικό διάστημα και να μην επηρεάζουν αρνητικά τις υπόλοιπες ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Εάν τα χλωριόντα εισχωρήσουν στο σκυρόδεμα, τότε η διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα δεν είναι πλέον αμελητέα. Ορισμένοι παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζονται από τους αναστολείς διάβρωσης, είναι οι εξής:

- Ο ρυθμός εισόδου των χλωριόντων από το περιβάλλον



- Ο βαθμός με τον οποίο τα χλωριόντα ενσωματώνονται χημικά ή δεσμεύονται φυσικά στην επικάλυψη του σκυροδέματος
- Η περιεκτικότητα των χλωριόντων που μπορεί να ανεχθεί ο οπλισμός χωρίς να διαρρηχθεί το υπάρχον παθητικό φιλμ
- Ο ρυθμός εισόδου του διαλυμένου οξυγόνου που ενισχύει την καθοδική αντίδραση
- Η ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος
- Η χημική σύσταση του ηλεκτρολύτη (το διάλυμα των πόρων στο τσιμέντο)

Η λειτουργία των αναστολέων διάβρωσης βασίζεται στην παρεμπόδιση είτε της ανοδικής, είτε της καθοδικής δράσης, είτε και των δύο. Πολλοί αναστολείς διάβρωσης είναι οργανικοί και η λειτουργία τους στηρίζεται στην δημιουργία ενός αδιάβροχου και μη διαπερατού φιλμ στην επιφάνεια του μετάλλου, είτε με την παρεμπόδιση της ανοδικής, είτε της καθοδικής αντίδρασης.

(Poulsen, Risberg, & Stilling, 2000) (Hansson, Mammoliti, & Bore, 1998) (Μπατής, Ρακαντά, Θεοδωρίδης, & Σίδερης, 2003) (Παναγιωτίδης, 2011) (Ζαχαροπούλου, 2013)

#### 2.5.2.2.1.1. Κατηγορίες αναστολέων διάβρωσης

Ανάλογα με τον τρόπο δράσης τους οι αναστολείς διάβρωσης χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες:

- Ανοδικοί αναστολείς διάβρωσης  
Οι ανοδικοί αναστολείς διάβρωσης αναστέλλουν την διάβρωση, σταθεροποιώντας το προστατευτικό φιλμ του οπλισμού, το οποίο έχει την τάση να διασπάται όταν αυξάνεται η περιεκτικότητα των χλωριδίων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων αναστολέων είναι αυτοί που περιέχουν νιτρώδες ασβέστιο και οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε κονιάματα επισκευών. Το νιτρώδες ασβέστιο όμως έχει σαν παράπλευρη δράση την επιτάχυνση της πήξης και επομένως θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για την αποφυγή φαινομένων «άμεσης πήξης» (flash setting).
- Καθοδικοί αναστολείς διάβρωσης  
Οι καθοδικοί αναστολείς διάβρωσης προσροφώνται από τον οπλισμό και σχηματίζουν στην επιφάνειά του ένα φράγμα στην μείωση οξυγόνου, που είναι η κύρια αιτία της καθοδικής αντίδρασης του χάλυβα στο σκυρόδεμα. Οι πιο πολλοί όμως καθοδικοί αναστολείς διάβρωσης, όπως οι αμίνες και τα φωσφορικά, έχουν σαν αποτέλεσμα την μεγάλη επιβράδυνση της πήξης του σκυροδέματος.
- Οργανικοί (Μεικτοί) αναστολείς διάβρωσης  
Οι οργανικοί αναστολείς διάβρωσης ονομάζονται επίσης και προσροφητικοί αναστολείς διάβρωσης και η δράση τους συνδυάζει ανοδική και καθοδική προστασία. Τυπικό είδος τέτοιων αναστολέων αποτελούν οι οργανικές αμίνες, όπως είναι για παράδειγμα οι αμινοαιθανόλες.
- Αναστολείς διάβρωσης φάσης ατμού  
Οι αναστολείς διάβρωσης φάσης ατμού έχουν παρόμοια δράση με τους προσροφητικούς αναστολείς, αλλά επιπρόσθετα προκαλούν και υψηλή

πίεση υδρατμών, η οποία λειτουργεί σαν φράγμα στην διείσδυση διαβρωτικών ουσιών από την ατμόσφαιρα προς το σκυρόδεμα.

- Οξειδωτικοί αναστολείς διάβρωσης

Οξειδωτικοί αναστολείς διάβρωσης είναι ουσίες όπως τα χρωμικά άλατα, τα οποία δρουν ως αναστολείς της διάβρωσης με πολλούς τρόπους. Η κύρια χρήση τους είναι η αναστολή της διάβρωσης σε μέταλλα τα οποία επιδεικνύουν ενεργητική – παθητική μετάλλαξη, όπως είναι ο σίδηρος και τα κράματά του.

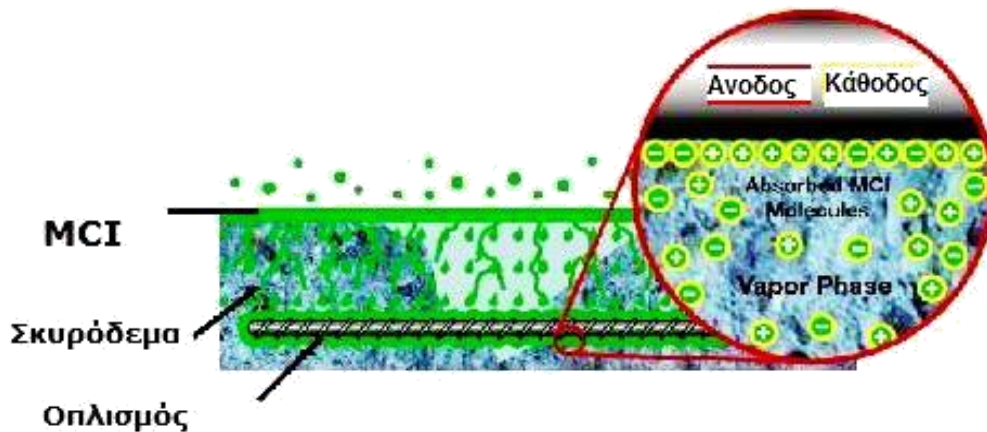
(Παναγιωτίδης, 2011) (Ζαχαροπούλου, 2013)

Από τις πέντε ανωτέρω κατηγορίες αναστολέων διάβρωσης αυτό που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις επισκευές οπλισμένου σκυροδέματος, είναι οι οργανικοί αναστολείς διάβρωσης, καθώς έχουν την δυνατότητα να διεισδύουν μέσα στο σκληρυμένο σκυρόδεμα μέσω διάχυσης. Όταν ο αναστολέας αυτός έρθει σε επαφή με τον χαλύβδινο οπλισμό, σχηματίζει ένα μονομοριακό προστατευτικό φιλμ, το οποίο μειώνει δραματικά την διάβρωση, παρουσιάζοντας διπλή δράση, τόσο ανοδική, όσο και καθοδική. (Μπατής, Ρακαντά, Θεοδωρίδης, & Σίδερης, 2003)

Οι διεισδυτικοί αναστολείς διάβρωσης (MCI's: Migrating Corrosion Inhibitors) αποτελούν κατηγορία των οργανικών (μεικτών) αναστολέων μιας και δρουν συγχρόνως στις ανοδικές και καθοδικές περιοχές καθυστερώντας την διάβρωση. Είναι βασισμένοι στην χημεία των αμινούχων ενώσεων και δημιουργούν ένα μονομοριακό στρώμα ανάμεσα στο μέταλλο και το νερό των πόρων. Τα μόρια του αναστολέα έχουν ένα υδρόφιλο και ένα υδρόφοβο τμήμα, ροφώνται στην επιφάνεια και έτσι σχηματίζεται ένα μονομοριακό προστατευτικό φιλμ με τα μόρια να τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα προς την επιφάνεια του χάλυβα, δημιουργώντας έτσι ένα συνεχές φράγμα που προστατεύει αποτελεσματικά την επιφάνεια. (Bavarian & Reiner, 2003) (Bavarian & Reiner, 2006)

Ονομάζονται διαχεόμενοι από την δράση τους να διαχέονται μέσω του πορώδους του σκυροδέματος μέχρι να συναντήσουν τον χάλυβα του οπλισμού, να ροφηθούν στην επιφάνειά του, να σχηματίσουν το προστατευτικό φιλμ και να προστατεύσουν έτσι τον χάλυβα. Στην εικόνα του ακόλουθου σχήματος απεικονίζεται η δράση του διαχεόμενου αναστολέα διάβρωσης για προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα. (Batis, Routoulas, & Rakanta, Effects of migrating inhibitors on corrosion of reinforcing steel covered with repair mortar, 2003)

Οι διεισδυτικοί αναστολείς διάβρωσης χρησιμοποιούνται ως η μοναδική λύση, ώστε το αποσθρωμένο σκυρόδεμα να παραμείνει στην θέση του και η «θεραπεία» των οπλισμών από την διάβρωση να γίνει εξωτερικά. (Παναγιωτίδης, 2011)



Σχήμα 6: Σχηματική απεικόνιση της δράσης του διαχεόμενου αναστολέα διάβρωσης για προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα ([www.cortecmci.com](http://www.cortecmci.com))

Η αντίδραση αναστολής της διάβρωσης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως είναι:

- Η διαλυτότητα
- Η διασπορά
- Η αναλογία αναστολέα διάβρωσης – χλωριόντων (για τους ανοδικούς αναστολείς)
- Η χημική σύσταση του τσιμέντου
- Οι συνθήκες ωρίμανσης
- Η θερμοκρασία
- Το pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος

(Μπατής, Ρακαντά, Θεοδωρίδης, & Σίδερης, 2003)

#### 2.5.2.2.1.2. Ιδιότητες αναστολέα διάβρωσης – Βαθμός προστασίας Z

Οι ιδιότητες ενός αναστολέα διάβρωσης, που έχει επιλεγεί για την επισκευή στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, θα πρέπει τουλάχιστον να ικανοποιεί τις εξής απαιτήσεις:

- Θα πρέπει να είναι μη τοξικός και να μην μολύνει το περιβάλλον στο οποίο εφαρμόζεται.
- Θα πρέπει να είναι αποτελεσματικός στις συνθήκες θερμοκρασίας και στο pH του περιβάλλοντος που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.
- Θα πρέπει να είναι συμβατός με το προοριζόμενο σύστημα προκειμένου να μην έχει ανεπιθύμητες παρενέργειες.
- Θα πρέπει να είναι ισχυρός δέκτης ή δότης ηλεκτρονίων ή και τα δύο ταυτόχρονα.
- Θα πρέπει να προκαλεί πόλωση των αντίστοιχων ηλεκτροδίων σε σχετικά μικρό ρυθμό ροής ηλεκτρικού ρεύματος.
- Θα πρέπει να μπορεί να διαχέεται διαμέσου του σκληρυμένου σκυροδέματος.
- Η προστασία του θα πρέπει να είναι αποτελεσματική και μεγάλης διάρκειας.

- Θα πρέπει να αναστέλλει την διάβρωση ανεξάρτητα από διαφοροποιήσεις στην πυκνότητα της μάζας του σκυροδέματος.
- Δεν θα πρέπει να έχει παράπλευρες επιπτώσεις στις ιδιότητες τόσο του φρέσκου, όσο και του σκληρυμένου σκυροδέματος.

(Παναγιωτίδης, 2011) (Ζαχαροπούλου, 2013)

Ένας αναστολέας διάβρωσης χαρακτηρίζεται ασφαλής όταν με την προσθήκη του ελαττώνεται ομοιόμορφα η διάβρωση στην ανοδική επιφάνεια (ισχύει για καθοδικούς και όχι για ανοδικούς αναστολείς διάβρωσης). Οι αναστολείς θα πρέπει πάντα να προστίθενται σε περίσσεια για να αποφευχθεί η πιθανότητα αύξησης της διάβρωσης.

Οι αναστολείς που χρησιμοποιούνται περιέχουν περισσότερα του ενός δραστικά συστατικά, ενώ υπάρχουν περιορισμοί ως προς την συγκέντρωσή τους λόγω του ότι πολλοί από αυτούς είναι τοξικοί. Ο βαθμός προστασίας  $Z$  που παρέχει ένας αναστολέας διάβρωσης δίνεται από τον τύπο:

$$Z(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_3}$$

όπου,

$Z(\%)$ : ο % βαθμός προστασίας που παρέχει ο αναστολέας

$W_1$ : ο ρυθμός μείωσης του πάχους σε mm/έτος

$W_2$ : ο ρυθμός μείωσης του πάχους χωρίς αναστολέα σε mm/έτος

$W_3$ : ο ρυθμός μείωσης του πάχους με αναστολέα σε mm/έτος

(Ζαχαροπούλου, 2013)

#### 2.5.2.2.1.3. Διαδικασία εφαρμογής αναστολέα διάβρωσης

Η μέχρι τώρα παραδοσιακή διαδικασία επισκευής των διαβρωμένων ράβδων οπλισμού στο σκυρόδεμα περιελάμβανε τα εξής τρία επισκευαστικά προϊόντα:

- Αντιδιαβρωτική προστασία οπλισμού: εφαρμόζεται μετά τον καθαρισμό των οπλισμών από την διάβρωση με αμμοβολή ή με μηχανικό τρίψιμο.
- Γέφυρα πρόσφυσης: εφαρμόζεται έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η πρόσφυση του επόμενου στρώματος αποκατάστασης της αρχικής διατομής.
- Επισκευαστικό κονίαμα: είναι το τελικό προϊόν που εφαρμόζεται έτσι ώστε να αποκατασταθεί η αρχική διατομή του στοιχείου και αυτό να είναι στατικά επαρκές και ανθεκτικό.

Όταν η διάβρωση προκαλείται λόγω επίθεσης χλωριδίων ή λόγω ενανθράκωσης, συνήθως εμφανίζεται νέα διάβρωση στους οπλισμούς στα άκρα της επισκευής, ακριβώς δίπλα στην επισκευασμένη περιοχή. Έτσι, η τεχνική επισκευής με χρήση διεισδυτικών αναστολέων διάβρωσης (MCI's: Migrating Corrosion Inhibitors), έχει ως εξής:

- Γίνεται καθαρισμός των αποσπασμένων τμημάτων του σκυροδέματος.

- Γίνεται καθαρισμός τόσο της επιφάνειας των οπλισμών από την σκουριά, όσο και της επιφάνειας του σκυροδέματος που έχει προκύψει μετά τον αρχικό καθαρισμό. Ο καθαρισμός πρέπει να γίνεται είτε με αμμοβολή, είτε με υδροβολή.
- Εφαρμόζεται αντιδιαβρωτική προστασία του οπλισμού, η οποία είναι προτιμότερο να περιέχει έναν αναστολέα διάβρωσης.
- Γίνεται εφαρμογή του αναστολέα διάβρωσης με ψεκασμό ή με ρολλό στην προετοιμασμένη επιφάνεια του σκυροδέματος, μέχρι το σκυρόδεμα να εμποτισθεί πλήρως και έτσι να περιορισθεί η αρχική ανοδική επίδραση.
- Εφαρμόζεται η γέφυρα πρόσφυσης στο υπόστρωμα, η οποία ενδείκνυται να περιέχει αναστολέα διάβρωσης και η οποία θα βοηθήσει την σύνδεση παλαιού με νέο σκυρόδεμα.
- Εφαρμόζεται το ειδικό επισκευαστικό κονίαμα, το οποίο ενδείκνυται να περιέχει αναστολέα διάβρωσης.
- Τέλος, εφαρμόζεται στην αποκατεστημένη διατομή μία προστατευτική επικάλυψη.

(Ramachandran, 1984) (Παναγιωτίδης, 2011)

### **2.5.2.3. Τροποποιήσεις του ηλεκτροδιακού δυναμικού μετάλλου – περιβάλλοντος**

Οι κυριότερες τρόποι επέμβασης στο ηλεκτροδιακό δυναμικό μετάλλου – περιβάλλοντος είναι οι εξής:

- Καθοδική προστασία
- Ανοδική προστασία
- Χρήση επιστρωμάτων
- Συνδυασμός καθοδικής προστασίας και μονωτικού επιστρώματος

#### **2.5.2.3.1. Καθοδική προστασία**

Η καθοδική προστασία είναι μία μέθοδος που μπορεί να εφαρμοστεί όπου συμβαίνει ηλεκτροχημική διάβρωση, την οποία μπορεί να εμποδίσει ολοκληρωτικά ή έστω να την διατηρήσει σε γνωστό και αποδεκτό επίπεδο. Αυτό επιτυγχάνεται με μείωση της ταχύτητας της διάβρωσης έως και τον μηδενισμό της, μέσω της παροχής ηλεκτρονίων στο μέταλλο.

Το δυναμικό του μετάλλου μετατοπίζεται προς πιο αρνητικές τιμές, ώστε να αποτελέσει την κάθοδο ενός ηλεκτρολυτικού κελιού. Πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι αν το δυναμικό του μετάλλου μετατοπιστεί πολύ αρνητικά, τότε προκαλείται υπερπροστασία, με την έννοια των αυξημένων τιμών της ταχύτητας καθοδικής αντίδρασης. Αποτέλεσμα της υπερπροστασίας είναι είτε η αύξηση του pH με δυσμενείς συνέπειες στην αντοχή των χρωμάτων, είτε η ευθραστοποίηση του μετάλλου που προκαλείται εξαιτίας της παραγωγής υδρογόνου.

(Κουλουμπή, Διάβρωση και Προστασία, 2010) (Revie & Uhlig, 2008) (Baeckmann, Schwenk, & Prinz, 1989)

Η καθοδική προστασία εφαρμόζεται με δύο τρόπους:

- Με θυσιαζόμενες ανόδους

- Με επιβαλλόμενα εξωτερικά ρεύματα

#### 2.5.2.3.2. Ανοδική προστασία

Με την μέθοδο της ανοδικής προστασίας η ταχύτητα διάβρωσης του μετάλλου μειώνεται με την επιβολή ανοδικού ρεύματος μέσω ποτενσιοστάτη. Το δυναμικό του μετάλλου που αποτελεί την άνοδο του ηλεκτρολυτικού κελιού μετατοπίζεται προς ηλεκτροθετικότερη κατεύθυνση σε σχέση με το δυναμικό διάβρωσης. Για την μέθοδο αυτή άριστο δυναμικό θεωρείται το μέσο της παθητικής περιοχής. Η ανοδική προστασία εφαρμόζεται μόνο σε ενεργά – παθητικά μέταλλα και κράματα και μόνο σε ορισμένα περιβάλλοντα. (Ντάφλου, 2012)

#### 2.5.2.3.3. Χρήση επιστρωμάτων

Η χρήση επιστρωμάτων αποτελεί την πιο κοινή μέθοδο αντιδιαβρωτικής προστασίας του σκυροδέματος (οπλισμένου ή μη). Η προστατευτική δράση των διαφόρων τύπων επιστρωμάτων οφείλεται στον προκαλούμενο διαχωρισμό του μετάλλου από το διαβρωτικό του περιβάλλον, στην αύξηση της ηλεκτρικής του αντίστασης ή στην μεταβολή της ανοδικής ή και της καθοδικής πόλωσης και εξαρτάται από το πάχος τους και τις ιδιότητές τους, όπως η αντοχή, η πρόσφυση, η διαπερατότητα, κ.ά. (Bierwagen, 1996) (Molera, Oller, del Vale, & Gonzalez, 2004)

Η επικάλυψη είναι δυνατόν να εφαρμοστεί είτε στην επιφάνεια του χαλύβδινου οπλισμού, είτε στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Επικαλύψεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος προστατεύουν τόσο το σκυρόδεμα, όσο και τον οπλισμό, ενώ επικαλύψεις στην επιφάνεια του οπλισμού προστατεύουν μόνο τον οπλισμό. Στην περίπτωση της επικάλυψης του οπλισμού πρέπει να εξετάζεται και η επίπτωσή του στην συνάφεια μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος. (Ζαχαροπούλου, 2013)

Η εφαρμογή των επιστρωμάτων γίνεται κατόπιν μίας προεργασίας της προς κάλυψη επιφάνειας, η οποία σχετίζεται κυρίως με τον επιμελημένο καθαρισμό της σύμφωνα με τα πρότυπα BS EN ISO 12944:1998. (ISO12944(1-8), 1998)

Συνήθως ο καθαρισμός αυτός περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Απομάκρυνση οργανικών ουσιών (για παράδειγμα λάδια, γράσα) με πτητικούς οργανικούς διαλύτες ή με αλκαλικούς απολιπαντές ή με γαλακτώματα ή με ατμό ή και με υπερήχους
- Απομάκρυνση ανόργανων ουσιών (για παράδειγμα σκουριά, λεβητόλιθος) με μηχανικές, θερμικές και χημικές μεθόδους

(Ντάφλου, 2012)

Τα επιστρώματα μπορεί να είναι:

- Μεταλλικά  
Διακρίνονται από άποψη διάβρωσης, σε περισσότερο ευγενή προς το προστασία μέταλλο και σε λιγότερο ευγενή (θυσιαζόμενα επιστρώματα Zn, Cd, Sn, Al πάνω σε χάλυβα)
- Μη μεταλλικά ανόργανα  
Επιστρώματα χημικής μετατροπής (οξειδία, φωσφορικά, χρωμικά) και η τσιμεντοκονία

- **Οργανικά**

Η επικάλυψη (βαφή) με χρήση οργανικών επικαλύψεων (χρωμάτων) αποτελεί την παλαιότερη μέθοδο προστασίας και διακόσμησης των επιφανειών. Τα χρώματα έχουν το πλεονέκτημα να μην αυξάνουν το βάρος της κατασκευής. Από την άλλη πλευρά όμως οι επιβλαβείς επιδράσεις του περιβάλλοντος στο σκυρόδεμα ενεργούν και στην οργανική επικάλυψη. Τα οργανικά χρώματα που χρησιμοποιούνται στην προστασία του σκυροδέματος είναι χρώματα σιλικόνης, σιλοξάνης, υδατικών διασπορών κυρίως ακρυλικών, πολυμερών ρητινών, χλωριομένου καουτσούκ, καθώς και χρώματα δύο συστατικών, όπως έχει ήδη αναφερθεί ανωτέρω.

(Batis, Kouloumbi, & Soulis, 1998)

#### 2.5.2.3.4. Συνδυασμός καθοδικής προστασίας και μονωτικού επιστρώματος

Ο συνδυασμός της καθοδικής προστασίας με το μονωτικό επίστρωμα (για παράδειγμα χρώμα) είναι συνήθως αποτελεσματικός, γιατί το προστατευτικό ρεύμα αφορά μόνο στις ατέλειες του επιστρώματος και επομένως είναι μικρότερο από ότι στο γυμνό μέταλλο. Ο συνδυασμός αυτός είναι επίσης και οικονομικός, γιατί μικρές ατέλειες του επιστρώματος μπορεί να είναι ανεκτές, ενώ χωρίς την καθοδική προστασία θα έπρεπε το επίστρωμα να είναι απόλυτα πυκνό για να είναι προστατευτικό. (Ντάφλου, 2012)

#### 2.5.3. Επιλογή των μέτρων προστασίας

Η οξειδωση των μετάλλων είναι δράση θερμοδυναμικά αυθόρμητη, αλλά και συνυφασμένη με αναγωγική δράση. Επομένως, η προστασία από τη διάβρωση στοχεύει στην ανάσχεση των οξειδοαναγωγικών δράσεων στο σύστημα διάβρωσης με χρήση της καταλληλότερης μεθόδου. Σκοπός των επεμβάσεων είναι η αποκατάσταση των βλαβών, έτσι ώστε η κατασκευή να διατηρήσει τα λειτουργικά και αισθητικά χαρακτηριστικά της κατά τη διάρκεια της ζωής της. Η επιλογή της μεθόδου προστασίας εξαρτάται από:

- την ηλικία της κατασκευής
- τη μέση ετήσια διακύμανση της σχετικής υγρασίας στην περιοχή
- την ταχύτητα φθοράς της κατασκευής
- τις λειτουργικές απαιτήσεις του υλικού
- τον αναμενόμενο χρηστικό χρόνο ζωής του
- την σκοπούμενη μελλοντική χρήση της κατασκευής
- το κόστος εφαρμογής της μεθόδου

(Υφαντής, 1995)

Προκειμένου να επιτευχθεί ο προβλεπόμενος χρόνος ζωής της κατασκευής πρέπει να γίνει μία σωστή επιλογή των μέτρων προστασίας απέναντι στην διάβρωση. Η επιλογή των μέτρων προστασίας πρέπει να ακολουθεί τους εξής κανόνες:

- Η επιψευδαργύρωση παρουσιάζει καλή συμπεριφορά σε ατμοσφαιρική διάβρωση. Σε υγρές κλιματολογικές συνθήκες πρέπει να προτιμάται η διπλή επιψευδαργύρωση.
- Σε έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα πρέπει να προτιμάται η μέθοδος των οργανικών επικαλύψεων.
- Σε ιδιαίτερα έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα, όταν συνυπάρχουν και ατμοί οργανικών ενώσεων, πρέπει να προτιμώνται χρώματα δύο συστατικών.

Πρέπει ακόμα να λεχθεί ότι η μέθοδος της αντιδιαβρωτικής προστασίας με οργανικές επικαλύψεις συνδυάζεται επιτυχώς με την πυροπροστασία με διογκούμενα χρώματα.

([http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL\\_GUIDES/METAL\\_KATASK/me4\\_2t](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/METAL_KATASK/me4_2t).)



## 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 3.1. Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της αποτελεσματικότητας ενός συγκεκριμένου αναστολέα διάβρωσης, καθώς και η σύγκριση των τρόπων εφαρμογής του ως προς την προστασία που προσφέρει έναντι της διάβρωσης. Ο αναστολέας διάβρωσης εφαρμόστηκε σε δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος, τα οποία έμειναν εμβαπτισμένα σε διαβρωτικό υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου περιεκτικότητας 3,5% w/v για χρονικό διάστημα 403 ημερών.

Το πειραματικό μέρος της εργασίας αυτής περιλαμβάνει την εφαρμογή του αναστολέα διάβρωσης με τρεις διαφορετικούς τρόπους στα προς μελέτη δοκίμια τσιμεντοκονιάματος. Ο έλεγχος της αποτελεσματικότητας του αναστολέα διάβρωσης απέναντι στην διάβρωση μελετήθηκε με τους εξής τρόπους:

- Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα
- Μέθοδος γραμμικής πόλωσης για ηλεκτροχημικό προσδιορισμό της αντίστασης πόλωσης, της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης και της ηλεκτροχημικής (θεωρητικής) απώλειας μάζας του χάλυβα
- Μέτρηση της (βαρυμετρικής) απώλειας μάζας του χάλυβα

### 3.2. Παρασκευή δοκιμίων

#### 3.2.1. Κατηγορίες δοκιμίων

Για το πείραμα αυτό κατασκευάστηκαν 4 ομάδες δοκιμίων οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ως εξής:

- Ομάδα 1 (7 δοκίμια)  
Στα δοκίμια 1 – 7 της Ομάδας 1 δεν εφαρμόστηκε αναστολέας διάβρωσης. Είναι τα δοκίμια αναφοράς (τυφλά).
- Ομάδα 2 (7 δοκίμια)  
Στην επιφάνεια των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος 8 – 14 της Ομάδας 2 εφαρμόστηκαν δύο στρώσεις επιστρώματος με αναστολέα διάβρωσης. Στον οπλισμό δεν εφαρμόστηκε αναστολέας.
- Ομάδα 3 (7 δοκίμια)  
Στους οπλισμούς των δοκιμίων 15 – 21 της Ομάδας 3 εφαρμόστηκε επίστρωμα με αναστολέα διάβρωσης. Στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος δεν εφαρμόστηκε αναστολέας.
- Ομάδα 4 (6 δοκίμια)  
Στα δοκίμια 22 – 27 της Ομάδας 4 εφαρμόστηκε επίστρωμα με τον προς μελέτη αναστολέα διάβρωσης τόσο στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος, όσο και στην επιφάνεια του οπλισμού.

### 3.2.2. Υλικά

#### 3.2.2.1. Χάλυβας

Στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκε χάλυβας της κατηγορίας S500s Tempcore. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 971, οι χάλυβες S500s είναι συγκολλησιμοι και διαθέτουν πλάγιες νευρώσεις (νευροχάλυβες), οι οποίες εξασφαλίζουν υψηλή συνάφεια με το σκυρόδεμα. (Μοροπούλου & Μπατής, 2012)

Οι χάλυβες S500s παρασκευάζονται με την μέθοδο Θερμής Έλασης και Θερμικής Κατεργασίας (Tempcore). Η μέθοδος Tempcore συνίσταται σε μία διαδικασία κατά την οποία, αμέσως μετά την θερμή έλαση σε θερμοκρασία (1000 – 1050) °C, πραγματοποιείται ταχεία και έντονη ψύξη, η οποία προσδίδει μία «βαφή» στο μέταλλο (quenching) σε βάθος από 1,5 έως 2 mm, ενώ το εσωτερικό της διατομής παραμένει διάπυρο κατά την θερμική κατεργασία.

Αποτέλεσμα αυτής της θερμικής κατεργασίας είναι η παραγωγή ενός όλκιμου προϊόντος, λόγω της ύπαρξης του μαλακού πυρήνα στο εσωτερικό της ράβδου και της σκληρής εξωτερικής στοιβάδας που προσδίδει στο υλικό την υψηλή του αντοχή. Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργείται στην επιφάνεια του χάλυβα σκληρή μαρτενσιτική δομή, ενώ ο πυρήνας παραμένει ωστενιτικός. Ο συγκεκριμένος τύπος χάλυβα καλείται και αυτό-επαναφοράς. (Κ.Τ.Χ., 2000)

Μάλιστα, το ίδιο το όνομα των χαλύβων αυτών “Tempcore” αντικατοπτρίζει την αρχή της διαδικασίας με την οποία παρασκευάζονται: επαναφορά (TEMPering = επαναφορά) της ήδη βαμμένης μαρτενσιτικά εξωτερικής στοιβάδας με θερμότητα που παρέχεται από το θερμό εσωτερικό (CORE = καρδιά) της ράβδου.

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μία οικονομική λύση για την παραγωγή συγκολλησιμων χαλύβων οπλισμένου σκυροδέματος υψηλής αντοχής. (Cetinel, Toparli, & Ozsoyeller, 2000)

Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας της εργασίας αυτής κατασκευάστηκαν δοκίμια τσιμεντοκονιάματος ενισχυμένα με χαλύβδινες ράβδους S500s Tempcore, με διάμετρο ράβδων 1 cm και μήκος 10 cm. Επομένως, προκύπτει ότι η επιφάνεια της διατομής των ράβδων ισούται με  $0,785 \text{ cm}^2$  ή αλλιώς με  $0,785 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ .

Η χημική σύσταση (%) των χαλύβδινων ράβδων που χρησιμοποιήθηκαν φαίνεται στον ακόλουθο Πίνακα.

Πίνακας 2: Χημική σύσταση (%) δομικού χάλυβα S500s Tempcore

C	Mn	S	P	Si	Ni	Cr	Cu	V	Mo
0,18	0,99	0,047	0,023	0,15	0,09	0,09	0,21	0,002	0,021

#### 3.2.2.2. Τσιμέντο

Στην παρούσα εργασία για την κατασκευή των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος χρησιμοποιήθηκε σύνθετο τσιμέντο Portland τύπου CEM II 35, η ακριβής σύσταση του οποίου δίνεται στον ακόλουθο Πίνακα.

Πίνακας 3: Ακριβής σύσταση τσιμέντου Portland CEM II

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CaO <sub>(f)</sub>	LOI
20,67	4,99	3,18	63,60	2,73	0,37	0,29	2,414	2,41	2,52

Σύμφωνα με τον ελληνικό κανονισμό τσιμέντου που ισχύει με σχετικό προεδρικό διάταγμα (ΠΔ) από το 1980, προβλέπεται ότι το τσιμέντο τύπου CEM II πρέπει να αποτελείται από τσιμέντο Portland με έως 20% φυσική ή τεχνητή ποζολάνη. Ο αριθμός 35 αναφέρεται στις μηχανικές αντοχές του τσιμέντου. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι αναπτύσσει αντοχές σε θλίψη μεγαλύτερες από 15 N/mm<sup>2</sup> μετά το πέρας 7 ημερών, ενώ μετά από 28 ημέρες η αντοχή του σε θλίψη κυμαίνεται από 25 N/mm<sup>2</sup> έως 45 N/mm<sup>2</sup>. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM (American Standards Testing Materials), ο τύπος τσιμέντου CEM II είναι γενικής χρήσης και προτιμάται όταν απαιτείται ενδιάμεση αντοχή στην επίδραση των θεικών αλάτων ή ενδιάμεση θερμότητα ενυδάτωσης. (Ζαχαροπούλου, 2013)

### 3.2.2.3. Αδρανή

Στο πείραμα αυτό το αδρανές υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος είναι η άμμος, η οποία πληροί τις απαραίτητες προδιαγραφές (EN 12620, EN 13055-1). Η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού, καθώς και η χημική του σύσταση παρουσιάζονται στους ακόλουθους Πίνακες.

Πίνακας 4: Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου

Διάμετρος κόκκων	% Σύσταση
4 mm < d	2,80
2 mm < d < 4 mm	30,60
1 mm < d < 2 mm	25,43
500 μm < d < 1 mm	14,22
250 μm < d < 500 μm	9,42
d < 250 μm	16,53

Πίνακας 5: Χημική σύσταση άμμου

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	LOI
1,4	0,64	0,48	54,6	0,34	0,08	42,4

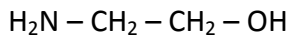
(Ζαχαροπούλου, 2013)

### 3.2.2.4. Νερό

Στο εν λόγω πείραμα για την παρασκευή των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος χρησιμοποιήθηκε απιονισμένο νερό του εργαστηρίου Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.. Γενικά, επειδή η αναλογία του νερού ανάμιξης και συνεπώς και των ουσιών μέσα σε αυτό είναι μικρή, υπάρχει μία ανοχή όσον αφορά στην καθαρότητα του νερού. Ωστόσο, το χρησιμοποιούμενο νερό πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγραφή EN 1008. (Αργύρη, 2014)

### 3.2.2.5. Αναστολέας διάβρωσης

Ο αναστολέας διάβρωσης, ο οποίος εφαρμόστηκε στα δοκίμια των ομάδων 2 (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος), 3 (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του σπλισμού) και 4 (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος και του σπλισμού), είναι η χημική οργανική ένωση αιθανολαμίνη με χημικό τύπο:



Η αιθανολαμίνη ανήκει στην κατηγορία των αλειφατικών αμινών<sup>17</sup>. Είναι ένα τοξικό, εύφλεκτο, άχρωμο (διαφανές) υγρό σε θερμοκρασία δωματίου, με οσμή αμμωνίας και υψηλό ιξώδες.

Όπως έχει και ανωτέρω αναφερθεί, οι αμινοαιθανόλες αποτελούν ένα τυπικό είδος οργανικού ή αλλιώς προσροφητικού αναστολέα διάβρωσης και η δράση τους συνδυάζει τόσο ανοδική, όσο και καθοδική προστασία. Συγκεκριμένα, η αμινοαιθανόλη διεισδύει στο σκληρυμένο σκυρόδεμα από τους πόρους του μέσω διάχυσης και όταν έρθει σε επαφή με τον χαλύβδινο σπλισμό, ροφάται στην επιφάνειά του, σχηματίζοντας ένα μονομοριακό προστατευτικό φιλμ ανάμεσα στο μέταλλο και το νερό των πόρων.

Το σύστημα του πτητικού αναστολέα διάβρωσης εφαρμόστηκε σε δύο στρώσεις.

#### Στρώση 1

Το Tyfo® CIS Layer 1 είναι ένα άχρωμο υγρό ενός συστατικού. Σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά που παρασχέθηκαν από τον κατασκευαστή, είναι η αέρια φάση του αντίστοιχου αναστολέα διάβρωσης επισκευής σκυροδέματος. Μετά την εφαρμογή στην επιφάνεια του σκυροδέματος, η ουσία περνά στην αέρια φάση, διαπερνά το σκυρόδεμα και διανέμεται ομοιόμορφα σχηματίζοντας μία παθητική μεμβράνη επί του χαλύβδινου σπλισμού. Αυτό το στρώμα βρίσκεται σε υγρή μορφή και εφαρμόζεται μέσω ψεκασμού πάνω στο σκυρόδεμα. Επιπλέον, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, οι ιδιότητές της πρώτης στρώσης του προς μελέτη αναστολέα διάβρωσης φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα.

Πίνακας 6: Ιδιότητες της πρώτης στρώσης του προς μελέτη αναστολέα διάβρωσης

Ιδιότητα	Τυπική Τιμή
pH	8,0
Stability	Αλκοόλη, υδρογονάνθρακες
Ειδικό βάρος	0,8
Πτητικότητα	100%

#### Στρώση 2

Σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά, το Tyfo® CIS Layer 2 είναι ένα διαυγές υγρό ενός συστατικού υδατικής βάσης με ήπια οσμή. Μπορεί να εφαρμοστεί

<sup>17</sup> Οι αλειφατικές αμίνες δεν έχουν αρωματικό σύστημα άμεσα ενωμένο με το άτομο αζώτου της αμινομάδας τους.

επαλειφόμενο ή με ψεκασμό μετά από την εφαρμογή του Tyfo® CIS Layer 1. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή η στρώση αυτή ελέγχει το pH, εκκαθαρίζει και ενθυλακώνει τα χλωριόντα που βρίσκονται σε υδατικό διάλυμα και πληρώνει τα κενά στο σκυρόδεμα, αναστέλλοντας την περαιτέρω διείσδυση της υγρασίας. Μπορεί επίσης να ενεργεί ως αναστολέας διάβρωσης απευθείας εφαρμοζόμενος για την ενίσχυση του χάλυβα. Σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του, οι ιδιότητες της δεύτερης στρώσης του προς μελέτη αναστολέα διάβρωσης φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα.

**Πίνακας 7: Ιδιότητες της δεύτερης στρώσης του προς μελέτη αναστολέα διάβρωσης**

<b>Ιδιότητα</b>	<b>Τυπική Τιμή</b>	<b>Μέθοδος Αποτίμησης</b>
Αναστολή διάβρωσης	Μείωση 50% του δυναμικού σε 14 ημέρες (400mV σε 200 mV)	C-876
Αντοχή σε θλίψη	Αύξηση 2000 psi (13,8 MPa)	C-42
Αύξηση σκληρότητας Σε νέο σκυρόδεμα	14%	C-418
Σε αποσαθρωμένο σκυρόδεμα	64%	C-414
Μείωση πορώδους	90%	
Διαλυτότητα	Πλήρης σε νερό	
pH	12,0	
Μείωση διαλυτών χλωριόντων	70%	
Μείωση δραστηριότητας οξέων	90%	
Πυκνότητα	4kg/3,79L	
VOC (Πτητικές οργανικές ενώσεις)	Λιγότερο από 1%	

### 3.2.3. Διαδικασία παρασκευής δοκιμών

Για την παρασκευή των δοκιμών οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Αρχικά οι χαλύβδινοι οπλισμοί καθαρίστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ISO/DIS 8407.3. Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκαν σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος με αναστολέα διάβρωσης για χρονικό διάστημα (10-15) min. Έπειτα, ξεπλύθηκαν με νερό βρύσης, με απιονισμένο νερό και ακολούθως εμβαπτίστηκαν σε ακετόνη και αφέθηκαν να στεγνώσουν. Η διαδικασία αυτή του καθαρισμού του χάλυβα γίνεται με σκοπό την απομάκρυνση των ακαθαρσιών και των οξειδίων από την επιφάνεια των ράβδων και την ενεργοποίηση της επιφάνειας του χάλυβα για καλύτερη επαφή και συνάφεια με το τσιμεντοκονίαμα στο οποίο θα ενσωματωθούν.
- Τα κυλινδρικά καλούπια διαμέτρου 4 cm και ύψους 10 cm, στα οποία επρόκειτο να εγχυθεί το τσιμεντοκονίαμα, πρέπει ομοίως να καθαριστούν μέσα σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος με αναστολέα διάβρωσης και κατόπιν

να ξεπλυθούν με νερό βρύσης και να ξυστεί η εσωτερική επιφάνειά τους με σκοπό την απομάκρυνση των υπολειμμάτων τσιμεντοκονιάματος από προηγούμενα πειράματα.

- Πριν την εισαγωγή τους στο τσιμεντοκονίαμα, οι ράβδοι χάλυβα ζυγίστηκαν σε ψηφιακό ζυγό ισορροπίας με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου, προκειμένου μετά το πέρας του πειράματος να υπολογισθεί η απώλεια μάζας τους λόγω διάβρωσης. Στην φωτογραφία του ακόλουθου Σχήματος απεικονίζεται η διαδικασία της ζύγισης.



Σχήμα 7: Διαδικασία ζύγισης οπλισμών χάλυβα σε ζυγό ισορροπίας

- Μετά την ζύγιση, στους χάλυβες που επρόκειτο να ενσωματωθούν στα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος των ομάδων 3 και 4, εφαρμόστηκε επίστρωμα με τον προς μελέτη αναστολέα διάβρωσης και εν συνεχεία αφέθηκαν να ξηρανθούν.
- Για την παρασκευή των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος αναμίχθηκαν τσιμέντο, αδρανή (άμμος) και νερό σε αναλογία 1:3:0,5. Αφού το μίγμα αυτό ανακατεύθηκε πολύ καλά, εγχύθηκε στα κυλινδρικά καλούπια και αμέσως εισήχθη σε καθένα από αυτά μία χαλύβδινη ράβδος, με τρόπο τέτοιο ώστε 2 cm της ράβδου να προεξέχουν από το τσιμεντοκονίαμα.
- Στη συνέχεια, αφέθηκαν για τρεις ημέρες προκειμένου το νωπό τσιμεντοκονίαμα να στερεοποιηθεί. Μετά το πέρας των τριών αυτών ημερών τα δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος απομακρύνθηκαν από τα καλούπια (ξεκαλουπώθηκαν). Αμέσως μετά τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε λεκάνες με νερό, όπου και παρέμειναν για μερικές ημέρες έτσι ώστε να ενυδατωθούν.

- Μετά την ενυδάτωση, για να καταστεί δυνατή η λήψη μετρήσεων με ηλεκτροχημικές μεθόδους για το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα και την αντίσταση γραμμικής πόλωσης, ήταν απαραίτητη η δημιουργία ηλεκτρικής γέφυρας μεταξύ του οπλισμού και του ηλεκτροδίου μέτρησης. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού ένα μικρό κομμάτι σύρματος χαλκού περίπου 10 cm τυλίχθηκε γύρω από το ελεύθερο (πάνω) άκρο του οπλισμού στα δοκίμια του τσιμεντοκονιάματος.
- Ύστερα, το ελεύθερο άκρο του οπλισμού, στο οποίο τυλίχθηκε το σύρμα χαλκού, έπρεπε να μονωθεί από το περιβάλλον. Για την επίτευξη της μόνωσης αρχικά τοποθετήθηκε γύρω από το ελεύθερο άκρο κάθε ράβδου ένας μικρός πλαστικός κύλινδρος με μήκος (3-4) cm και διάμετρο ελάχιστα μεγαλύτερη από αυτήν της ράβδου του χάλυβα. Στο κενό που προέκυψε μεταξύ δοκιμίου τσιμεντοκονιάματος, ράβδου χάλυβα και πλαστικού σωλήνα εγχύθηκε ένα μίγμα από δύο κόλλες εποξειδικών ρητινών σε αναλογία 100:80. Το αποτέλεσμα ήταν τόσο η άνω επιφάνεια κάθε δοκιμίου, όσο και το εσωτερικό των πλαστικών ράβδων μαζί με το ελεύθερο άκρο κάθε ράβδου να καλυφθεί πλήρως από το μίγμα κόλλας, με στόχο την επιτυχή μόνωση του οπλισμού. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτής, τα δοκίμια αφέθηκαν και πάλι για να στεγνώσει η κόλλα.
- Αφού στέγνωσε το μίγμα κόλλας σε όλα τα δοκίμια, η επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος των δοκιμίων των ομάδων 2 και 4 καθαρίστηκε μηχανικά (τρίψιμο με βούρτσα) και εν συνεχεία επικαλύφθηκε με επίστρωμα, το οποίο περιείχε τον προς μελέτη αναστολέα διάβρωσης. Συγκεκριμένα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εφαρμόστηκαν δύο στρώσεις επικάλυψης με τον αναστολέα διάβρωσης με χρονική απόσταση 30 λεπτών μεταξύ τους. Έπειτα, τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4 αφέθηκαν μέχρι να στεγνώσουν πλήρως.
- Αφού τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4 στέγνωσαν πλήρως, όλα τα δοκίμια και των τεσσάρων ομάδων τοποθετήθηκαν μέσα σε δοχεία με υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου περιεκτικότητας 3,5% w/v. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε λεκάνη για 2L απιονισμένου νερού διαλύθηκαν 70g NaCl. Το ύψος του υδατικού διαλύματος μέσα στα δοχεία έφτανε περίπου μέχρι το ¼ του ύψους των δοκιμίων. Το διάλυμα αυτό του χλωριούχου νατρίου αποτελεί το διαβρωτικό περιβάλλον για τα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος. Τα δοκίμια των ομάδων 1 και 3, τα οποία δεν είχαν επαλειφθεί εξωτερικά με αναστολέα διάβρωσης, παρέμειναν μαζί με κοινό δοχείο, ενώ τα υπόλοιπα δοκίμια των ομάδων 2 και 4, τα οποία είχαν επαλειφθεί εξωτερικά με αναστολέα διάβρωσης, τοποθετήθηκαν μαζί στο έτερο δοχείο.
- Τα δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος που παρασκευάστηκαν ήταν συνολικά 27 και όπως έχει και ανωτέρω αναφερθεί ανήκουν στις εξής 4 κατηγορίες:
  - α. Ομάδα 1 (7 δοκίμια)  
Στα δοκίμια 1 – 7 της Ομάδας 1 δεν εφαρμόστηκε αναστολέας διάβρωσης. Είναι τα δοκίμια αναφοράς (τυφλά).
  - β. Ομάδα 2 (7 δοκίμια)

Στην επιφάνεια των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος 8 – 14 της Ομάδας 2 εφαρμόστηκαν δύο στρώσεις επιστρώματος με αναστολέα διάβρωσης. Στον οπλισμό δεν εφαρμόστηκε αναστολέας.

γ. Ομάδα 3 (7 δοκίμια)

Στους οπλισμούς των δοκιμών 15 – 21 της Ομάδας 3 εφαρμόστηκε επίστρωμα με αναστολέα διάβρωσης. Στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος δεν εφαρμόστηκε αναστολέας.

δ. Ομάδα 4 (6 δοκίμια)

Στα δοκίμια 22 – 27 της Ομάδας 4 εφαρμόστηκε επίστρωμα με τον προς μελέτη αναστολέα διάβρωσης τόσο στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος, όσο και στην επιφάνεια του οπλισμού.

- Τα δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος παρέμειναν μέσα στα δοχεία με το υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου για χρονικό διάστημα 403 ημερών και συγκεκριμένα από τις 15/4/2014 έως και τις 22/5/2015. Κατά τη διάρκεια του πειράματος ελήφθησαν 30 μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης και 6 μετρήσεις αντίστασης πόλωσης με την μέθοδο της γραμμικής πόλωσης.
- Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι την 210<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος, δηλαδή στις 10/11/2014 έγινε θραύση δύο δοκιμών τσιμεντοκονιάματος από κάθε ομάδα προκειμένου να αφαιρεθεί ο οπλισμός. Οι χαλύβδινες ράβδοι, αφού αφαιρέθηκαν από το τσιμεντοκονίαμα, καθαρίστηκαν πάλι σύμφωνα με το πρότυπο ISO/DIS 8407.3. Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκαν σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος με αναστολέα διάβρωσης για χρονικό διάστημα (10-15) min. Έπειτα, ξεπλύθηκαν με νερό βρύσης, τρίφτηκαν μηχανικά με βούρτσα για την απομάκρυνση των προϊόντων σκουριάς από τις ράβδους χάλυβα, κατόπιν ξεπλύθηκαν με απιονισμένο νερό και ακολούθως εμβαπτίστηκαν σε ακετόνη και αφέθηκαν να στεγνώσουν. Η διαδικασία αυτή του καθαρισμού του χάλυβα γίνεται με σκοπό την απομάκρυνση όλων των υπολειμμάτων σκουριάς και των οξειδίων από την επιφάνεια των ράβδων, έτσι ώστε η μέτρηση της απώλειας μάζας να είναι ακριβής. Στη συνέχεια, οι ράβδοι χάλυβα ζυγίστηκαν σε ψηφιακό ζυγό ισορροπίας με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου προκειμένου να υπολογισθεί η απώλεια της μάζας τους λόγω διάβρωσης.
- Την 218<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος, δηλαδή στις 18/11/2014, έγινε αντικατάσταση του υπάρχοντος υδατικού διαλύματος χλωριούχου νατρίου περιεκτικότητας 3,5% w/v με καινούργιο στο δοχείο που περιείχε τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4, τα οποία είχαν επαλειφθεί εξωτερικά με αναστολέα διάβρωσης. Αντίστοιχα, την 234<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος, δηλαδή στις 4/12/2014, έγινε ομοίως αντικατάσταση και του υδατικού διαλύματος χλωριούχου νατρίου του έτερου δοχείου με τα δοκίμια των ομάδων 1 και 3, τα οποία δεν είχαν επαλειφθεί εξωτερικά με αναστολέα διάβρωσης.
- Τέλος, την τελευταία 403<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος έγινε θραύση όλων των υπολειπομένων δοκιμών τσιμεντοκονιάματος όλων των ομάδων προκειμένου να αφαιρεθεί, κατόπιν να καθαριστεί και εν συνεχεία να ζυγισθεί ο οπλισμός τους, με σκοπό να υπολογισθεί η απώλεια της μάζας τους λόγω διάβρωσης, με τον ακριβή τρόπο που περιγράφηκε ανωτέρω.



### 3.3. Μέθοδοι εκτίμησης της διάβρωσης του οπλισμού

Υπάρχουν πολλές έμμεσες μέθοδοι για την μέτρηση της διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα, κάποιες εκ των οποίων είναι ηλεκτροχημικές, ενώ κάποιες άλλες όχι. Τα αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών μεθόδων, καθώς και η απώλεια μάζας και ο ρυθμός διάβρωσης μπορούν να δώσουν μία πρόβλεψη για την διάρκεια ζωής των κατασκευών.

Η αποτελεσματικότητα του προς μελέτη αναστολέα διάβρωσης εκτιμήθηκε με χρήση των παρακάτω μεθόδων:

- Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα
- Μέθοδος γραμμικής πόλωσης για ηλεκτροχημικό προσδιορισμό της αντίστασης πόλωσης, της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης και της ηλεκτροχημικής (θεωρητικής) απώλειας μάζας του χάλυβα
- Μέτρηση της (βαρυμετρικής) απώλειας μάζας του χάλυβα

(Alghamdi & Ahmad)

#### 3.3.1. Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης

Το δυναμικό διάβρωσης ή αλλιώς δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας της διάβρωσης και προσδιορίζεται από το άθροισμα των συνολικών ηλεκτροχημικών δράσεων οξειδωσης και αναγωγής. Αποτελεί μία ποιοτική, μη καταστρεπτική (έμμεση) ηλεκτροχημική μέθοδο, η οποία δείχνει την προδιάθεση για διάβρωση, όχι όμως και την ταχύτητά της. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την παρακολούθηση και τον χαρακτηρισμό της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα συναρτήσει του χρόνου.

Η μέθοδος της μέτρησης του δυναμικού διάβρωσης είναι γρήγορη και απλή στην εφαρμογή της και για αυτόν άλλωστε τον λόγο χρησιμοποιείται ευρέως. Βέβαια, η εφαρμογή και η ερμηνεία της μεθόδου πρέπει να γίνεται από ειδικευμένο προσωπικό. Ενανθρακωμένο ή χλωριωμένο περιβάλλον συνεπάγονται αλλοιώσεις στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Η χρονική εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης για μακρές περιόδους προσφέρει αξιόπιστα στοιχεία για την πιθανότητα να διαβρωθούν τα μέταλλα.

(<http://ikaros.teipir.gr/phyche/Subjects/Routoulas/Petyl/%D0%C5%D4%D5%CB%20%CA%C5%D63%C1.pdf>)

Το δυναμικό διάβρωσης εξαρτάται από:

- τον τύπο του μετάλλου
- τις συνθήκες του περιβάλλοντος έκθεσης (υγρασία, pH, συγκέντρωση αλάτων)
- τη διαθεσιμότητα σε οξυγόνο
- τα επαγόμενα ρεύματα
- την θερμοκρασία

Η παθητική και η ενεργή περιοχή του χάλυβα σχηματίζουν ένα μικρογαλβανικό στοιχείο με άνοδο την περιοχή όπου διαβρώνεται ο χάλυβας και κάθοδο την

παθητική περιοχή. Η διαφορά δυναμικού του δημιουργούμενου στοιχείου (διαφορά δυναμικού  $\Delta V$  μεταξύ παθητικής και ενεργής περιοχής) παίρνει τιμές μερικών εκατοντάδων mV. Το προκύπτον ρεύμα  $I$  από τον σχηματισμό του γαλβανικού στοιχείου προσδιορίζεται από την αντίσταση του σκυροδέματος, καθώς και το άθροισμα των αντιστάσεων της ανοδικής και της καθοδικής αντίδρασης.

$$I = \frac{\Delta V}{R_E + R_A + R_C}$$

όπου,

$I$ : Ρεύμα διάβρωσης από την άνοδο προς την κάθοδο

$\Delta V$ : Διαφορά δυναμικού μικρογαλβανικού στοιχείου

$R_E$ : Ηλεκτρική αντίσταση σκυροδέματος

$R_A$ : Αντίσταση ανοδικής αντίδρασης

$R_C$ : Αντίσταση καθοδικής αντίδρασης

Οι παράγοντες που επιδρούν στην μέτρηση της διαφοράς δυναμικού είναι:

- Το πάχος επικάλυψης των οπλισμών  
Αυξανόμενου του πάχους επικάλυψης του οπλισμού, οι τιμές του δυναμικού στην ανοδική και καθοδική περιοχή γίνονται σχεδόν ίσες. Επίσης, μικρής έκτασης ανοδικές περιοχές δεν είναι εύκολο να προσδιορισθούν όταν το πάχος επικάλυψης των οπλισμών στην κατασκευή είναι μεγάλο.
- Η αντίσταση του σκυροδέματος  
Σε σκυρόδεμα υψηλής αντίστασης το μετρούμενο δυναμικό είναι ηλεκτροθετικότερο από το πραγματικό, με συνέπεια να μην εντοπίζονται οι περιοχές διάβρωσης.

Μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στην διάβρωση έχει εκείνο το μέταλλο, για το οποίο το δυναμικό διάβρωσης μένει σταθερότερο για ίδιες συνθήκες. Γρήγορη πτώση του δυναμικού διάβρωσης υποδηλώνει γρήγορο σχηματισμό προϊόντος διάβρωσης. Την πτώση αυτή ακολουθεί συνήθως απότομη αύξηση του δυναμικού διάβρωσης, λόγω ρήξης του στρώματος του προϊόντος διάβρωσης.

(<http://ikaros.teipir.gr/phyche/Subjects/Routoulas/Petyl/%D0%C5%D4%D5%CB%20%CA%C5%D63%C1.pdf>)

Η χρονική εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα ως προς κάποιο ηλεκτρόδιο αναφοράς προσφέρει πληροφορίες σχετικά με την πιθανότητα διάβρωσης του χάλυβα. Ως ηλεκτρόδια αναφοράς χρησιμοποιούνται συνήθως το ηλεκτρόδιο καλομέλινα SCE [Hg/HgCl/KCl], το ηλεκτρόδιο χαλκού – θειικού χαλκού, καθώς και το ηλεκτρόδιο αργύρου – χλωριούχου αργύρου. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα ολοκληρωμένο κλειστό ηλεκτρικό κύκλωμα για τον προσδιορισμό της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του οπλισμού στο σκυρόδεμα ως

προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς. Για την μέθοδο αυτή γίνεται χρήση απλού ή ψηφιακού βολτόμετρου. (Ζαχαροπούλου, 2013)

Η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης παρέχει πληροφορίες για την σχετική τάση διάβρωσης μεταξύ διαφόρων μετάλλων, ενώ η χρονική εξέλιξή του αποκαλύπτει την προδιάθεση είτε μειωμένης διάβρωσης (σχηματισμός προστατευτικού οξειδίου) όταν μετατοπίζεται ηλεκτροθετικά, είτε αυξημένης διάβρωσης όταν μετατοπίζεται ηλεκτροαρνητικά με την πάροδο του χρόνου. Η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης δίνει επίσης διάφορες επιπρόσθετες πληροφορίες, όπως για παράδειγμα για το ποιο μέταλλο θα είναι ανοδικό στην περίπτωση της γαλβανικής σύνδεσης ή για την επίδραση μικροσκοπικών ετερογενειών στο μέταλλο (μέτρηση  $E_{corr}$  σε ορισμένες περιοχές της μεταλλικής επιφάνειας με μικροηλεκτρόδια) ή για τις πιθανές θέσεις των ανοδικών περιοχών σε ένα θαμμένο σωλήνα. (Ντάφλου, 2012)

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87 “Standard test method for Half Cell Potentials of reinforcing steel in Concrete”, οι τιμές του μετρούμενου δυναμικού διάβρωσης αποτελούν την ένδειξη για την κατάσταση του σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα, καθώς και για την προδιάθεσή του για διάβρωση. Στον ακόλουθο Πίνακα δίνεται η συσχέτιση μεταξύ των τιμών του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς χαλκού – θεικού χαλκού (CSE) και της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87.

Πίνακας 8: Συσχέτιση των τιμών του δυναμικού διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού και της κατάστασής του μέσα στο σκυρόδεμα, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87

Δυναμικό διάβρωσης χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος προς ηλεκτρόδιο Cu/CuSO <sub>4</sub> , sat (mV)	Κατάσταση οπλισμού
$E_{corr} > -200$ mV CSE	Ο οπλισμός βρίσκεται σε παθητική κατάσταση, κατά 90% πιθανότητα δεν συμβαίνει διάβρωση
$-200$ mV CSE $> E_{corr} > -350$ mV CSE	Η κατάσταση του οπλισμού θεωρείται αβέβαιη (αβέβαιο αν συμβαίνει ή όχι διάβρωση)
$E_{corr} < -350$ mV CSE	Ο οπλισμός βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση, κατά 90% πιθανότητα συμβαίνει διάβρωση

(<http://ikaros.teipir.gr/phycha/Subjects/Routoulas/Petyl/%D0%C5%D4%D5%CB%20%CA%C5%D63%C1.pdf>)

### 3.3.2. Μέθοδος γραμμικής πόλωσης

Ο προσδιορισμός της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης μπορεί να γίνει με διάφορες ηλεκτροχημικές μεθόδους, η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη εκ των οποίων είναι η τεχνική της γραμμικής πόλωσης (Linear Polarization Technique).

### Τεχνική της λήψης καμπυλών πόλωσης (Linear Polarization Technique)

Οι καμπύλες πόλωσης είναι καμπύλες δυναμικού σε συνάρτηση με το ρεύμα διάβρωσης  $E = f(I)$  ή ρεύματος σε συνάρτηση με το δυναμικό  $I = f(E)$  και γράφονται:

- Έντασιοστατικά  
Ένα ορισμένο ποσό ρεύματος περνάει από ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο στο ηλεκτρόδιο εργασίας και μετράται το δυναμικό του ηλεκτροδίου εργασίας ως προς κάποιο ηλεκτρόδιο αναφοράς.
- Δυναμοστατικά  
Ένα σταθερό δυναμικό εφαρμόζεται μεταξύ ηλεκτροδίου εργασίας και ηλεκτροδίου αναφοράς και μετράται η μεταβολή της έντασης του ρεύματος.
- Δυναμοδυναμικά  
Το δυναμικό του ηλεκτροδίου μεταβάλλεται συνεχώς και καταγράφεται το αντίστοιχο ρεύμα.

Μία καμπύλη πόλωσης δίνει τις ακόλουθες πληροφορίες για ένα παθητικό μέταλλο:

- Δυνατότητα του μετάλλου να παθητικοποιηθεί αυθόρμητα σε ορισμένο περιβάλλον
- Την περιοχή του δυναμικού στην οποία το δοκίμιο παραμένει παθητικό
- Την ταχύτητα διάβρωσης (ρεύμα διάβρωσης) στην παθητική περιοχή
- Την πιθανότητα έντονων βελονισμών (διάβρωση στην υπερπαθητική περιοχή)

Αντίστοιχα, οι πληροφορίες που δίνει μία καμπύλη πόλωσης για ένα ενεργό (μη παθητικό) μέταλλο είναι οι εξής:

- Την ταχύτητα διάβρωσης
- Συγκριτικά την αντοχή στην διάβρωση διαφόρων γυμνών ή επικαλυμμένων δοκιμίων

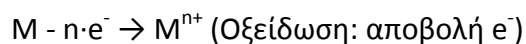
Για την μέτρηση των απόλυτων ταχυτήτων διάβρωσης χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές λήψης των καμπυλών πόλωσης:

- Η τεχνική γραμμικής πόλωσης
- Η τεχνική προεκβολής του Tafel

Οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις βασίζονται στην ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης και μετρούν τις ηλεκτρικές ιδιότητες της ηλεκτρισμένης διπλοστοιβάδας, δηλαδή της διεπιφάνειας μετάλλου/διαλύματος. Επιτρέπουν την διερεύνηση του μηχανισμού της διάβρωσης, την παρακολούθηση, καθώς και τον έλεγχο. Η κινητική των ηλεκτροχημικών δράσεων ενός μετάλλου, το οποίο διαβρώνεται, μπορεί να προσδιορισθεί από τουλάχιστον τρεις παραμέτρους:

- την πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης  $i_{corr}$
- το δυναμικό διάβρωσης  $E_{corr}$
- τις σταθερές Tafel ( $\beta_\alpha$  και  $\beta_c$ )

Η συμπεριφορά του μετάλλου μπορεί να απεικονιστεί από τις καμπύλες πόλωσης ( $E - I$ ). Η εκτίμηση των παραπάνω παραμέτρων οδηγεί στον προσδιορισμό της αντίστασης πόλωσης  $R_p$  και του ρυθμού διάβρωσης. Έστω ότι κατά την διάβρωση ενός μετάλλου  $M$  ισχύουν οι εξής αντιδράσεις:



Υπολογίζεται η ένταση ρεύματος ή το φορτίο του ρεύματος που πέρασε από το κύκλωμα σε ορισμένο χρονικό διάστημα ( $Q = I \cdot t$ ). Το κύκλωμα αποτελείται από το μέταλλο που διαβρώνεται και ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο από αδρανές αέριο (για παράδειγμα γραφίτη ή λευκόχρυσο). Τα δύο αυτά ηλεκτρόδια (μέταλλο και βοηθητικό) τοποθετούνται στο προς εξέταση διαβρωτικό περιβάλλον. Εάν η τιμή της έντασης διάβρωσης συνδυαστεί με την τιμή του δυναμικού διάβρωσης οδηγεί σε βεβαιότερη πρόβλεψη για την συμπεριφορά σε διάβρωση των συγκρινόμενων μετάλλων, σε σχέση με αυτήν που προκύπτει μόνο από την τιμή του δυναμικού διάβρωσης. Για σίγουρη όμως πρόβλεψη απαιτείται η προσφυγή και σε άλλες μεθόδους. Όπως στην περίπτωση του δυναμικού διάβρωσης, έτσι και στην περίπτωση της έντασης του ρεύματος διάβρωσης παρακολουθείται η τιμή της έντασης του ρεύματος διάβρωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται να προσδιορισθεί πρώτα το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα (αναμονή μέχρι επίτευξη ισορροπίας).

Στην περίπτωση της δυναμοστατικής μεθόδου εφαρμόζονται στον χάλυβα διάφορα δυναμικά, πολύ κοντά στο δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα, συγκεκριμένα μέχρι και 25 mV εκατέρωθεν του δυναμικού διάβρωσής του, αλλά συνηθέστερα 10 mV και κατόπιν μετράται η ένταση του αντίστοιχου ρεύματος. Καταγράφεται η καμπύλη του δυναμικού  $V$  ως προς την ένταση του ρεύματος  $I$ . Η καμπύλη πόλωσης  $E - I$  για μικρές μεταβολές του εφαρμοζόμενου δυναμικού είναι περίπου ευθεία γραμμή. Αυτό συμβαίνει επειδή στην περιοχή της χαμηλής υπέρτασης ισχύει η προσεγγιστική μορφή της εξίσωσης Butler – Volmer. Η κλίση της ευθείας δίνει την αντίσταση πόλωσης  $R_p$ .

Η εξίσωση Butler – Volmer περιγράφει το πώς η ένταση του ρεύματος σε ένα ηλεκτρόδιο εξαρτάται από το δυναμικό του ηλεκτροδίου, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι τόσο η ανοδική, όσο και η καθοδική αντίδραση πραγματοποιούνται επάνω στον ίδιο ηλεκτρόδιο. Συγκεκριμένα, το ρεύμα μίας αντίδρασης μεταφοράς φορτίου ισούται με:

$$I = A \cdot j_0 \cdot \left\{ \exp \left[ \frac{\alpha_a n F}{RT} (E - E_{eq}) \right] - \exp \left[ - \frac{\alpha_c n F}{RT} (E - E_{eq}) \right] \right\}$$

Και σε πιο συμπαγή μορφή:

$$j = j_0 \cdot \left\{ \exp \left[ \frac{\alpha_a n F \eta}{RT} \right] - \exp \left[ - \frac{\alpha_c n F \eta}{RT} \right] \right\}$$

όπου,

*I*: η ένταση ρεύματος του ηλεκτροδίου (A)  
*A*: η ενεργή επιφάνεια του ηλεκτροδίου (m<sup>2</sup>)  
*j*: η πυκνότητα ρεύματος του ηλεκτροδίου (A/m<sup>2</sup>)  
*j<sub>o</sub>*: η πυκνότητα του ρεύματος εναλλαγής (A/m<sup>2</sup>)  
*E*: το δυναμικό του ηλεκτροδίου (V)  
*E<sub>eq</sub>*: το δυναμικό ισορροπίας (V)  
*T*: η απόλυτη θερμοκρασία (K)  
*n*: ο αριθμός των ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην αντίδραση επάνω στο ηλεκτρόδιο  
*F*: η σταθερά Faraday  
*R*: η παγκόσμια σταθερά των αερίων  
*a<sub>c</sub>*: ο λεγόμενος καθοδικός συντελεστής μεταφοράς φορτίου (αδιάστατος)  
*a<sub>a</sub>*: ο λεγόμενος ανοδικός συντελεστής μεταφοράς φορτίου (αδιάστατος)  
*η*: το υπερδυναμικό ενεργοποίησης ( $\eta = E - E_{eq}$ )

Μετά από επεξεργασία της εξίσωσης Butler – Volmer προκύπτει ότι αντίσταση πόλωσης ισούται με:

$$R_p = \left( \frac{di}{dE} \right)_{E=E_{corr}}^{-1} = \left( \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303 \cdot i_{corr} \cdot (\beta_a + \beta_c)} \right) = \frac{B}{i_{corr}}$$

Από την σχέση αυτή φαίνεται ότι η αντίσταση πόλωσης *R<sub>p</sub>* είναι αντιστρόφως ανάλογη της πυκνότητας ρεύματος.

*B* είναι η σταθερά Stern – Geary, η οποία ισούται με:

$$B = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303 \cdot i_{corr} \cdot (\beta_a + \beta_c)}$$

Η εξίσωση αυτή αποτελεί μία άλλη μορφή της εξίσωσης Butler – Volmer, η οποία ποσοτικοποιεί τις κινητικές παραμέτρους της ηλεκτροχημικής διάβρωσης. Η σταθερά *B* συνδέεται με την ανοδική σταθερά Tafel *β<sub>a</sub>* και με την καθοδική σταθερά Tafel *β<sub>c</sub>*. Για το οπλισμένο σκυρόδεμα οι τιμές της σταθεράς *B* κυμαίνονται στο εύρος τιμών (26 – 52) mV, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο οπλισμός μέσα στο σκυρόδεμα. Όταν ο οπλισμός βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση, τότε *B* = 26 mV, ενώ όταν ο οπλισμός βρίσκεται σε παθητική κατάσταση, τότε *B* = 52 mV.

Παθητικότητα στον χάλυβα υπάρχει όταν η μεταβολή Δ*E*/Δ*I* είναι μεγάλη, γιατί αυτό σημαίνει μεγάλη αντίσταση πόλωσης *R<sub>p</sub>*.

Η συσχέτιση των μετρήσεων γραμμικής πόλωσης με την κατάσταση του χαλύβδινου οπλισμού δίνεται από κριτήρια που αναπτύχθηκαν βάσει εργαστηριακών δοκιμών και συνοψίζονται στους δύο ακόλουθους Πίνακες.

**Πίνακας 9: Συσχέτιση πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης με την κατάσταση του χαλύβδινου οπλισμού του σκυροδέματος**

<b><i>i<sub>corr</sub></i> (μA/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Κατάσταση οπλισμού</b>
<i>i<sub>corr</sub></i> < 0,1	Παθητική κατάσταση
0,1 < <i>i<sub>corr</sub></i> < 0,5	Χαμηλός έως μέτριος ρυθμός διάβρωσης

$0,5 < i_{corr} < 1$	Μέτριος έως υψηλός ρυθμός διάβρωσης
$i_{corr} > 1$	Υψηλός ρυθμός διάβρωσης

Πίνακας 10: Συσχέτιση πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης με την πιθανότητα διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού του σκυροδέματος

$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Κατάσταση οπλισμού
$i_{corr} < 0,2$	Δεν αναμένονται φαινόμενα διάβρωσης
$0,2 < i_{corr} < 1$	Πιθανότητα διάβρωσης σε 10-15 χρόνια
$1 < i_{corr} < 10$	Πιθανότητα διάβρωσης σε 2-10 χρόνια
$i_{corr} > 10$	Πιθανότητα διάβρωσης σε 2 χρόνια ή λιγότερο

Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής της γραμμικής πόλωσης είναι τα εξής:

- Η ταχύτητά της: είναι πολύ χρήσιμη ιδιαίτερα για μικρότερης ακρίβειας πειράματα, όπως για παράδειγμα η ποιοτική εκτίμηση διαφόρων αναστολέων.
- Είναι μη καταστρεπτική μέθοδος: επειδή η πόλωση που εφαρμόζεται είναι μικρή, η επιφάνεια του δοκιμίου δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα.
- Οι μετρήσεις του ποσοστού διάβρωσης που προκύπτουν από την τεχνική αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές, οι οποίες δεν μπορούν να ελεγχθούν οπτικά ή να υποβληθούν σε δοκιμές απώλειας μάζας, όπως για παράδειγμα σε υπόγειους αγωγούς και δεξαμενές ή σε τμήματα μεγάλων χημικών εγκαταστάσεων (εργοστασίων).
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ακριβείς μετρήσεις πολύ μικρών ποσοστών διάβρωσης (corrosion rate) και συγκεκριμένα μικρότερων από 0,1 mpy, που είναι δύσκολο να πραγματοποιηθούν με συμβατικές τεχνικές απώλειας μάζας ή τεχνικές αναλυτικής χημείας. Η μέτρηση χαμηλών ποσοστών διάβρωσης είναι ιδιαίτερα σημαντική σε πυρηνικές και φαρμακευτικές βιομηχανίες, αλλά και σε βιομηχανίες τροφίμων, όπου ακόμα και ίχνη ακαθαρσιών και μόλυνσης αποτελούν μεγάλο πρόβλημα.
- Οι ωμικές πτώσεις τάσης είναι αμελητέες.

(Κουλουμπή, Ηλεκτροχημεία, 2005) (Ντάφλου, 2012) (Ζαχαροπούλου, 2013)

### 3.3.3. Μέτρηση της απώλειας μάζας

Για τον υπολογισμό της βαρυμετρικής απώλειας μάζας του χαλύβδινου οπλισμού του σκυροδέματος ως αρχική μάζα λαμβάνεται η μάζα του οπλισμού πριν από την έκθεσή του στο διαβρωτικό περιβάλλον και ως τελική μάζα λαμβάνεται η μάζα του οπλισμού μετά από την έκθεσή του στο διαβρωτικό περιβάλλον, αφού πρώτα απομακρυνθούν από αυτόν τα οξείδια (προϊόντα σκουριάς). Η διαφορά μάζας προκύπτει από την διαφορά της αρχικής μείον την τελική τιμή της μάζας του οπλισμού. Η εκτίμηση της διάβρωσης γίνεται με την βοήθεια του υπολογισμού του ποσοστού επί τοις εκατό της μεταβολής μάζας των οπλισμών, καθώς επίσης και από τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης. Το ποσοστό επί τοις εκατό της μεταβολής μάζας των οπλισμών δίνεται από την σχέση:

$$\Delta m(\%) = \frac{m_{\alpha\rho\chi} - m_{\tau\epsilon\lambda}}{m_{\alpha\rho\chi}} \cdot 100\%$$

Από την διαφορά  $m_{\alpha\rho\chi} - m_{\tau\epsilon\lambda}$ , καθώς επίσης και από άλλα μεγέθη που σχετίζονται με τον οπλισμό και την διάρκεια έκθεσής του στο διαβρωτικό περιβάλλον εκτιμάται και ο ρυθμός διάβρωσης σε  $\mu\text{m}/\text{έτος}$  ως εξής:

$$\text{Ρυθμός διάβρωσης} = \frac{8,76 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta m}{A \cdot D \cdot T}$$

όπου,

$$\Delta m = m_{\alpha\rho\chi} - m_{\tau\epsilon\lambda} \text{ (g)}$$

A: η συνολική εκτεθειμένη επιφάνεια του οπλισμού ( $A = \pi \cdot \frac{d^2}{2} + \pi \cdot d \cdot h = \pi \cdot d \cdot (\frac{d}{2} + h)$ ) ( $\text{cm}^2$ )

D: η πυκνότητα του δομικού χάλυβα ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

T: χρόνος έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον (h)

Για τον προσδιορισμό της μάζας των χαλύβδινων οπλισμών σκυροδέματος πρέπει πριν την έκθεσή τους στο περιβάλλον διάβρωσης να καθαρισθούν με διάλυμα υδροχλωρικού οξέος που περιέχει αναστολέα διάβρωσης, έτσι ώστε να απομακρυνθούν τυχόν οξείδια ή ακαθαρσίες από την επιφάνειά τους. Στην συνέχεια οι οπλισμοί ξεπλένονται με απιονισμένο νερό και εμβαπτίζονται σε ακετόνη με σκοπό την απομάκρυνση των λιπαρών ουσιών από την επιφάνειά τους. Τέλος, ζυγίζονται σε ζυγό ισορροπίας με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου σύμφωνα με το πρότυπο ISO/DIS 8407.3.

### 3.4 Αποτελέσματα μετρήσεων

Υπενθυμίζεται ότι για το πείραμα αυτό κατασκευάστηκαν 4 ομάδες δοκιμών οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ως εξής:

- Ομάδα 1 (7 δοκίμια)  
Στα δοκίμια 1 – 7 της Ομάδας 1 δεν εφαρμόστηκε αναστολέας διάβρωσης. Είναι τα δοκίμια αναφοράς (τυφλά).
- Ομάδα 2 (7 δοκίμια)  
Στην επιφάνεια των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος 8 – 14 της Ομάδας 2 εφαρμόστηκαν δύο στρώσεις επιστρώματος με αναστολέα διάβρωσης. Στον οπλισμό δεν εφαρμόστηκε αναστολέας.
- Ομάδα 3 (7 δοκίμια)  
Στους οπλισμούς των δοκιμών 15 – 21 της Ομάδας 3 εφαρμόστηκε επιστρώμα με αναστολέα διάβρωσης. Στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος δεν εφαρμόστηκε αναστολέας.
- Ομάδα 4 (6 δοκίμια)



Στα δοκίμια 22 – 27 της Ομάδας 4 εφαρμόστηκε επίστρωση με τον προς μελέτη αναστολέα διάβρωσης τόσο στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος, όσο και στην επιφάνεια του οπλισμού.

#### 3.4.1. Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής για την μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό πολύμετρο, ως ηλεκτρόδιο εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο χαλύβδινος οπλισμός των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος και ως ηλεκτρόδιο αναφοράς ένα ηλεκτρόδιο αργύρου – χλωριούχου αργύρου (Ag/AgCl). Το ηλεκτρόδιο μέτρησης του βολτόμετρου συνδεόταν μέσω ηλεκτρικής επαφής με τον εκάστοτε χάλυβα του κάθε δοκιμίου τσιμεντοκονιάματος.

Για την διεξαγωγή της μέτρησης του δυναμικού διάβρωσης το ηλεκτρόδιο αναφοράς μαζί με το εκάστοτε προς μέτρηση δοκίμιο οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος εισέρχονταν σε ποτήρι ζέσεως μαζί με μία μικρή ποσότητα διαλύματος χλωριούχου νατρίου του αντίστοιχου δοχείου στο οποίο ήταν εμβαπτισμένο το δοκίμιο αυτό, όπως απεικονίζεται στην φωτογραφία του ακόλουθου Σχήματος. Η διαδικασία αυτή γινόταν έτσι ώστε το δυναμικό διάβρωσης του προς μέτρηση δοκιμίου να μην επηρεάζεται από το δυναμικό των υπόλοιπων δοκιμών που βρίσκονταν εμβαπτισμένα στην ίδια λεκάνη.

Κατά την διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήθηκαν συνολικά 30 μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το δυναμικό διάβρωσης που ελήφθησαν για κάθε ομάδα δοκιμών παρατίθενται σε πίνακες και σε διαγράμματα συναρτήσεως του χρόνου.



Σχήμα 8: Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού με ηλεκτρονικό πολύμετρο

## 1<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών

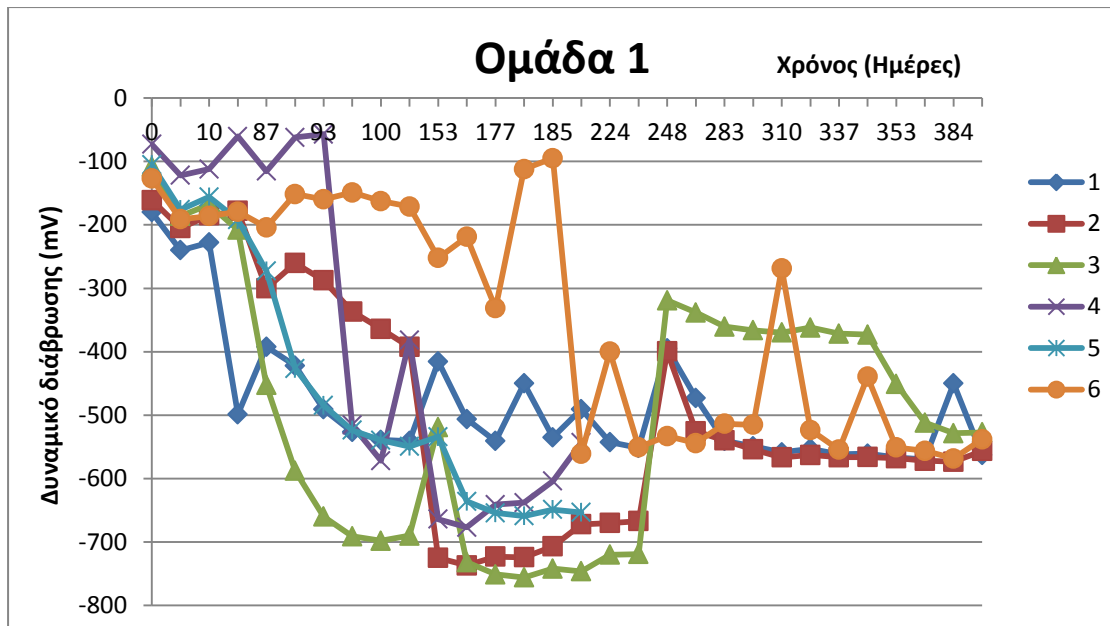
Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 1<sup>ης</sup> ομάδας (δοκίμια αναφοράς: χωρίς αναστολέα διάβρωσης), καθώς και η μέση τιμή του δυναμικού διάβρωσης όλων των δοκιμών της ομάδας 1 για την εκάστοτε ημέρα μέτρησης.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα μετρήσεων δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 1ης ομάδας - Μέση τιμή E<sub>corr</sub>

Μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης E <sub>corr</sub> (mV) 1ης ομάδας δοκιμών								Μέση τιμή E <sub>corr</sub> (mV)
Χρόνος (Ημέρες) \ Αριθμός δοκιμίου	1	2	3	4	5	6	7	
0	-180	-161	-108	-73	-105	-127	-200	-125,6666667
8	-240	-205	-186	-122	-176	-191	-269	-186,6666667
10	-228	-185	-168	-112	-156	-186	-252	-172,5
57	-498,8	-177,9	-207,6	-60,5	-192	-179,3	-56,7	-219,35
87	-392,2	-300,1	-452,6	-115,3	-272,5	-203,8	-49,3	-289,4166667
91	-421,9	-260,1	-587,9	-62,1	-426,5	-151,4	-53,9	-318,3166667
93	-491	-287,4	-660	-56,9	-484,5	-159,7	-57,9	-356,5833333
97	-526,6	-336,8	-691	-515,7	-523,7	-148,9	-54,2	-457,1166667
100	-539,1	-364	-698	-572	-539,7	-162,5	-58,8	-479,2166667
104	-540,9	-392,5	-690	-381,9	-549,4	-171,1	-59,8	-454,3
153	-415,3	-725	-518,9	-664	-534,1	-252,1	-65,8	-518,2333333
160	-506,4	-737	-732	-677	-635,9	-218,7	-60,1	-584,5
177	-540,8	-723	-751	-641,1	-654,1	-331,3	51,2	-606,8833333
178	-450	-724	-756	-638	-659	-112	-8	-556,5
185	-535	-707	-742	-604	-649	-95	-8	-555,3333333
199	-490,52	-672,189	-746,395	-543,205	-653,553	-561,025	-15	-611,1478333
224	-542,7	-670	-720			-399,9	-62,5	-583,15
233	-551,6	-667	-719			-550,6	-81,1	-622,05
248	-394,8	-399,6	-318,9			-533,1	-82,5	-411,6
269	-472,9	-525,5	-338,1			-544,2	-35,9	-470,175
283	-540,6	-539,8	-360,3			-513,6	-90,9	-488,575
300	-549,1	-554,1	-366,1			-515,2	-73,2	-496,125
310	-558,8	-566,6	-369,7			-268,9	-70,2	-441
324	-553,1	-562,9	-361,9			-523,5	-103,9	-500,35
337	-561,6	-566,3	-371,4			-554,5	-105,9	-513,45
346	-560,8	-566,1	-372,9			-439,4	-115,9	-484,8
353	-566,8	-567,8	-450,8			-550,9	-130,1	-534,075
373	-569,9	-571,9	-511,9			-556,2	-125,5	-552,475
384	-450,1	-573,5	-528,5			-568,4	-138,3	-530,125
402	-562,9	-556,6	-527,2			-538,2	-141,3	-546,225

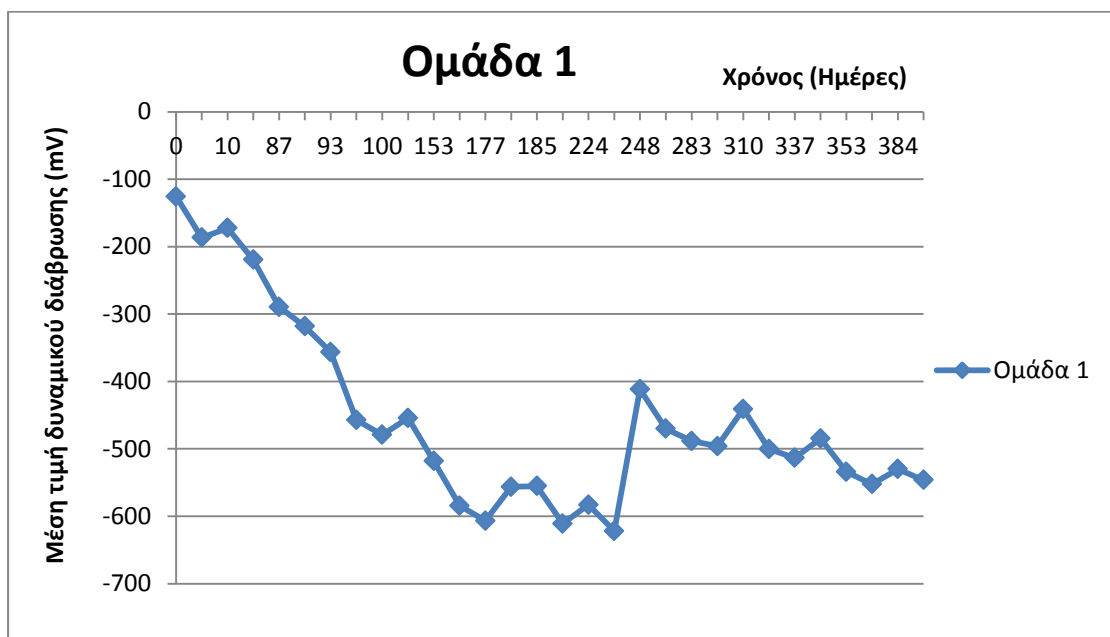
\*Οι μετρήσεις για το δοκίμιο 7 δεν λαμβάνονται υπ' όψιν για τον προσδιορισμό της μέσης τιμής του δυναμικού διάβρωσης.

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα του δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 1<sup>ης</sup> ομάδας (δοκίμια αναφοράς: χωρίς αναστολέα διάβρωσης) συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 9: Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 1ης ομάδας συναρτήσει του χρόνου

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της μέσης τιμής του δυναμικού διάβρωσης για την 1<sup>η</sup> ομάδα δοκιμίων (δοκίμια αναφοράς: χωρίς αναστολέα διάβρωσης) συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 10: Διάγραμμα μέσης τιμής δυναμικού διάβρωσης για την 1η ομάδα δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου

### Παρατηρήσεις για το δυναμικό διάβρωσης της 1<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμίων

Παρατηρείται ότι το δυναμικό διάβρωσης για την 1<sup>η</sup> ομάδα δοκιμίων μειώνεται διαρκώς, λαμβάνει δηλαδή όλο και πιο ηλεκτροαρνητικές τιμές, από την έναρξη του

πειράματος μέχρι και τις 233 ημέρες, όταν και προσεγγίζει τιμές μικρότερες από τα -600 mV. Από την 234<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος, το δυναμικό διάβρωσης άρχισε να λαμβάνει πιο ηλεκτροθετικές τιμές. Από το χρονικό σημείο αυτό και μέχρι το τέλος του πειράματος το δυναμικό διάβρωσης της 1<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμίων κυμαινόταν μεταξύ των -600 mV και των -400 mV.

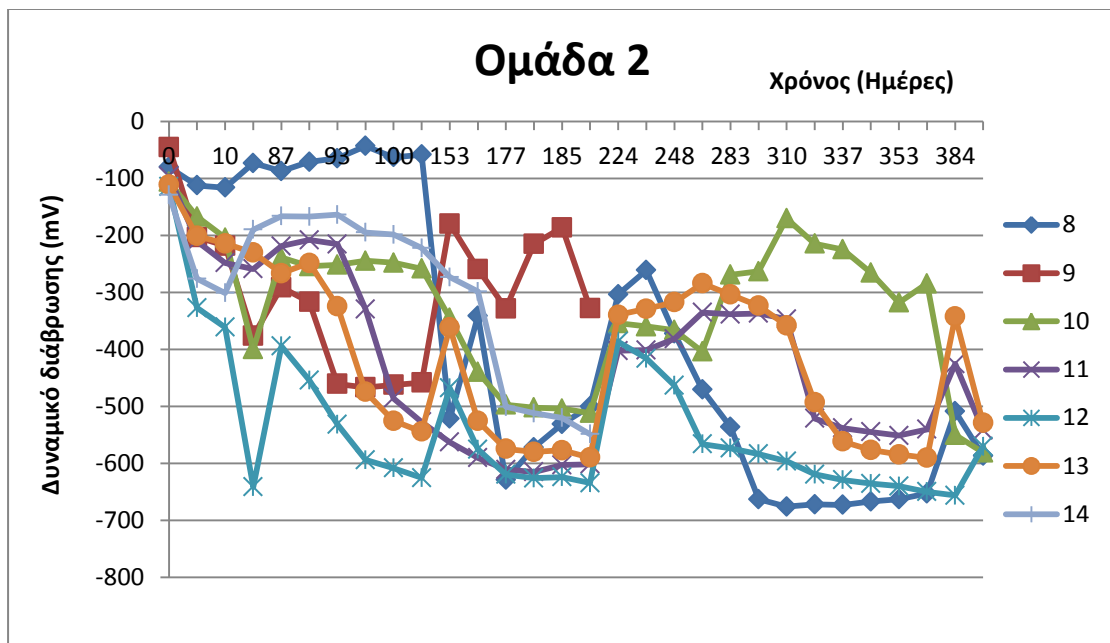
## 2<sup>η</sup> ομάδα δοκιμίων

Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 2<sup>ης</sup> ομάδας (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τιμεντοκονιάματος), καθώς και η μέση τιμή του δυναμικού διάβρωσης όλων των δοκιμίων της ομάδας 2 για την εκάστοτε ημέρα μέτρησης.

**Πίνακας 12: Αποτελέσματα μετρήσεων δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 2ης ομάδας - Μέση τιμή E<sub>corr</sub>**

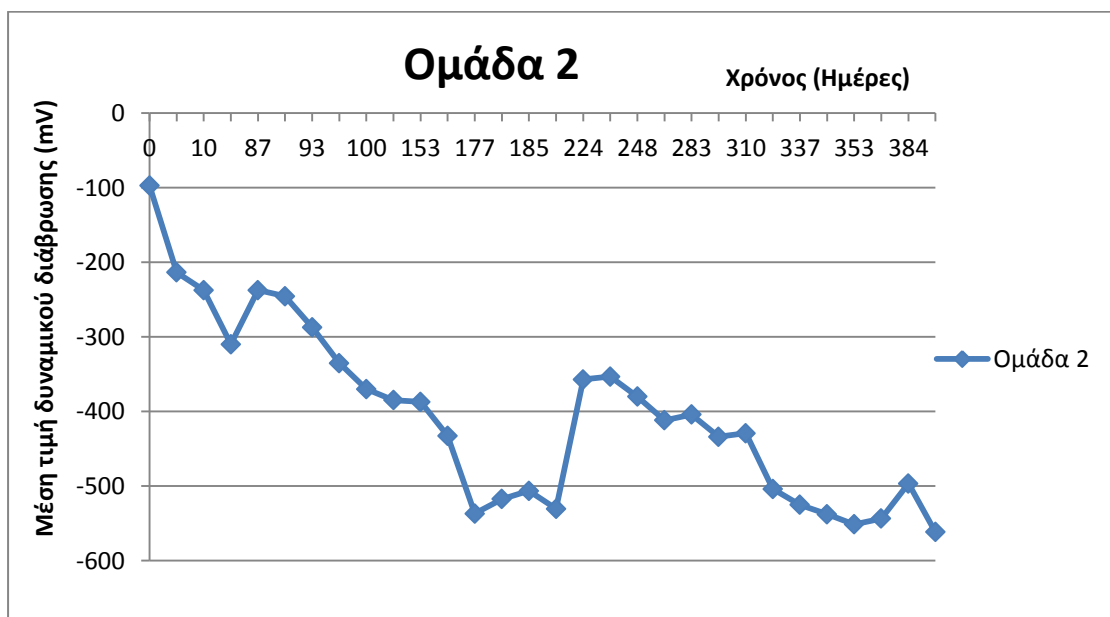
Μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης E <sub>corr</sub> (mV) 2ης ομάδας δοκιμίων								Μέση τιμή E <sub>corr</sub> (mV)
Χρόνος (Ημέρες) \ Αριθμός δοκιμίου	8	9	10	11	12	13	14	
0	-80	-45	-106	-96	-114	-111	-129	-97,28571429
8	-112	-203	-167	-210	-327	-201	-276	-213,7142857
10	-116	-218	-204	-248	-361	-214	-301	-237,4285714
57	-73,1	-376,2	-399,9	-258,9	-641,4	-230,1	-189,7	-309,9
87	-87,1	-291,2	-238,8	-218,6	-394,3	-266,3	-166	-237,4714286
91	-70,7	-316,5	-254,1	-207,9	-454,1	-248,3	-167	-245,5142857
93	-64,6	-460,4	-251,5	-215,1	-531,6	-324,2	-163,4	-287,2571429
97	-43,1	-466,7	-244,5	-329,6	-594	-474,5	-194,6	-335,2857143
100	-62,8	-462,1	-247,9	-485,9	-608,3	-525,3	-198,5	-370,1142857
104	-58,1	-458,3	-258,1	-527,3	-625,5	-544,1	-221,9	-384,7571429
153	-521,8	-179,2	-344,6	-562,8	-467,9	-361,2	-273,1	-387,2285714
160	-341,1	-259,1	-439,7	-590,2	-575,3	-525,6	-298,4	-432,7714286
177	-628,9	-328,1	-496,9	-610,7	-619,5	-574,4	-500,7	-537,0285714
178	-572	-215	-502	-615	-626	-580	-512	-517,4285714
185	-531	-186	-504	-603	-624	-577	-520	-506,4285714
199	-500,179	-327,504	-511,488	-601,593	-634,502	-589,695	-548,567	-530,504
224	-303,3		-354,1	-402,2	-386,4	-339,4		-357,08
233	-261,1		-359,5	-401,3	-415,7	-328,6		-353,24
248	-372,1		-366,2	-381,6	-463,4	-317,2		-380,1
269	-470,6		-403,8	-335,2	-566,2	-284,1		-411,98
283	-536,1		-268,9	-338,4	-573,4	-303,7		-404,1
300	-663		-262,9	-336,8	-583,5	-323,3		-433,9
310	-676		-169,9	-346,8	-596,1	-357,9		-429,34
324	-672		-214,4	-521,1	-619,3	-493,1		-503,98
337	-673		-224,5	-538,1	-629,1	-561,6		-525,26
346	-667		-265,3	-544,8	-635,4	-576,5		-537,8
353	-663		-317,7	-551,1	-640,1	-584,4		-551,26
373	-652,8		-284,4	-540,3	-649,8	-590,4		-543,54
384	-508,8		-550,1	-425,4	-656,4	-342,3		-496,6
402	-586,5		-580,9	-541,7	-570,2	-528,9		-561,64

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα του δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 2<sup>ης</sup> ομάδας (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 11: Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 2ης ομάδας συναρτήσει του χρόνου

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της μέσης τιμής του δυναμικού διάβρωσης για την 2<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 12: Διάγραμμα μέσης τιμής δυναμικού διάβρωσης για την 2η ομάδα δοκιμών συναρτήσει του χρόνου

### Παρατηρήσεις για το δυναμικό διάβρωσης της 2<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών

Παρατηρείται ότι το δυναμικό διάβρωσης για την 2<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών μειώνεται διαρκώς, λαμβάνει δηλαδή όλο και πιο ηλεκτροαρνητικές τιμές, από την έναρξη του πειράματος μέχρι και τις 200 περίπου ημέρες, όταν και κυμαίνεται στο εύρος τιμών από -600 mV ως και -500 mV. Από την 218<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος, το δυναμικό διάβρωσης άρχισε να λαμβάνει πιο ηλεκτροθετικές τιμές. Από το χρονικό σημείο αυτό και μέχρι το τέλος του πειράματος το δυναμικό διάβρωσης της 2<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών άρχισε και πάλι να μειώνεται σταδιακά. Στους τελευταίους μήνες του πειράματος το δυναμικό βρισκόταν σταθερά μεταξύ των -600 mV και των -500 mV.

### 3<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών

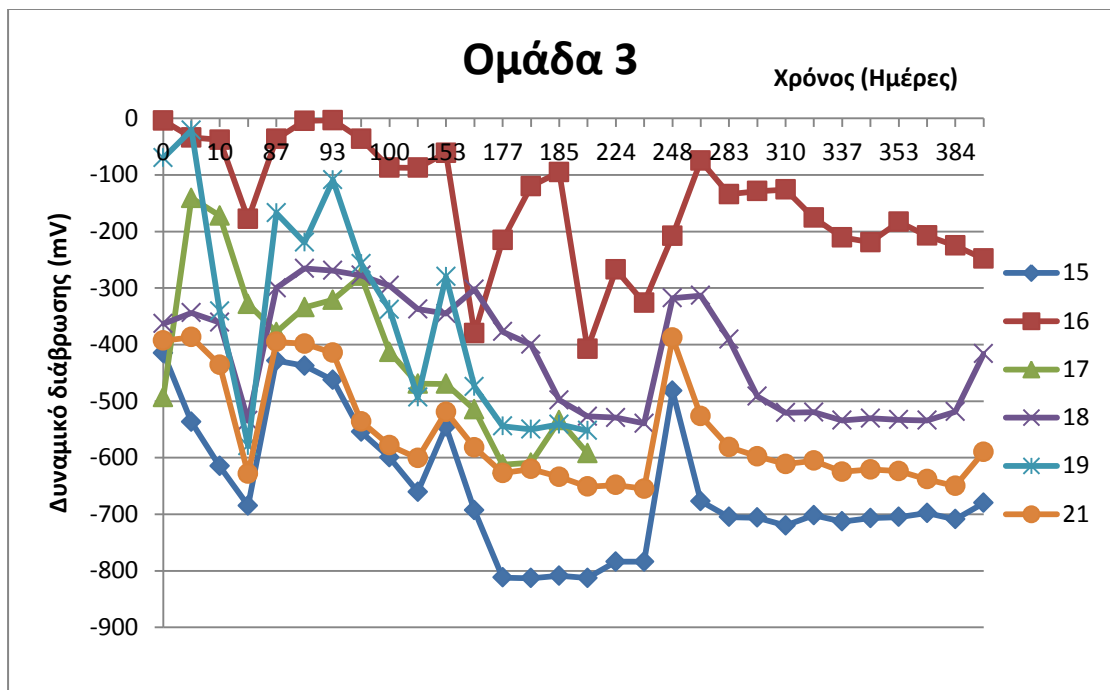
Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 3<sup>ης</sup> ομάδας (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού), καθώς και η μέση τιμή του δυναμικού διάβρωσης όλων των δοκιμών της ομάδας 3 για την εκάστοτε ημέρα μέτρησης.

**Πίνακας 13: Αποτελέσματα μετρήσεων δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 3ης ομάδας - Μέση τιμή E<sub>corr</sub>**

Μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης E <sub>corr</sub> (mV) 3ης ομάδας δοκιμών								Μέση τιμή E <sub>corr</sub> (mV)
Χρόνος (Ημέρες) \ Αριθμός δοκιμίου	15	16	17	18	19	20	21	
0	-415	-4	-493	-363	-70	-1	-393	-289,6666667
8	-537	-34	-141	-344	-21	-1	-387	-244
10	-615	-38	-172	-361	-341	-1	-436	-327,1666667
57	-685	-178,1	-328,4	-534,5	-579,3	-97,3	-628,6	-488,9833333
87	-428,6	-36,4	-378,1	-299,9	-167,2	-1,7	-395,4	-284,2666667
91	-437,6	-4,6	-334,2	-265,6	-219,3	-1,3	-398,4	-276,6166667
93	-462,7	-3,3	-321,1	-269,2	-109,1	-2,1	-414,6	-263,3333333
97	-554,4	-36,5	-278,8	-277,6	-256,9	-4,8	-536,1	-323,3833333
100	-599,6	-87,2	-413,1	-295,9	-338,2	-10	-578,2	-385,3666667
104	-660,6	-87,4	-469,2	-337,4	-493,2	-1	-600,9	-441,45
153	-545,1	-61,1	-469,6	-345,4	-279,9	-25,4	-519,2	-370,05
160	-693	-380,2	-514,8	-302,4	-474,3	-31,7	-581,8	-491,0833333
177	-812	-215,5	-612,1	-377,4	-544,2	-19,3	-627,2	-531,4
178	-813	-120	-609	-400	-550	-3	-620	-518,6666667
185	-809	-95	-534	-498	-541	-6	-634	-518,5
199	-812,7	-407,56	-591,968	-526,9	-552,1	-5	-651,245	-590,4121667
224	-784	-267,5		-529,2		-69,4	-648,3	-557,25
233	-784	-326,1		-539,4		-77,6	-654,8	-576,075
248	-481,9	-207,7		-317,9		-17,6	-387,9	-348,85
269	-677	-74,9		-313,4		-22,8	-526,3	-397,9
283	-705	-134,2		-390,6		-43,2	-581,4	-452,8
300	-706	-128,9		-491,7		-63,5	-597,8	-481,1
310	-720	-125,9		-520,6		-41,5	-611,4	-494,475
324	-702	-175,9		-519,6		-221,1	-605,4	-500,725
337	-713	-210,5		-534,1		-603,9	-624,9	-520,625
346	-707	-219,1		-530,4		-663	-620,9	-519,35
353	-705	-183,1		-532,9		-666	-623,9	-511,225
373	-698	-207,6		-534,1		-668	-638,1	-519,45
384	-709	-224,9		-518,8		-672	-650,2	-525,725
402	-680	-248,1		-416,3		-420,3	-589,8	-483,55

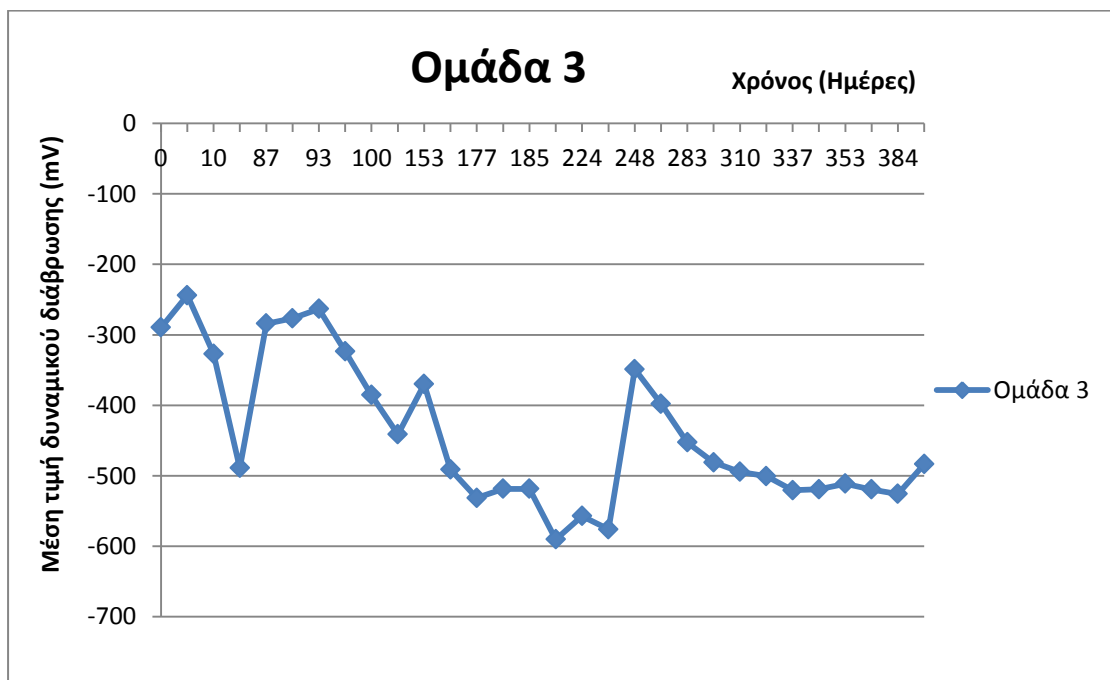
\*Οι μετρήσεις για το δοκίμιο 20 δεν λαμβάνονται υπ' όψιν για τον προσδιορισμό της μέσης τιμής του δυναμικού διάβρωσης.

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα του δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 3<sup>ης</sup> ομάδας (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του σπλισμού) συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 13: Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 3ης ομάδας συναρτήσει του χρόνου

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της μέσης τιμής του δυναμικού διάβρωσης για την 3<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του σπλισμού) συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 14: Διάγραμμα μέσης τιμής δυναμικού διάβρωσης 3ης ομάδας δοκιμών συναρτήσει του χρόνου

### Παρατηρήσεις για το δυναμικό διάβρωσης της 3<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών

Παρατηρείται ότι το δυναμικό διάβρωσης για την 3<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών ήδη από την αρχή του πειράματος λαμβάνει πιο ηλεκτροαρνητικές συγκριτικά με τις αντίστοιχες πρώτες τιμές του δυναμικού των ομάδων 1 και 2. Συγκεκριμένα, το δυναμικό διάβρωσης για την 3<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών ξεκινάει από τιμές μικρότερες των -200 mV και μειώνεται διαρκώς (με ορισμένες μικρές αυξομειώσεις) μέχρι και τις 233 ημέρες, όταν και προσεγγίζει τιμές μεταξύ των -600 mV και των -500 mV. Από την 234<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος, το δυναμικό διάβρωσης άρχισε να λαμβάνει πιο ηλεκτροθετικές τιμές. Από το χρονικό σημείο αυτό και μέχρι το τέλος του πειράματος το δυναμικό διάβρωσης της 3<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών κυμαινόταν σε τιμές εκατέρωθεν των -500 mV.

### 4<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών

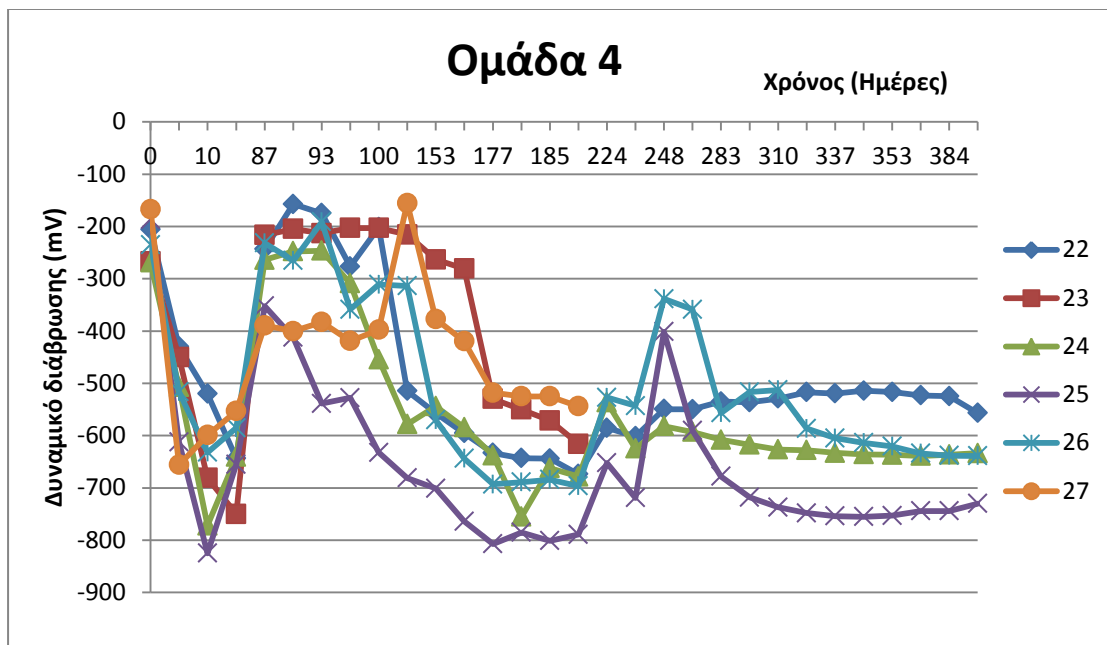
Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 4<sup>ης</sup> ομάδας (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος και του σπλισμού), καθώς και η μέση τιμή του δυναμικού διάβρωσης όλων των δοκιμών της ομάδας 4 για την εκάστοτε ημέρα μέτρησης.

Πίνακας 14: Αποτελέσματα μετρήσεων δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 4ης ομάδας - Μέση τιμή  $E_{corr}$

Μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης $E_{corr}$ (mV) 4ης ομάδας δοκιμών							Μέση τιμή $E_{corr}$ (mV)
Χρόνος (Ημέρες) \ Αριθμός δοκιμίου	22	23	24	25	26	27	
0	-206	-267	-269	-187	-235	-167	-221,8333333
8	-430	-450	-507	-612	-516	-656	-528,5
10	-520	-681	-772	-825	-632	-599	-671,5
57	-643,5	-750	-640,6	-654,9	-585,1	-553,1	-637,8666667
87	-242,9	-216,5	-263,7	-352,2	-231,7	-389,2	-282,7
91	-157,3	-204,6	-247,6	-412,2	-265,4	-400,3	-281,2333333
93	-174,6	-213,1	-246,5	-538,7	-191,2	-382,8	-291,15
97	-276,7	-202,8	-308,7	-527,8	-358,8	-418,9	-348,95
100	-201,7	-202,9	-454,2	-632,5	-311,1	-397,6	-366,6666667
104	-514,6	-215,4	-578,1	-681	-313,6	-155,5	-409,7
153	-557,2	-263,3	-543,8	-701	-570,2	-377,1	-502,1
160	-595,4	-280,6	-584,3	-764	-643,6	-419,5	-547,9
177	-633,2	-529,7	-637,9	-807	-693	-517,9	-636,45
178	-643	-550	-755	-785	-689	-525	-657,8333333
185	-644	-571	-662	-801	-684	-525	-647,8333333
199	-673,752	-615,811	-678,235	-789,029	-696,238	-543,98	-666,1741667
224	-585,1		-536,2	-652,1	-527,1		-575,125
233	-601,5		-624,6	-719	-543,1		-622,05
248	-549,3		-581,8	-401,1	-338,5		-467,675
269	-549,7		-592,9	-590,1	-358,7		-522,85
283	-535,1		-607,9	-678	-556,8		-594,45
300	-536,2		-617,4	-718	-516,5		-597,025
310	-529,1		-626,4	-737	-512,6		-601,275
324	-517,1		-627,7	-748	-586,5		-619,825
337	-519,4		-632,9	-754	-604,7		-627,75
346	-514,1		-635,6	-755	-613,7		-629,6
353	-516,6		-636,6	-753	-620,4		-631,65
373	-523,1		-638,7	-744	-633,9		-634,925
384	-524,6		-636,2	-744	-638,1		-635,725
402	-556,8		-633,7	-730	-638,9		-639,85

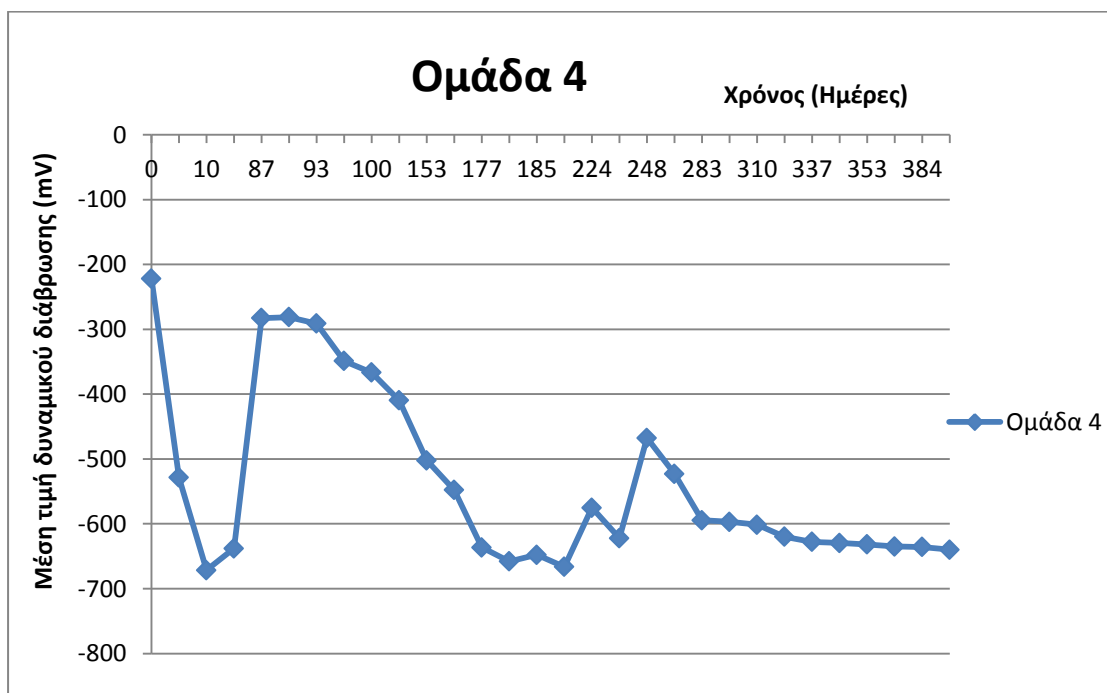


Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα του δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 4<sup>ης</sup> ομάδας (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος και του οπλισμού) συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 15: Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 4ης ομάδας συναρτήσει του χρόνου

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της μέσης τιμής του δυναμικού διάβρωσης για την 4<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος και του οπλισμού) συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 16: Διάγραμμα μέσης τιμής δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια της 4ης ομάδας συναρτήσει με τον χρόνο

#### Παρατηρήσεις για το δυναμικό διάβρωσης της 4<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών

Παρατηρείται ότι το δυναμικό διάβρωσης για την 4<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών, ομοίως με το δυναμικό της ομάδας 3, λαμβάνει ήδη από την αρχή του πειράματος πιο ηλεκτροαρνητικές τιμές συγκριτικά με τις αντίστοιχες πρώτες τιμές του δυναμικού των ομάδων 1 και 2. Συγκεκριμένα, το δυναμικό διάβρωσης για την 4<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών ξεκινάει από τιμές μικρότερες των -200 mV και πέραν από μία αισθητή αυξομείωση κατά τις πρώτες ημέρες του πειράματος, μειώνεται διαρκώς. Από τις 177 μέχρι και τις 233 ημέρες το δυναμικό κυμαίνεται σε πιο σταθερά επίπεδα και προσεγγίζει τιμές μεταξύ των -700 mV και των -600 mV. Από την 224<sup>η</sup> ως και την 248<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος το δυναμικό παίρνει μεν πιο ηλεκτροθετικές τιμές, φτάνοντας μέχρι και σε τιμή μεγαλύτερη από τα -500 mV, η αύξηση όμως αυτή του δυναμικού δεν συνεχίζεται και επέρχεται νέα πτώση του. Τέλος, από τις 283 ημέρες μέχρι και το τέλος του πειράματος το δυναμικό διάβρωσης της 4<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών κινείται σταθερά μεταξύ των -700 mV και των -600 mV, δηλαδή βρίσκεται περίπου στα ίδια επίπεδα τιμών που βρισκόταν και στο μέσο του πειράματος. Φαίνεται ότι οι τιμές του δυναμικού διάβρωσης για την 4<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών φτάνουν σε χαμηλότερα επίπεδα τιμών συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές δυναμικού για τις άλλες τρεις ομάδες δοκιμών.

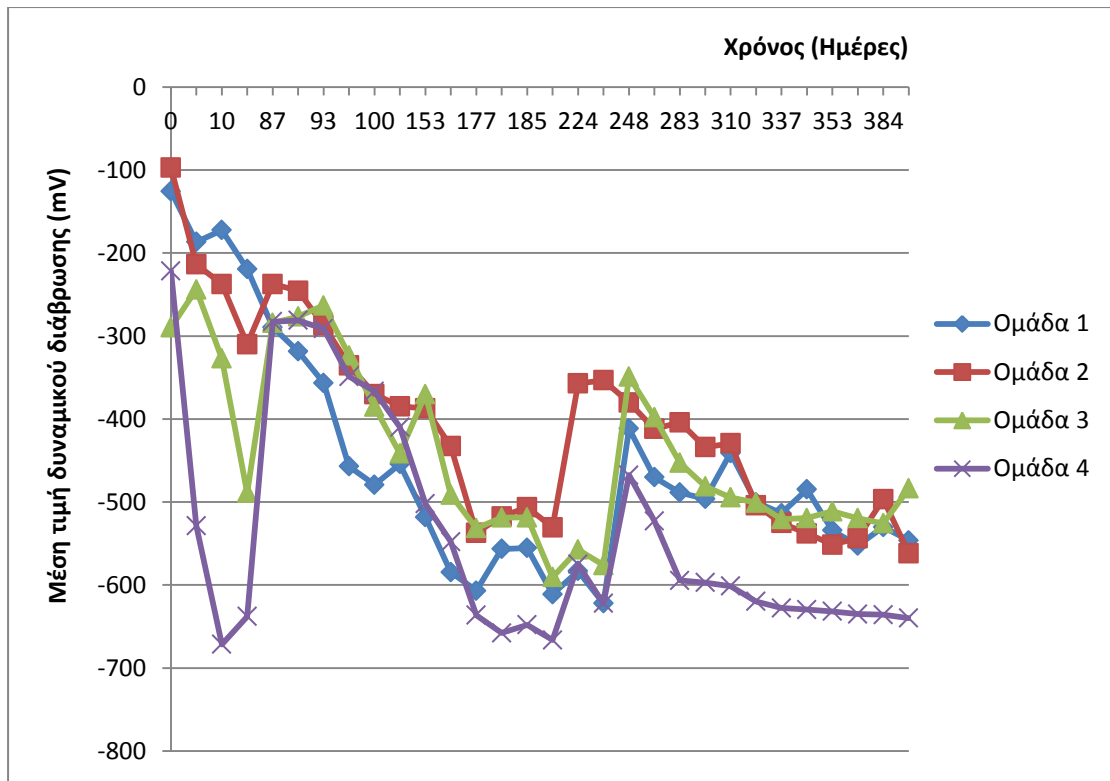
### Συγκεντρωτικές μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης

Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για την μέση τιμή του δυναμικού διάβρωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμίων.

Πίνακας 15: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την μέση τιμή της αντίστασης πόλωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμίων

Μέση τιμή δυναμικού διάβρωσης $E_{corr}$ (mV)				
Χρόνος (Ημέρες) \ Ομάδα δοκιμίων	Ομάδα 1	Ομάδα 2	Ομάδα 3	Ομάδα 4
0	-125,6666667	-97,28571429	-289,6666667	-221,8333333
8	-186,6666667	-213,7142857	-244	-528,5
10	-172,5	-237,4285714	-327,1666667	-671,5
57	-219,35	-309,9	-488,9833333	-637,8666667
87	-289,4166667	-237,4714286	-284,2666667	-282,7
91	-318,3166667	-245,5142857	-276,6166667	-281,2333333
93	-356,5833333	-287,2571429	-263,3333333	-291,15
97	-457,1166667	-335,2857143	-323,3833333	-348,95
100	-479,2166667	-370,1142857	-385,3666667	-366,6666667
104	-454,3	-384,7571429	-441,45	-409,7
153	-518,2333333	-387,2285714	-370,05	-502,1
160	-584,5	-432,7714286	-491,0833333	-547,9
177	-606,8833333	-537,0285714	-531,4	-636,45
178	-556,5	-517,4285714	-518,6666667	-657,8333333
185	-555,3333333	-506,4285714	-518,5	-647,8333333
199	-611,1478333	-530,504	-590,412167	-666,1741667
224	-583,15	-357,08	-557,25	-575,125
233	-622,05	-353,24	-576,075	-622,05
248	-411,6	-380,1	-348,85	-467,675
269	-470,175	-411,98	-397,9	-522,85
283	-488,575	-404,1	-452,8	-594,45
300	-496,125	-433,9	-481,1	-597,025
310	-441	-429,34	-494,475	-601,275
324	-500,35	-503,98	-500,725	-619,825
337	-513,45	-525,26	-520,625	-627,75
346	-484,8	-537,8	-519,35	-629,6
353	-534,075	-551,26	-511,225	-631,65
373	-552,475	-543,54	-519,45	-634,925
384	-530,125	-496,6	-525,725	-635,725
402	-546,225	-561,64	-483,55	-639,85

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της μέσης τιμής του δυναμικού διάβρωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 17: Διάγραμμα μέσης τιμής δυναμικού διάβρωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου

### 1<sup>ο</sup> Μερικό συμπέρασμα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, από την πορεία του δυναμικού διάβρωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο προκύπτει ότι η 4<sup>η</sup> ομάδα δοκιμίων (με επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος και του οπλισμού) εμφανίζει τα πλέον ηλεκτροαρνητικά δυναμικά διάβρωσης και ως εκ τούτου θα πρέπει να διαβρώνεται περισσότερο. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι κατά τους τελευταίους μήνες του πειράματος το δυναμικό διάβρωσης της 4<sup>ης</sup> ομάδας λαμβάνει σταθερά τιμές από -700 mV έως και -600 mV. Αντίθετα, οι αντίστοιχες τιμές δυναμικού για τις ομάδες 1, 2 και 3 κατά τους τελευταίους μήνες του πειράματος κυμαίνονται από τα -600 mV έως και τα -400 mV, λαμβάνοντας δηλαδή εμφανώς πιο ηλεκτροθετικές τιμές. Η διάκριση μεταξύ των ομάδων δοκιμίων 1, 2 και 3 δεν είναι ευδιάκριτη.

### 3.4.2. Μέθοδος γραμμικής πόλωσης

Για την διεξαγωγή μετρήσεων με την μέθοδο της γραμμικής πόλωσης χρησιμοποιήθηκε διάταξη ποτενσιοστάτη / γαλβανοστάτη της EG&G Princeton Applied Research Model 263A, ο οποίος απεικονίζεται στην φωτογραφία του ακόλουθου Σχήματος. Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε χρήση λογισμικού Power Suite Softcorr της ίδιας εταιρείας.



Σχήμα 18: Ποτενσιοστάτης / γαλβανοστάτης της EG&G Princeton Applied Research Model 263A

Για τις μετρήσεις με την μέθοδο της γραμμικής πόλωσης χρησιμοποιήθηκαν τα εξής ηλεκτρόδια:

- Ηλεκτρόδιο εργασίας → ο χαλύβδινος σπλισμός των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος
- Ηλεκτρόδιο αναφοράς → ηλεκτρόδιο αργύρου – χλωριούχου αργύρου (Ag/AgCl)
- Βοηθητικό ηλεκτρόδιο → ράβδος άνθρακα σε επαφή με τα δοκίμια

Ως ηλεκτρολύτης χρησιμεύει το υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου μέσα στο οποίο βρίσκονται εμβαπτισμένα τα προς μέτρηση δοκίμια τσιμεντοκονιάματος.

Όπως και για την μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης, έτσι και για τις μετρήσεις με την μέθοδο γραμμικής πόλωσης το ηλεκτρόδιο αναφοράς και το βοηθητικό ηλεκτρόδιο μαζί με το εκάστοτε προς μέτρηση δοκίμιο σπλισμένου τσιμεντοκονιάματος εισέρχονταν σε ποτήρι ζέσεως μαζί με μία μικρή ποσότητα διαλύματος χλωριούχου νατρίου του αντίστοιχου δοχείου στο οποίο ήταν εμβαπτισμένο το δοκίμιο αυτό.

Στις καμπύλες πόλωσης  $E - I$  για δυναμικό κοντά στο δυναμικό ισορροπίας ισχύει γραμμική σχέση μεταξύ του δυναμικού και της πυκνότητας του ρεύματος. Στην περιοχή κοντά στο  $I = 0$  η συνάρτηση του δυναμικού ως προς την πυκνότητα του ρεύματος ακολουθεί τον νόμο του Ohm. Η κλίση της ευθείας της συνάρτησης αυτής για δυναμικό  $E = E_{corr}$  είναι η αντίσταση πόλωσης  $R_p$ . Από τις μετρήσεις γραμμικής πόλωσης καθορίζονται για  $I = 0$  το δυναμικό διάβρωσης και η αντίσταση πόλωσης.

Κατά την διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήθηκαν συνολικά 6 μετρήσεις με την μέθοδο της γραμμικής πόλωσης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που

ελήφθησαν για κάθε ομάδα δοκιμών παρατίθενται σε πίνακες και σε διαγράμματα συναρτήσεως του χρόνου.

### 3.4.2.1. Προσδιορισμός αντίστασης πόλωσης

#### 1<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών

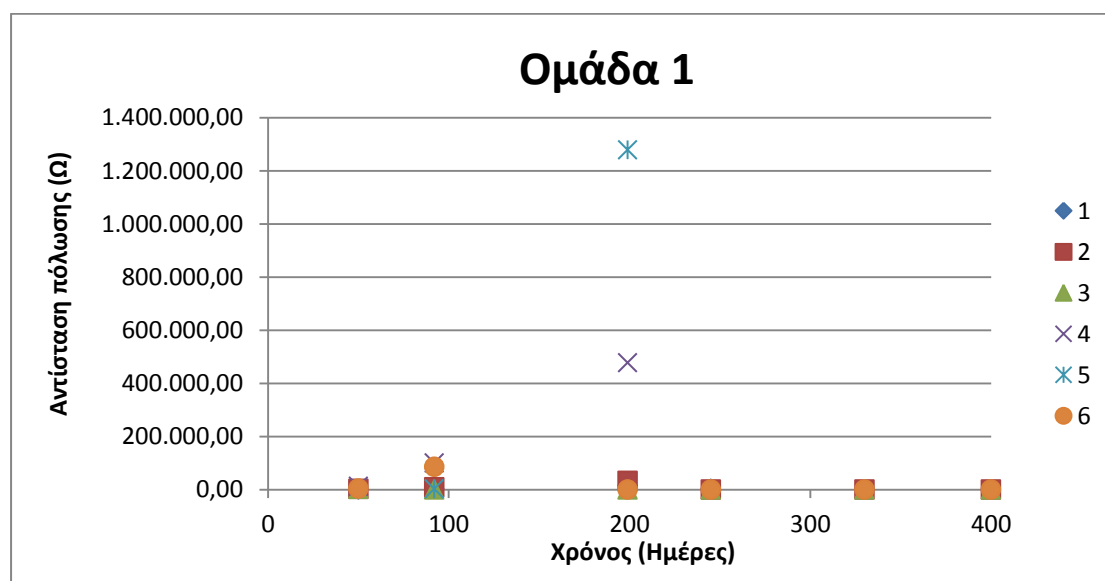
Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 1<sup>ης</sup> ομάδας (δοκίμια αναφοράς: χωρίς αναστολέα διάβρωσης), καθώς και η μέση τιμή της αντίστασης πόλωσης όλων των δοκιμών της ομάδας 1 για την εκάστοτε ημέρα μέτρησης.

Πίνακας 16: Αποτελέσματα μετρήσεων αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 1ης ομάδας - Μέση τιμή Rp

Μετρήσεις αντίστασης πόλωσης Rp (Ω) 1ης ομάδας δοκιμών						
Ημερομηνία	4/6/2014	16/7/2014	31/10/2014	16/12/2014	11/3/2015	20/5/2015
Αριθμός δοκιμίου \ Χρόνος (Ημέρες)	50	92	199	245	330	400
1	518,03	1.918,74	15.627,34	2205,194	234,295	283,29
2	2.702,70	8.904,59	33.144,83	345,389	161,088	226,68
3	2.397,32	179,61	260,56	186,868	487,444	247,17
4	11.941,18	99.577,03	477.057,11			
5		2.106,67	1.277.850,59			
6	3.751,03	86.125,43	529,40	587,079	474,796	652,29
7	x	x	x	x	x	x
<b>Μέση τιμή Rp (Ω)</b>	<b>4.262,05</b>	<b>33.135,34</b>	<b>300.744,97</b>	<b>831,1325</b>	<b>339,40575</b>	<b>352,36</b>

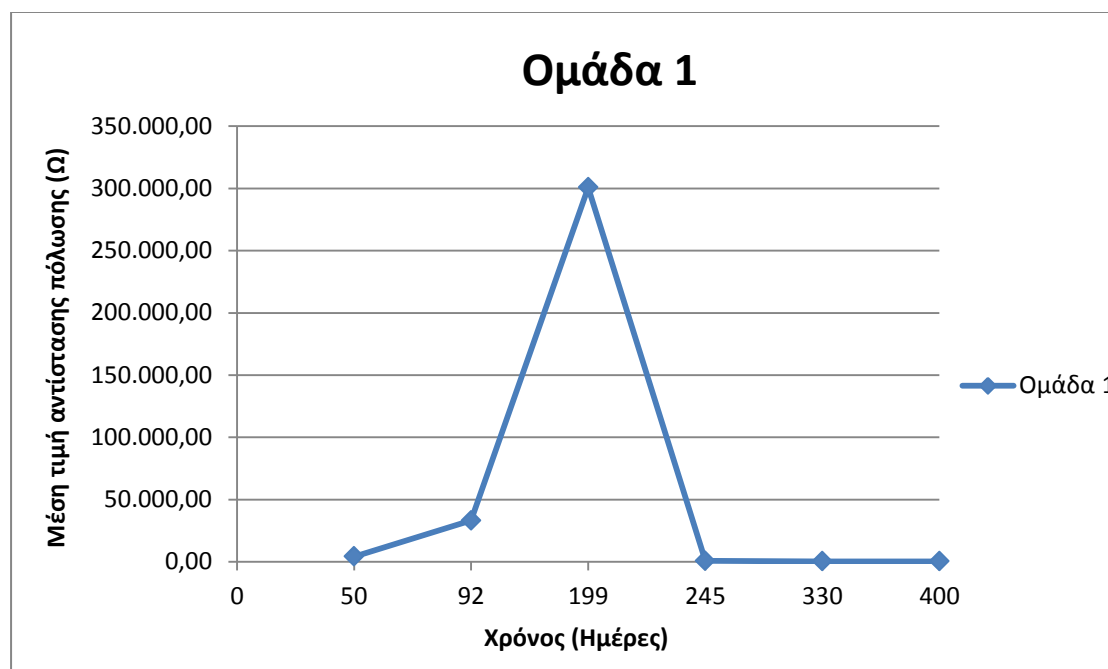
\*Για το δοκίμιο 7, καθώς και για την πρώτη μέτρηση του δοκιμίου 5 δεν κατέστη δυνατή η λήψη μετρήσεων αντίστασης πόλωσης.

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 1<sup>ης</sup> ομάδας (δοκίμια αναφοράς: χωρίς αναστολέα διάβρωσης) συναρτήσεως του χρόνου.



Σχήμα 19: Διάγραμμα αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 1ης ομάδας συναρτήσεως του χρόνου

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της μέσης τιμής της αντίστασης πόλωσης για την 1<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών (δοκίμια αναφοράς: χωρίς αναστολέα διάβρωσης) συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 20: Διάγραμμα μέσης τιμής αντίστασης πόλωσης για την 1η ομάδα δοκιμών συναρτήσει του χρόνου

#### Παρατηρήσεις για την αντίσταση πόλωσης της 1<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών

Παρατηρείται ότι η μέση αντίσταση πόλωσης της 1<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών λαμβάνει χαμηλές τιμές και πιο συγκεκριμένα τιμές μικρότερες των 50.000 Ω. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η τρίτη μέτρηση, η οποία δίνει μέση αντίσταση πόλωσης περίπου 300.000 Ω.

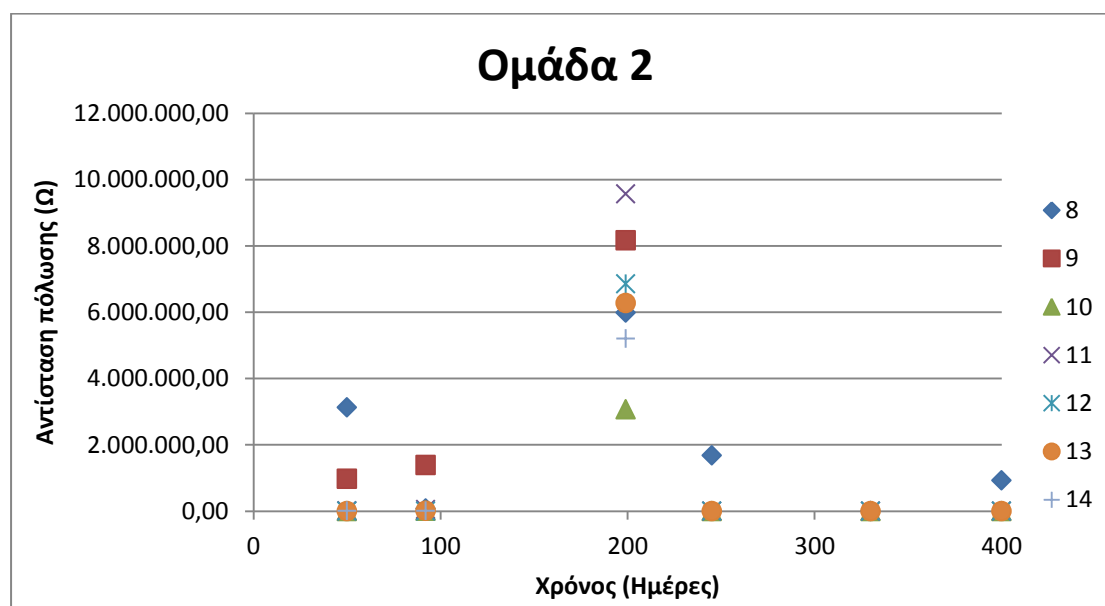
#### 2<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών

Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 2<sup>ης</sup> ομάδας (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος), καθώς και η μέση τιμή της αντίστασης πόλωσης όλων των δοκιμών της ομάδας 2 για την εκάστοτε ημέρα μέτρησης.

Πίνακας 17: Αποτελέσματα μετρήσεων αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 2ης ομάδας - Μέση τιμή R<sub>p</sub>

Μετρήσεις αντίστασης πόλωσης R <sub>p</sub> (Ω) 2ης ομάδας δοκιμίων						
Ημερομηνία	4/6/2014	16/7/2014	31/10/2014	16/12/2014	11/3/2015	20/5/2015
Αριθμός δοκιμίου \ Χρόνος (Ημέρες)	50	92	199	245	330	400
8	3.127.893,52	78.067,30	5.984.305,60	1.684.847,05	259,66	923.929,20
9	972.696,25	1.395.157,07	8.169.398,91			
10	1.343,10	12.998,83	3.068.532,62	4.521,25	211,48	191,52
11	8.452,25	49.309,86	9.571.411,28	3.563,30	427,58	261,71
12	226,70	836,78	6.853.556,49	1.107,52	206,00	189,16
13	1.990,52	13.575,89	6.278.481,01	3.826,43	353,22	231,88
14	11.629,71	12.242,74	5.200.000,00			
Μέση τιμή R <sub>p</sub> (Ω)	589.176,01	223.169,78	6.446.526,56	339.573,11	291,59	184.960,69

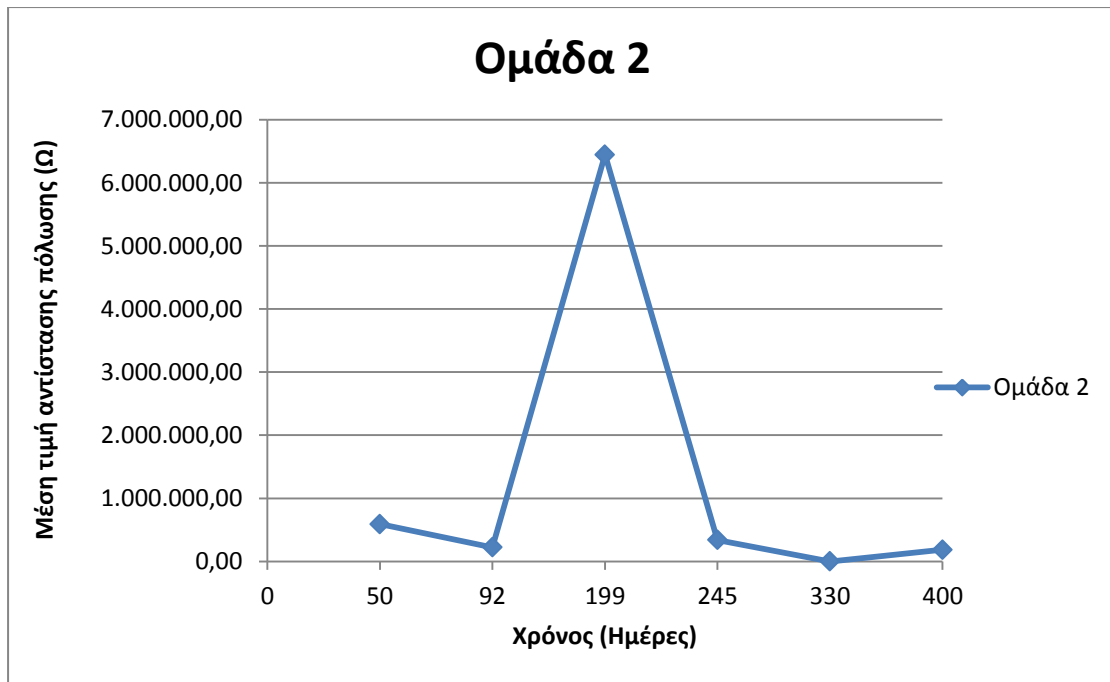
Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 2<sup>ης</sup> ομάδας (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 21: Διάγραμμα αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 2ης ομάδας συναρτήσει του χρόνου

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της μέσης τιμής της αντίστασης πόλωσης για την 2<sup>η</sup> ομάδα δοκιμίων (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) συναρτήσει του χρόνου.





Σχήμα 22: Διάγραμμα μέσης τιμής αντίστασης πόλωσης για την 2η ομάδα δοκιμών συναρτήσεϊ του χρόνου

#### Παρατηρήσεις για την αντίσταση πόλωσης της 2<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών

Παρατηρείται ότι η μέση αντίσταση πόλωσης της 2<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών λαμβάνει υψηλότερες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές της 1<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών. Μάλιστα, η τρίτη μέτρηση δίνει αντίσταση πόλωσης της τάξης των 6.500.000 Ω.

#### 3<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών

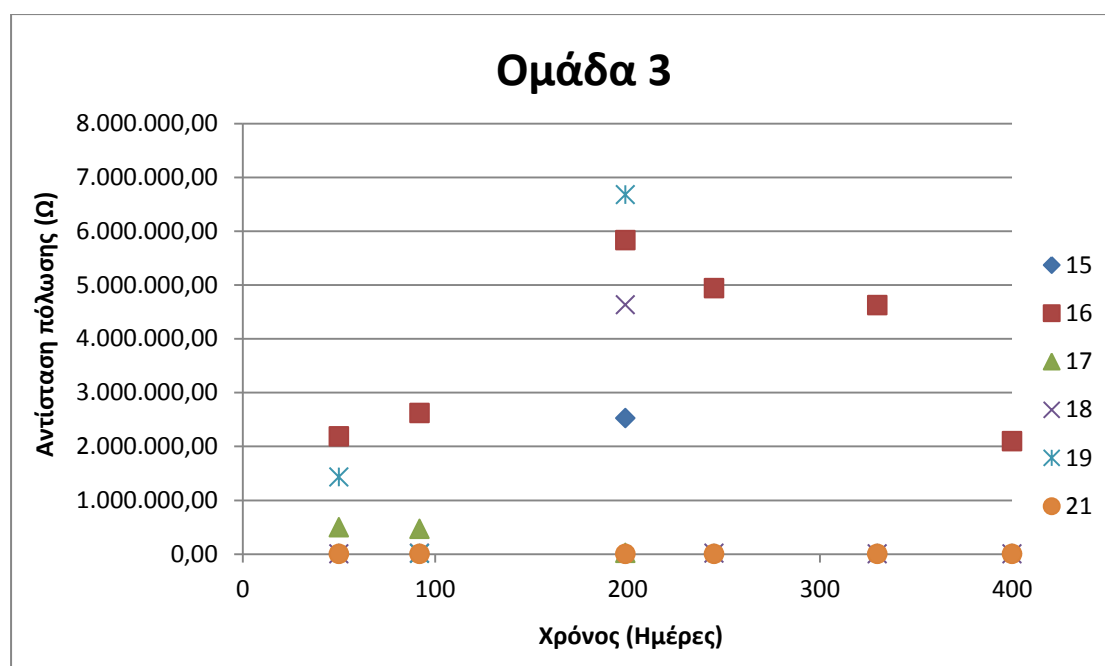
Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 3<sup>ης</sup> ομάδας (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού), καθώς και η μέση τιμή της αντίστασης πόλωσης όλων των δοκιμών της ομάδας 3 για την εκάστοτε ημέρα μέτρησης.

Πίνακας 18: Αποτελέσματα μετρήσεων αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 3ης ομάδας - Μέση τιμή Rp

Μετρήσεις αντίστασης πόλωσης Rp ( $\Omega$ ) 3ης ομάδας δοκιμίων						
Ημερομηνία	4/6/2014	16/7/2014	31/10/2014	16/12/2014	11/3/2015	20/5/2015
Αριθμός δοκιμίου \ Χρόνος (Ημέρες)	50	92	199	245	330	400
15	207,43	1.256,30	2.523.437,50	297,16	160,90	301,41
16	2.181.666,27	2.616.133,52	5.833.333,33	4.939.110,07	4.621.296,30	2.095.749,88
17	492.012,78	463.061,56	19.315,81			
18	2.776,08	15.155,19	4.627.118,64	11.565,22	1.059,42	2.045,67
19	1.428.225,81	9.354,55	6.676.737,16			
20	x	x	x	x	x	x
21	397,70	3.401,45	361,68	3.696,28	353,41	449,13
Μέση τιμή Rp ( $\Omega$ )	684.214,34	518.060,43	3.280.050,69	1.238.667,18	1.155.717,51	524.636,52

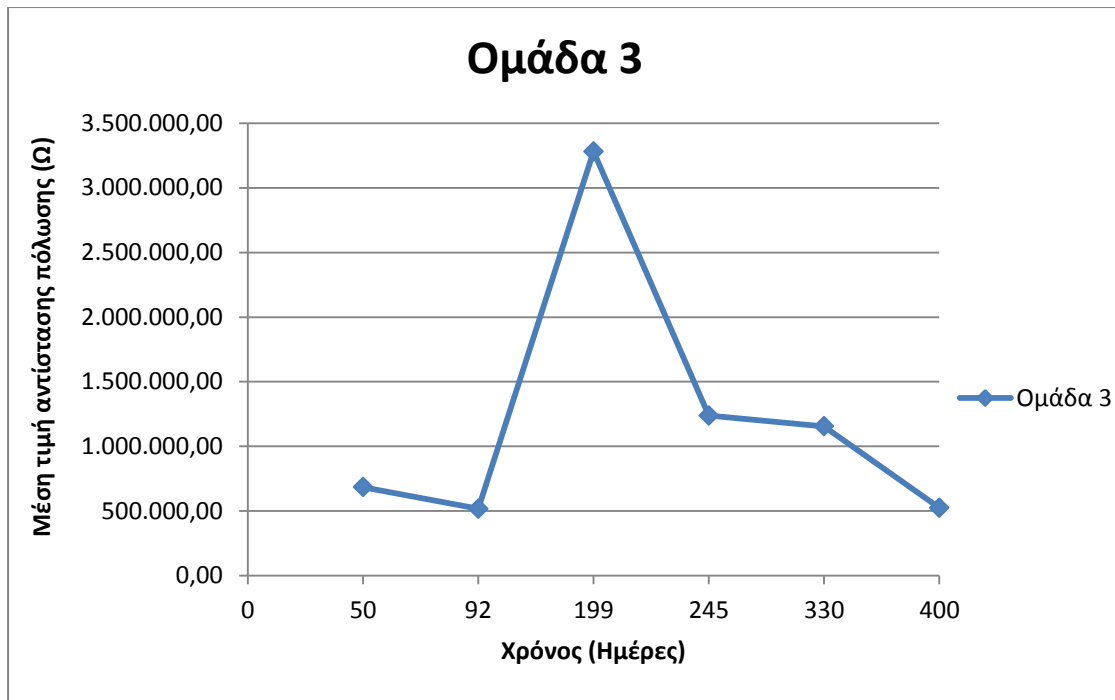
\*Για το δοκίμιο 20 δεν κατέστη δυνατή η λήψη μετρήσεων αντίστασης πόλωσης.

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 3<sup>ης</sup> ομάδας (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού) συναρτήσεως του χρόνου.



Σχήμα 23: Διάγραμμα αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 3ης ομάδας συναρτήσεως του χρόνου

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της μέσης τιμής της αντίστασης πόλωσης για την 3<sup>η</sup> ομάδα δοκιμίων (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού) συναρτήσεως του χρόνου.



Σχήμα 24: Διάγραμμα μέσης τιμής αντίστασης πόλωσης για την 3η ομάδα δοκιμών συναρτήσε του χρόνου

#### Παρατηρήσεις για την αντίσταση πόλωσης της 3<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών

Παρατηρείται ότι η μέση αντίσταση πόλωσης της 3<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών λαμβάνει συνολικά υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με τις αντίστοιχες των ομάδων 1 και 2. Ειδικότερα, ξεκινάει από τιμές (500.000 – 1.000.000) Ω, ακολουθεί μία μεγάλη αύξηση πάνω από τα 3.000.000 Ω και τέλος κατά τις τρεις τελευταίες μετρήσεις ακολουθεί μία πτωτική πορεία από τα 1.500.000 Ω περίπου μέχρι και τα 500.000 Ω.

#### 4<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών

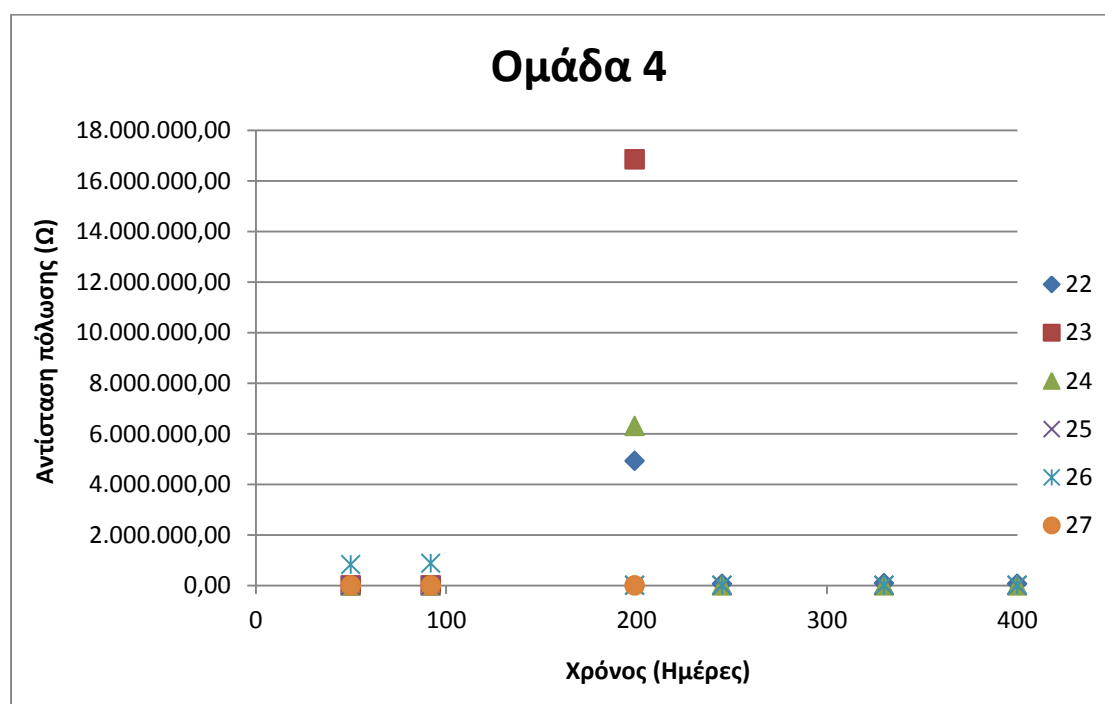
Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 4<sup>ης</sup> ομάδας (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος και του σπλισμού), καθώς και η μέση τιμή της αντίστασης πόλωσης όλων των δοκιμών της ομάδας 4 για την εκάστοτε ημέρα μέτρησης.

Πίνακας 19: Αποτελέσματα μετρήσεων αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 4ης ομάδας - Μέση τιμή Rp

Μετρήσεις αντίστασης πόλωσης Rp (Ω) 4ης ομάδας δοκιμίων						
Ημερομηνία	4/6/2014	16/7/2014	31/10/2014	16/12/2014	11/3/2015	20/5/2015
Αριθμός δοκιμίου \ Χρόνος (Ημέρες)	50	92	199	245	330	400
22		21.512,14	4.925.373,14	65.261,89	91.559,53	62.379,29
23	6.850,20	7.492,30	16.851.851,85			
24	541,40	12.103,33	6.309.963,10	543,74	348,47	280,80
25	282,48	1.314,09	226,39	404,17	183,40	201,31
26	824.165,75	875.301,41	12.213,37	20.038,97	18.258,67	10.838,53
27	1.408,64	8.261,80	764,16			
<b>Μέση τιμή Rp (Ω)</b>	<b>166.649,70</b>	<b>154.330,85</b>	<b>4.683.398,67</b>	<b>21.562,19</b>	<b>27.587,52</b>	<b>18.424,98</b>

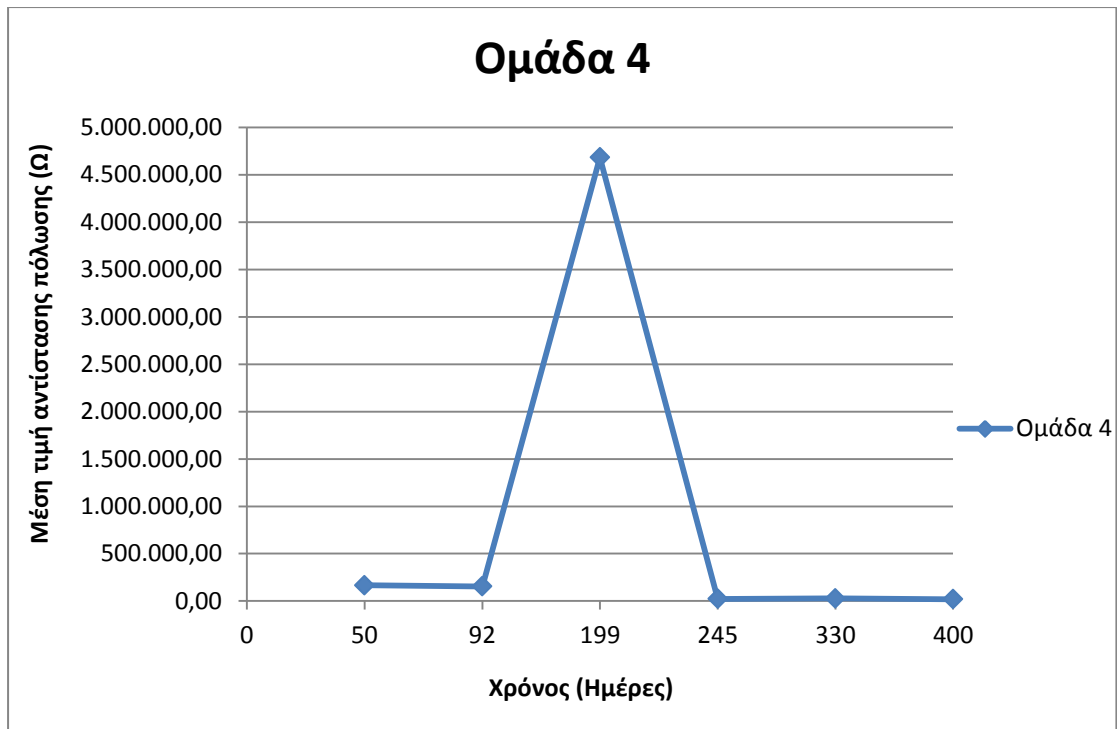
\*Για την πρώτη μέτρηση του δοκιμίου 22 δεν κατέστη δυνατή η λήψη μέτρησης αντίστασης πόλωσης.

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 4<sup>ης</sup> ομάδας (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος και του οπλισμού) συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 25: Διάγραμμα αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια της 4ης ομάδας δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της μέσης τιμής της αντίστασης πόλωσης για την 4<sup>η</sup> ομάδα δοκιμίων (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος και του οπλισμού) συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 26: Διάγραμμα μέσης τιμής αντίστασης πόλωσης για την 4η ομάδα δοκιμών συναρτήσεϊ του χρόνου

#### Παρατηρήσεις για την αντίσταση πόλωσης της 4<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών

Παρατηρείται ότι η μέση αντίσταση πόλωσης της 4<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών λαμβάνει τιμές μικρότερες των 500.000 Ω, με εξαίρεση την τρίτη μέτρηση που δίνει μέση αντίσταση πόλωσης κοντά στα 4.500.000 Ω.

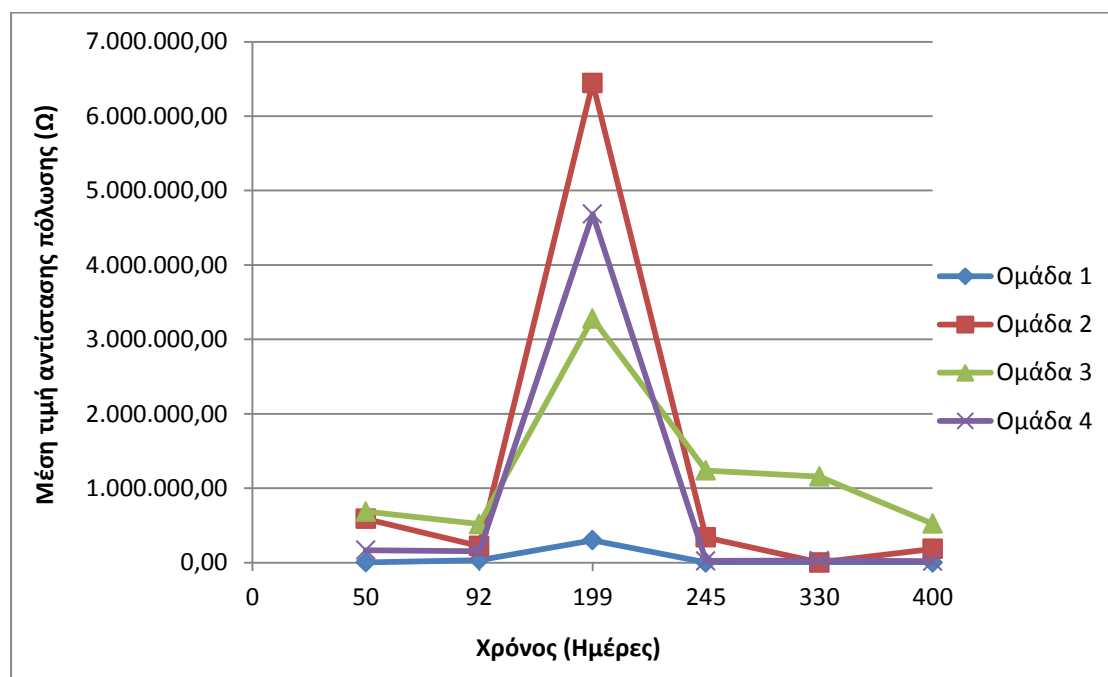
#### Συγκεντρωτικές μετρήσεις αντίστασης πόλωσης

Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για την μέση τιμή της αντίστασης πόλωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμών.

Πίνακας 20: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την μέση τιμή της αντίστασης πόλωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμών

Μέση τιμή αντίστασης πόλωσης R <sub>p</sub> (Ω)						
Ημερομηνία	4/6/2014	16/7/2014	31/10/2014	16/12/2014	11/3/2015	20/5/2015
Ομάδα δοκιμών \ Χρόνος (Ημέρες)	50	92	199	245	330	400
Ομάδα 1	4262,052	33135,3442	300744,97	831,1325	339,40575	352,3575
Ομάδα 2	589.176,01	223.169,78	6.446.526,56	339.573,11	291,59	184.960,69
Ομάδα 3	684.214,34	518.060,43	3.280.050,69	1.238.667,18	1.155.717,51	524.636,52
Ομάδα 4	166.649,70	154.330,85	4.683.398,67	21.562,19	27.587,52	18.424,98

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της μέσης τιμής της αντίστασης πόλωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμών συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 27: Διάγραμμα μέσης τιμής αντίστασης πόλωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμών συναρτήσει του χρόνου

#### Παρατηρήσεις για την αντίσταση πόλωσης και των τεσσάρων ομάδων δοκιμών

Παρατηρείται ότι η μέση αντίσταση πόλωσης της 1<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών (δοκίμια αναφοράς: χωρίς αναστολέα διάβρωσης) είναι εμφανώς μικρότερη σε σχέση με την μέση αντίσταση πόλωσης των άλλων τριών ομάδων δοκιμών. Διάκριση μεταξύ των ομάδων δοκιμών 2, 3 και 4 δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί αφού σε άλλες μετρήσεις οι τιμές τους για την αντίσταση πόλωσης βρίσκονται κοντά, ενώ σε άλλες απομακρύνονται.

#### **3.4.2.2. Προσδιορισμός πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ρεύμα διάβρωσης είναι αντιστρόφως ανάλογο της αντίστασης πόλωσης και συνδέονται μεταξύ τους μέσω της σχέσης:

$$I_{corr} = B / R_p$$

όπου, B: η σταθερά Stern – Geary

Η σταθεράς B παίρνει τιμές από (26-52) mV ανάλογα με την κατάσταση του οπλισμού. Για να ληφθεί όμως η πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης πρέπει ο οπλισμός να βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση, οπότε η τιμή της σταθεράς Stern – Geary παίρνει την τιμή B = 26 mV.

Αφού υπολογιστεί το ρεύμα διάβρωσης  $I_{corr}$  μέσω της ανωτέρω σχέσης και εν συνεχεία μετατραπεί από mA σε  $\mu A$ , πρέπει ακολούθως να υπολογισθεί η πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης  $i_{corr}$ , η οποία είναι το πηλίκο του ρεύματος διάβρωσης προς την συνολική εκτεθειμένη επιφάνεια του οπλισμού. Συγκεκριμένα, η συνολική εκτεθειμένη επιφάνεια του οπλισμού  $A$  ( $cm^2$ ) προκύπτει από την γεωμετρία των χαλύβδινων ράβδων και δίνεται από την σχέση:

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{2} + \pi \cdot d \cdot h = \pi \cdot d \cdot \left( \frac{d}{2} + h \right)$$

όπου,

d: η διάμετρος της χαλύβδινης ράβδου ( $d = 1$  cm)

h: το ύψος της χαλύβδινης ράβδου ( $h = 10$  cm)

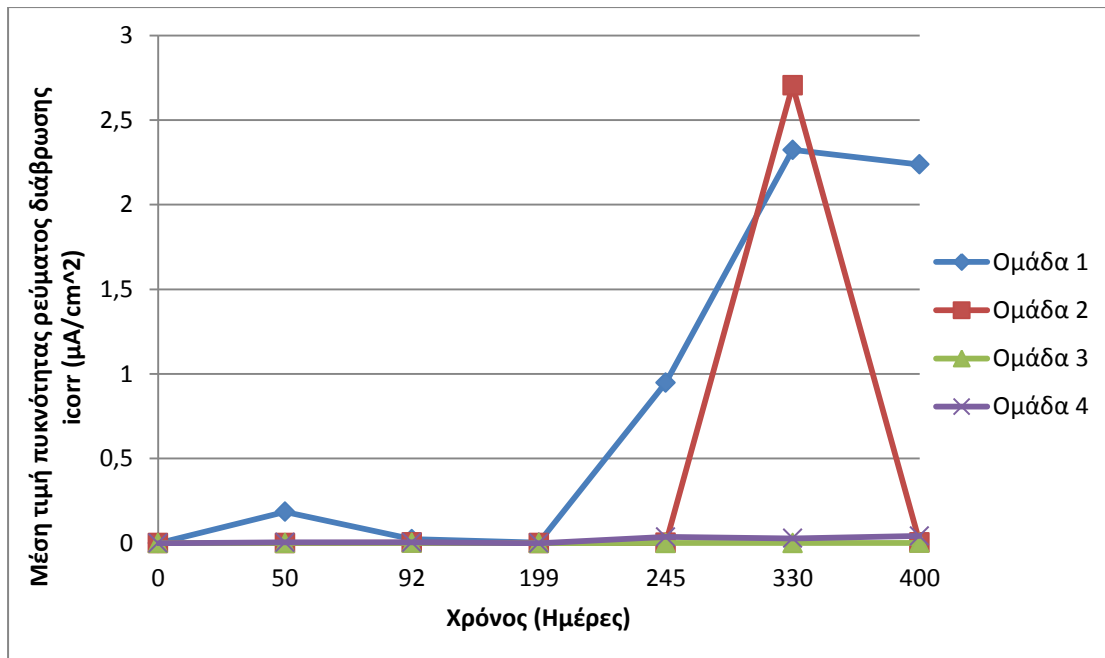
Άρα, προκύπτει ότι  $A = 32,97$   $cm^2$ .

Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για την μέση πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμίων.

**Πίνακας 21: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την μέση τιμή της πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμίων**

Μέση τιμή πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης $i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )						
Ημερομηνία	4/6/2014	16/7/2014	31/10/2014	16/12/2014	11/3/2015	20/5/2015
Ομάδα δοκιμίων \ Χρόνος (Ημέρες)	50	92	199	245	330	400
Ομάδα 1	0,185027234	0,02379923	0,002622141	0,948820667	2,323460027	2,238055648
Ομάδα 2	0,001338472	0,003533613	0,000122329	0,002322315	2,704502796	0,004263585
Ομάδα 3	0,001152557	0,001522208	0,000240422	0,000636649	0,000682343	0,001503128
Ομάδα 4	0,004732056	0,005109774	0,000168381	0,036573074	0,028585237	0,042800355

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της μέσης πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 28: Διάγραμμα μέσης τιμής πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου

#### Παρατηρήσεις για την πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης και των τεσσάρων ομάδων δοκιμίων

Παρατηρείται ότι η μέση τιμή της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης για την 1<sup>η</sup> ομάδα δοκιμίων (δοκίμια αναφοράς: χωρίς αναστολέα διάβρωσης) είναι εμφανώς μεγαλύτερη σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για την πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης για τις άλλες τρεις ομάδες δοκιμίων. Ακολουθως, η μέση τιμή της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης για την 2<sup>η</sup> ομάδα δοκιμίων (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) παρουσιάζει πολύ μικρές τιμές μέσης πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης, οι οποίες βρίσκονται σχεδόν κοντά στο 0. Εξαιρέση αποτελεί η πέμπτη μέτρηση, η τιμή της οποίας κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα τιμών της τάξης των 2,7  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Οι ομάδες δοκιμίων 3 (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού) και 4 (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος και του οπλισμού) εμφανίζουν πολύ μικρές τιμές μέσης πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης προσεγγίζοντας σχεδόν το 0. Διάκριση μεταξύ των ομάδων 3 και 4 δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί.

#### **3.4.2.3. Προσδιορισμός ηλεκτροχημικής (θεωρητικής) απώλειας μάζας**

Η διάβρωση ενός ατόμου σιδήρου συνοδεύεται από μετακίνηση δύο ηλεκτρονίων. Επομένως, το ποσό της σχηματιζόμενης σκουριάς και η ποσότητα των ηλεκτρονίων, δηλαδή το ηλεκτρικό φορτίο, αποτελούν μεγέθη ευθέως ανάλογα. Η ποσότητα των προϊόντων διάβρωσης προς τον χρόνο που αυτά σχηματίστηκαν είναι μέγεθος ανάλογο με το ηλεκτρικό φορτίο προς τον χρόνο, δηλαδή με την ένταση του ρεύματος του γαλβανικού στοιχείου. Η σχέση αυτή εκφράζεται με τον νόμο του Faraday, σύμφωνα με τον οποίο η ηλεκτροχημική (θεωρητική) απώλεια της μάζας β



(g/cm<sup>2</sup>), δηλαδή τα προϊόντα σκουριάς ανά τετραγωνικό εκατοστό επιφάνειας χάλυβα, είναι ανάλογη με την πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης  $i$  (A/cm<sup>2</sup>), δηλαδή με το ρεύμα που διέρχεται από την επιφάνεια αυτή.

$$\beta = \frac{i \cdot M \cdot t}{n e \cdot F}$$

όπου,

$\beta$ : η ηλεκτροχημική (θεωρητική) απώλεια μάζας (g/cm<sup>2</sup>)

$i$ : η πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης (A/cm<sup>2</sup>)

$M$ : το μοριακό βάρος του προϊόντος διάβρωσης, στην περίπτωση του πειράματος του σιδήρου ( $M_{\text{Fe}} = 55,845$  g/mol)

$t$ : ο χρόνος (sec)

$ne$ : ο αριθμός των ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων, στην περίπτωση του πειράματος για τον δισθενή σίδηρο ( $ne = 2$ )

$F$ : η σταθερά του Faraday ( $F = 96.485,34$  Coulomb/mol)

Για τον υπολογισμό της ηλεκτροχημικής (θεωρητικής) απώλειας μάζας  $\beta$ :

- Πρέπει πρώτα η μέση πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης  $i_{\text{corr}}$  για κάθε ομάδα δοκιμών, η οποία έχει ήδη υπολογισθεί παραπάνω, να μετατραπεί από  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  σε  $\text{A}/\text{cm}^2$  και ο αντίστοιχος χρόνος να μετατραπεί από ημέρες σε δευτερόλεπτα.
- Ακολούθως πρέπει να υπολογισθεί το εμβαδόν του ανωτέρω διαγράμματος  $i_{\text{corr}} - t$  για την κάθε ομάδα δοκιμών και η εκάστοτε τιμή που θα προκύψει να πολλαπλασιαστεί με το σταθερό πηλίκο  $\frac{M}{ne \cdot F}$  του νόμου Faraday, το οποίο και ισούται με 0,000289.
- Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι η πρώτη τιμή στο διάγραμμα  $i_{\text{corr}} - t$  για την κάθε ομάδα δοκιμών είναι πάντα η αρχή των αξόνων 0(0,0) και άρα το πρώτο προς υπολογισμό εμβαδόν, δηλαδή το εμβαδόν του διαγράμματος για την πρώτη ημέρα μέτρησης προκύπτει ως το εμβαδόν τριγώνου ( $E_{\text{τριγ.}} = \frac{\beta \cdot v}{2}$ ), όπου βάση του τριγώνου θεωρείται ο αντίστοιχος χρόνος σε sec και ύψος του τριγώνου το  $i_{\text{corr}}$  (A/cm<sup>2</sup>) που αντιστοιχεί στον χρόνο αυτό.
- Εν συνεχεία, όλα τα επόμενα προς υπολογισμό εμβαδά στο διάγραμμα  $i_{\text{corr}} - t$  για την κάθε ομάδα δοκιμών, δηλαδή το εμβαδόν του διαγράμματος για καθεμία από τις επόμενες ημέρες μετρήσεων προκύπτει ως το εμβαδόν τραapeζίου ( $E_{\text{τραπ.}} = \frac{(B+\beta) \cdot v}{2}$ ). Ειδικότερα το άθροισμα της μεγάλης και της μικρής βάσης του τραapeζίου αντιστοιχεί στο άθροισμα του  $i_{\text{corr}}$  για την εκάστοτε ημέρα μέτρησης και του  $i_{\text{corr}}$  για την αμέσως προηγούμενη ημέρα μέτρησης. Ύψος του τραapeζίου θεωρείται η διαφορά του χρόνου σε sec μεταξύ της εκάστοτε ημέρας μέτρησης και της αμέσως προηγούμενης.
- Τέλος, η ηλεκτροχημική (θεωρητική) απώλεια μάζας  $\beta$  που υπολογίζεται για κάθε ημέρα μετρήσεων (για παράδειγμα  $\beta_{92}$ ) πρέπει να προστεθεί στην

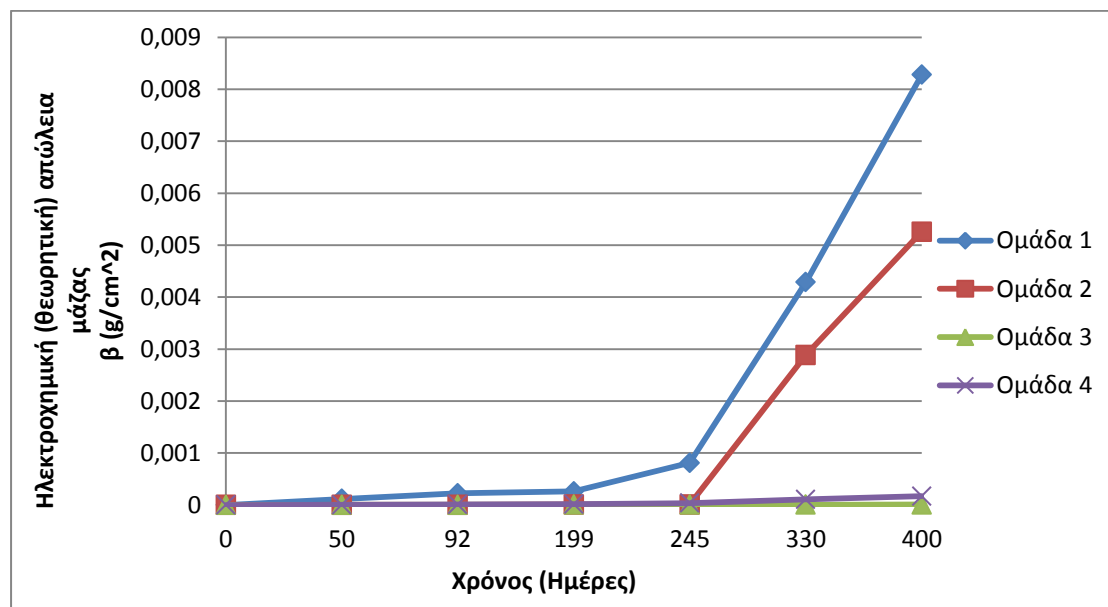
απώλεια μάζας που έχει ήδη υπολογισθεί για όλες τις προηγούμενες ημέρες μετρήσεων (δηλαδή  $\beta_{50}$ ), έτσι ώστε να βρεθεί η συνολική (τελική) απώλεια μάζας  $\beta$  την τελευταία ημέρα μετρήσεων στις 400 ημέρες, η οποία ουσιαστικά θα είναι το άθροισμα όλων των επιμέρους  $\beta$  για κάθε ημέρα μέτρησης για την κάθε ομάδα δοκιμίων.

Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για την ηλεκτροχημική (θεωρητική) απώλεια μάζας  $\beta$  ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμίων.

Πίνακας 22: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την ηλεκτροχημική (θεωρητική) απώλεια μάζας και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμίων

Ηλεκτροχημική (θεωρητική) απώλεια μάζας $\beta$ ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )						
Ημερομηνία	4/6/2014	16/7/2014	31/10/2014	16/12/2014	11/3/2015	20/5/2015
Χρόνος (Ημέρες)	$\beta_{50}$	$\beta_{92}$	$\beta_{199}$	$\beta_{245}$	$\beta_{330}$	$\beta_{400}$
Ομάδα δοκιμίων \ Χρόνος (sec)	4320000	7948800	17193600	21168000	28512000	34560000
Ομάδα 1	0,0001157	0,00022531	0,000260655	0,000807818	0,004285151	0,00827709
Ομάδα 2	8,367E-07	3,3949E-06	8,28548E-06	9,69137E-06	0,002886135	0,00525667
Ομάδα 3	7,205E-07	2,1249E-06	4,4828E-06	4,9872E-06	6,38884E-06	8,3014E-06
Ομάδα 4	2,958E-06	8,1257E-06	1,51864E-05	3,63159E-05	0,000105557	0,00016803

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα της ηλεκτροχημικής (θεωρητικής) απώλειας μάζας  $\beta$  ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 29: Διάγραμμα ηλεκτροχημικής (θεωρητικής) απώλειας μάζας και για τις τέσσερις ομάδες δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου

\*Ο χρόνος χρησιμοποιείται σε ημέρες μόνο χάριν ευκολίας ανάγνωσης του ανωτέρω διαγράμματος  $\beta - t$ .

## 2<sup>ο</sup> Μερικό συμπέρασμα

Από την πορεία της ηλεκτροχημικής (θεωρητικής) απώλειας μάζας με τον χρόνο προκύπτει ότι η απώλεια μάζας για την 1<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών (δοκίμια αναφοράς: χωρίς αναστολέα διάβρωσης) είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας των άλλων τριών ομάδων δοκιμών. Ακολούθως, παρατηρείται ότι η 2<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) έχει με την σειρά της μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας σε σχέση με τις ομάδες 3 και 4, αλλά μικρότερη φυσικά από αυτήν της ομάδας 1. Οι ομάδες δοκιμών 3 (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού) και 4 (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος και του οπλισμού) εμφανίζουν πάρα πολύ μικρές τιμές ηλεκτροχημικής (θεωρητικής) απώλειας μάζας σε συνάρτηση με τον χρόνο. Διάκριση μεταξύ των ομάδων 3 και 4 δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί.

### 3.4.3. Μέτρηση (βαρυμετρικής) απώλειας μάζας

#### 3.4.3.1. Μέτρηση απώλειας μάζας στις 10/11/2014: 210 ημέρες

Μετά από την παραμονή όλων των δοκιμών και των τεσσάρων ομάδων σε υδατικό διάλυμα NaCl 3,5% w/v για χρονικό διάστημα 210 ημερών, ελήφθησαν δύο δοκίμια από κάθε ομάδα, τα οποία υπέστησαν μηχανική θραύση προκειμένου να αποσπαστεί ο οπλισμός από το τσιμεντοκονίαμα. Ο οπλισμός αφού παραλήφθηκε, καθαρίστηκε και κατόπιν ζυγίστηκε σύμφωνα με την διαδικασία που έχει περιγραφεί παραπάνω. Το ποσοστό απώλειας της μάζας του οπλισμού υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$\Delta m(\%) = \frac{m_{\alpha\rho\chi} - m_{\tau\epsilon\lambda}}{m_{\alpha\rho\chi}} \cdot 100\%$$

Ο ρυθμός διάβρωσης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{Ρυθμός διάβρωσης [cm/h]} = \frac{8,76 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta m}{A \cdot D \cdot T}$$

όπου,

$$\Delta m = m_{\alpha\rho\chi} - m_{\tau\epsilon\lambda} \text{ (g)}$$

A: η συνολική εκτεθειμένη επιφάνεια του οπλισμού ( $A = \pi \cdot \frac{d^2}{2} + \pi \cdot d \cdot h = \pi \cdot d \cdot (\frac{d}{2} + h) = 32,97 \text{ cm}^2$ )

D: πυκνότητα δομικού χάλυβα ( $D = 7,8 \text{ g/cm}^3$ )

T: χρόνος έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον ( $T = 210 \text{ days} = 5040 \text{ h}$ )

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων για την απώλεια μάζας δύο δοκιμών από κάθε ομάδα παρατίθενται σε πίνακες και διαγράμματα.

### 1<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών

Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα της μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 4 και 5 της 1<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών (δοκίμια αναφοράς: χωρίς αναστολέα διάβρωσης), καθώς και ο ρυθμός διάβρωσής τους.

Πίνακας 23: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 4 και 5 της 1ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης

<b>Μετρήσεις απώλειας μάζας 1ης ομάδας δοκιμών (10/11/2014: 210 ημέρες)</b>				
<b>Αριθμός δοκιμίου</b>	<b>Αρχική μάζα (g)</b>	<b>Τελική μάζα (g)</b>	<b>Δm(%)</b>	<b>Ρυθμός διάβρωσης [10<sup>-7</sup>*(cm/h)]</b>
<b>4</b>	60,4597	60,3794	0,132816	5,4272E-07
<b>5</b>	58,08	58,0203	0,102789	4,03491E-07
<b>Μέση τιμή</b>			<b>0,117802</b>	<b>4,73106E-07</b>

### 2<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών

Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα της μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 9 και 14 της 2<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος), καθώς και ο ρυθμός διάβρωσής τους.

Πίνακας 24: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 9 και 14 της 2ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης

<b>Μετρήσεις απώλειας μάζας 2ης ομάδας δοκιμών (10/11/2014: 210 ημέρες)</b>				
<b>Αριθμός δοκιμίου</b>	<b>Αρχική μάζα (g)</b>	<b>Τελική μάζα (g)</b>	<b>Δm(%)</b>	<b>Ρυθμός διάβρωσης [10<sup>-7</sup>*(cm/h)]</b>
<b>9</b>	60,3526	60,2789	0,122116	4,98113E-07
<b>14</b>	61,6271	61,5129	0,185308	7,71838E-07
<b>Μέση τιμή</b>			<b>0,153712</b>	<b>6,34975E-07</b>

### 3<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών

Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα της μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 17 και 19 της 3<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού), καθώς και ο ρυθμός διάβρωσής τους.

Πίνακας 25: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 17 και 19 της 3ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης

Μετρήσεις απώλειας μάζας 3ης ομάδας δοκιμίων (10/11/2014: 210 ημέρες)				
Αριθμός δοκιμίου	Αρχική μάζα (g)	Τελική μάζα (g)	Δm(%)	Ρυθμός διάβρωσης [ $10^{-7}$ *(cm/h)]
17	58,8868	58,7159	0,290218	1,15505E-06
19	62,6287	62,4746	0,246053	1,04151E-06
Μέση τιμή			<b>0,268136</b>	<b>1,09828E-06</b>

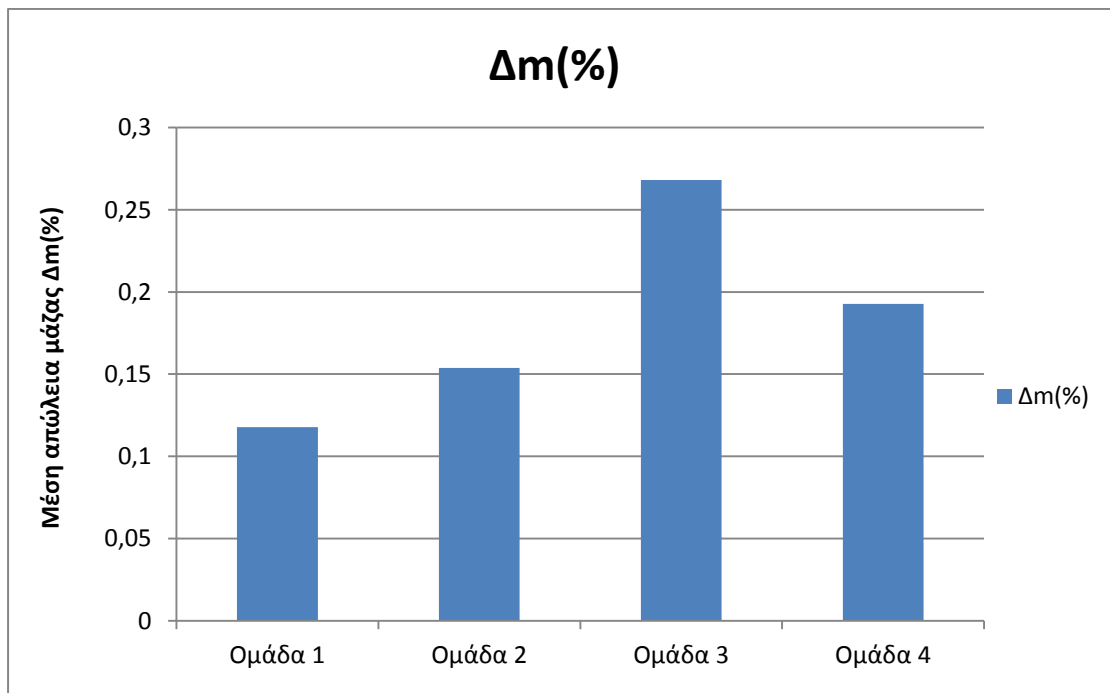
#### 4<sup>η</sup> ομάδα δοκιμίων

Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα της μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 23 και 27 της 4<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμίων (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος και του σπλισμού), καθώς και ο ρυθμός διάβρωσής τους.

Πίνακας 26: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 23 και 27 της 4ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης

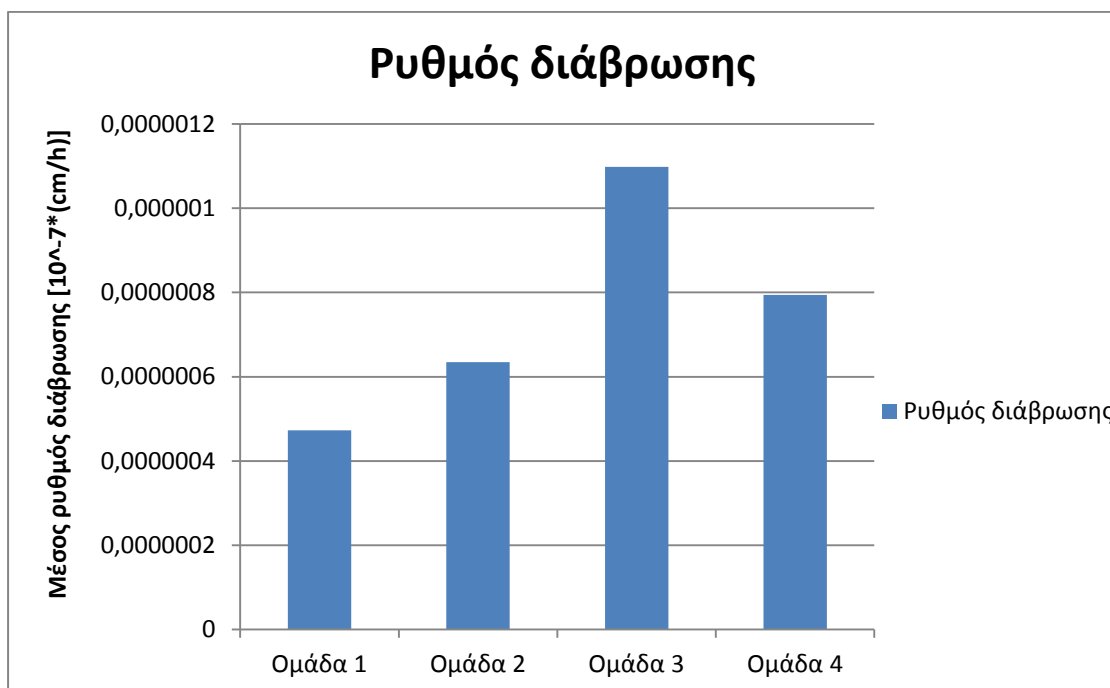
Μετρήσεις απώλειας μάζας 4ης ομάδας δοκιμίων (10/11/2014: 210 ημέρες)				
Αριθμός δοκιμίου	Αρχική μάζα (g)	Τελική μάζα (g)	Δm(%)	Ρυθμός διάβρωσης [ $10^{-7}$ *(cm/h)]
23	62,662	62,5296	0,211292	8,94845E-07
27	58,9415	58,8388	0,174241	6,94113E-07
Μέση τιμή			<b>0,192766</b>	<b>7,94479E-07</b>

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το συγκριτικό διάγραμμα της μέσης απώλειας μάζας  $\Delta m(\%)$  των τεσσάρων ομάδων δοκιμών στις 210 ημέρες του πειράματος.



Σχήμα 30: Συγκριτικό διάγραμμα της μέσης απώλειας μάζας των τεσσάρων ομάδων δοκιμών στις 210 ημέρες του πειράματος

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το συγκριτικό διάγραμμα του μέσου ρυθμού διάβρωσης των τεσσάρων ομάδων δοκιμών στις 210 ημέρες του πειράματος.



Σχήμα 31: Συγκριτικό διάγραμμα του μέσου ρυθμού διάβρωσης των τεσσάρων ομάδων δοκιμών στις 210 ημέρες του πειράματος

### Παρατηρήσεις για την (βαρυμετρική) απώλεια μάζας στις 10/11/2014: 210 ημέρες

Παρατηρείται ότι τα δύο δοκίμια της 1<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών (δοκίμια αναφοράς: χωρίς αναστολέα διάβρωσης) παρουσιάζουν την μικρότερη μέση βαρυμετρική απώλεια μάζας, άρα και τον μικρότερο μέσο ρυθμό διάβρωσης μετά από το πέρασμα 210 ημερών από την έναρξη του πειράματος. Αντίθετα, τα δύο δοκίμια της 3<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού) παρουσιάζουν την μεγαλύτερη μέση βαρυμετρική απώλεια μάζας, άρα και τον μεγαλύτερο μέσο ρυθμό διάβρωσης για το ίδιο χρονικό σημείο του πειράματος. Ειδικότερα, η σειρά που ακολουθούν τα δύο δοκίμια από κάθε ομάδα δοκιμών αναφορικά με την μέση απώλεια μάζας τους και τον μέσο ρυθμό διάβρωσής τους είναι η εξής:

Ομάδα δοκιμών 1 < Ομάδα δοκιμών 2 < Ομάδα δοκιμών 4 < Ομάδα δοκιμών 3

### **3.4.3.2. Μέτρηση απώλειας μάζας στις 22/5/2015: 403 ημέρες**

Μετά από την παραμονή όλων των υπολειπομένων δοκιμών και των τεσσάρων ομάδων σε υδατικό διάλυμα NaCl 3,5% w/v για συνολικό χρονικό διάστημα 403 ημερών από την έναρξη του πειράματος, ελήφθησαν πλέον όλα τα δοκίμια από κάθε ομάδα και υπέστησαν μηχανική θραύση προκειμένου να αποσπαστεί ο οπλισμός από το τσιμεντοκονίαμα. Ο οπλισμός αφού παραλήφθηκε, καθαρίστηκε και κατόπιν ζυγίστηκε σύμφωνα με την διαδικασία που έχει περιγραφεί παραπάνω. Το ποσοστό απώλειας της μάζας του οπλισμού υπολογίζεται ομοίως μέσω του τύπου:

$$\Delta m(\%) = \frac{m_{\alpha\rho\chi} - m_{\tau\epsilon\lambda}}{m_{\alpha\rho\chi}} \cdot 100\%$$

Ο ρυθμός διάβρωσης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{Ρυθμός διάβρωσης [cm/h]} = \frac{8,76 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta m}{A \cdot D \cdot T}$$

όπου,

$$\Delta m = m_{\alpha\rho\chi} - m_{\tau\epsilon\lambda} \text{ (g)}$$

A: η συνολική εκτεθειμένη επιφάνεια του οπλισμού ( $A = \pi \cdot \frac{d^2}{2} + \pi \cdot d \cdot h = \pi \cdot d \cdot (\frac{d}{2} + h) = 32,97 \text{ cm}^2$ )

D: πυκνότητα δομικού χάλυβα ( $D = 7,8 \text{ g/cm}^3$ )

T: χρόνος έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον ( $T = 403 \text{ days} = 9672 \text{ h}$ )

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων για την απώλεια μάζας όλων των υπολειπομένων δοκιμών από κάθε ομάδα παρατίθενται σε πίνακες και διαγράμματα.

### 1<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών

Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα της μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 1, 2, 3, 6 και 7 της 1<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών (δοκίμια αναφοράς: χωρίς αναστολέα διάβρωσης), καθώς και ο ρυθμός διάβρωσής τους.

**Πίνακας 27: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 1, 2, 3, 6 και 7 της 1ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης**

<b>Μετρήσεις απώλειας μάζας 1ης ομάδας δοκιμών (22/5/2015: 403 ημέρες)</b>				
<b>Αριθμός δοκιμίου</b>	<b>Αρχική μάζα (g)</b>	<b>Τελική μάζα (g)</b>	<b>Δm(%)</b>	<b>Ρυθμός διάβρωσης [10<sup>-7</sup>*(cm/h)]</b>
<b>1</b>	60,0897	59,9946	0,158263	3,34931E-07
<b>2</b>	60,9504	60,8384	0,183756	3,9445E-07
<b>3</b>	63,4351	63,2649	0,268306	5,99424E-07
<b>6</b>	57,9822	57,8828	0,171432	3,50075E-07
<b>7</b>	62,872	62,7539	0,187842	4,15934E-07
<b>Μέση τιμή</b>			<b>0,195439</b>	<b>4,1972E-07</b>

\*Οι μετρήσεις για το δοκίμιο 7 δεν λαμβάνονται υπ' όψιν για τον προσδιορισμό της μέσης τιμής της απώλειας μάζας.

### 2<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών

Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα της μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 8, 10, 11, 12 και 13 της 2<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος), καθώς και ο ρυθμός διάβρωσής τους.

**Πίνακας 28: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 8, 10, 11, 12 και 13 της 2ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης**

<b>Μετρήσεις απώλειας μάζας 2ης ομάδας δοκιμών (22/5/2015: 403 ημέρες)</b>				
<b>Αριθμός δοκιμίου</b>	<b>Αρχική μάζα (g)</b>	<b>Τελική μάζα (g)</b>	<b>Δm(%)</b>	<b>Ρυθμός διάβρωσης [10<sup>-7</sup>*(cm/h)]</b>
<b>8</b>	60,9189	60,7882	0,214548	4,60309E-07
<b>10</b>	57,1357	57,0189	0,204426	4,11355E-07
<b>11</b>	60,8614	60,7048	0,257306	5,51526E-07
<b>12</b>	61,5698	61,4109	0,258081	5,59626E-07
<b>13</b>	61,7807	61,6182	0,263027	5,72305E-07
<b>Μέση τιμή</b>			<b>0,239477</b>	<b>5,11024E-07</b>

### 3<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών

Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα της μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 15, 16, 18, 20 και 21 της 3<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμών (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού), καθώς και ο ρυθμός διάβρωσής τους.



Πίνακας 29: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 15, 16, 18, 20 και 21 της 3ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης

<b>Μετρήσεις απώλειας μάζας 3ης ομάδας δοκιμίων (22/5/2015: 403 ημέρες)</b>				
<b>Αριθμός δοκιμίου</b>	<b>Αρχική μάζα (g)</b>	<b>Τελική μάζα (g)</b>	<b>Δm(%)</b>	<b>Ρυθμός διάβρωσης [10<sup>-7</sup>*(cm/h)]</b>
<b>15</b>	63,872	63,6934	0,279622	6,29007E-07
<b>16</b>	61,8474	61,6929	0,249808	5,4413E-07
<b>18</b>	60,8411	60,6995	0,232737	4,98698E-07
<b>20</b>	61,4745	61,3334	0,229526	4,96937E-07
<b>21</b>	62,6936	62,4903	0,324276	7,15998E-07
<b>Μέση τιμή</b>			<b>0,271611</b>	<b>5,96958E-07</b>

\*Οι μετρήσεις για το δοκίμιο 20 δεν λαμβάνονται υπ' όψιν για τον προσδιορισμό της μέσης τιμής της απώλειας μάζας.

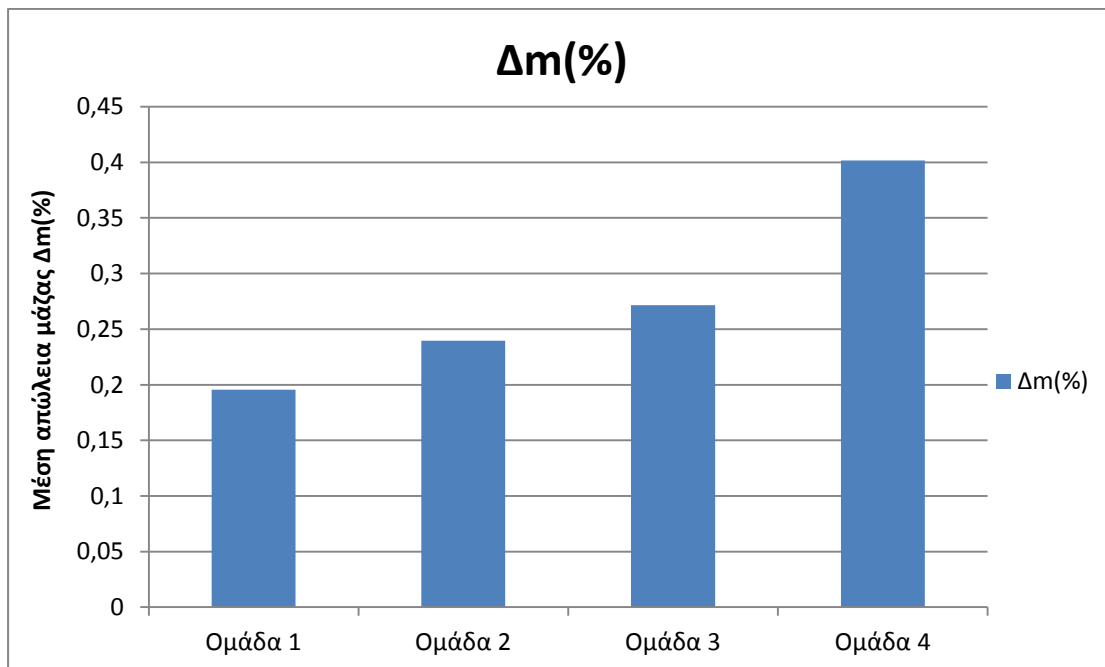
#### 4<sup>η</sup> ομάδα δοκιμίων

Στον ακόλουθο Πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα της μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 22, 24, 25 και 26 της 4<sup>ης</sup> ομάδας δοκιμίων (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος και του σπλισμού), καθώς και ο ρυθμός διάβρωσής τους.

Πίνακας 30: Αποτελέσματα μέτρησης απώλειας μάζας για τα δοκίμια 22, 24, 25 και 26 της 4ης ομάδας - Ρυθμός διάβρωσης

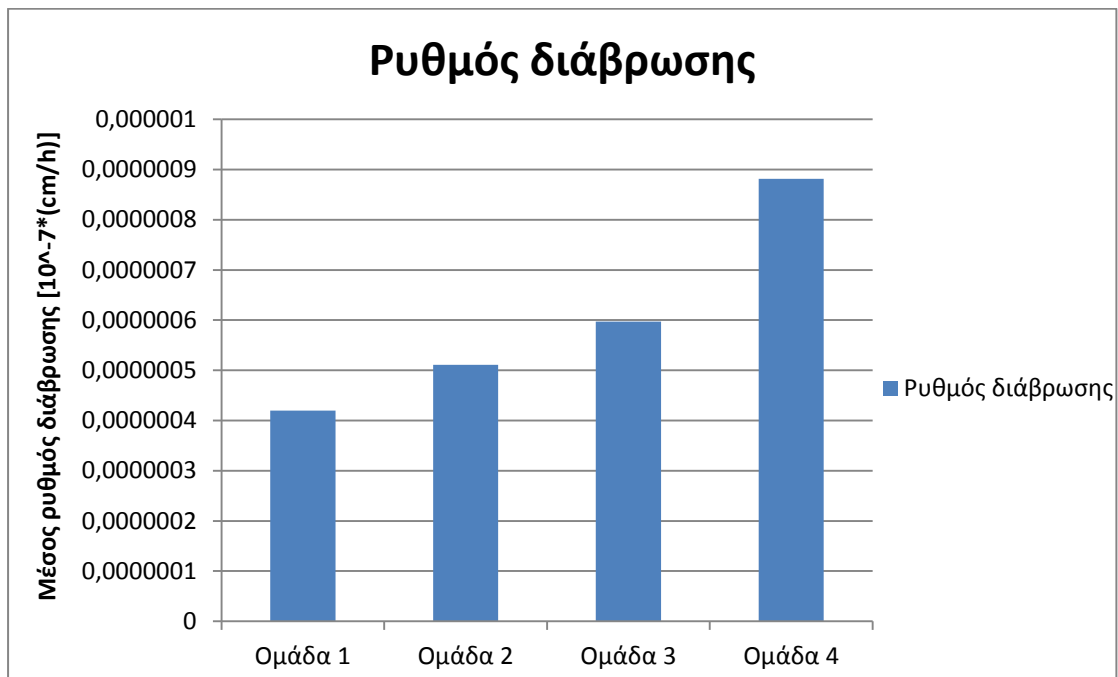
<b>Μετρήσεις απώλειας μάζας 4ης ομάδας δοκιμίων (22/5/2015: 403 ημέρες)</b>				
<b>Αριθμός δοκιμίου</b>	<b>Αρχική μάζα (g)</b>	<b>Τελική μάζα (g)</b>	<b>Δm(%)</b>	<b>Ρυθμός διάβρωσης [10<sup>-7</sup>*(cm/h)]</b>
<b>22</b>	61,6661	61,3836	0,458112	9,9493E-07
<b>24</b>	61,1799	60,953	0,370873	7,99114E-07
<b>25</b>	63,466	63,2561	0,330728	7,39242E-07
<b>26</b>	63,054	62,7725	0,446443	9,91409E-07
<b>Μέση τιμή</b>			<b>0,401539</b>	<b>8,81174E-07</b>

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το συγκριτικό διάγραμμα της μέσης απώλειας μάζας  $\Delta m(\%)$  των τεσσάρων ομάδων δοκιμών στις 403 ημέρες του πειράματος.



Σχήμα 32: Συγκριτικό διάγραμμα της μέσης απώλειας μάζας των τεσσάρων ομάδων δοκιμών στις 403 ημέρες του πειράματος

Στο ακόλουθο Σχήμα απεικονίζεται το συγκριτικό διάγραμμα του μέσου ρυθμού διάβρωσης των τεσσάρων ομάδων δοκιμών στις 403 ημέρες του πειράματος.



Σχήμα 33: Συγκριτικό διάγραμμα του μέσου ρυθμού διάβρωσης των τεσσάρων ομάδων δοκιμών στις 403 ημέρες του πειράματος

### 3<sup>ο</sup> Μερικό συμπέρασμα

Παρατηρείται ότι μετά το πέρας 403 ημερών από την έναρξη του πειράματος η μέση βαρυμετρική απώλεια μάζας, άρα και ο μέσος ρυθμός διάβρωσης, των τεσσάρων ομάδων δοκιμών από την μικρότερη προς την μεγαλύτερη ακολουθεί την εξής σειρά:

Ομάδα δοκιμών 1 < Ομάδα δοκιμών 2 < Ομάδα δοκιμών 3 < Ομάδα δοκιμών 4

Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζουν μία διαφοροποίηση σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που ελήφθησαν κατά την μέτρηση της απώλειας μάζας μετά το πέρας 210 ημερών από την έναρξη του πειράματος. Συγκεκριμένα, η διαφορά αυτή εντοπίζεται στο ότι ενώ στο μέσο περίπου του πειράματος, στις 210 ημέρες, η ομάδα δοκιμών 3 (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού) εμφάνιζε την μεγαλύτερη απώλεια μάζας, πλέον στην λήξη του πειράματος στις 403 ημέρες η ομάδα δοκιμών 4 (αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος και του οπλισμού) παρουσιάζει την μεγαλύτερη απώλεια μάζας.

#### **3.4.4. Οπτικές παρατηρήσεις**

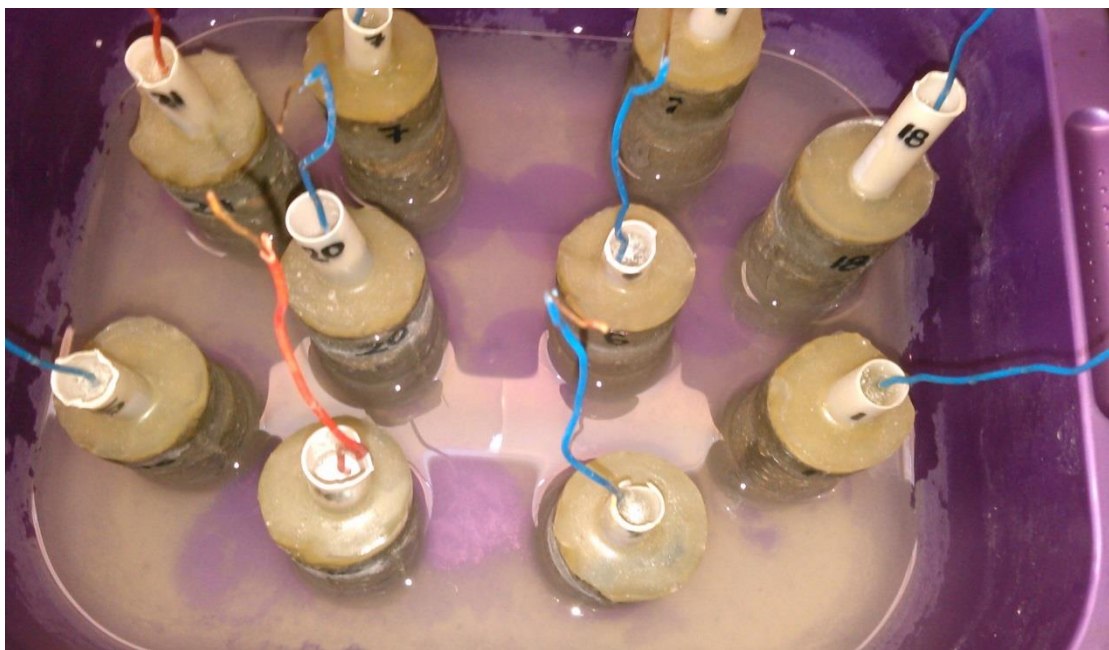
Πέραν από τις πειραματικές μετρήσεις που ελήφθησαν και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων αυτών, πραγματοποιήθηκαν και κάποιες επιπλέον οπτικές παρατηρήσεις κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος:

- Το υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου του δοχείου που περιείχε τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4, τα οποία είχαν επαλειφθεί εξωτερικά με αναστολέα διάβρωσης, είχε αρχίσει να γίνεται θολό ήδη από τις πρώτες ημέρες του πειράματος. Ύστερα από έξι μήνες έκθεσης, το χρώμα του είχε πλέον γίνει καφέ, γεγονός που οδήγησε στην απόφαση για αντικατάσταση του υπάρχοντος διαλύματος NaCl με καινούργιο υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου περιεκτικότητας 3,5% w/v την 218<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος, δηλαδή στις 18/11/2014. Ο χρωματισμός αυτός ενδεχομένως να οφείλεται στο ότι ο αναστολέας διάβρωσης προτίμησε να μεταφερθεί στο διάλυμα NaCl. Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρήθηκε σε κανένα χρονικό σημείο του πειράματος στο έτερο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 1 και 3, τα οποία δεν είχαν επαλειφθεί εξωτερικά με αναστολέα διάβρωσης. Παρόλο όμως που το υδατικό διάλυμα NaCl του δοχείου με τα δοκίμια των ομάδων 1 και 3 δεν παρουσίασε καφέ χρωματισμό, πραγματοποιήθηκε ομοίως αντικατάστασή του με καινούργιο την 234<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος, δηλαδή στις 4/12/2014. Για καλύτερη κατανόηση και σύγκριση της διαφοράς χρώματος του διαλύματος NaCl στα δύο δοχεία παρατίθεται η φωτογραφία του ακόλουθου Σχήματος, όπου φαίνεται το καφέ χρώμα του διαλύματος NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4 μετά από έξι μήνες παραμονής σε αυτό και ακολούθως και η αντίστοιχη φωτογραφία του

παρακάτω Σχήματος, όπου φαίνεται το διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 1 και 3. Από την διαφοροποίηση στο χρώμα του διαλύματος NaCl των δύο δοχείων προκύπτει το συμπέρασμα ότι η αιτία της χρωματικής αυτής αλλαγής στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4 σχετίζεται πιθανώς με την διάχυση μέσα στο διάλυμα κάποιου συστατικού του επιστρώματος με αναστολέα διάβρωσης από την επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος των δοκιμίων των ομάδων 2 και 4.



Σχήμα 34: Διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4 (επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) έξι μήνες μετά από την έναρξη του πειράματος

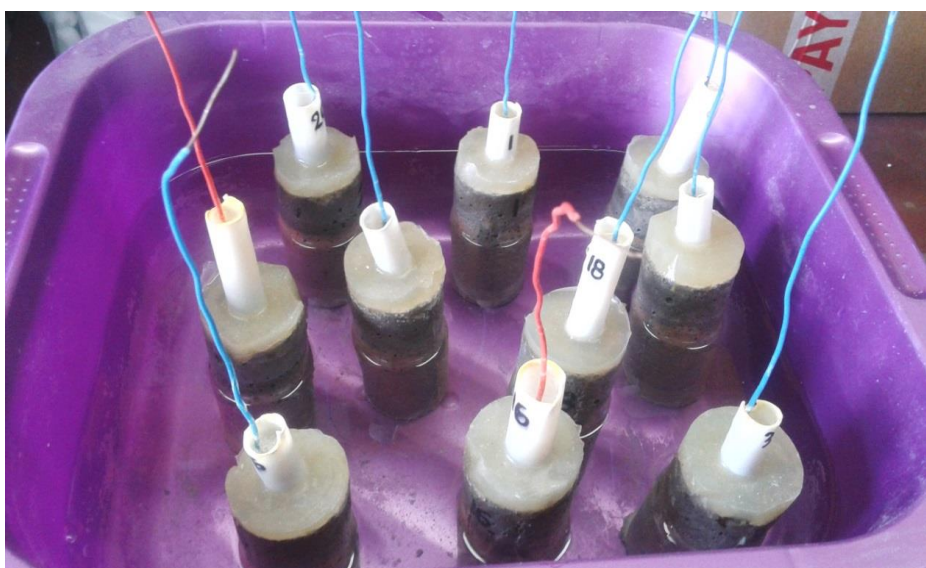


Σχήμα 35: Διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 1 και 3 (χωρίς επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) έξι μήνες μετά από την έναρξη του πειράματος

- Μετά την αντικατάσταση που πραγματοποιήθηκε στο υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου στα δύο δοχεία μετά το πέρας επτά περίπου μηνών από την έναρξη του πειράματος όπως περιγράφηκε παραπάνω, παρατηρήθηκε ότι το διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4 άρχισε πολύ γρήγορα να γίνεται θολό – ήδη από τον αμέσως επόμενο μήνα – σε σύγκριση με το έτερο δοχείο, στο οποίο δεν παρατηρήθηκε κάτι τέτοιο. Τρεις περίπου μήνες μετά την ανανέωση του διαλύματος το χρώμα του διαλύματος NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4, τα οποία είχαν επικαλυφθεί εξωτερικά με αναστολέα διάβρωσης, ήταν ήδη εμφανώς πιο θολό σε σχέση με το αντίστοιχο του δοχείου με τα δοκίμια των ομάδων 1 και 3, όπως άλλωστε φαίνεται και στις φωτογραφίες των παρακάτω Σχημάτων.

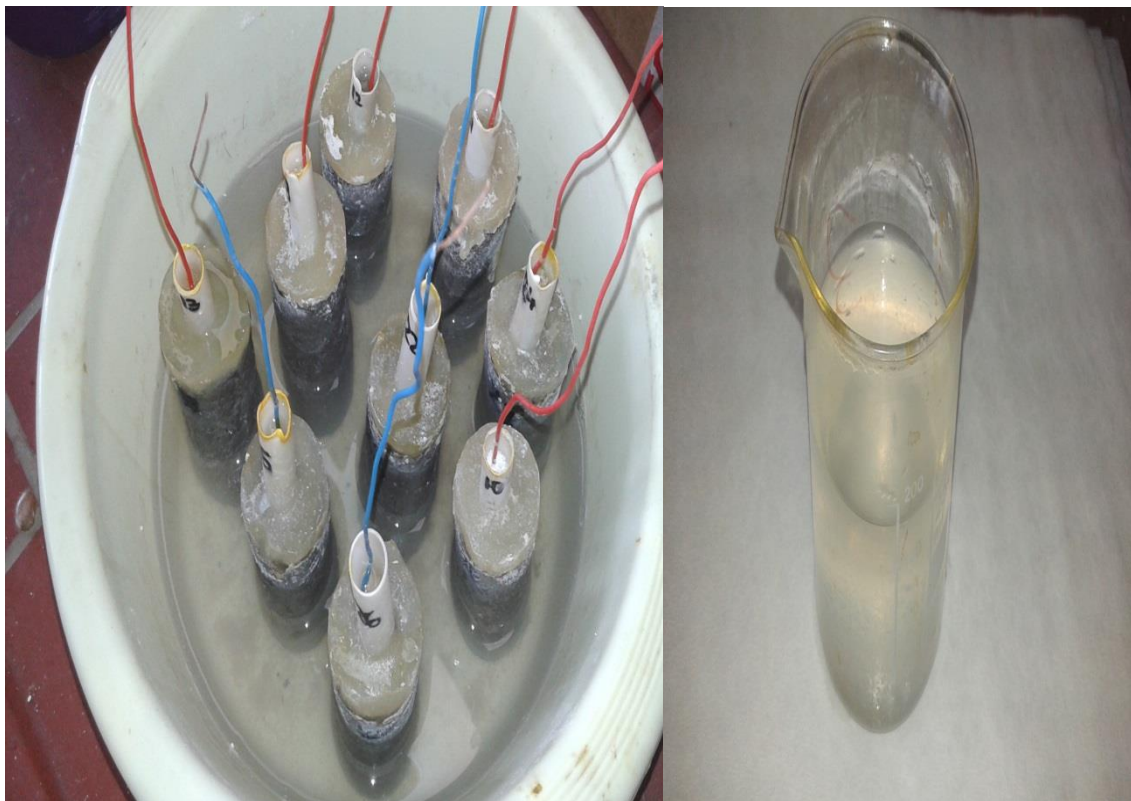


Σχήμα 36: Διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4 (επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) τρεις μήνες μετά από την ανανέωση του διαλύματος



Σχήμα 37: Διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 1 και 3 (χωρίς επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) τρεις μήνες μετά από την ανανέωση του διαλύματος

- Στους έξι περίπου μήνες που μεσολάβησαν μεταξύ της ανανέωσης του διαλύματος στα δύο δοχεία και της τελικής θραύσης όλων των δοκιμίων κατά την λήξη του πειράματος δεν εμφανίστηκε ξανά καφέ απόχρωση στο διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4. Τέλος, κατά την λήξη του πειράματος παρατηρήθηκε ότι το διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4 είχε λάβει ακόμη πιο έντονα θολή απόχρωση σε σχέση με το αντίστοιχο του έτερου δοχείου, συγκριτικά με τρεις μήνες πριν. Για καλύτερη οπτική παρατήρηση και σύγκριση της τελικής διαφοράς χρώματος στα δύο δοχεία έξι περίπου μήνες μετά την ανανέωση του διαλύματος NaCl, δηλαδή κατά την λήξη του πειράματος, παρατίθενται οι φωτογραφίες του ακόλουθου Σχήματος, στις οποίες απεικονίζεται το χρώμα του διαλύματος NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4, τα οποία είχαν επαλειφθεί εξωτερικά με αναστολέα διάβρωσης και ακολούθως και οι αντίστοιχες φωτογραφίες του παρακάτω Σχήματος, στις οποίες απεικονίζεται το αντίστοιχο διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 1 και 3.



Σχήμα 38: Διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 2 και 4 (επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) έξι μήνες μετά την ανανέωση του διαλύματος (λήξη πειράματος)



Σχήμα 39: Διάλυμα NaCl στο δοχείο με τα δοκίμια των ομάδων 1 και 3 (χωρίς επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος) έξι μήνες μετά την ανανέωση του διαλύματος (λήξη πειράματος)

- Κατά την πρώτη θραύση δύο δοκιμίων από κάθε ομάδα την 210<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος, δηλαδή στις 10/11/2014, παρατηρήθηκε ότι η πρόσφυση του χάλυβα στο τσιμεντοκονίαμα στα δοκίμια των ομάδων 3 και 4, στα οποία είχε εφαρμοστεί αναστολέας διάβρωσης στην οπλισμό, ήταν σαφώς καλύτερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη των ομάδων 1 και 2, στις οποίες δεν είχε εφαρμοστεί αναστολέας διάβρωσης στον οπλισμό. Προκύπτει επομένως το συμπέρασμα ότι ο συγκεκριμένος αναστολέας διάβρωσης που εφαρμόστηκε στον οπλισμό των δοκιμίων των ομάδων 3 και 4 βελτιώνει την πρόσφυση μεταξύ χάλυβα και τσιμεντοκονιάματος.
- Κατά την θραύση των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος με σκοπό την παραλαβή των οπλισμών τους τόσο την 210<sup>η</sup> ημέρα (10/11/2014), όσο και την τελευταία 403<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος (22/5/2015), παρατηρήθηκε ότι οι οπλισμοί των δοκιμίων των ομάδων 3 και 4, οι οποίοι είχαν επαλειφθεί με αναστολέα διάβρωσης, είχαν αφήσει κόκκινα ίχνη επάνω στο τσιμεντοκονίαμα, όπως απεικονίζεται στην φωτογραφία του ακόλουθου Σχήματος. Αντίθετα, οι οπλισμοί των δοκιμίων των ομάδων 1 και 2, οι οποίοι δεν είχαν επαλειφθεί με αναστολέα διάβρωσης, δεν είχαν αφήσει κόκκινο αποτύπωμα επάνω στο τσιμεντοκονίαμα, όπως απεικονίζεται στην φωτογραφία του παρακάτω Σχήματος. Προκύπτει συνεπώς το συμπέρασμα ότι το κόκκινο αυτό αποτύπωμα των οπλισμών των δοκιμίων των ομάδων 3 και 4 επάνω στο τσιμεντοκονίαμα δημιουργήθηκε λόγω της επάλειψής με αναστολέα διάβρωσης.



Σχήμα 40: Κόκκινο αποτύπωμα επάνω στο τσιμεντοκονίαμα από τον αναστολέα διάβρωσης επάνω στον οπλισμό στο δοκίμιο 16 της ομάδας 3

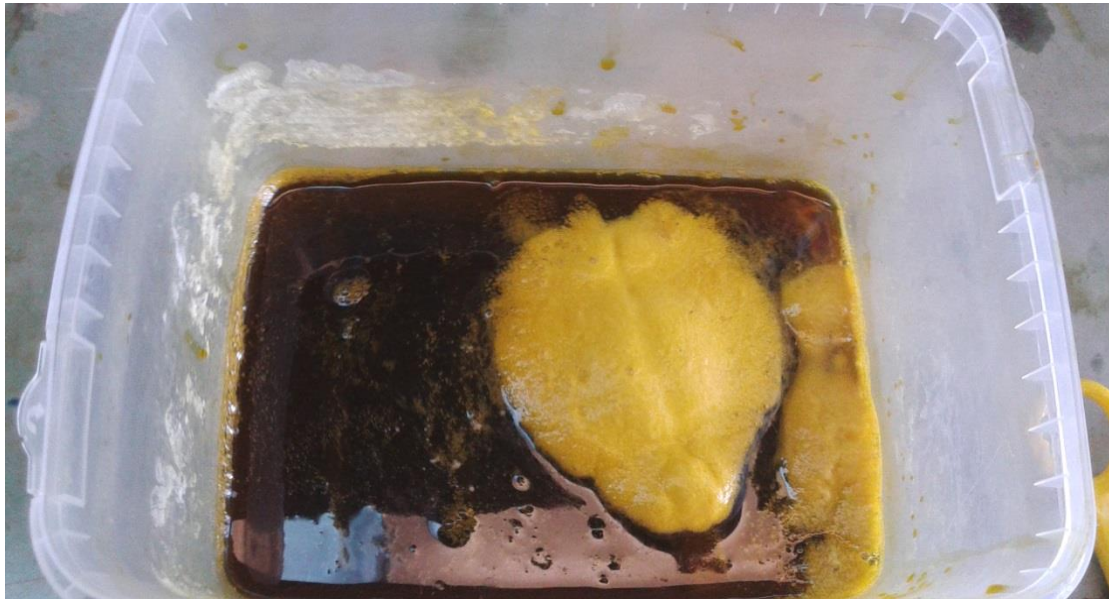


Σχήμα 41: Απουσία κόκκινου αποτυπώματος επάνω στο τσιμεντοκονίαμα λόγω της μη εφαρμογής αναστολέα διάβρωσης στον οπλισμό του δοκίμιου 12 της ομάδας 2

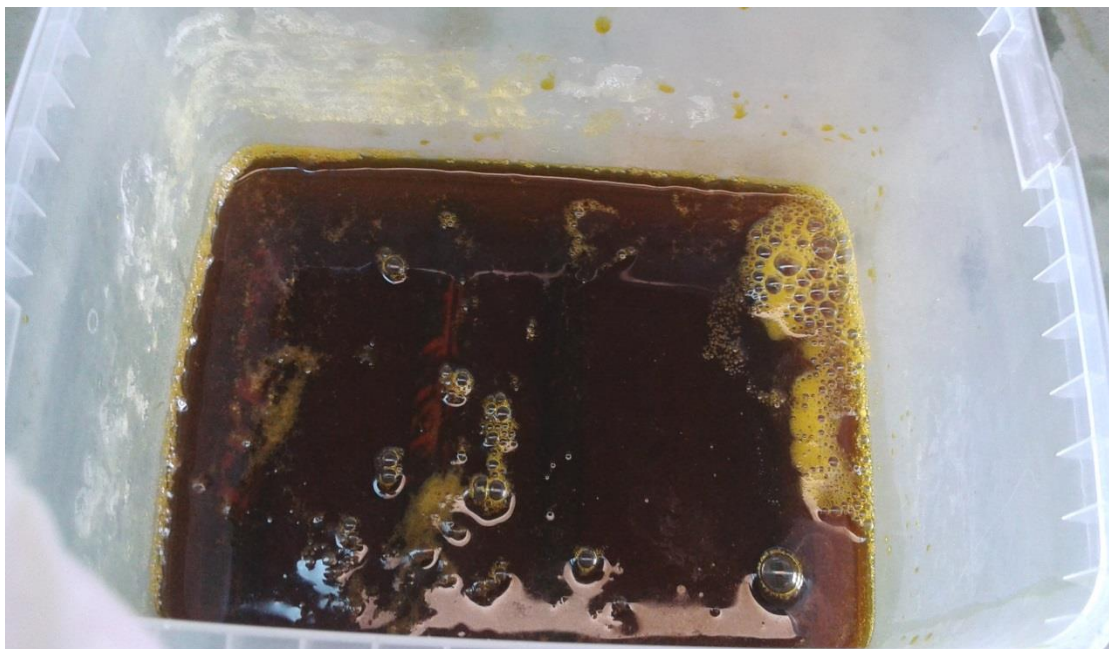
- Κατά τον καθαρισμό των οπλισμών που παραλήφθηκαν μετά την θραύση των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος τόσο την 210<sup>η</sup> ημέρα (10/11/2014), όσο και την τελευταία 403<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος (22/5/2015), παρατηρήθηκε ότι με την βύθισή τους στο διάλυμα υδροχλωρικού οξέος με αναστολέα διάβρωσης ο αφρισμός που δημιούργησαν οι οπλισμοί των δοκιμίων των ομάδων 3 και 4, οι οποίοι είχαν επαλειφθεί με αναστολέα διάβρωσης, ήταν ιδιαίτερα έντονος και αισθητός, όπως φαίνεται και στην φωτογραφία του ακόλουθου Σχήματος. Αντίθετα, οι οπλισμοί των δοκιμίων των ομάδων 1 και 2, οι οποίοι δεν είχαν επαλειφθεί με αναστολέα διάβρωσης, προκάλεσαν ελάχιστο αφρισμό, όπως φαίνεται και στην φωτογραφία του παρακάτω Σχήματος. Προκύπτει επομένως το συμπέρασμα ότι το φαινόμενο αυτό



οφείλεται στην αντίδραση του αναστολέα διάβρωσης της επιφάνειας του οπλισμού με το διάλυμα υδροχλωρικού οξέος.



Σχήμα 42: Έντονος αφρισμός των οπλισμών των δοκιμών των ομάδων 3 και 4 (επάλειψη οπλισμών με αναστολέα διάβρωσης) κατά τον καθαρισμό τους μέσα στο διάλυμα HCl με αναστολέα διάβρωσης



Σχήμα 43: Ελάχιστος αφρισμός των οπλισμών των δοκιμών των ομάδων 1 και 2 (οπλισμοί χωρίς επάλειψη με αναστολέα διάβρωσης) κατά τον καθαρισμό τους μέσα στο διάλυμα HCl με αναστολέα διάβρωσης

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 4.1. Συζήτηση αποτελεσμάτων

Υπενθυμίζεται ότι για το πείραμα αυτό κατασκευάστηκαν 4 ομάδες δοκιμών οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος ως εξής:

- Ομάδα 1 (7 δοκίμια)  
Στα δοκίμια 1 – 7 της Ομάδας 1 δεν εφαρμόστηκε αναστολέας διάβρωσης. Είναι τα δοκίμια αναφοράς (τυφλά).
- Ομάδα 2 (7 δοκίμια)  
Στην επιφάνεια των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος 8 – 14 της Ομάδας 2 εφαρμόστηκαν δύο στρώσεις επιστρώματος με αναστολέα διάβρωσης. Στον οπλισμό δεν εφαρμόστηκε αναστολέας.
- Ομάδα 3 (7 δοκίμια)  
Στους οπλισμούς των δοκιμών 15 – 21 της Ομάδας 3 εφαρμόστηκε επίστρωμα με αναστολέα διάβρωσης. Στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος δεν εφαρμόστηκε αναστολέας.
- Ομάδα 4 (6 δοκίμια)  
Στα δοκίμια 22 – 27 της Ομάδας 4 εφαρμόστηκε επίστρωμα με τον προς μελέτη αναστολέα διάβρωσης τόσο στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος, όσο και στην επιφάνεια του οπλισμού.

Από τις τρεις μεθόδους εκτίμησης της διάβρωσης του οπλισμού των δοκιμών οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα της διεξαγωγής του πειράματος προκύπτουν αλληλοσυγκρουόμενα αποτελέσματα.

- Σύμφωνα με την μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης η χειρότερη ομάδα δοκιμών είναι η 4<sup>η</sup>, στην οποία είχε εφαρμοστεί αναστολέας διάβρωσης τόσο στην επιφάνεια του οπλισμού, όσο και στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος. Διάκριση μεταξύ των άλλων τριών ομάδων δοκιμών δεν είναι δυνατόν να γίνει.
- Από την μέτρηση της θεωρητικής (ηλεκτροχημικής) απώλειας μάζας προκύπτει ότι η χειρότερη από όλες τις κατηγορίες δοκιμών αναφορικά με την συμπεριφορά ως προς την διάβρωση είναι η 1<sup>η</sup> (δοκίμια αναφοράς: χωρίς αναστολέα διάβρωσης). Με τη σειρά της η 2<sup>η</sup> ομάδα δοκιμών, στην οποία είχε εφαρμοστεί αναστολέας διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος, παρουσιάζει χειρότερη συμπεριφορά σε σχέση με τις ομάδες 3 και 4. Διάκριση μεταξύ των ομάδων 3 και 4 δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί.
- Από την μέτρηση για την βαρυμετρική απώλεια μάζας προκύπτει ότι η χειρότερη κατηγορία δοκιμών είναι η 4<sup>η</sup>. Πιο συγκεκριμένα, μετά το πέρας 403 ημερών από την έναρξη του πειράματος η απώλεια μάζας των τεσσάρων ομάδων δοκιμών από την μικρότερη προς την μεγαλύτερη ακολουθεί την εξής σειρά:  
Ομάδα δοκιμών 1 < Ομάδα δοκιμών 2 < Ομάδα δοκιμών 3 < Ομάδα δοκιμών 4

Η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της βαρυμετρικής απώλειας μάζας και της ηλεκτροχημικής (θεωρητικής) απώλειας μάζας πιθανώς να οφείλεται στο ότι ο χάλυβας των δοκιμίων των ομάδων 3 και 4 μπορεί μεν να διαβρώθηκε περισσότερο και για τον λόγο αυτό να παρουσιάζει τελικά και την μεγαλύτερη απώλεια μάζας, αλλά τα οξειδία του σιδήρου να παρέμειναν πάνω στην επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης του οπλισμού. Στο γεγονός αυτό συνηγορεί και το ότι οι οπλισμοί των δοκιμίων των ομάδων 3 και 4 άφησαν κόκκινο ίχνος λόγω των οξειδίων σιδήρου επάνω στο τσιμεντοκονίαμα. Η παραμονή των οξειδίων επί της επικάλυψης είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης των οπλισμών, παρά την διάβρωση που είχαν υποστεί. Βάσει της εξήγησης αυτής δικαιολογούνται τα μικρά ρεύματα διάβρωσης των δοκιμίων των ομάδων 3 και 4 και επομένως και η μικρή ηλεκτροχημική (θεωρητική) απώλεια της μάζας τους, την στιγμή που η βαρυμετρική απώλεια της μάζας τους είναι μεγάλη.

Γενικά σύμφωνα με την βαρυμετρική απώλεια μάζας, η οποία θεωρείται πιο αξιόπιστη από τις άλλες δύο μεθόδους εκτίμησης της διάβρωσης του οπλισμού, αφού είναι και η μόνη καταστρεπτική μέθοδος, η εφαρμογή της επικάλυψης με αναστολέα διάβρωσης επί της επιφάνειας του οπλισμού (ομάδες 3 και 4) επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα αναφορικά με την προστασία απέναντι στην διάβρωση.

Βάσει των αποτελεσμάτων της βαρυμετρικής απώλειας μάζας προκύπτει επίσης ότι η εφαρμογή της επικάλυψης με αναστολέα διάβρωσης επί της επιφάνειας του τσιμεντοκονιάματος (ομάδες 2 και 4) οδηγεί περίπου στα ίδια αποτελέσματα που επιφέρει και η μη εφαρμογή επικάλυψης στην επιφάνεια των δοκιμίων (ομάδα 1).

Κατά συνέπεια προκύπτει το συμπέρασμα ότι η συγκεκριμένη επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης δεν προσφέρει προστασία στον οπλισμό έναντι της διάβρωσης, είτε εφαρμοστεί στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος, είτε στην επιφάνεια του οπλισμού, τουλάχιστον για την χρονική διάρκεια των 403 ημερών του πειράματος αυτού. Επομένως, ο αναστολέας διάβρωσης  $H_2N - CH_2 - CH_2 - OH$  που χρησιμοποιήθηκε για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα πρέπει να βελτιωθεί.

## 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alghamdi, S. A., & Ahmad, S. (n.d.). Service life prediction of RC structures based on correlation between electrochemical and gravimetric reinforcement corrosion rates. *Cement and Concrete Composites*, σσ. 64-68.
- Baeckmann, W., Schwenk, W., & Prinz, W. (1989). *Handbook of Cathodic Corrosion Protection*. Weinheim: VCH.
- Batis, G., Kouloumbi, N., & Soulis, E. (1998, Vol.45 No.4). Sandblasting: the only way to eliminate rust? *Anti-Corrosion Methods and Materials*.
- Batis, G., Routoulas, A., & Rakanta, E. (2003, January 25). Effects of migrating inhibitors on corrosion of reinforcing steel covered with repair mortar. *Cement and Concrete Composites*.
- Bavarian, B., & Reiner, L. (2003). *Corrosion Protection of Steel Rebar in Concrete by Migrating Corrosion Inhibitors*. NACE.
- Bavarian, B., & Reiner, L. (2006). *Current Progress in Corrosion Inhibition of Reinforced Steel in Concrete using Migrating Corrosion Inhibitors*. NACE.
- Bierwagen, G. (1996). Reflections on corrosion control by organic coatings. *Progress in Organic Coatings*, Vol.28.
- Cetinel, H., Toparli, M., & Ozsoyeller, L. (2000). A finite element based prediction of the Microstructural evolution of steels subjected to the Tempcore process. *Mechanics of Materials*, σσ. 339-347.
- Chandler, K., & Bayliss, B. (1985). *Corrosion Protection of Steel Structures*. Elsevier Applied Science.
- Davis, J., & Associates, D. &. (2004). *Corrosion: Understanding the basics*. U.S.A.: ASM International, The Materials Information Society.
- Fontana, M. (1978). *Corrosion Engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Hansson, C., Mammoliti, L., & Bope, B. (1998). Corrosion inhibitors in concrete- Part I: The principles. *Cement and Concrete Research*, σσ. 1775-1781.
- <http://ikaros.teipir.gr/phyche/Subjects/Routoulas/Petyl/%D0%C5%D4%D5%CB%20%CA%C5%D63%C1.pdf>. (n.d.). Τμήμα Φυσικής, Χημείας και Τεχνολογίας Υλικών Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών ΤΕΙ Πειραιά. Ανάκτηση από <http://ikaros.teipir.gr/phyche/Subjects/Routoulas/Petyl/%D0%C5%D4%D5%CB%20%CA%C5%D63%C1.pdf>
- [http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL\\_GUIDES/METAL\\_KATASK/me4\\_2t](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/METAL_KATASK/me4_2t). (n.d.). Ανάκτηση από

- [http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL\\_GUIDES/METAL\\_KATASK/me4\\_2t.htm](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/METAL_KATASK/me4_2t.htm)
- <http://www.businessdictionary.com/definition/prestressed-concrete.html>. (n.d.). Ανάκτηση από <http://www.businessdictionary.com/definition/prestressed-concrete.html>
- ISO12944(1-8), B. E. (1998). *Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems*.
- ISO8044-99. (n.d.). *Corrosion of Metals and Alloys - Basic Terms and Definitions*.
- Jones, D. (1996). *Principles and Prevention of Corrosion*. New Jersey: Prentice Hall 2nd edition.
- Mattsson, E. (1989). *Basic Corrosion Technology for Scientists and Engineers*. England: Ellis Horwood Ltd.
- Molera, P., Oller, X., del Vale, M., & Gonzalez, F. (2004). Formulation and characterization of anticorrosive paints. *Pigment and Resin Technology*, Vol.33, No.2.
- Poulsen, E., Risberg, J. E., & Stilling, J. E. (2000). Migration Corrosion Inhibiting Admixtures - Some documentation and a model for the increase of service lifetime. *CANMET/ACI*. Nice.
- Ramachandran, V. (1984). *Concrete admixtures handbook: properties, science and technology*. Noyes Publications, 2nd edition.
- Revie, R., & Uhlig, H. (2008). *Corrosion and corrosion control: An Introduction to corrosion science and engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 4th edition.
- Scully, J. (1990). *The fundamentals of corrosion*. Pergamon Press, 3rd edition.
- Trethewey, K., & Champerlain, J. (1998). *Corrosion for Science and Engineering*. London: Longman 2nd Edition.
- [www.cortecmci.com](http://www.cortecmci.com). (n.d.). Ανάκτηση από [www.cortecmci.com](http://www.cortecmci.com)
- Αργύρη, Ι. (2014). *Προστασία οπλισμένου σκυροδέματος με πρόσθετα - Επίδραση αναστολέα δέσμευσης χλωριόντων στη διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος*. Μεταπτυχιακή Εργασία Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- Γεωργίου, Κ. (n.d.). Ανθεκτικότητα σκυροδέματος (στοιχεία) και ελληνικές πρακτικές κατασκευής (περίληψη ομιλίας).
- Δρίτσος, Σ. (2005). *Ενισχύσεις / επισκευές κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα*. Πάτρα.
- Ζαχαροπούλου, Α. (2013). *Επίδραση πρόσθετων-πρόσμικτων στην διάβρωση του χάλυβα οπλισμού του σκυροδέματος*. Διδακτορική διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

- Κ.Τ.Χ. (2000). *Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος*. Αθήνα: Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ.
- Κουλουμπή, Ν. (2005). *Ηλεκτροχημεία*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών.
- Κουλουμπή, Ν. (2010). *Διάβρωση και Προστασία*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- Κουλουμπή, Ν., & Μοροπούλου, Α. (2010). *Φθορά και Προστασία Υλικών*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- Λεγάκης, Α. (1997). *Δομικά Υλικά*. Εκδόσεις Ευγενίδιο Ίδρυμα.
- Μασαβέτας, Κ. Α. (2005). *Εισαγωγή στη Χημική Θερμοδυναμική με παραδείγματα, ασκήσεις, προβλήματα*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- Μαυροειδής, Π. (n.d.). *Διάβρωση του σιδηρού οπλισμού. Κτίριο*.
- Μοροπούλου, Α., & Μπατής, Γ. (2012). *Δομικά Υλικά*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- Μπατής, Γ. (n.d.). *Χρήση νέων υλικών για την αύξηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών. Εισήγηση στην ημερίδα του ΤΕΕ Ενίσχυση κτιρίων με σύγχρονα υλικά*.
- Μπατής, Γ., Ρακαντά, Ε., & Μελετίου, Κ. (2004). Προβλήματα διάβρωσης οπλισμού κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος στην Ελλάδα. *Σκυρόδεμα*, σσ. 10-18.
- Μπατής, Γ., Ρακαντά, Ε., Θεοδωρίδης, Β., & Σίδερης, Κ. (2003). Επίδραση με αναστολέα διάβρωσης με βάση την Ν,Ν-διμεθυλαμινοαιθανόλη στην προστασία του οπλισμού σκυροδέματος λόγω ενανθράκωσης και ταυτόχρονης παρουσίας χλωριόντων. *14ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος*. Κως.
- Ντάφλου, Ε. (2012). *Ανθεκτικότητα οργανικών επικαλύψεων που περιέχουν αναστολείς διάβρωσης*. Αθήνα: Διδακτορική διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- Παναγιωτίδης, Θ. (2011). *Αναστολείς Διάβρωσης: Ένα αποτελεσματικό όπλο κατά της διάβρωσης*. Ανάκτηση από Αρχιμήδης: Forum ενημέρωσης και προβληματισμού των τεχνικών: <http://www.e-archimedes.gr/faq/item/3651->
- Παναγόπουλος, Γ., & Κίρτας, Ε. (2005). *Κατασκευές Οπλισμένου Σκυροδέματος Ι*.
- Παπαδόπουλος, Μ. (2007). *Μηχανική συμπεριφορά διαβρωμένων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος*. Πάτρα: Διδακτορική διατριβή.
- Σκουλικίδης, Θ. (1994). *Διάβρωση και προστασία υλικών*. Αθήνα.
- Σκουλικίδης, Θ. (2000). *Διάβρωση και Συντήρηση των Δομικών Υλικών Μνημείων*. Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης.
- Τάσιος, Θ., & Αλιγιζάκη, Κ. (1993). *Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος*. Αθήνα.
- ΤΕΕ. (2008). *Οδηγός Δομικών Υλικών*. Αθήνα.

Τσίμας, Σ., & Τσιβιλής, Σ. (2010). *Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Υφαντής, Δ. (1995). *Υλικά - Διάβρωση και Προστασία*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Χρυσουλάκης, Γ. Δ., & Παντελής, Δ. Ι. (2008). *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.