



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΩΝ  
ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΣΕ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ  
ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΕΡΒΕΡΗ ΑΦΡΟΔΙΤΗ**

Διπλωματούχος Αρχιτέκτων Μηχανικός Α.Π.Θ.

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Γ. ΜΠΑΤΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. ΤΣΙΒΙΛΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Νοέμβριος 2014**



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΛΙΚΩΝ"

# ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΣΕ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΕΡΒΕΡΗ ΑΦΡΟΔΙΤΗ**

Διπλωματούχος Αρχιτέκτων Μηχανικός Α.Π.Θ.

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

Γ. ΜΠΑΤΗΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Νοέμβριος 2014**

## Περίληψη

Οι κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, παρότι είναι πολύ ανθεκτικές στη φθορά, μπορεί να υποβαθμιστούν εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με κάποιο διαβρωτικό περιβάλλον και τη συνεπαγόμενη ενανθράκωση του σκυροδέματος και τη διάβρωση του οπλισμού τους. Φυσικοί παράγοντες, όπως είναι οι συνεχείς κύκλοι ψύξης-θέρμανσης, χημικοί παράγοντες όπως τα ιόντα μαγνησίου ή το καθαρό νερό, βιολογικοί καθώς και μηχανικοί παράγοντες μπορούν να οδηγήσουν στη φθορά των κατασκευών και κατά συνέπεια στη μείωση του χρόνου ζωής τους. Το πρόβλημα της διάβρωσης του οπλισμού εντοπίζεται κατά κύριο λόγο σε χώρες που περιβάλλονται από θάλασσα και έχουν ζεστό κλίμα, ενώ από τα τέλη της δεκαετίας του 1960 προσδιορίστηκε και σε μη παράκτιες περιοχές ως παράγοντας υποβάθμισης των κατασκευών. Αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου διάβρωσης πραγματοποιείται είτε κατά την κατασκευαστική φάση μιας δομής (ως μέτρα πρόληψης) ή σε προϋπάρχουσες κατασκευές (ως μέτρα προστασίας).

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας μιας εφαρμοσμένης σε διαφορετικά υποστρώματα επικάλυψης. Για τη μελέτη αυτή κρίθηκε απαραίτητη η κατασκευή πανομοιότυπων δοκιμίων τριών κατηγοριών. Η *πρώτη κατηγορία (τυφλά δοκίμια)* περιλαμβάνει τα δοκίμια αναφοράς που αποτελούνται μόνο από τσιμέντο και οπλισμό. Η *δεύτερη κατηγορία (δοκίμια με επικάλυψη του χάλυβα)* αποτελείται από τα δοκίμια στα οποία έγινε εφαρμογή του ασταριού οπλισμού στο χάλυβα. Η *τρίτη κατηγορία δοκιμίων (δοκίμια με βαφή του σκυροδέματος)* είναι αυτά στα οποία το τσιμεντοκονίαμα εφαρμόστηκε περιμετρικά στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος, χωρίς να έρχεται σε επαφή το αστάρι με τον εγκιβωτισμένο οπλισμό.

Ο σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας εξετάζει τη συμπεριφορά των τριών εφαρμογών της επικάλυψης έναντι διάβρωσης και ενανθράκωσης. Οι επιταχυνόμενες διαβρωτικές συνθήκες επιτεύχθηκαν με παραμονή των δοκιμίων σε διάλυμα NaCl 3,5%κ.β. καθ' όλη την πειραματική διαδικασία. Οι μέθοδοι αποτίμησης της διάβρωσης από χλωριόντα περιλάμβαναν ηλεκτροχημικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό του δυναμικού και του ρεύματος διάβρωσης, της αντίστασης πόλωσης και του ρυθμού διάβρωσης. Μετά το τέλος των πειραμάτων εκτιμήθηκε και η απώλεια μάζας των εγκιβωτισμένων οπλισμών.

## Abstract

Reinforced concrete constructions, although being satisfactorily durable against corrosion, might be downgraded due to inevitable interaction with a corrosive environment and the consequent corrosion of both the concrete and the reinforcement. The deterioration of concrete's quality and the reduction of their life expectancy can be caused by various simultaneous reasons, such as physical factors, including continuous freeze-thaw cycles, chemical agents such as magnesium ions and pure water, biological and mechanical factors. Reinforcement corrosion can be identified as a problem mainly at warm countries that are surrounded by the sea, while in the late '60 it was identified as a problem of major importance to non-coastal areas. The methods that have been developed in order to protect reinforced concrete from corrosion may be applied either on new (precautionary methods) or on existing structures (taking measures against corrosion).

The subject of this thesis is the protection level that the same coating offers, depending on the surface on which this coating is applied. For this reason, three categories of concrete specimens were investigated. The first category (*reference specimens*) includes concrete specimen with no coating. The second category (*specimens with steel coating*) consists of the concrete specimens on which the coating is applied on the surface of the steel, while at the third category (*specimens with cement coating*) the coating is applied on the surface of the cement.

The experimental part consists on corrosion evaluation methods that examine the behavior of the three coating's application methods. The accelerated corrosion of the concrete specimens was achieved by immersing the specimens in 3.5% w.t. NaCl for 185 days. The corrosion evaluation methods include electrochemical measurements, in order to determine the corrosion potential, the corrosion current density and the corrosion rate. After the end of the experiments, the mass loss of the embedded rebars was measured.

## ***Ευχαριστίες***

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε στη σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Γ. Μπατή, τον οποίο και θα έπρεπε να ευχαριστήσω για την καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια διεκπεραίωσης της παρούσας εργασίας. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την διδάκτορα κ. Θ. Ζαφειροπούλου, της οποίας η συμβολή ήταν ιδιαίτερα σημαντική στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στην οικογένεια μου για την συμπαράσταση και την κατανόηση που έδειξαν όλο αυτό το διάστημα. Ωστόσο, θα ήθελα να αφιερώσω την παρούσα εργασία στον κ. Ν. Ντέντε, χωρίς τη βοήθεια και την υποστήριξη του οποίου δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωσή της. Ευχαριστώ από καρδιάς.

## Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	3
<b>1. Εισαγωγή</b>	<b>8</b>
<b>2. Σκυρόδεμα</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Ορισμός σκυροδέματος</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Βασικές ιδιότητες σκυροδέματος</b>	<b>11</b>
2.2.1 <i>Εργασιμότητα</i>	11
2.2.2 <i>Αντοχή</i>	11
2.2.3 <i>Διαπερατότητα</i>	12
2.2.4 <i>Ανθεκτικότητα</i>	12
<b>2.3 Συστατικά του σκυροδέματος</b>	<b>12</b>
2.3.1 <i>Αδρανή</i>	12
2.3.2 <i>Τσιμέντο</i>	14
2.3.2.1 <i>Τύποι τσιμέντων</i>	15
2.3.2.2 <i>Αντοχή και ταχύτητα πήξης</i>	16
2.3.2.3 <i>Κατηγορίες τσιμέντων</i>	17
2.3.3 <i>Νερό</i>	24
2.3.4 <i>Πρόσθετα σκυροδέματος</i>	25
2.3.5 <i>Ουσίες που μειώνουν την αντοχή του σκυροδέματος</i>	26
<b>2.4 Σκυροδέματα με ειδικές απαιτήσεις</b>	<b>27</b>
<b>3. Οπλισμός</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Κατηγοριοποίηση χαλύβων</b>	<b>29</b>
<b>3.2 Συμπεριφορά χάλυβα εντός σκυροδέματος</b>	<b>30</b>
<b>4. Διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος</b>	<b>32</b>
<b>4.1 Ορισμός διάβρωσης</b>	<b>32</b>
<b>4.2 Αιτίες διάβρωσης</b>	<b>34</b>
<b>4.3 Ταχύτητα διάβρωσης</b>	<b>37</b>
<b>4.4 Μηχανισμοί διάβρωσης</b>	<b>39</b>
4.4.1 <i>Ενανθράκωση</i>	39

4.4.2	<i>Επίδραση χλωριόντων</i>	41
<b>4.5</b>	<b>Κατηγορίες διάβρωσης</b>	<b>43</b>
4.5.1	<i>Με κριτήριο το διαβρωτικό περιβάλλον</i>	44
4.5.2	<i>Με κριτήριο το υλικό</i>	46
4.5.3	<i>Με κριτήριο την αιτία</i>	46
4.5.4	<i>Με κριτήριο τη μορφή των ηλεκτροχημικών δράσεων</i>	47
4.5.5	<i>Με κριτήριο τις μηχανικές τάσεις</i>	47
4.5.5.1	<i>Ρευστομηχανική διάβρωση</i>	47
4.5.5.2	<i>Διάβρωση λόγω τριβής</i>	48
4.5.5.3	<i>Διάβρωση από μηχανική καταπόνηση</i>	48
4.5.5.4	<i>Βλάβη από υδρογόνο</i>	49
4.5.5.5	<i>Διάβρωση κόπωσης</i>	49
4.5.6	<i>Με κριτήριο τη μορφολογία της προσβολής</i>	49
4.5.6.1	<i>Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση</i>	49
4.5.6.2	<i>Διάβρωση με βελονισμούς</i>	49
4.5.6.3	<i>Μικρορηγματώδης διάβρωση</i>	51
4.5.6.4	<i>Περικρυσταλλική διάβρωση</i>	51
4.5.6.5	<i>Θερμογαλβανική διάβρωση</i>	51
4.5.7	<i>Συνέπειες διάβρωσης</i>	52
<b>5.</b>	<b>Προληπτικά μέτρα και μέτρα επέμβασης</b>	<b>56</b>
5.1	<b>Προστασία οπλισμένου σκυροδέματος</b>	<b>58</b>
5.2	<b>Προστασία των μετάλλων με αντιδιαβρωτικά χρώματα</b>	<b>59</b>
5.3	<b>Σύσταση των οργανικών επιστρωμάτων</b>	<b>62</b>
5.3.1	<i>Συνδετικό μέσο(φορέας)</i>	62
5.3.1.1	<i>Συνθετικά πολυμερή</i>	62
5.3.1.2	<i>Παράγωγα</i>	63
5.3.1.3	<i>Άλλα συνδετικά μέσα</i>	63
5.3.2	<i>Διαλύτες</i>	64
5.3.2.1	<i>Υδρογονάνθρακες</i>	64
5.3.2.2	<i>Αλκοόλες</i>	64
5.3.2.3	<i>Εστέρες</i>	64
5.3.2.4	<i>Κετόνες</i>	64
5.3.2.5	<i>Γλυκολαιθέρες</i>	65
5.3.3	<i>Πιγμέντα</i>	65
5.3.3.1	<i>Οργανικά/ανόργανα</i>	66
5.3.3.2	<i>Φυσικά/συνθετικά</i>	66
5.3.3.3	<i>Αντιδιαβρωτικά/βελτιωτικά/επιβραδυντές/χρωστικές ουσίες</i>	66
5.3.4	<i>Πρόσθετα</i>	67
5.3.4.1	<i>Ξηραντικά πρόσθετα</i>	67

5.3.4.2	Στεγνωτικά πρόσθετα	67
5.3.4.3	Αντιοξειδωτικά πρόσθετα	67
5.3.4.4	Ενεργά προϊόντα(antifouling)	67
5.3.4.5	Βακτηριοκτόνα και μυκητοκτόνα	67
5.3.4.6	Επιφανειακά ενεργά πρόσθετα	67
5.3.4.7	Αντιπετσωτικά	68
5.3.4.8	Απορροφητές UV	68
5.3.4.9	Διαμορφωτές επιστρώματος	68
5.3.4.10	Παχυντές και παράγοντες αντικαθίζησης	68
<b>5.4</b>	<b>Τύποι οργανικών επιστρώσεων</b>	<b>68</b>
5.4.1	Ακρυλικές διασπορές	69
5.4.2	Χρώματα χλωριομένου καουτσούκ	69
5.4.3	Χρώματα ναυτεχνολογίας	69
<b>5.5</b>	<b>Ιδιότητες αντιδιαβρωτικών χρωμάτων</b>	<b>70</b>
<b>5.6</b>	<b>Επιλογή του αντιδιαβρωτικού επιστρώματος</b>	<b>74</b>
<b>5.7</b>	<b>Μέθοδοι επικάλυψης με αντιδιαβρωτικά χρώματα</b>	<b>75</b>
<b>5.8</b>	<b>Φθορά επιστρωμάτων</b>	<b>76</b>
5.8.1	Διάβρωση κατά την εφαρμογή	77
5.8.2	Διάβρωση κατά την ξήρανση ή την αντίδραση της επίστρωσης	78
5.8.3	Διάβρωση μετά την εφαρμογή της επίστρωσης	78
<b>6.</b>	<b>Μέτρα προστασίας σε υφιστάμενες κατασκευές</b>	<b>82</b>
6.1	Προστασία της επικάλυψης	82
6.2	Επεμβατικές μέθοδοι	83
<b>7.</b>	<b>Πειραματικό μέρος</b>	<b>84</b>
7.1	Σκοπός	84
7.2	Υλικά	84
7.2.1	Προετοιμασία χαλύβων και καλουπιών	84
7.2.2	Δοκίμια	85
7.2.3	Συστήματα επικαλύψεων	85
7.2.3.1	Μέθοδος βαφής	87
7.2.3.2	Επικάλυψη	87
7.2.4	Περιβάλλον έκθεσης των δοκιμών	87



<b>8. Μέθοδοι εκτίμησης αποτελεσματικότητας οργανικών επικαλύψεων έναντι διάβρωσης και ενανθράκωσης</b>	<b>89</b>
<b>8.1 Ηλεκτροχημικές Μετρήσεις Αποτίμησης της Διάβρωσης</b>	<b>89</b>
<b>8.1.1 Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης (OCP)</b>	<b>89</b>
8.1.1.1 Αρχή της μεθόδου	89
8.1.1.2 Ηλεκτρόδιο αναφοράς	90
8.1.1.3 Κατάσταση οπλισμένου σκυροδέματος συναρτήσει του δυναμικού διάβρωσης	90
<b>8.1.2 Τεχνική γραμμικής πόλωσης (LPR)</b>	<b>91</b>
8.1.2.1 Αρχή της μεθόδου	91
8.1.2.2 Κατάσταση του χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος συναρτήσει των μετρήσεων γραμμικής πόλωσης	92
<b>8.2 Απώλεια μάζας χαλύβδινων οπλισμών</b>	<b>92</b>
<b>9. Επεξεργασία αποτελεσμάτων</b>	<b>94</b>
<b>9.1 Μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης</b>	<b>94</b>
9.1.1 Τυφλά δοκίμια	94
9.1.2 Δοκίμια με επικάλυψη του χάλυβα	96
9.1.3 Δοκίμια με επικάλυψη του σκυροδέματος	98
<b>9.2 Τεχνική γραμμικής πόλωσης Linear Polarization Technique, LPR</b>	<b>101</b>
9.2.1 Τυφλά δοκίμια	101
9.2.2 Δοκίμια με επικάλυψη του χάλυβα	103
9.2.3 Δοκίμια με επικάλυψη του σκυροδέματος	105
<b>9.3 Μετρήσεις Απώλειας Μάζας</b>	<b>109</b>
<b>10. Συμπεράσματα</b>	<b>112</b>
<b>Βιβλιογραφικές αναφορές</b>	<b>113</b>
<b>Βιογραφικό σημείωμα</b>	<b>115</b>

## Εισαγωγή

Η πλειονότητα των οικοδομικών κατασκευών στην Ελλάδα πραγματοποιούνται με τη χρήση οπλισμένου σκυροδέματος, ενώ οι μεταλλικές κατασκευές κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος στις προτιμήσεις των μηχανικών, πλεονεκτώντας λόγω του μικρού τους βάρους, της καλής σεισμικής τους συμπεριφοράς, της ταχύτητας δόμησης αλλά και των μεγάλων δυνατοτήτων που προσφέρουν για τη δημιουργία καλαίσθητων αρχιτεκτονημάτων [8]. Κοινό στοιχείο τόσο των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος όσο και των αμιγώς μεταλλικών κατασκευών είναι η χρήση χάλυβα, στις μεν πρώτες με τη μορφή του οπλισμού που περιβάλλεται και προστατεύεται από το σκυρόδεμα, στις δε δεύτερες με τη μορφή εμφανών στηλών και δοκών. Ωστόσο, το υλικό αυτό παρουσιάζει κάποιες ιδιαιτερότητες, η σημαντικότερη από τις οποίες είναι η φθορά του, η οποία είναι αποτέλεσμα του φαινομένου της διάβρωσης που μπορεί να προκαλέσει καταστροφές που κυμαίνονται από απλές παραμορφώσεις μέχρι την ολοκληρωτική απαξίωση και καταστροφή του οικοδομήματος, καθιστώντας το παράλληλα στατικά ανεπαρκές [9]. Κύρια χαρακτηριστικά της διάβρωσης είναι η πολυπλοκότητα, η απρόβλεπτη φύση της, ο τοποχημικός και τοποχρονικός χαρακτήρας της, η ευαισθησία της σε διάφορες εναλλαγές συνθηκών, η ποικιλία της μορφής της, που σε συνδυασμό με την ποικιλία των μεθόδων προστασίας και των συνθηκών εφαρμογής καθιστούν κάθε περίπτωση διάβρωσης ιδιαίτερο πρόβλημα [13].

Μια πιθανή υποβάθμιση ή καταστροφή της κατασκευής μπορεί να οφείλεται σε διάβρωση τόσο του σκυροδέματος όσο και του οπλισμού αυτού, δύο αλληλένδετων ειδών διάβρωσης, με το ένα προκαλεί αργά ή γρήγορα την εμφάνιση του άλλου [14]. Αποτέλεσμα αυτής της δράσης είναι η πρόκληση ποικίλων προβλημάτων, τα οποία και καθιστούν απαραίτητη την εκ των προτέρων λήψη προληπτικών μέτρων για την αποφυγή του φαινομένου. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το υψηλό κόστος επισκευής του διαβρωμένου τμήματος, επιβάλλοντας σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμα και την κατεδάφιση του κτιρίου εξαιτίας της δυσκολίας απομάκρυνσης των διαβρωμένων στοιχείων και του ιδιαίτερα υψηλού κόστους επισκευής [9]. Ενδεικτικό του κόστους επισκευής διαβρωμένων επιφανειών είναι η έρευνα που διεξήγαγε κατά την περίοδο 1999-2001 η διοίκηση Ομοσπονδιακών Αυτοκινητοδρόμων στις Η.Π.Α., στην οποία διαπιστώθηκε ότι το συνολικό κόστος εξαιτίας της διάβρωσης στο δίκτυό της ανερχόταν στα 276 δισεκατομμύρια δολάρια, ποσό που αντιστοιχεί στο 3.1% του ΑΕΠ

των Ηνωμένων Πολιτειών, αναδεικνύοντας το πρόβλημα της διάβρωσης σε σοβαρή υπόθεση [8].

Προκειμένου να περιοριστεί και σε κάποια ιδανική περίπτωση να αποφευχθεί μια πιθανή αποκάλυψη του χάλυβα, μείωση της μάζας του και τελικά μείωση της αντοχής του συστήματος σκυρόδεμα-οπλισμός, απαραίτητα κρίνεται η λήψη μέτρων προστασίας της κατασκευής. Η προστασία από τη διάβρωση των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος επιτυγχάνεται κατά κύριο λόγο με τη χρήση οργανικών επικαλύψεων, οι οποίες αποτελούν την παλαιότερη μέθοδο προστασίας και διακόσμησης επιφανειών, παρέχοντας τα περισσότερα τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα στην προστασία των μεταλλικών υλικών [14].

# 1. Σκυρόδεμα

## 1.1 Ορισμός σκυροδέματος

Το *σκυρόδεμα* ή αλλιώς *μπετόν* έχει αποτελέσει το ευρύτερα παραγόμενο για χρήση στον κατασκευαστικό τομέα τεχνητό δομικό προϊόν των τελευταίων χρόνων και αναφέρεται στο μείγμα τσιμέντου με ποσότητα αδρανών υλικών ή στο στερεό κατασκευαστικό υλικό που προκύπτει από την ανάμιξη του μίγματος του τσιμέντου με νερό, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί πήξη και σκλήρυνσή του με ταυτόχρονο εγκλωβισμό των αδρανών υλικών στη μάζα του [12,13]. Η ευκολία της παρασκευής και της χρήσης του σε συνδυασμό με το χαμηλό του κόστος και την καλή συνεργασία του με το χάλυβα το καθιστούν το πλέον χρησιμοποιούμενο οικοδομικό υλικό [2]. Ωστόσο, η χαμηλή αντοχή του σε κατάσταση εφελκυσμού επιβάλλει την ενίσχυσή του με μεταλλικό οπλισμό (χαλύβδινες ράβδους ή πλέγμα) προκειμένου να αυξηθούν οι μηχανικές του ιδιότητες, οδηγώντας έτσι στη δημιουργία του *οπλισμένου σκυροδέματος* [1]. Η χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος περιορίζεται σχεδόν αποκλειστικά στις δομικές κατασκευές αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλους τομείς της βιομηχανίας, στην κατασκευή δεξαμενών, σιλό, σωληνώσεων και καναλιών. Κονιάματα τσιμέντου βρίσκουν εφαρμογή στην εσωτερική επικάλυψη σωληνώσεων για την προστασία από τη διάβρωση [2].

Το σκυρόδεμα είναι το μοναδικό υλικό που παρουσιάζει την ευρύτερη χρήση από όλα τα άλλα δομικά υλικά, τόσο στη χώρα μας όσο και διεθνώς, με παγκόσμια κατανάλωση που κυμαίνεται στους 5.5 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως, γεγονός που οφείλεται στον εξαιρετικά ευνοϊκό συνδυασμό ιδιοτήτων και κόστους [12]. Η ευρεία εφαρμογή του σκυροδέματος στις κατασκευές οφείλεται κυρίως στην ευκολία με την οποία γίνεται η σχηματοποίηση και η παρασκευή του, η οποία και πραγματοποιείται με την ανάμιξη σε κατάλληλες ποσότητες τεσσάρων υλικών: τσιμέντου, χαλικιών(σκύρα), άμμου και νερού. Η αναλογία των τεσσάρων αυτών στοιχείων πρέπει να είναι σαφώς υπολογισμένη και καθορισμένη, εξαρτώμενη κυρίως από τις απαιτήσεις τόσο της κατασκευής όσο και του περιβάλλοντος στο οποίο αυτή πραγματοποιείται, διαδραματίζοντας σημαντικό ρόλο στην ποιότητα του απλού ή οπλισμένου σκυροδέματος. Παράλληλα, η ποιότητα των χρησιμοποιούμενων πρώτων υλών, ο τρόπος ανάμιξής τους, η συμπύκνωσή τους μέσα στα καλούπια και η συντήρηση του

αρχικού σκυροδέματος είναι παράγοντες που επηρεάζουν την τελική ποιότητα του παρασκευαζόμενου σκυροδέματος. Σύμφωνα με την ποιότητα γίνεται και η κατηγοριοποίηση του σκυροδέματος σε κατηγορίες, όπως το βαρύ μπετόν, με ειδικό βάρος μεγαλύτερο από  $5,5\text{kg/dm}^3$ , το ελαφρύ μπετόν με ειδικό βάρος έως  $0,5\text{kg/dm}^3$  και το προεντεταμένο σκυρόδεμα, το οποίο βρίσκει εφαρμογή σε κατασκευές όπου απαιτούνται αυξημένες αντοχές [2].

## **1.2 Βασικές ιδιότητες σκυροδέματος**

### **1.2.1 Εργασιμότητα**

Ο όρος εργασιμότητα αναφέρεται στο έργο που απαιτείται για να υπερνικηθούν οι εσωτερικές τριβές και να επιτευχθεί πλήρης συμπύκνωση, δηλαδή στην ευκολία με την οποία είναι δυνατόν να μεταφερθεί, διαστρωθεί και συμπυκνωθεί το σκυρόδεμα. Το εργάσιμο είναι μια σύνθετη ιδιότητα που συνδέεται με άλλες ιδιότητες, όπως η ρευστότητα, η συνοχή και η πλαστικότητα στην οποία αυτή συμβάλλει, η συμπυκνωσιμότητα και η συνεκτικότητα που πολλές φορές εκφράζει είτε το εργάσιμο είτε τη ρευστότητα. Οι παραπάνω ιδιότητες συνδέονται άμεσα με την ποσότητα του νερού που προστίθεται κατά την ανάμειξη του σκυροδέματος, η οποία πρέπει να ισορροπεί προκειμένου να ικανοποιεί κατά το καλύτερο δυνατό την εργασιμότητα του σκυροδέματος [12].

### **1.2.2 Αντοχή**

Η αντοχή του σκυροδέματος σε μηχανική καταπόνηση θεωρείται ίσως η πιο σημαντική ιδιότητά του και μια αναντικατάστατη μεταβλητή του σχεδιασμού των κατασκευών, παρόλο που σε ορισμένες περιπτώσεις τόσο η διαπερατότητα όσο και η ανθεκτικότητα μπορεί να είναι το ίδιο σημαντικά. Η αντοχή του σκυροδέματος σε συγκεκριμένη ηλικία, συντήρηση και θερμοκρασία εξαρτάται από το λόγο νερού/τσιμέντο και από το βαθμό συμπύκνωσης του σκυροδέματος. Έτσι, προκειμένου να χαρακτηριστεί η ποιότητα του υλικού μελετάται η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του, η οποία και προσδιορίζει το πορώδες του υλικού, η αντοχή του σε εφελκυσμό που αποτελεί το 10% της αντοχής του σε θλίψη και δεν μελετάται κατά το σχεδιασμό της κατασκευής, καθώς και η αντοχή του σε τριαξονική καταπόνηση που περιγράφει τις συνδυασμένες τάσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της κατασκευής [12].

### **1.2.3 Διαπερατότητα**

Η διαπερατότητα του σκυροδέματος επηρεάζεται από τη σύσταση του τσιμέντου και το λόγο νερού/τσιμέντο που δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 0.6 για να μην αυξάνεται το μέγεθος και ο αριθμός των τριχοειδών πόρων, από το βαθμό συμπύκνωσης και κατ' επέκταση από το πορώδες, δηλαδή το μέγεθος και την κατανομή των πόρων που δεν πρέπει να ξεπερνά κάποιο όριο προκειμένου να μη μειώνεται η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε φυσικές και χημικές επιδράσεις. Παράλληλα, πρέπει να διατηρούνται ευνοϊκές συνθήκες θερμοκρασίας ώστε να προχωρούν οι αντιδράσεις ενυδάτωσης και να πραγματοποιείται σωστή συντήρηση του σκυροδέματος αλλά και προστασία του από τις απότομες αλλαγές θερμοκρασίας. Ένας άλλος παράγοντας που επιτρέπει τη διείσδυση βλαβερών ουσιών στο εσωτερικό της κατασκευής είναι η ύπαρξη ρωγμών, οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε φυσικές, χημικές, θερμικές ή κατασκευαστικές αιτίες [12].

### **1.2.4 Ανθεκτικότητα**

Η ανθεκτικότητα εκφράζει τη δυνατότητα του σκυροδέματος να μη φθείρεται από το φυσικό ή μη περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται. Η φθορά αυτή είναι το αποτέλεσμα φυσικών και χημικών δράσεων που συμβαίνουν μεταξύ των συστατικών του σκυροδέματος και των διαβρωτικών μέσων που συνιστούν το περιβάλλον του, ενώ εκδηλώνεται με ρωγμές και διογκώσεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος και με παράλληλη μείωση της μηχανικής αντοχής του και απώλεια μέρους της μάζας του. Οι βασικοί παράγοντες που ρυθμίζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος είναι η παρουσία συνδεδεμένων πόρων, η έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον και η παρουσία νερού [12].

## **1.3 Συστατικά του σκυροδέματος**

### **1.3.1 Αδρανή**

Τα αδρανή συνιστούν το μεγαλύτερο μέρος του όγκου του σκυροδέματος συμμετέχοντας σε ποσοστό 60-70%, και συνίστανται από άθραυστες ή θραυστές φυσικές ή τεχνητές ορυκτές ύλες που δεν αντιδρούν με την άσβεστο και το μίγμα τσιμέντου-νερού [13]. Πρόκειται κατά κύριο λόγο για υλικά όπως *χαλίκια* ή *σκόρα* (με διάμετρο >5mm) και *άμμο* (με διάμετρο <5mm), τα οποία είναι φθηνά συστατικά με ικανοποιητικές όμως βασικές ιδιότητες όπως η μηχανική τους αντοχή, η ανθεκτικότητά τους στην πάροδο του χρόνου και στις περιβαλλοντικές επιδράσεις (χημικές ουσίες,

υγρασία, κύκλους ζέστης παγωνιάς, υψηλές θερμοκρασίες), η σταθερότητα του όγκου τους και η υδατοστεγανότητα που τα χαρακτηρίζει [2]. Τα υλικά αυτά παίρνουν την ονομασία τους λόγω της μη αντίδρασής τους με το τσιμέντο και είναι υλικά που προέρχονται από τη φύση, με συλλογή από ρέματα (φυσικά ή συλλεκτά) ή από θραύση ασβεστολιθικών ή πυριτικών πετρωμάτων (θραυστά) [3]. Τα υλικά αυτά συνδέονται και συγκολλούνται μεταξύ τους, συμβάλλοντας μηχανικά στην αντοχή του σκυροδέματος [12]. Έτσι, ως αδρανή υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν θεωρητικά οποιαδήποτε υλικά συγκεντρώνουν τις τρεις βασικές απαιτήσεις: επαρκή αντοχή, επαρκή πρόσφυση και χημική ανεκτικότητα με την τσιμεντοκονία [13].

Τα αδρανή υλικά κατηγοριοποιούνται με βάση το μέγεθός τους σε λεπτομερή αδρανή(άμμος), ενδιάμεσου μεγέθους όπως λεπτόκοκκα χαλίκια ή σκύρα(ριζάκι, γαρμπίλι, σκύρα) και χοντρόκοκκα σκύρα, με βάση την προέλευσή τους σε φυσικά και τεχνητά και με βάση το ειδικό τους βάρος σε συμπαγή και ελαφρά(τα οποία βρίσκουν εφαρμογή σε κατασκευές με πορώδη δομή, όπως η θερμομόνωση). Η μορφή των κόκκων τους μπορεί να είναι κυβική, στρογγυλή, γωνιώδης, πλακοειδής ή επιμήκης, με προτιμώμενους τους κόκκους που προέρχονται από θραυστά υλικά και δεν είναι επιμήκεις ή πλακοειδείς [3] και με λόγο μήκος/πάχος να είναι απαραίτητα μεγαλύτερος από 3/1 [2] (οι στρογγυλοί ή κυβόμορφοι κόκκοι παρουσιάζουν καλύτερη εργασιμότητα ενώ οι κόκκοι με ανώμαλη επιφάνεια έχουν καλύτερη μηχανική αντοχή [3]).

Γενικά, τα αδρανή υλικά πρέπει να είναι:

- σταθερά ώστε να μην θρυμματίζονται εύκολα
- ανθεκτικά, προερχόμενα από σκληρά πετρώματα (γρανίτες και ασβεστόλιθοι)
- καθαρά και απαλλαγμένα από φυτικές και άλλες επιβλαβείς προσμίξεις (πηλός, χημικά, δραστικές ουσίες, άνθρακες)
- σταθερά στη χημική συμπεριφορά τους με τα άλλα συστατικά του σκυροδέματος(ιδιαίτερα με το  $\text{Na}_2\text{O}$  και το  $\text{K}_2\text{O}$ )
- σταθερά στις καιρικές αλλαγές (μεταβολές θερμοκρασίας και υγρασίας)
- συμβατά(να έχουν καλή πρόσφυση) με την κονία
- απαλλαγμένα από πυριτική παιπάλη με διάμετρο μικρότερη από 0,075 mm
- καλά διαβαθμισμένα. Η κοκκομετρική καμπύλη της άμμου, των σκύρων και του μίγματος αυτών πρέπει να βρίσκεται μέσα στις περιοχές που περιλαμβάνονται στα διαγράμματα που προβλέπουν οι κανονισμοί [3].

- αδρανή με διάμετρο μέχρι 7mm πρέπει να καλύπτουν το 35-45% της συνολικής ποσότητας των αδρανών που τοποθετούνται στο σκυρόδεμα [3].

Η αντοχή που παρουσιάζει το παραγόμενο σκυρόδεμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό των αδρανών που το απαρτίζουν, πέτρωμα το οποίο πρέπει να έχει μεγάλη μηχανική αντοχή, ανθεκτικότητα στο χρόνο, μικρή επιφανειακή φθορά σε κρούση, χημική αδράνεια σε σχέση με το τσιμέντο και το νερό καθώς και σταθερότητα όγκου (δηλαδή, να μη διογκώνεται λόγω απορρόφησης νερού) [3]. Η επιτρεπόμενη θεωρητική τιμή της αντοχής του πετρώματος των αδρανών σε θλίψη ορίζεται μεταξύ 45 και 65MPa, έτσι ώστε να επιτευχθεί θλιπτική αντοχή σκυροδέματος που βρίσκεται μέσα στα προδιαγεγραμμένα όρια.

Στο σύνολό τους, τα αδρανή είναι ισχυροί αλλά ασύνδετοι κόκκοι, η σύνδεση και η συγκόλληση σε μονολιθική μάζα των οποίων γίνεται μέσω του τσιμεντοπολτού. Η κοκκομετρική σύνθεση των αδρανών πρέπει να αποτελείται από καλά διαβαθμισμένα αδρανή με διαστάσεις κόκκων που καλύπτουν όλο το φάσμα μεγεθών, έτσι ώστε να καλύπτονται καλύτερα τα κενά σε σχέση με την χρήση κόκκων ομοιόμορφου μεγέθους. Το τσιμέντο που πληρώνει τα κενά, αν και έχει υψηλότερο κόστος από τα αδρανή, στη σκληρυμένη του μορφή δεν παρουσιάζει εξίσου καλές βασικές ιδιότητες με αυτά αλλά χρησιμοποιείται για να τα μετατρέψει σε ένα ισχυρό τεχνητό πέτρωμα. Έτσι, η μείωση του όγκου των κενών μειώνει τον απαιτούμενο τσιμεντοπολτό, οδηγώντας κατ' επέκταση και σε μείωση του κόστους καθώς και σε ταυτόχρονη αύξηση της σταθερότητας του σκυροδέματος [3].

### **1.3.2** *Τσιμέντο*

Το τσιμέντο είναι ένα βιομηχανικό κοκκώδες υλικό με υδραυλικές ιδιότητες που, εκτός από τη σύνδεση των αδρανών, λειτουργεί και σαν λιπαντικό μεταξύ των κόκκων, έτσι ώστε το νωπό σκυρόδεμα να αποκτήσει μια ρευστή αλλά συνεκτική μάζα [3]. Ο όρος τσιμέντο ή τσιμεντοκονία αναφέρεται στη συνδετική σκόνη, προ της ανάμιξής της με νερό και χωρίς την προσθήκη άλλων αδρανών όπως άμμου και χαλικιού [12]. Πρόκειται ουσιαστικά για μια υδραυλική κονία, δηλαδή ένα λεπτότατα αλεσμένο ανόργανο υλικό, που αποτελείται από ενώσεις οξειδίου του ασβεστίου, οξειδίου του πυριτίου, οξειδίου του αργιλίου και οξειδίου του σιδήρου και παρασκευάζεται με σύγχρονη όπτηση ασβεστόλιθου και αργίλου [2,12]. Το τσιμέντο συνίσταται από τα κύρια υλικά του (κλίνκερ τσιμέντου Πόρτλαντ, σκωρία υψικαμίνων, φυσικές



ποζολάνες, φυσικές ψημένες ποζολάνες, ιπτάμενες τέφρες, ψημένος σχιστόλιθος, ασβεστόλιθος, πυριτική παιπάλη), από τα δευτερεύοντα συστατικά του (mac και fillers), από το θειικό ασβέστιο και από τα πρόσθετα.

Για την παρασκευή του χρησιμοποιούμενου τσιμέντου απαραίτητη είναι η ενυδάτωσή του, δηλαδή η ανάμιξή του με νερό, έτσι ώστε να σχηματιστεί ένας πολτός(πάστα) που πήζει και σκληρύνεται διαμέσου αντιδράσεων και μηχανισμών ενυδάτωσης [12]. Κατά την ενυδάτωση το τσιμέντο παρουσιάζει υδραυλικές ιδιότητες, σκληραίνοντας και αποκτώντας συνδετικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα στο χρόνο, ενώ η ανάμιξη του τσιμέντου με άμμο και νερό δημιουργεί την **κονία του τσιμέντου** (cement mortar) [2]. Η τσιμεντοκονία μετά την προσθήκη του νερού και πριν ξεκινήσει η πήξη της έχει τη μορφή μιας γκριζοπράσινης πολτώδους μάζας η οποία επιδέχεται κατεργασίας και μεταφοράς. Η αρχή και το τέλος της πήξης της τσιμεντοκονίας ορίζονται από τον κανονισμό, με την αρχή να μην πρέπει να εμφανίζεται νωρίτερα από μια ώρα από τη στιγμή ανάμιξης των δύο υλικών και το τέλος να μην πρέπει να γίνεται αργότερα από 8 ώρες. Για την πήξη του σκυροδέματος, ο χρόνος έως την αρχή πήξεως ορίζεται σε δύο έως τέσσερις φορές μεγαλύτερος [3].

Η ποσότητα στην οποία προστίθεται το τσιμέντο για την παρασκευή του σκυροδέματος πρέπει να μελετάται προσεκτικά πριν την έναρξη της διαδικασίας παρασκευής. Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται είναι η επιδιωκόμενη κατηγορία του παρασκευαζόμενου σκυροδέματος, η ποιότητα του τσιμέντου και το μέγεθος των κόκκων του τσιμέντου, δηλαδή η λεπτότητα αλέσεώς του. Στο σκυρόδεμα πρέπει να περιέχεται η απαιτούμενη και συγχρόνως η μικρότερη δυνατή ποσότητα τσιμέντου, έτσι ώστε να είναι δυνατόν να επιτευχθεί η απαιτούμενη θλιπτική αντοχή και να προστατεύονται οι οπλισμοί από την διάβρωση [3].

### **1.3.2.1** *Τύποι τσιμέντων*

Σήμερα, αν και στη διεθνή αγορά κυριαρχεί το τσιμέντο πόρτλαντ, υπάρχουν και χρησιμοποιούνται γενικότερα διάφορα είδη τσιμέντων, ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής [2]. Εξάλλου, κάθε χώρα παγκοσμίως παρασκευάζει τσιμέντο χρησιμοποιώντας τις πηγές πρώτων υλών που διαθέτει. Έτσι, ανάλογα με τις υπάρχουσες και χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων όπως το καθαρό ή αμιγές τσιμέντο πόρτλαντ, το τσιμέντο με ποζολάνη,

ιπτάμενη τέφρα (πυριτική ή ασβεστολιθική), σκωρία υψικαμίνου, πυριτική παιπάλη, ασβεστόλιθο κλπ. [3].

**Πίνακας 1: Βασικοί τύποι τσιμέντου**

<b>βασικοί τύποι τσιμέντου</b>	
<b>τσιμέντα Πόρτλαντ αμιγή_CEM I</b>	Τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ και γύψου.
<b>σύνθετα τσιμέντα Πόρτλαντ_CEM II</b>	Τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ-πόρτλαντ, γύψου και φυσικής ή τεχνητής ποζολάνης σε ποσοστό 6-35% μέγιστο.
<b>σκωριακά τσιμέντα ή σκωριοτσιμέντα_CEM III</b>	Τσιμέντα που προέρχονται από τη συνάλεση κλίνκερ, γύψου και σκωρίας σε ποσοστό 36-95% μέγιστο.
<b>ποζολανικά τσιμέντα_CEM IV</b>	Τσιμέντα που προέρχονται από τη συνάλεση κλίνκερ- πόρτλαντ, γύψου και ποζολάνης φυσικής ή ψημένης(ιπτάμενη τέφρα πυριτική ή ασβεστούχα) και πυριτική παιπάλη. Δεν μπορεί να περιέχει σκωρία.
<b>Σύνθετα τσιμέντα_CEM V</b>	Τσιμέντα που προέρχονται από τη συνάλεση σε ίσο ποσοστό κλίνκερ, γύψου, σκωρίας και ποζολάνης(φυσικής, ψημένης ή πυριτικής ιπτάμενης τέφρας) σε ποσοστά 36-50% μέγιστο. Δεν μπορεί να περιέχει πυριτική παιπάλη [3].

### **1.3.2.2 Αντοχή και ταχύτητα πήξης**

Οι προαναφερθείσες κατηγορίες τσιμέντων χαρακτηρίζονται από την συμβατικά και σύμφωνα με τον κανονισμό προσδιοριζόμενη αντοχή τους, η οποία ορίζεται στις κατηγορίες των 35MPa, των 45MPa και των 55MPa. Η αντοχή του παρασκευαζόμενου τσιμέντου αυξάνει ανάλογα με την αύξηση της λεπτότητας των κόκκων του, με ένα λεπτόκοκκο να παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή από ένα χονδροαλεσμένο τσιμέντο. Παράλληλα, με βάση την αντοχή σε θλίψη, διακρίνονται τρεις κατηγορίες τσιμέντων: το κοινό τσιμέντο με αντοχή 275 kg/cm<sup>2</sup> κατ' ελάχιστο, το τσιμέντο υψηλής αντοχής με αντοχή τουλάχιστον 400 kg/cm<sup>2</sup> και το πιο εξειδικευμένο τσιμέντο, το τσιμέντο ειδικής παραγγελίας υψηλής αντοχής που έχει προδιαγραφές κατά παραγγελία [3].

Πέρα όμως από την αντοχή τα τσιμέντα χαρακτηρίζονται και από την ταχύτητα πήξης τους, χωριζόμενα σε τσιμέντα ταχείας πήξης ή αργιλικά, στα οποία η πήξη

συμπληρώνεται σε διάστημα μικρότερο της μισής ώρας και είναι πλουσιότερα σε οξείδιο του αργιλίου ( $Al_2O_3$ ), σε συνήθη τσιμέντα με χρόνο πήξης που κυμαίνεται μεταξύ 6-8 ωρών και σε τσιμέντα βραδείας πήξης ή πυριτικά, στα οποία η πήξη αρχίζει μετά τις 8 ώρες και είναι πλουσιότερα σε οξείδιο του πυριτίου ( $SiO_2$ ) [3].

### 1.3.2.3 Κατηγορίες τσιμέντων

#### *Τσιμέντο Πόρτλαντ*

Σήμερα στην Ελληνική αγορά, εξαιρώντας μια μικρή μερίδα ειδικών τσιμέντων, χρησιμοποιούνται ευρέως τα γνωστά **τσιμέντα Πόρτλαντ**. Το τσιμέντο Πόρτλαντ παρασκευάζεται μέσω της έψησης σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης, στους περίπου  $1450^\circ C$ , πλήρως ομογενοποιημένου μίγματος ασβεστόλιθου και αργιλοπυριτικών υλικών σε αναλογία 75% και 25% αντίστοιχα (προϊόν που πριν την έψηση ονομάζεται φαρίνα) [2,3]. Στη συνέχεια, γίνεται άλεση του δημιουργούμενου προϊόντος klinker (ή αλλιώς εκβολάδες), που αμέσως μετά την έψηση έχει διάμετρο λίγων εκατοστών, χρώμα μαυροπράσινο και αποτελεί κατά κάποιον τρόπο τα πετρώματα του τσιμέντου, αποκτώντας μετά την άλεση τη γνωστή μορφή του τσιμέντου [3]. Ακολουθεί συνάλεση με την κατάλληλη ποσότητα γύψου, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις πραγματοποιείται προσθήκη και δευτερευόντων υλικών ως βελτιωτικά σε μικρές ποσότητες, όπως η χρήση πυριτικού χώματος. Στα δευτερεύοντα αυτά συστατικά, γνωστά ως mac (minor additional constituents), περιλαμβάνονται και τα γεμιστικά (fillers), τα οποία είναι ειδικά επιλεγμένα φυσικά ή τεχνητά ανόργανα ορυκτά υλικά, που μετά από κατάλληλη προετοιμασία τους για την κατάλληλη διαμόρφωση της κοκκομετρικής κατανομής τους, βελτιώνουν τις φυσικές ιδιότητες του τσιμέντου [12].

Η πήξη και η σκλήρυνση του τσιμέντου γίνεται μέσω των αντιδράσεων ενυδάτωσης, με την ακόλουθη δημιουργία ενός ετερογενούς συστήματος ανάμιξης του τσιμέντου με το νερό, κατά το οποίο συμμετέχουν τρεις φάσεις: η στερεή με τους κόκκους τσιμέντου, η υγρή με το νερό αρχικά και εν συνεχεία με ένα ενδιάμεσο διάλυμα και η αέρια, με τις δημιουργούμενες φυσαλίδες αέρα. Η ενυδάτωση των ενώσεων του τσιμέντου οδηγεί στη δημιουργία προϊόντων ενυδάτωσης που απαρτίζονται από δύο φάσεις: τη φάση του τομπερμορίτη με προϊόντα τον αλίτη, το βελίτη, το σελίτη, το φερρίτη και το βρουσίτη, και τη φάση του πορτλαντίτη που αποτελείται από το υδροξείδιο του ασβεστίου. Η προσθήκη νερού στο τσιμέντο συνοδεύεται από παράλληλη έκλυση θερμότητας, διαφορετική για κάθε φάση που πρέπει να τίθεται υπό

πλήρη έλεγχο, καθώς η εμφάνιση διαφορών θερμοκρασίας της τάξης των 20°-30°C είναι αρκετή για να την πρόκληση ρωγμών στο παρασκευαζόμενο σκυρόδεμα [2]. Σε ορισμένες περιπτώσεις πραγματοποιείται προσθήκη θεικού ασβεστίου στο σώμα του τσιμέντου κατά την τελική άλεση του κλίνκερ με σκοπό την πήξη του τσιμέντου, ενώ μπορεί να γίνει χρήση και προσθέτων, τα οποία δεν καλύπτονται από υλικά τα οποία στοχεύουν στη βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας ή των ιδιοτήτων του τσιμέντου [12].

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι ασβεστοπυριτικές ενώσεις ενυδατώνονται με διαφορετικό μηχανισμό και διαφορετικό ρυθμό από τις ασβεσταργλικές ενώσεις, με τις πρώτες να διατηρούν τους κόκκους τους, διαλυτοποιώντας ταυτόχρονα και συνεχόμενα το υδροξείδιο του ασβεστίου και σχηματίζοντας το ζελ του τομπερμορίτη. Αντίθετα, οι κόκκοι των ασβεσταργλικών ενώσεων διαλύονται πλήρως στο νερό και οι δεσμοί εμφανίζονται μετά από το σχηματισμό αλυσίδων και τη σύνδεση των κόκκων, ακολουθώντας δηλαδή την πλήρη ολοκλήρωση της διαλυτοποίησης. Συνέπεια της διαδικασίας αυτής είναι η ταχύτερη εμφάνιση δεσμών και η συγκράτηση ξένων ουσιών στο σκληρυνόμενο τσιμέντο, κάτι που αποφεύγεται στις ασβεστοπυριτικές ενώσεις.

Ωστόσο, τόσο στις ασβεστοπυριτικές όσο και στις ασβεσταργλικές ενώσεις, ο λόγος νερού προς τσιμέντο πρέπει να επαρκεί για την πλήρη ενυδάτωση του τσιμέντου αλλά και για την όσο το δυνατόν μικρότερη αύξηση του πορώδους που εμφανίζεται στο σώμα του τελικού προϊόντος. Έτσι, σε θεωρητικό επίπεδο ο λόγος αυτός πρέπει να βρίσκεται κοντά στο 0.225-0.250, κάτι που πρακτικά διαφοροποιείται, φτάνοντας στο 0.45-0.65. Άλλοι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη καθώς επηρεάζουν το πορώδες είναι η κοκκομετρία των αδρανών, η συμπύκνωση στα καλούπια και η συντήρηση τις πρώτες επτά ημέρες από την παρασκευή του σκυροδέματος.

Οι παραπάνω παράμετροι επηρεάζουν τη διάμετρο των σχηματιζόμενων πόρων, με βάση την οποία μπορεί να γίνει ομαδοποίησή τους σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία, με διάμετρο πόρων περίπου 25Α σχηματίζεται στο τζελ του τομπερμορίτη και είναι ανεξάρτητη από το λόγο νερού προς τσιμέντο. Στην κατηγορία αυτή εντάσσεται το 20-40% των πόρων. Η δεύτερη κατηγορία αποτελείται από τριχοειδείς πόρους διαμέτρου 1-10μm, η οποία και εξαρτάται από το λόγο νερού προς τσιμέντο, με τη διάμετρό τους να μειώνεται ανάλογα με τη μείωση του λόγου αυτού. Οι πόροι αυτής της κατηγορίας αποτελούν το 40% των συνολικών πόρων. Οι πόροι των δύο

πρώτων κατηγοριών ‘συνδέονται’ μέσω της μετακίνησης του νερού που βρίσκεται στο εσωτερικό τους(το οποίο και χαρακτηρίζεται από διαφορετική ενθαλπία) από τον πόρο της μιας κατηγορίας στον πόρο της άλλης, γεγονός που μπορεί να πραγματοποιηθεί εξαιτίας κάποιας μεταβολής της θερμοκρασίας. Η τρίτη και ανεξάρτητη από τις δυο προηγούμενες κατηγορία πόρων αποτελείται από πόρους με διάμετρο 0.01-2mm, οι οποίοι σχηματίζονται λόγω του εγκλεισμού αέρα στο μίγμα του σκυροδέματος ή της κονίας, ενώ οι πόροι αυτής της κατηγορίας συμμετέχουν στο συνολικό πορώδες σε ποσοστό μεγαλύτερο από 10% [2].

Οι βασικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται τα τσιμέντα Πόρτλαντ είναι:

**Πίνακας 2:** Τύποι τσιμέντου Πόρτλαντ

<b>Τύποι τσιμέντου Πόρτλαντ</b>	
<b>Τσιμέντο Πόρτλαντ – I/45</b>	Παρουσιάζει γρήγορη ανάπτυξη αντοχών και είναι κατάλληλο για την κατασκευή σκυροδεμάτων υψηλών κατηγοριών και δομικών στοιχείων που απαιτούν γρήγορο ξεκαλούπωμα, όπως σε προκατασκευές και προεντεταμένο σκυρόδεμα [3].
<b>Τσιμέντο Πόρτλαντ – I/55</b>	Η χρήση του στο εσωτερικό είναι περιορισμένη και τόσο η ποιότητα όσο και οι χρήσεις του είναι ανάλογες με του <b>τσιμέντου I/45</b> , σημειώνοντας ωστόσο καλύτερες επιδόσεις κυρίως στην ανάπτυξη αντοχών [3].
<b>Τσιμέντο Πόρτλαντ ανθεκτικό σε θειικά – IV/55</b>	Το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με το τσιμέντο αυτό έχει μικρή περιεκτικότητα σε C <sub>3</sub> A σε ποσοστό μικρότερο από 3% και η συρρίκνωσή του είναι μικρότερη ή ίση με 0.6mm/m. Χαρακτηριστικό του είναι ότι παρουσιάζει ισχυρή αντίσταση στις προσβολές από τα θειικά άλατα και το θαλασσινό νερό. Ωστόσο, πραγματοποιείται μεγάλη διάβρωση του σιδηροπλισμού του σε περιβάλλον χλωριόντων. Το τσιμέντο αυτό βρίσκει εφαρμογή κατά κύριο λόγο σε κατασκευές αποβλήτων [2].

---

### Τσιμέντο Πόρτλαντ Λευκό – I/55

Έχει ιδιότητες και επιδόσεις αντίστοιχες με αυτές του **τσιμέντου Πόρτλαντ-I/55** και χρησιμοποιείται στην πλακοποιία, στην κατασκευή διακοσμητικών στοιχείων, μωσαϊκών δαπέδων κλπ. λόγω της λευκότητάς του, που αποτελεί και κύριο χαρακτηριστικό του [3].

---

#### *Ποζολανικά τσιμέντα*

Μια άλλη κατηγορία τσιμέντου είναι τα **ποζολανικά τσιμέντα** (τσιμέντα με πρόσθετα/μικτά τσιμέντα), στα οποία συνήθως χρησιμοποιούνται ποζολάνες σαν προσθήκες στο τσιμέντο πόρτλαντ για εξοικονόμηση ενέργειας, για αύξηση της αντοχής του σε διάβρωση και για μείωση του κόστους του.

Οι ποζολάνες είναι πυριτικά ή αργιλοπυριτικά υλικά με ασθενείς ή καθόλου υδραυλικές ιδιότητες, τα οποία σε λεπτό διαμερισμό παρουσία νερού αντιδρούν με την υδράσβεστο σε συνήθη θερμοκρασία, σχηματίζοντας ένυδρες ασβεστοπυριτικές ενώσεις που με το χρόνο σκληραίνουν, αποκτώντας υδραυλικές ιδιότητες και μεγαλύτερες ή μικρότερες αντοχές, κάτι που οφείλεται στο άμορφο πυριτικό υλικό τους [2]. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί μια ποζολάνη για την παρασκευή τσιμέντων τύπου II ή III πρέπει, σύμφωνα με τον κανονισμό, να παρουσιάζει συμβατική αντοχή τουλάχιστον 5MPa. Η προέλευση των ποζολανών μπορεί να είναι φυσική, όπως η θηραϊκή γη, η μηλαϊκή γη, οι ποζολάνες που προέρχονται από τα νησιά Γυαλί και Νίσυρος, από το νομό Πέλλης και αλλού, ή τεχνητή, όπως η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία υψικαμίνων και τα φύλλερ [3].

#### Φυσικές ποζολάνες (θηραϊκή γη)

Πρόκειται για μια δραστική ύαλο που προέρχεται από ηφαιστειακή έκρηξη και περιέχει υψηλότερο ποσοστό SiO<sub>2</sub> (**Σχήμα 1**). Ανήκει στα ενεργειακή αναβαθμισμένα υλικά παρέχοντας πρόσθετη ανθεκτικότητα του σκυροδέματος στο θαλασσινό νερό και σε αραιά διαλύματα αλάτων μαγνησίου, καθώς και μεγαλύτερη προστασία του σιδηροπλισμού. Έτσι, αυξάνεται η αντοχή σε διάβρωση και η ανθεκτικότητα σε όξινο περιβάλλον (μέσω της δέσμευσης του ασβεστίου και του περιορισμού του πορώδους), ενώ παράλληλα μειώνεται η εκλυόμενη θερμότητα κατά τη διαδικασία της ενυδάτωσης και καθυστερεί η ανάπτυξη των αντοχών στο σκυρόδεμα. Η προσθήκη των φυσικών

ποζολανικών υλικών στο τσιμέντο γίνεται είτε κατά την παραγωγή με συνάλεση, είτε με αρχική άλεση της ποζολάνης και εν συνεχεία ανάμειξή της με το τσιμέντο [2].



**Σχήμα 1:** Θηραϊκή γη [[http://www.ilikodomiki.gr/?page\\_id=1330](http://www.ilikodomiki.gr/?page_id=1330)]

Τεχνητές ποζολάνες

Ιπτάμενη τέφρα

Ιπτάμενη τέφρα ονομάζουμε τα σε λεπτότατο καταμερισμό κατάλοιπα που προκύπτουν από την καύση γαιανθράκων ή λιγνιτών, η χημική και ορυκτολογική σύσταση των οποίων εξαρτάται από την πρώτη ύλη καύσης, τη θερμοκρασία καύσης και την ταχύτητα ψύξης [2].



**Σχήμα 2:** Ιπτάμενη τέφρα για χρήση ως μονωτικό υλικό [[http://www.diytrade.com/china/pd/4742899/Fly\\_Ash\\_from\\_Vietnam.html](http://www.diytrade.com/china/pd/4742899/Fly_Ash_from_Vietnam.html)]

Τα στερεοποιημένα αυτά στερεά καύσιμα συλλέγονται κατά την έξοδο των αερίων καύσεως από τις καπνοδόχους των ατμοηλεκτρικών σταθμών με τα ηλεκτροστατικά φίλτρα [3]. Η δραστηριότητα των τερφρών οφείλεται στη μεγάλη περιεκτικότητα σε  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και  $\text{CaO}$ , με τις δύο πρώτες ενώσεις να προσδίδουν στην τέφρα ποζολανικές ιδιότητες ενώ το οξείδιο του Ca υδραυλικές ιδιότητες [3]. Η αλλαγή στις αναλογίες αυτών των ενώσεων οδηγεί στη σύσταση δύο κατηγοριών ΙΤ, μιας που περιέχει κυρίως  $\text{SiO}_2$  και λίγη άσβεστο και μιας δεύτερης που έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε  $\text{CaO}$  και μικρή σε πυρίτιο [2]. Στην Ελλάδα ιπτάμενη τέφρα

παράγεται στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς της Δ.Ε.Η. στην Πτολεμαΐδα και στη Μεγαλόπολη [3].

Η ιπτάμενη τέφρα, συγκρινόμενη με τις φυσικές ποζολάνες, χαρακτηρίζεται από μικρότερη περιεκτικότητα σε άσβεστο και μικρότερη περιεκτικότητα σε δεσμευμένο νερό, ενώ και οι υδραυλικές της ιδιότητες είναι ασθενείς [2].

#### Σκωρία υψικαμίνων (slag)

Πρόκειται για ένα μη μεταλλικό υλικό, αποτελούμενο από πυριτικά ή αργιλοπυριτικά άλατα του ασβεστίου, το οποίο παρουσιάζει υδραυλικές ιδιότητες. Η σκωρία προστίθεται πάντα σε μίγματα με τσιμέντο Πόρτλαντ και η προσθήκη γίνεται είτε με ξερή συνάλεση στο κλίνκερ είτε με ανάμειξη με ήδη κονιοποιημένη σκωρία, ενώ τα ποσοστά ανάμειξης ποικίλουν (5-85% σκωρία) [2].



**Σχήμα 3:** Σκωρία υψικαμίνων

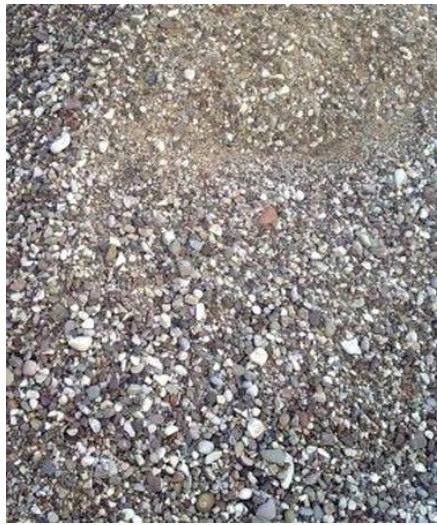
[\[http://dir.indiamart.com/impcat/slag-powder.html\]](http://dir.indiamart.com/impcat/slag-powder.html)

Η προσθήκη της σκωρίας στο τσιμέντο Πόρτλαντ προκαλεί μείωση του ποσού της εκλυόμενης θερμότητας, μείωση της συρρίκνωσης και μικρότερη ανάγκη νερού για την ενυδάτωση του τσιμέντου. Παράλληλα, προσδίδει στο τσιμέντο μεγαλύτερη αντοχή σε θειικά και σε αραιά ή μέσης συγκέντρωσης διαλύματα με  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , όπως και σε μαλακά νερά, ενώ η ταχύτητα ανθρακοποιήσεως είναι μικρότερη από αυτή του τσιμέντου Πόρτλαντ χωρίς πρόσθετα. Ωστόσο, τα τσιμέντα με προσθήκη σκωρίας παρουσιάζουν μεγαλύτερη ταχύτητα διάβρωσης του σιδηροπλισμού σε περιβάλλον πλούσιο σε χλωριόντα, όπως και σε περιβάλλον με σημαντικά κυμαινόμενη στάθμη νερού, ενώ σε αυτά καθυστερεί σημαντικά και η ανάπτυξη αντοχών σε θερμοκρασίες μικρότερες των  $10^\circ\text{C}$  [2].



## Φίλλερ (filler)

Φίλλερ είναι συνήθως κάποια λεπτότατα καταμερισμένα αδρανή υλικά. Τα φίλλερ σε μικρές ποσότητες επιδρούν ευνοϊκά στην εργασιμότητα και την υδατοπερατότητα του τσιμέντου, έχοντας μηχανική δράση ως λιπαντικό και αυξάνοντας την υδατοστεγανότητα με τη διόγκωση των κόκκων παρουσία υγρασίας. Σπανίως δε παρουσιάζουν και ποζολανικές ή υδραυλικές ιδιότητες, κάτι που εξαρτάται από το αρχικό υλικό από το οποίο προέρχονται [3].



**Σχήμα 4:** Αμμοχάλικο ποταμού

[<http://www.emporodomiki-syrou.gr/home/oikodomika-ylika/adrane-ylika>]

### Τύποι ποζολανικών τσιμέντων

Τα τσιμέντα με πρόσθετα παράγονται με την προσθήκη ποζολανικών υλικών στα τυπικά τσιμέντα Πόρτλαντ. Έτσι, οι τύποι των τσιμέντων Πόρτλαντ με ποζολάνες είναι δύο:

- **Τσιμέντο Πόρτλαντ με Ποζολάνη\_II/35:** Στην αγορά είναι γνωστό με την ονομασία "κοινό τσιμέντο" ή P35 και χρησιμοποιείται στα σκυροδέματα των συνήθων κατασκευών. Η ανάπτυξη των αντοχών του είναι βραδύτερη συγκριτικά με τους τύπους των απλών τσιμέντων Πόρτλαντ, αλλά λόγω της παρουσίας ποζολανικών υλικών στη σύνθεσή του οι αντοχές του σκυροδέματος συνεχίζονται να αυξάνονται σταδιακά και σε βάθος χρόνου, οδηγώντας στην αύξηση της ανθεκτικότητάς του. Το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με το τσιμέντο αυτό παρουσιάζει μειωμένη ανάπτυξη θερμότητας ενυδάτωσης, μειωμένη διαπερατότητα και αυξημένη ανθεκτικότητα στα θειικά άλατα,

το θαλασσινό νερό και σε διάφορα διαβρωτικά περιβάλλοντα, γεγονός που δικαιολογεί τη χρήση του σε λιμενικά έργα [3].

- **Τσιμέντο Πόρτλαντ με Ποζολάνη – Π/45 (ΠΥΑ 2000):** Χρησιμοποιείται κυρίως σε έργα της ΔΕΗ (φράγματα, σήραγγες) και είναι κατάλληλο για χρήση σε λιμενικά έργα. Το τσιμέντο αυτό θεωρείται ανάλογο του Π/35, αλλά έχει βελτιωμένα ειδικά χαρακτηριστικά και μεγαλύτερο ρυθμό ανάπτυξης των αντοχών του έναντι του πρώτου [3].

#### *Φερριτικό τσιμέντο*

Το τσιμέντο αυτό παρασκευάζεται με χρήση οξειδίων του σιδήρου κατά το ψήσιμο του κλίνκερ, έτσι ώστε να μειωθεί το ποσοστό του σχηματιζόμενου  $C_3A$ , το οποίο και αντικαθίσταται από  $C_4AF$ . Τα τσιμέντα αυτά παρουσιάζουν καλή αντοχή στην ανθρακοποίηση λόγω μικρότερου ποσοστού ελευθέρως ασβέστου, ελάχιστη συρρίκνωση, μικρότερη θερμότητα ενυδάτωσης και μεγαλύτερη πλαστικότητα κατά το σχηματισμό του σκυροδέματος, καθώς και μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση και στα θειικά, κάτι που οφείλεται στο υδροξείδιο του σιδήρου που σχηματίζεται κατά την ενυδάτωση και φράζει τους πόρους, δημιουργώντας σκυρόδεμα με μικρότερο πορώδες. Ωστόσο, η υψηλή τιμή τους και η μικρή δυνατότητα ανάμειξής τους με ποζολανικά υλικά, αποτελούν στοιχεία που δυσχεραίνουν και περιορίζουν τη χρήση των τσιμέντων αυτών.[2]

### **1.3.3 Νερό**

Ένα από τα κυριότερα ενεργά συστατικά του σκυροδέματος είναι το νερό, το οποίο μπορεί να είναι βρόχινο, πόσιμο, λίμνης ή υπόγειο, δηλαδή νερό καθαρό και απαλλαγμένο από βλαπτικές ουσίες. Αυτό, μαζί με το τσιμέντο παίρνει μέρος σε μια σειρά χημικών αντιδράσεων που οδηγούν με τη δημιουργία ένυδρων κρυστάλλων στην πήξη και στη σκλήρυνση του μείγματος. Η βασική απαίτηση έναντι του νερού είναι να μην περιέχει συστατικά που μπορούν να βλάψουν ή να επηρεάσουν τις αντιδράσεις ενυδάτωσης [13]. Για την παρασκευή του σκυροδέματος δεν μπορεί να γίνει χρήση ανθρακούχου νερού, νερού με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα, με χαμηλό pH, όπως και θαλασσινού νερού με υψηλή περιεκτικότητα σε χλωριόντα, αλλά ούτε και βιομηχανικών αποβλήτων. Οι κυριότερες από τις χημικές ουσίες που έχουν δυσμενή επίδραση στην εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων οδηγώντας στη μείωση της τελικής

αντοχής και την καθυστέρηση της πήξης είναι τα οξέα (ανθρακικό οξύ ή άλλα οργανικής προέλευσης), τα λάδια και τα λίπη, καθώς και οι οργανικές ουσίες [12].

Κυριότερα χαρακτηριστικά του νερού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του σκυροδέματος είναι:

- περιεκτικότητα σε άλατα μικρότερη από 3.5%
- περιεκτικότητα σε θειικά μικρότερη από 0.5%
- περιεκτικότητα σε νάτριο μικρότερη από 3%
- χαμηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένες οργανικές ουσίες
- χαμηλή περιεκτικότητα σε αιωρούμενες οργανικές ουσίες
- pH μεγαλύτερο από 4
- πλήρης έλλειψη σε λίπη ή έλαια

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην ποσότητα του νερού που προστίθεται στο τσιμέντο για την ενυδάτωση και την παρασκευή του σκυροδέματος, με την άριστη αναλογία του λόγου νερού/τσιμέντο να κυμαίνεται μεταξύ 0,4 για σκυροδέματα υψηλής αντοχής και 0,5 για σκυροδέματα χαμηλότερης αντοχής. Γενικά αποδεκτό είναι ότι όσο μικρότερος ο λόγος αυτός, τόσο μεγαλύτερη φαίνεται να είναι η αντοχή του σκυροδέματος. Ωστόσο, σύμφωνα με μελέτες έχει αποδειχθεί ότι αν η ποσότητα νερού είναι μικρότερη της βέλτιστης, η αντοχή του παραγόμενου σκυροδέματος υφίσταται αλματώδη πτώση, ενώ παράλληλα εμποδίζεται και η καλή κατεργασία του μίγματος. Έτσι, προτιμάται η προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας νερού για λόγους ασφάλειας της παρασκευής και του τελικού σκυροδέματος [3].

Νερό χρησιμοποιείται και για τη συντήρηση του σκυροδέματος, το οποίο δεν πρέπει να περιέχει ουσίες που προσβάλλουν την άσβεστο και με το πόσιμο να θεωρείται το πλέον κατάλληλο για αυτή τη χρήση [2].

#### **1.3.4 Πρόσθετα σκυροδέματος**

Συχνή είναι η προσθήκη χημικών ουσιών στον όγκο του σκυροδέματος, οι οποίες προστίθενται σε μικρές ποσότητες σε σχέση με τη μάζα του τσιμέντου και στοχεύουν, μέσω φυσικοχημικών αντιδράσεων στη βελτίωση κάποιων ιδιοτήτων του σκυροδέματος και συνήθως έχουν σημαντικό, ανά μονάδα βάρους ή όγκου, κόστος.

Τα πρόσθετα κατατάσσονται στις κατηγορίες:

- Αερατικά: αναπτύσσουν στη μάζα του σκληρυμένου σκυροδέματος μικροσκοπικές (0,02-0,2 mm) φυσαλίδες με σκοπό την αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε κύκλους ζέστης- παγετού.

- Πρόσθετα επιταχυντικά της πήξης: για σκυροδέτηση σε χαμηλές θερμοκρασίες.

- Πρόσθετα επιβραδυντικά της πήξης: για σκυροδέτηση σε πολύ ζεστό καιρό.

- Ρευστοποιητικά ή υπερρευστοποιητικά πρόσθετα: αυξάνουν τη ρευστότητα του νωπού σκυροδέματος μειώνοντας την επιφανειακή τάση του νερού και τις δυνάμεις συνοχής μεταξύ των κόκκων [13]. Η χρήση τους είναι σχεδόν απαραίτητη για σκυροδέματα υψηλής ποιότητας που αναγκαστικά περιέχουν λιγότερο νερό, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες. Όταν χρησιμοποιούνται υπερρευστοποιητικά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η επίδραση τους στην ρευστότητα του μίγματος κατά κανόνα εξαφανίζεται μετά από 20-30 min από την προσθήκη τους στο μίγμα.

- Ρευστοποιητικά –επιβραδυντικά

- Ρευστοποιητικά- επιταχυντικά

- Υπερρευστοποιητικά –επιβραδυντικά [3]

- Στεγανωτικά

Εκτός από τα παραπάνω, υπάρχουν κι άλλα πρόσμικτα όπως αντιπαγετικά, διογκωτικά και αντιδιαβρωτικά [13].

### **1.3.5 Ουσίες που μειώνουν την αντοχή του σκυροδέματος**

Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δίνεται και στις ουσίες που είναι πιθανό να βρίσκονται στον όγκο των αδρανών οι οποίες, κατά την ανάμειξή τους με το τσιμέντο για την παρασκευή του σκυροδέματος, παρεμποδίζουν την πήξη του τσιμέντου και μειώνουν την αντοχή του. Τέτοιου είδους ουσίες μπορεί να είναι:

- Πολύ λεπτά συστατικά: είναι ουσίες κατά βάση αργλικής προέλευσης και βρίσκονται είτε στην επιφάνεια των αδρανών είτε μεταξύ των κόκκων και έχουν διάμετρο μικρότερη από 0.06mm, μειώνοντας την αντοχή του σκυροδέματος σε κατάσταση θλίψης. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό στο οποίο μπορούν να εντοπίζονται στο σκυροδέμα κυμαίνεται μεταξύ 4-0.5%, ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων [2].

- Οργανικές ουσίες: είναι λεπτά διαμερισμένες ουσίες που εμποδίζουν τη σκλήρυνση του σκυροδέματος ή κατακρατούν το νερό διογκούμενες και το ανώτατο ποσοστό αυτών είναι 0.5% [2].

- Ουσίες που εμποδίζουν τη σκλήρυνση του σκυροδέματος: πρόκειται για οργανικές διαλυτές ουσίες ή άλατα που, ακόμα και σε μικρή ποσότητα, εμποδίζουν την ανάπτυξη αντοχών του σκυροδέματος [2].

- Ενώσεις του θείου: οι ενώσεις αυτές ενοχλούν τις ενώσεις τα θειικά άλατα κατά την πήξη του σκυροδέματος, καθώς και σε περίπτωση οξειδωσής τους, σχηματίζονται θεικές ενώσεις, στοιχεία που δεν επιτρέπουν την υπέρβαση της ποσότητάς τους πάνω από 1% [2].

- Ουσίες επιβλαβείς για τον οπλισμό του σκυροδέματος: σε αυτήν την κατηγορία ουσιών ανήκουν τα χλωριούχα άλατα, όπως και τα νιτρικά, τα βρωμιούχα και τα ιωδιούχα άλατα. Η επιτρεπόμενη ποσότητα τέτοιων αλάτων δεν πρέπει να ξεπερνά το ποσοστό του 0.4% σε οπλισμένο και το 0.02% σε προεντεταμένο σκυρόδεμα [2].

## 1.4 Σκυροδέματα με ειδικές απαιτήσεις

Σε κατασκευές που έχουν ορισμένες προδιαγραφές και συγκεκριμένες απαιτήσεις, πραγματοποιείται παρασκευή και χρήση σκυροδεμάτων ειδικών απαιτήσεων.

**Πίνακας 3:** Είδη τσιμέντων ειδικών απαιτήσεων

<b>Τσιμέντα ειδικών απαιτήσεων</b>	
<b>Σκυρόδεμα ανθεκτικό σε επιφανειακή φθορά</b>	Εφαρμόζονται σε κατασκευές όπου η επιφάνεια του σκυροδέματος πρέπει να έχει αντοχή σε φθορά από κρούσεις και τριβές. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτούνται χονδρόκοκκα αδρανή, η περιεκτικότητα σε τσιμέντο πρέπει να είναι τουλάχιστον 350 kg/m <sup>3</sup> ενώ παράλληλα η περιεκτικότητα σε νερό πρέπει να είναι χαμηλή [3].
<b>Σκυρόδεμα μικρής υδατοπερατότητας</b>	Χρησιμοποιείται σε κατασκευές που απαιτείται αυξημένη υδατοστεγανότητα, όπως υδατόπυργοι ή υδατοδεξαμενές, τοίχοι και δάπεδα υπογείων που βρίσκονται κάτω από τον υπόγειο ορίζοντα κτλ. Στις κατασκευές αυτές απαιτείται καλή συμπύκνωση του σκυροδέματος, μείγμα αδρανών με λίγα κενά και κυρίως μικρός λόγος νερού

---

προς τσιμέντο, καθώς η διαπερατότητα της μάζας του σκυροδέματος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον όγκο των τριχοειδών πόρων και των κενών του σκληρυνόμενου τσιμεντοπολτού [3].

**Σκυρόδεμα ανθεκτικό σε χημικά ή σε θαλασσινό νερό**

Χημικές ουσίες διαλυμένες σε νερό μπορεί να διεισδύσουν στο εσωτερικό του σκληρυνόμενου τσιμεντοπολτού μέσω των τριχοειδών πόρων και των κενών διαλύοντας κάποια συστατικά του ή να τα προσβάλλουν χημικά προκαλώντας την σταδιακή αποσύνθεσή του. Το σκυρόδεμα μπορεί να προστατευτεί από τέτοιες χημικές επιδράσεις με περιορισμό του όγκου των τριχοειδών πόρων και των κενών του τσιμεντοπολτού, δηλαδή με μείωση του λόγου νερού/τσιμέντο, με επιμήκυνση του χρόνου συντήρησης και με χρήση τσιμέντου ανθεκτικού στα θεϊκά ιόντα [3].

**Σκυρόδεμα ανθεκτικό σε παγετό**

Χρησιμοποιείται σε περιοχές της χώρας όπου η θερμοκρασία πέφτει συχνά κάτω από το μηδέν καθώς όταν παγώνει το νερό των τριχοειδών πόρων διαστέλλεται, τείνοντας να διαρρήξει το σκληρυνόμενο τσιμεντοπολτό. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό γίνεται χρήση αερατικών προσθέτων, στις μικροσκοπικές φυσαλίδες των οποίων διοχετεύεται το νερό των τριχοειδών πόρων μετά τη διαστολή του. Η προσθήκη αυτών επιβάλλεται σε ανεπίχριστα σκυροδέματα ανωδομών και σε όλα τα σκυροδέματα που διαστρώνονται το χειμώνα [3].

**Σκυρόδεμα που διαστρώνεται μέσα στο νερό**

Σε αυτήν την περίπτωση γίνεται χρήση μεγαλύτερης ποσότητας τσιμέντου και μικρότερης ποσότητας νερού, έτσι ώστε να υπάρχει κάποιο περιθώριο εάν κάποιο μέρος του τσιμέντου ξεπλυθεί από την επαφή του με το νερό [3].

## 2. Οπλισμός

### 2.1 Κατηγοριοποίηση χαλύβων

Ως οπλισμός του σκυροδέματος χρησιμοποιείται ο δομικός χάλυβας, ο οποίος αποτελεί κράμα σιδήρου-άνθρακα, με περιεκτικότητα σε άνθρακα 2% w/w, σε μαγγάνιο έως 1% w/w και με πολύ μικρότερες προσμίξεις πυριτίου, φωσφόρου, θείου και οξυγόνου. Το σημαντικότερο από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δομικού αυτού στοιχείου είναι η μηχανική του αντοχή, στην οποία και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση. Ωστόσο, η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη και έρευνα γύρω από το υλικό αυτό με διαφοροποιήσεις στις διεργασίες παραγωγής και με διάφορες προσμίξεις στο βασικό κράμα οδήγησε στη δημιουργία περισσότερων από 3.500 διαφορετικών ειδών χάλυβα με διαφορετικές ιδιότητες.

Έτσι, μπορεί να γίνει ταξινόμηση του χάλυβα με βάση τη χημική του σύσταση ή την κατεργασία που υφίσταται κατά την παραγωγή του σε:

- *Κοινούς ή ανθρακούχους χάλυβες(carbon steels)*. Χρησιμοποιούνται ευρέως και παρουσιάζουν ευκολία συγκολλησεως, ενώ περιέχουν άνθρακα και μικρό ποσοστό μαγγανίου, πυριτίου και χαλκού.
- *Κραματωμένους χάλυβες(alloy steels)*. Είναι κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα σε σημαντική περιεκτικότητα. Οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες περιέχουν συνήθως χρώμιο, μολυβδαίνιο, βανάδιο, νικέλιο σε μικρό ποσοστό, ενώ οι ισχυρά κραματωμένοι είναι οι ανοξείδωτοι και οι ταχυχάλυβες.

Περαιτέρω κατηγοριοποίησή του γίνεται με βάση τη μέθοδο παρασκευής, με βάση τη μορφή της επιφάνειας και με βάση τη συγκολλησιμότητα. Έτσι, στη μέθοδος παρασκευής ανήκουν:

- Η *θερμή έλαση* χωρίς καμία περαιτέρω επεξεργασία
- Η *θερμή έλαση* που ακολουθείται από μια άμεση θερμική επεξεργασία
- Η *ψυχρή κατεργασία* με στρέψη ή όλκηση(συρματοποίηση) του αρχικού, προερχόμενου από θερμή έλαση, προϊόντος[2].
- Οι *χυτοχάλυβες*, που παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή χελωνών και επαναχυτεύονται για την παραγωγή και τη δημιουργία διαφόρων εξαρτημάτων[13].

Τέλος, η συγκολλησιμότητα διακρίνει τους χάλυβες σε:

- Συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις(πρότυπο *EΛΟΤ 959*)
- Χάλυβες συγκολλησίμους(πρότυπο *EΛΟΤ 971*).[2]

Έτσι, ανάλογα με την χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής και τη συγκολλησιμότητα των χαλύβων, διαμορφώνονται οι εξής κατηγορίες: S 220, S400, S 500, S 400s και S 500s, με το νούμερο να αντιστοιχεί στο όριο διαρροής μετρούμενη σε MPa και το s να αναφέρεται στους συγκολλησίμους χάλυβες. Συγκεκριμένα, η ποιότητα S 200 περιλαμβάνει λείες ράβδους θερμής εξέλασης, ενώ οι ποιότητες S 400, S 400s, S 500 και S 500s περιγράφουν νευροχάλυβες, δηλαδή ράβδους και σύρματα υψηλής συνάφειας, με τις δύο τελευταίες κατηγορίες να αποτελούν χάλυβες λείας μορφής ή με νευρώσεις που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή δομικών πλεγμάτων. Ωστόσο, πλέον έχει πραγματοποιηθεί μια γενική αντικατάσταση όλων των τύπων χαλύβων με τους B500C όσο αφορά τις οικοδομικές χρήσεις, ενώ μόνο βοηθητικά και σε διάμετρο 8mm γίνεται χρήση των B500A, σύμφωνα με το ισχύον πρότυπο “EN 206-1, Concrete – Part 1. Specification, Performance, Production and Conformity, European Committee for Standardization, 2001-07”.

Παράλληλα, γίνεται μια περαιτέρω διάκριση ανάλογα με την κρυσταλλική φάση σε φερριτικούς, σε φερριτικούς-ωστενιτικούς, σε ωστενιτικούς και σε μαρτενσιτικούς, οι οποίοι περιέχουν ελάχιστο άνθρακα και κατ’ ελάχιστο 12% χρώμιο, είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση και ανήκουν στην γενικότερη κατηγορία των ‘ανοξειδωτων χαλύβων’ [14]. Τα πλεονεκτήματα των ανοξειδωτων χαλύβων για την ενίσχυση του σκυροδέματος είναι ότι έχει από κατασκευής μεγάλη αντίσταση στη διάβρωση, δεν απαιτεί επιπλέον προστασία με άλλη μέθοδο, παρουσιάζει καλή αντοχή, ολκιμότητα και συγκολλησιμότητα, ενώ συγχρόνως πλεονεκτεί έναντι του χάλυβα με ανοξειδωτη επίστρωση λόγω της αντοχής του σε κάμψη, απαλλαγμένος από το φόβο καταστροφής της επίστρωσης [14].

## **2.2 Συμπεριφορά χάλυβα εντός σκυροδέματος**

Γενικά, όταν ένα μέταλλο βρεθεί σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον συμπεριφέρεται με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

- *Αδρανής συμπεριφορά.* Την παρουσιάζουν τα ευγενή μέταλλα, όπως ο χρυσός, το ασήμι, η πλατίνα. Σε αυτήν την κατάσταση η αντίδραση της διάβρωσης δεν πραγματοποιείται αυθόρμητα, καθώς τα μέταλλα χαρακτηρίζονται κατά βάση από θερμοδυναμική σταθερότητα.



- *Ενεργή συμπεριφορά.* Αναφέρεται στη διάβρωση ενός μετάλλου εντός ενός διαλύματος, δηλαδή το μέταλλο διαλύεται μέσα στο διάλυμα και σχηματίζει διαλυτά μη προστατευτικά προϊόντα διάβρωσης. Τα προϊόντα αυτά δεν εμποδίζουν τη συνέχιση της διάβρωσης και παρατηρείται μεγάλη απώλεια μάζας του υλικού.

- *Παθητική συμπεριφορά.* Το μέταλλο ενώ διαβρώνεται με τη βύθιση στο διάλυμα σχηματίζει παράλληλα ένα αδιάλυτο προϊόν που έχει τη μορφή ενός λεπτού προστατευτικού φιλμ, το οποίο και επιβραδύνει την αντίδραση της διάβρωσης οδηγώντας τη σε χαμηλά επίπεδα. Η αντίδραση στη διάβρωση εξαρτάται από τη σταθερότητα του προστατευτικού στρώματος, καθώς στην περίπτωση που το στρώμα διαλυθεί ή παρουσιάσει ρωγμές σε κάποια σημεία το μέταλλο μπορεί να αποκτήσει ενεργή συμπεριφορά. Μέταλλα με τέτοια συμπεριφορά είναι ο σίδηρος, ο χαλκός, το τιτάνιο, το νικέλιο και τα κράματα αυτών [14].

Όσο αφορά το σκυρόδεμα, οι θερμοδυναμικά σταθερές ενώσεις του σιδήρου είναι τα οξειδία και τα υδροξειδία ασβεστίου, νατρίου και καλίου τα οποία σχηματίζονται κατά τη διάρκεια ενυδάτωσης του τσιμεντοπολτού ως αποτέλεσμα του ισχυρού αλκαλικού διαλύματος πόρων με pH μεταξύ 12,5 και 13,6. Αντίστοιχα, ο συνήθης χάλυβας που είναι ενσωματωμένος σε αλκαλικό σκυρόδεμα προστατεύεται από ένα λεπτό(πάχους μερικών νανομέτρων) φιλμ οξειδίων που ως παθητικό στρώμα σχηματίζεται αυθόρμητα, καθιστώντας το χάλυβα ανενεργό σε μηχανικές ή διαβρωτικές δράσεις. Ωστόσο, η παρουσία ιόντων χλωρίου και η μείωση του pH λόγω ενανθράκωσης προκαλούν την καταστροφή του παθητικού φιλμ οξειδίων, φαινόμενο που καλείται **αποπαθητικοποίηση του χάλυβα**[14].

### 3. Διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος

#### 3.1 Ορισμός διάβρωσης

Ο όρος «διάβρωση» (corrosion) συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αλλοίωση που υφίστανται τα μεταλλικά υλικά (που μπορεί να είναι καθαρά μέταλλα ή κράματα), αλλά τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει και την υποβάθμιση πολυμερών ή και σύνθετων υλικών με μικρές διαφοροποιήσεις. Ωστόσο, η από οποιαδήποτε αιτία φθορά ή αχρήστευση υλικών όπως το ξύλο, τα κεραμικά, το δέρμα, τα υφάσματα δεν μπορεί να λάβει το χαρακτηρισμό διάβρωση, καθώς η ηλεκτροχημική δράση υπερέχει στα μέταλλα και στα κράματα από τα υπόλοιπα υλικά, όπου η αλλοίωση βιολογικής φύσης(πέτρα) ή χημικής και φυσικής φύσης(πολυμερή) μπορεί να παρουσιάζεται περισσότερο έντονη [6,14].

Ως διάβρωση ορίζεται κάθε αυθόρμητη ή εκβιασμένη χημική, ηλεκτροχημική, μηχανική ή βιολογική αλλοίωση της επιφάνειας της μεταλλικής ύλης, που έχει ως συνέπεια την φθορά, την καταστροφή ή και τη λειτουργική αχρήστευση χρήσιμου υλικού μέσω της αλλαγής της χημικής σύστασης του υλικού αυτού[4,5]. Ένας άλλος ορισμός της διάβρωσης είναι η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, είναι δηλαδή μια ετερογενής, μη αντιστρεπτή, διεπιφανειακή αντίδραση μεταξύ του υλικού και του ρευστού(αέριου ή υγρού) περιβάλλοντός του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή ορισμένων ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του ίδιου, του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος που αυτό αποτελεί τμήμα του [4,12]. Ο όρος δεν είναι μονοσήμαντος, αλλά αναφέρεται τόσο στο φαινόμενο της δράσης όσο και στο αποτέλεσμά της[6]. Το φαινόμενο της διάβρωσης είναι επιφανειακό, δηλαδή εντοπίζεται στην εκτεθειμένη προς το περιβάλλον επιφάνεια του μετάλλου, μην εννοώντας μόνο τη γεωμετρική επιφάνεια αλλά περιλαμβάνοντας και τις επιφανειακές ανωμαλίες, τους πόρους, τα ενεργά κενά καθώς και τους ενεργούς δρόμους από αταξίες δομής. Έτσι, μέσω της διάβρωσης πραγματοποιείται μεταφορά μάζας και ενέργειας, σχηματίζοντας στην επιφάνεια του υλικού ενώσεις με έντονη πρόσφυση και διατηρώντας ή ακόμα και αυξάνοντας το συνολικό βάρος του. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι η αποδοχή της σύμβασης ότι ως απώλεια υλικού κατά τη διαδικασία της διάβρωσης εννοείται η απώλεια ως προς την αρχική μορφή του υλικού και όχι απαραίτητα η απώλεια μάζας

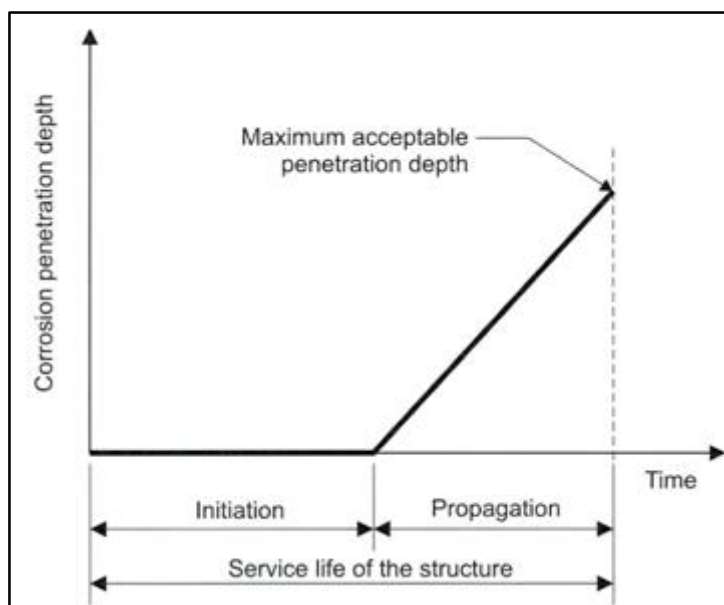
του [11]. Συνυφασμένη με την έννοια της διάβρωσης ως διεργασία είναι η ταχύτητα της διαβρωτικής δράσης, της προκαλούμενης φθοράς, καθώς και η έκταση και η φύση της φθοράς σε σχέση με τη λειτουργία του σχετικού συστήματος[13].

Δεν υπάρχει μέταλλο ή κράμα που να μη διαβρώνεται, κάτι που οφείλεται στη φυσική προδιάθεση των μετάλλων να ενώνονται με διάφορα στοιχεία, σχηματίζοντας μαζί τους ενώσεις που όπως αποδεικνύεται είναι πιο σταθερές. Αυτός είναι και ο λόγος που ελάχιστα μόνο μέταλλα βρίσκονται στη φύση σε καθαρή μεταλλική μορφή, χωρίς να έχουν άλλες προσμίξεις, τα επονομαζόμενα ευγενή μέταλλα(χρυσός, λευκόχρυσος, άργυρος, χαλκός), ενώ όλα σχεδόν τα υπόλοιπα βρίσκονται υπό μορφή ενώσεων(οξειδία, θειούχα, θειικά, ανθρακικά, χλωριούχα άλατα), τα γνωστά ορυκτά. Τα ευγενή μέταλλα δεν απαιτούν ιδιαίτερη προστασία, παραμένουν σταθερά και διατηρούν τις ιδιότητές τους στα περισσότερα διαβρωτικά μέσα, ενώ τα ορυκτά βρίσκονται ανακατεμένα με γαιώδεις προσμίξεις, σχηματίζοντας τα μεταλλεύματα.[12]

Στον κατασκευαστικό τομέα, η διάβρωση αναφέρεται στην ανθρακοποίηση του σκυροδέματος από το CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας, καθώς και στην παράλληλη διάβρωση του οπλισμού. Αυτά τα δύο είδη διάβρωσης δεν είναι ανεξάρτητα, αλλά αλληλοεπηρεάζονται, καθώς στην περίπτωση που διαβρώνεται το σκυρόδεμα το διαβρωτικό περιβάλλον είναι αναπόφευκτο να φτάσει στον οπλισμό, οδηγώντας στη διάβρωσή του. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στην περίπτωση της δημιουργίας διαβρωτικών συνθηκών στον οπλισμό, κατά την οποία, αν και δεν πραγματοποιείται αξιολογη μεταβολή του σκυροδέματος, ο οπλισμός διογκώνεται δημιουργώντας ρωγμές στο μπετόν[2]. Ουσιαστικά, η διάβρωση των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να χωριστεί σε δύο διακριτές φάσεις.

- *Φάση έναρξης.* Ο οπλισμός που μέχρι αυτή τη φάση βρίσκεται σε παθητική κατάσταση, ξεκινάει να αποπαθητικοποιείται λόγω φαινομένων όπως ενανθράκωση ή διείσδυση χλωριόντων στη μάζα του σκυροδέματος. Η διάρκεια της φάσης έναρξης εξαρτάται από το πάχος της επικάλυψης του σκυροδέματος, το οποίο καθορίζεται από διεθνή πρότυπα ανάλογα με το περιβάλλον έκθεσης, καθώς και από το ρυθμό διάχυσης των διαβρωτικών ουσιών. Ο ρυθμός αυτός εξαρτάται από την ποιότητα του σκυροδέματος, όπως το πορώδες και η διαπερατότητά του, και από τις μικροκλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

• *Φάση διάδοσης.* Η διάρρηξη του προστατευτικού στρώματος είναι η απαραίτητη προϋπόθεση για την έναρξη της διάβρωσης. Μόλις ολοκληρωθεί η καταστροφή του παθητικού προστατευτικού φιλμ πραγματοποιείται η διάβρωση παρουσία οξυγόνου και υγρασίας στην επιφάνεια του οπλισμού.[14]



**Σχήμα 5:** Έναρξη και διάδοση διάβρωσης σε οπλισμένο σκυρόδεμα κατά το Μοντέλο Tuutti (K. Tuutti, "Corrosion of Steel in Concrete, Swedish foundation for concrete research", Stockholm, 1982)

## 4.2 Αιτίες διάβρωσης

Ο εγκιβωτισμένος οπλισμός στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος χαίρει μιας αρχικής προστασίας κατά των παραγόντων διάβρωσης χάρη σε ένα παθητικό στρώμα οξειδίων που σχηματίζεται μόλις ο οπλισμός τοποθετείται μέσα στο σκυρόδεμα, αποτέλεσμα της υψηλής τιμής του pH του σκυροδέματος λόγω της ύπαρξης  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Η διάτρηση αυτού του προστατευτικού στρώματος σηματοδοτεί την έναρξη της διάβρωσης και της δημιουργίας προϊόντων σκουριάς, οξειδίων και υπεροξειδίων, των οποίων ο όγκος είναι δύο και τρεις φορές μεγαλύτερος από αυτόν του αρχικού οπλισμού, ενώ οι εσωτερικά αναπτυσσόμενες τάσεις προκαλούν ρηγμάτωση και θραύση της επικάλυψης σκυροδέματος [1]. Οι παράγοντες που προκαλούν αυτή τη φθορά ποικίλουν από φυσικούς όπως οι κλιματολογικές συνθήκες του περιβάλλοντος και η τοπογραφία του, έως εξωγενείς όπως ο μη κατάλληλος σχεδιασμός της κατασκευής [5]. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συμβολή του νερού κατά το προπαρασκευαστικό στάδιο της διάβρωσης κατά το οποίο γίνεται μεταφορά των

χλωριόντων από το εξωτερικό περιβάλλον προς τις ράβδους, όσο και κατά την αντίδραση του CO<sub>2</sub> με το εν διαλύσει Ca(OH)<sub>2</sub> κατά την ενανθράκωση [7]. Η διάβρωση, παρόλο που είναι αποτέλεσμα της ισχύος του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου και κατ' επέκταση ανεξάρτητη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος, πραγματοποιείται με ταχύτητα που εξαρτάται από τη φύση του μετάλλου ή του κράματος και από τους διαβρωτικούς παράγοντες του περιβάλλοντος[4]. Συγκεκριμένα, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα εξέλιξης του φαινομένου είναι:

- *Το είδος και η δομή του σκυροδέματος.* Το σκυρόδεμα είναι ένα πορώδες υλικό, στο οποίο το συνδετικό του υλικό, το τσιμέντο κατά την ενυδάτωσή του σχηματίζει ένα ζελέ με πόρους διαφόρων διαμέτρων. Η περιεκτικότητα των πόρων αυτών σε νερό, σε συνδυασμό με το είδος και την κοκκομετρία των αδρανών και το χρόνο συντήρησης του σκυροδέματος επηρεάζουν την αντίσταση του σκυροδέματος στην πρόσβαση από τους διαβρωτικούς παράγοντες του περιβάλλοντος.
- *Το πάχος επικάλυψης του οπλισμού.* Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του σκυροδέματος τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για να φτάσουν τα διαβρωτικά συστατικά στον οπλισμό. Η αύξηση του πορώδους του σκυροδέματος συνεπάγεται και την ανάγκη αύξησης του πάχους της επικάλυψης ούτως ώστε να διατηρηθεί ο ίδιος βαθμός προστασίας[13].
- *Επίδραση της τριεπιφάνειας.* Η διεργασία αυτή δημιουργείται λόγω αύξησης της πυκνότητας ρεύματος του αναπτυσσόμενου ηλεκτροστατικού πεδίου και της δημιουργίας γαλβανικού στοιχείου κατά την επαφή ενός μετάλλου με άλλο καθοδικότερο.
- *Επίδραση της αγωγιμότητας του διαβρωτικού περιβάλλοντος.* Όσο μικρότερο είναι το pH τόσο πιο έντονη είναι η διάβρωση λόγω αύξησης της αγωγιμότητας είτε λόγω διάλυσης των μετάλλων, των κραμάτων και των οξειδίων.
- *Επίδραση της εναλλαγής του διαβρωτικού περιβάλλοντος.* Αναφέρεται στην εναλλαγή του ίδιου του διαβρωτικού περιβάλλοντος ή των ιδιοτήτων του.
- *Επίδραση πλαστικών και ελαστικών παραμορφώσεων.* Πλαστικές παραμορφώσεις ή πρόσθετες αταξίες δομής που δημιουργήθηκαν με μηχανική

ή θερμική κατεργασία οδηγούν σε τοπική ανοδικοποίηση και κατ' επέκταση σε τοπικά γαλβανικά στοιχεία.

- *Επίδραση της θερμοκρασίας και της υγρασίας.* Η αύξηση και των δυο αυτών παραγόντων επιταχύνουν το φαινόμενο της διάβρωσης.
- *Επίδραση διαφυγόντων ρευμάτων.* Πρόκειται για τα ρεύματα που κυκλοφορούν στο έδαφος, στους τοίχους, στις κατασκευές ή στα νερά έξω από τα υπάρχοντα κυκλώματα, με τα σημεία όπου τα ηλεκτρόνια εγκαταλείπουν τις μεταλλικές επιφάνειες να παρουσιάζουν τα εντονότερα διαβρωτικά φαινόμενα.
- *Επίδραση γεωμετρικών ανωμαλιών.* Αναφέρεται σε μακροσκοπικές ανωμαλίες, όπως ύπαρξη προεξοχών στην επιφάνεια, εμφάνιση κόκκων από ψηγματοβολή, καθώς και μικροσκοπικές ανωμαλίες, όπως διαφοροποίηση στη χημική σύσταση, γεωμετρικά ενεργά κέντρα λόγω αταξίας στη φύση του υλικού ή της επεξεργασίας του [13].

Το διαβρωτικό περιβάλλον συναντάται και στις τρεις καταστάσεις της ύλης. Στην αέρια μορφή, με ή χωρίς την παρουσία υγρασίας, πραγματοποιείται ατμοσφαιρική διάβρωση, διάβρωση σε ξηρή ατμόσφαιρα, απουσία υγρασίας (dry corrosion) και διάβρωση από καυσαέρια. Στην υγρή μορφή περιβάλλοντος ανήκουν το θαλασσίνο, το φυσικό, της ύδρευσης, της αποχέτευσης, το βιομηχανικό νερό και τα χημικά όπως και τα βιολογικά υγρά. Στερεό περιβάλλον διάβρωσης μπορεί να είναι το έδαφος ή το σκυρόδεμα[6]. Αναλυτικότερα, ως διαβρωτικά περιβάλλοντα θεωρούνται τα εξής:

- Ο ατμοσφαιρικός αέρας που περιέχει οξυγόνο, υγρασία, οξειδία αζώτου και θείου, σκόνη, αλάτι κοντά στη θάλασσα, κλπ.
- Το υδάτινο περιβάλλον π.χ. θαλάσσιο που είναι εξόχως διαβρωτικό εξαιτίας κυρίως των περιεχομένων αλάτων και ιόντων και κυρίως των χλωριόντων, καθώς, αν και σε μικρότερο βαθμό, το λιμναίο και ποτάμιο υγρό περιβάλλον. Η διαβρωτική δράση του νερού οφείλεται στο διαλυμένο σε αυτό οξυγόνο, στα διαλυμένα άλατα, στην τιμή του pH, σε αιωρούμενα σε αυτό σωματίδια και μικροοργανισμούς.
- Το έδαφος με τα διαλυμένα σε αυτό άλατα, την υγρασία, τους μικροοργανισμούς και την αγωγιμότητά του.
- Τα καυσαέρια και γενικά τα αέρια, των οποίων η διαβρωτικότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία τους, την ταχύτητα ροής τους και τη σύστασή τους, ενώ η

διαβρωτική δράση τους εντοπίζεται τόσο στο χώρο παραγωγής τους όσο και στο χώρο που αυτά ρυπαίνουν. Μπορούν να διακριθούν και άλλα διαβρωτικά περιβάλλοντα, π.χ. βιομηχανικό, αγροτικό, αστικό κλπ.[4,13]

### 4.3 Ταχύτητα διάβρωσης

Τα χαρακτηριστικά τόσο του υλικού όσο και του περιβάλλοντος ή κάποια μεταβολή της έντασής τους καθορίζουν το κινητικό σχήμα που ελέγχει την ταχύτητα διάβρωσης. Με τον όρο περιβάλλον εννοείται η τοποθεσία σε συνδυασμό με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν, τη ρύπανση αλλά και την εγγύτητα με τη θάλασσα [8]. Οι σημαντικότεροι από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα διάβρωσης είναι οι εξής:

- *Νερό.* Αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις μεταλλικές κατασκευές και μπορεί να βρίσκεται σε μορφή υγρασίας ή βροχής και συνήθως συνδυάζεται με τους ρύπους και με το ποσοστό άλατος που περιέχει [8].

- *Συγκέντρωση(χλωριόντων, θεικών αλάτων κτλ).* Η επίδραση της συγκέντρωσης του διαβρωτικού συστατικού εξαρτάται από το συγκεκριμένο συνδυασμό μετάλλου-περιβάλλοντος [5, 6].

- *Θερμοκρασία.* Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ταχύτητα διάβρωσης εξαρτάται από την επίδρασή της στους παράγοντες που επηρεάζουν τη διαβρωτική δράση, όπως είναι η διαλυτότητα και η διάχυση του οξυγόνου, το pH, η διαλυτότητα και οι φυσικές ή χημικές μεταβολές των προστατευτικών επιστρωμάτων, η ρόφηση αναστολέων, το δυναμικό των γαλβανικών στοιχείων κ.α.[6].

- *Ενεργή οξύτητα pH.* Όσο το pH απομακρύνεται από το ουδέτερο σημείο, αυξάνεται η αγωγιμότητα του διαλύματος, κάτι που ασκεί αυξητική επίδραση στην ταχύτητα διάβρωσης [6].

- *Διαβρωτικά στοιχεία:* Η συγκέντρωση και το είδος των διαβρωτικών παραγόντων του περιβάλλοντος έκθεσης του μετάλλου επηρεάζει τόσο το ποσοστό εμφάνισης όσο και το ρυθμό του φαινομένου [12].

- *Ταχύτητα κίνησης του διαβρωτικού περιβάλλοντος* [6]. Η ταχύτητα του διαλύματος μπορεί να αυξήσει ή να αφήσει ανεπηρέαστη την ταχύτητα διάβρωσης , ενώ ανάλογα με την τιμή της ταχύτητας κίνησης πρέπει να εκτιμάται η παροχή

αναστολέων στην μεταλλική επιφάνεια ή η απομάκρυνση των συσσωρευμένων ακαθαρσιών [14].

- *Πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος-ταυτόχρονες καθοδικές δράσεις.* Συνήθως το διαβρωτικό περιβάλλον είναι αρκετά πολύπλοκο, έτσι ώστε εκτός από τις δυο δράσεις της οξειδωσης του μετάλλου και της αναγωγής ενός ιοντικού είδους να λαμβάνουν μέρος περισσότερες καθοδικές δράσεις στο σύστημα [6].

- *Εναλλαγή του διαβρωτικού περιβάλλοντος ή των ιδιοτήτων του:* Τόσο η εναλλαγή όσο και η διακύμανση των ιδιοτήτων του διαβρωτικού περιβάλλοντος αυξάνουν τη διάβρωση [12].

- *Επαφή ανόμοιων μετάλλων και ύπαρξη τριεπιφάνειας.* Η επαφή αυτή και η ύπαρξη τριεπιφάνειας(σε ίσαλο γραμμή πλοίων) συχνά οδηγεί σε πολύ αυξημένες ταχύτητες διάβρωσης λόγω της δημιουργίας γαλβανικού στοιχείου [12].

- *Ακτινοβολίες και ηχητική ενέργεια.* Η έκθεση μετάλλου ή κράματος σε ραδιενέργεια συνεπάγεται τη δημιουργία πρόσθετων αταξιών δομής που καθιστούν το μέταλλο πιο ανοδικό, προκαλώντας κατ' επέκταση την ταχύτερη διάβρωσή του[6]. Παράλληλα, υψηλές ηχητικές εντάσεις αυξάνουν ελάχιστα την ταχύτητα διάβρωσης, κάτι που οφείλεται στο σχηματισμό φυσαλίδων υδρογόνου ή στην αλλαγή της μορφής και της δευτερεύουσας δομής των προϊόντων διάβρωσης[6].

- *Ανομοιογένεια της επιφάνειας και πλαστικές παραμορφώσεις.* Η αύξηση της ανομοιογένειας της επιφάνειας πιθανώς λόγω θερμικών ή μηχανικών κατεργασιών χωρίς ανόπτηση οδηγεί στη δημιουργία σημείων περισσότερο ανοδικών, τα οποία και λειτουργούν σαν τοπικά γαλβανικά στοιχεία επιτείνοντας τη διάβρωση [6].

- *Μηχανικές τάσεις.* Οι ελαστικές εσωτερικές ή εξωτερικές τάσεις ευθύνονται συχνά για την επιτάχυνση της διάβρωσης και την ψαθυρή θραύση της κατασκευής[6].

- *Παρουσία οξυγόνου:* Η παρουσία οξυγόνου αυξάνει την ταχύτητα της διάβρωσης του σιδήρου καθώς και πολλών άλλων μετάλλων [12].

Τα αποτελέσματα της διάβρωσης είναι εμφανή και σημαντικά, με αποτέλεσμα να μπορούν να γίνουν εύκολα αντιληπτά. Η διάβρωση του οπλισμού μιας κατασκευής οδηγεί σε σημαντική μείωση της αντοχής και της λειτουργικότητάς της, ενώ οι επιπτώσεις είναι εμφανείς και από αισθητικής απόψεως[5]. Συγχρόνως, οι



τεχνολογικές και οικονομικές επιπτώσεις της διάβρωσης των μετάλλων είναι τεράστιες[4].

#### **4.4 Μηχανισμοί διάβρωσης**

Η μεταλλική ύλη χαρακτηρίζεται από την κρυσταλλική δομή και κατ' επέκταση την κρυσταλλική τάξη, την οποία διαταράσσουν διάφορες κατηγορίες ατελειών δομής(όπως είναι τα όρια των κόκκων), που είναι αναβαθμισμένες από ενεργειακή άποψη και υπόκεινται σε εντονότερη διάβρωση. Η διάβρωση εκφράζεται ως η απώλεια μάζας ανά μονάδα επιφάνειας, ενώ εντάσσοντας και την παράμετρο του χρόνου, προκύπτει η ταχύτητα διάβρωσης [4].

Η διάβρωση του χάλυβα πραγματοποιείται με διάφορους μηχανισμούς. Κυριότεροι από αυτούς θεωρούνται η ενανθράκωση και η διείδυση χλωριόντων, δράσεις που δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, καθώς η πρώτη προκαλεί ραγδαία επιτάχυνση της δεύτερης [5]. Έτσι, ο μηχανισμός διάβρωσης μπορεί να είναι είτε καθαρά χημικός στην περίπτωση της απουσίας υγρασίας, είτε ηλεκτροχημικός όταν αυτή συνοδεύεται από υγρασία [4]. Η πιο συνήθης μορφή διάβρωσης είναι αυτή που υποβοηθιέται από την παρουσία υγρασίας στην οποία ανήκει και η διάβρωση του σιδήρου, μια ηλεκτροχημική διαδικασία που εμπεριέχει ροή ηλεκτρονίων και ιόντων μέσω του σχηματισμού πολλών μικρογαλβανικών στοιχείων διεσπαρμένων στην επιφάνεια του μετάλλου [4,5]. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η μεταφορά χλωριόντων είναι ταχύτερη όταν οι πόροι είναι σχεδόν γεμάτοι με νερό(σχετική υγρασία περιβάλλον κοντά στο 100% ή όταν το δομικό στοιχείο είναι μερικώς βυθισμένο στο νερό οπότε οι πόροι του υπολοίπου είναι σχεδόν πάντα γεμάτοι λόγω τριχοειδούς ανύψωσης), κάτι που βρίσκεται σε αντίθεση με την ενανθράκωση η οποία και προϋποθέτει μερικώς γεμάτους πόρους ούτως ώστε να επιτρέπεται η διείδυση του CO<sub>2</sub> προς το εσωτερικό(ρυθμός ενανθράκωσης μέγιστος όταν η σχετική υγρασία είναι κοντά στο 50%) [7].

##### **4.4.1 Ενανθράκωση**

Ως ενανθράκωση του σκυροδέματος ορίζεται η διαδικασία της μετατροπής του υδροξειδίου του ασβεστίου Ca(OH)<sub>2</sub> σε ανθρακικό ασβέστιο CaCO<sub>3</sub>. Το υδροξείδιο του ασβεστίου και άλλα υδροξείδια υπάρχουν σε μικρότερες ποσότητες στην επιφάνεια των οπλισμών εξασφαλίζοντας σε αυτούς ένα προστατευτικό, έντονα αλκαλικό περιβάλλον μέσω ενός λεπτού στρώματος οξειδίων και υπεροξειδίων που προστατεύει

το χάλυβα. Ωστόσο, η διάβρωση ξεκινάει λόγω της σταδιακής μείωσης της αλκαλικότητας του περιβάλλοντος αυτού εξαιτίας της ένωσης του CaO με το H<sub>2</sub>O και της συνεπαγόμενης μετατροπής του Ca(OH)<sub>2</sub> σε ασβεστόλιθο, αναιρώντας την παθητική προστασία που παρέχει το επικαλυπτικό στρώμα (αποπαθητικοποίηση του χάλυβα). Η μετάβαση αυτή σηματοδοτείται από την πτώση του pH από 12,5 που χαρακτηρίζει το αλκαλικό περιβάλλον στην τιμή του 9, οδηγώντας σε ένα πλήρως ενανθρακωμένο σκυρόδεμα με pH=8 [5].

Η διάβρωση του χάλυβα με μηχανισμό ενανθράκωσης οφείλεται στην μείωση της αλκαλικότητας λόγω απελευθέρωσης αλκαλικών ειδών και συναφών αντιδράσεων στα ποζολανικά υλικά ή μερικής εξουδετέρωσης της αλκαλικότητας με διοξείδιο του άνθρακα ή άλλα όξινα χημικά είδη [9]. Ο μηχανισμός διάβρωσης με ενανθράκωση είναι μια χημική κατεργασία φθοράς και απαξίωσης του οπλισμού, καθώς αποτελεί το πρώτο στάδιο για την διάλυση του επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου (που λειτουργεί ως προστασία των ράβδων χάλυβα) και την επακόλουθη διείσδυση των χλωριόντων μέσω της διάτρησής του. Από την άλλη μεριά, θετικό στοιχείο της δημιουργίας ασβεστόλιθου είναι η δημιουργία ενός πυκνού υλικού με χαμηλό πορώδες και μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή, που όμως δεν είναι σε θέση να προστατεύσει τον οπλισμό [5]. Η ενανθράκωση του σκυροδέματος σε ατμοσφαιρικό αέρα οδηγεί σε σκλήρυνση του ασβέστη, κάτι που χρησιμοποιείται ως θετικό στοιχείο για συγκεκριμένες χρήσεις. Εξάλλου, το σκυρόδεμα, ως πορώδες υλικό αποβάλλει το νερό δυσκολότερα από ότι το απορροφά, με αποτέλεσμα σε περιπτώσεις αυξομείωσης της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος ή περιοδικής διαβροχής, η μέση ποσότητα νερού στους πόρους είναι μεγαλύτερη από την μέση υγρασία περιβάλλοντος δίνοντας τη δυνατότητα στην επιπλέον ποσότητα να επιβραδύνει την ενανθράκωση [7].

#### *Παράμετροι που επηρεάζουν την ενανθράκωση*

- *Συνθήκες περιβάλλοντος.* Τόσο η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος στο οποίο τοποθετείται η κατασκευή όσο και η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα επηρεάζουν το ρυθμό ενανθράκωσης [14]. Σε σχετική υγρασία περιβάλλοντος 50-70% παρατηρείται το μέγιστο ποσοστό ενανθράκωσης, ενώ όσο αυξάνει η περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> στον αέρα, αυξάνεται και ο ρυθμός ενανθράκωσης [7,14].

- *Θερμοκρασία.* Εάν όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες διατηρούνται σταθεροί με έμφαση σε αυτόν της υγρασίας, αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας ενανθράκωσης [14].
- *Ποιότητα και πάχος της επικάλυψης.* Η υψηλή διαπερατότητά της, η ύπαρξη ρωγμών και οι υψηλές τιμές αναλογίας νερού/τσιμέντο δρουν επιταχυντικά στη διαδικασία της ενανθράκωσης [7].
- *Σύνθεση και είδος τσιμέντου.* Η διαπερατότητα του σκυροδέματος επηρεάζει σημαντικά τη διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα, με τη μείωση του λόγου w/c να προκαλεί μείωση του πορώδους του ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού και κατά συνέπεια μείωση του ρυθμού ενανθράκωσης [14]. Παράλληλα, η ικανότητα κάθε σκυροδέματος να αντιδρά με το CO<sub>2</sub> είναι ανάλογη της αλκαλικότητάς του. Έτσι, τσιμέντα που περιέχουν πυριτική παιπάλη, σκωρία υψικαμίνων, ποζολάνες και ιπτάμενες τέφρες ενανθρακώνονται πιο γρήγορα από το τσιμέντο Portland. Αντίθετα, η προσθήκη λιγνοσουλφόνης στο σκυρόδεμα σε ποσότητα 0.25% κατά βάρος θεωρείται ότι μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης κατά 10-30% [7].

#### 4.4.2 Επίδραση χλωριόντων

Τα χλωριόντα που επιδρούν αρνητικά στη διάβρωση του οπλισμού προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος στην περίπτωση που έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτά αδρανή από παραλίες, θαλασσινό νερό ή πρόσμικτα βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα, είτε από το εξωτερικό φυσικό περιβάλλον [7]. Τα χλωριόντα αυτά διαπερνούν τοπικά το επιφανειακό στρώμα ένυδρου οξειδίου που προστατεύει τις ράβδους οπλισμού [5]. Στις περιπτώσεις που η περιεκτικότητα σε χλωριόντα φτάνει μια οριακή τιμή που εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, σημαντικότερη από τις οποίες είναι το ηλεκτροχημικό δυναμικό του χάλυβα το οποίο σχετίζεται με την ποσότητα του οξυγόνου της επιφάνειας του οπλισμού, τότε μόνο πραγματοποιείται διάβρωση του οπλισμού σε μη ενανθρακωμένο σκυρόδεμα [14].

*Παράμετροι που επηρεάζουν τη διεύθυνση των χλωριόντων*

- *Το μέγεθος και η κατανομή των πόρων του σκυροδέματος.* Από το σύνολο των χλωριόντων που υπάρχουν μέσα στο σκυρόδεμα, αυτά που συμμετέχουν ενεργά στη διάβρωση του οπλισμού είναι αυτά που

βρίσκονται διαλυμένα στο νερό των πόρων του σκυροδέματος, τα οποία φτάνοντας στην επιφάνεια του οπλισμού ξεκινούν την αποπαθητικοποίησή του. Συνεπώς, μικρός λόγος νερού/τσιμέντο εξασφαλίζει πυκνό σκυρόδεμα με μικρή διαπερατότητα [7].

- *Περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο και σε πρόσθετα.* Οι προσμίξεις στο σκυρόδεμα και η ανεπαρκής ποσότητα  $C_3A$  (λιγότερο από 8% κ.β.) στον όγκο του τσιμέντου επηρεάζουν την ικανότητα του σκυροδέματος να δεσμεύει τα χλωριόντα [7].
- *Είδος και συγκέντρωση χλωριόντων.* Το  $CaCl_2$  προκαλεί μεγαλύτερη διάβρωση από το  $NaCl$ . Παράλληλα, η αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων μέχρι ενός σημείου προκαλεί αύξηση του βαθμού διάβρωσης, ενώ κάποια περαιτέρω αύξησή τους οδηγεί σε μείωση του βαθμού διάβρωσης του χάλυβα [7].
- *Περιβάλλον.* Η διείδυση χλωριόντων μπορεί να γίνει είτε σε ξηρό είτε σε υγρό περιβάλλον, με συνηθέστερη και πιο σοβαρή μορφή διείδυσης αυτή που πραγματοποιείται σε συνθήκες μεγαλύτερης υγρασίας [7].

Το ρόλο της ανόδου και της καθόδου μπορούν να παίξουν ξεχωριστές αλλά με διαφορετικά ενεργειακά επίπεδα περιοχές του οπλισμού, στις οποίες εντοπίζεται και η διαφορά δυναμικού με τη μορφή ρεύματος διάβρωσης μικρής έντασης. Στις ανοδικές περιοχές πραγματοποιείται η οξειδωση με την αποβολή ηλεκτρονίων, ενώ στις καθοδικές περιοχές λαμβάνει χώρα η αναγωγή όπου προσλαμβάνονται τα ηλεκτρόνια. Η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος από τις ανοδικές προς τις καθοδικές περιοχές γίνεται δυνατή με την παρουσία νερού και οξυγόνου στο περιβάλλον του χάλυβα, οδηγώντας στην παραγωγή υδροξυλίων ( $OH^-$ ) στην κάθοδο [9].

Στο ρόλο του ηλεκτρολύτη μέσω του οποίου μεταφέρονται τα κατιόντα της ανόδου στην κάθοδο τίθεται το περιβάλλον του μπετόν. Η μεταλλική σύνδεση που μεταφέρει τα ηλεκτρόνια είναι ο ίδιος ο οπλισμός, ο οποίος μένει απροστάτευτος λόγω της αδρανοποίησης της παθητικής προστασίας που του προσφέρουν τα επιφανειακά, σταθερά στρώματα των υδροξειδίων του σιδήρου και του ασβεστίου εξαιτίας της μείωσης της αλκαλικότητας του περιβάλλοντος [5]. Το αρχικό ολοκληρωμένο προϊόν διάβρωσης είναι τα υδροξείδια του σιδήρου ( $Fe(OH)_2$ ), που μετά τη μερική αφυδάτωσή τους μετασχηματίζονται σε μικτό υλικό αποτελούμενο από υδροξείδιο και οξείδια που

συνθέτουν τη σκουριά και καλύπτουν σταδιακά όλη την επιφάνεια του μετάλλου [4]. Το δημιουργούμενο αυτό υλικό αποτελείται από έναν ικανοποιητικό αριθμό πόρων, ευνοώντας έτσι τη μεταφορά ιόντων από το μέταλλο προς το περιβάλλον και αντίστροφα και συνεχίζοντας αδιάκοπα το σχηματισμό προϊόντων διάβρωσης τα οποία και συσσωρεύονται σε ένα παχύ στρώμα προϊόντων στην επιφάνεια του μετάλλου [4].

Σε ορισμένες περιπτώσεις σχηματίζεται ένα συμπαγές προϊόν στην επιφάνεια του μετάλλου, οδηγώντας στην παθητικοποίηση του μετάλλου. Στην περίπτωση που αυτό λαμβάνει χώρα σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον η διάβρωση συνεχίζεται με μηχανισμό τοπικής διάβρωσης \_βελονισμού, που μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτατη καταστροφή του υλικού. Ακόμα, σε περιπτώσεις καθολικού ή ανεπαρκούς αερισμού η διάβρωση εμφανίζεται ως αυθόρμητο φαινόμενο σε υγρό περιβάλλον και βρίσκει τρόπους να εκδηλωθεί [4].

Εκτός των περιπτώσεων αυθόρμητης διάβρωσης ενός μετάλλου σε διαβρωτικό περιβάλλον, συχνά συναντάται και η περίπτωση επαφής μετάλλων με διαφορετικό δυναμικό οξειδοαναγωγής, μεταξύ των οποίων σχηματίζεται γαλβανικό στοιχείο που επιταχύνει τη διάβρωση του ενός και επιβραδύνει τη διάβρωση του άλλου μετάλλου [4]. Αυτός ο μηχανισμός διάβρωσης σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται και ως μέθοδος προστασίας ενός μετάλλου μέσω της επαφής του με ηλεκτραρνητικότερα και κατ' επέκταση πιο εύκολα διαβρώσιμα μέταλλα.

Αξιοσημείωτη είναι η συνεργασία των παραπάνω μηχανισμών διάβρωσης, καθώς σε σκυρόδεμα υψηλού pH η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου στα οποία οφείλεται η έναρξη του μηχανισμού διάβρωσης, είναι αρκετά υψηλή συγκρινόμενη με αυτή του ήδη διαβρωμένου σκυροδέματος. Ειδικά στην Ελληνική επικράτεια συναντάται συχνά η συνύπαρξη και των δύο βασικών διαβρωτικών μηχανισμών, με την επίδραση των χλωριόντων να είναι πιο έντονη σε παραθαλάσσιες περιοχές και την εναθράκωση να συναντάται συνηθέστερα σε αστικά περιβάλλοντα [1].

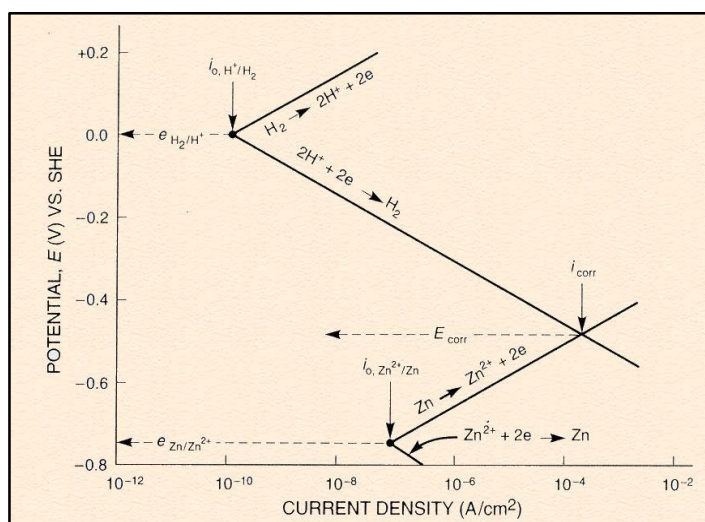
## **4.5 Κατηγορίες διάβρωσης**

Η διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να είναι φυσική, δηλαδή να οφείλεται σε φθορές από καθαρά μηχανικούς λόγους, ή χημική, δηλαδή να σχετίζεται με χημική ή φυσικοχημικά φαινόμενα με πολλές φορές ταυτόχρονη συνέργεια μηχανικών αιτιών και ομοιόμορφη οξειδοαναγωγική δράση με ταυτόχρονη ανταλλαγή ηλεκτρονίων. Η χημική διάβρωση συγκεκριμένα διακρίνεται σε διάβρωση λόγω

εκχύλισης ιόντων από το σκυρόδεμα στο υγρό περιβάλλον, σε διάβρωση λόγω ανταλλαγής ιόντων μεταξύ των δύο περιβαλλόντων και σε διάβρωση μέσω σχηματισμού μεγαλομοριακών ενώσεων [12]. Εξάλλου, το υλικό και το περιβάλλον ή το διαβρωτικό μέσο αποτελούν ένα ετερογενές σύστημα διάβρωσης, στο οποίο η διάβρωση εμφανίζεται στη διεπιφάνεια. Έτσι, προκύπτει ένα πλήθος χαρακτηρισμών του διαβρωτικού συστήματος και κατά συνέπεια της διάβρωσης, σύμφωνα με ορισμένα κριτήρια.

#### 4.5.1 Με κριτήριο το διαβρωτικό περιβάλλον

Γίνεται διάκριση σε ξηρή ή χημική διάβρωση και σε υγρή ή ηλεκτροχημική διάβρωση. Η διαφορά των δύο μορφών διάβρωσης έγκειται στο γεγονός ότι στην πρώτη το υλικό εκτίθεται σε οξειδωτικό αέριο σε θερμοκρασία δωματίου ή σε συνηθέστερα υψηλότερες θερμοκρασίες απουσία νερού ή υδατικού περιβάλλοντος (οξυγόνο, αλογόνα, ατμοί θείου κα), ενώ στη δεύτερη μορφή διάβρωσης το υλικό εκτίθεται σε υγρό περιβάλλον (υγρασία, υδατικά διαλύματα κα). Η υγρή διάβρωση περιλαμβάνει όλες τις δράσεις στο μηχανισμό των οποίων υπεισέρχεται υγρό περιβάλλον, όπως το έδαφος, ενώ οι ηλεκτροχημικές δράσεις συμβαίνουν ταυτόχρονα στο ίδιο ηλεκτρόδιο. Η απεικόνιση αυτού του είδους διάβρωσης γίνεται με τα "διαγράμματα διάβρωσης" ή "διαγράμματα Evans". Κατά την ξηρή διάβρωση σχηματίζονται μεταλλικά οξείδια, το στρώμα των οποίων μπορεί να είναι προστατευτικό ή μη, κάτι που εξαρτάται από το πορώδες του, την εμφάνιση ρωγμών ή αποκολλήσεων, τη συνάφειά του με το υπόστρωμα, καθώς και τους συντελεστές διάχυσης ιόντων και ηλεκτρονίων [14].



Σχήμα 6: Διάγραμμα Evans για σύστημα Zn σε HCl

[http://www.corrosionclinic.com/corrosion\\_online\\_lectures/ME303L06.HTM](http://www.corrosionclinic.com/corrosion_online_lectures/ME303L06.HTM)

Μία άλλη διάκριση με βάση το περιβάλλον μπορεί να γίνει σε ατμοσφαιρική και σε βιολογική διάβρωση. Ως ατμοσφαιρική διάβρωση ορίζεται αυτή που πραγματοποιείται μετά την έκθεση του υλικού στον ατμοσφαιρικό αέρα και στους ρύπους του και όχι μετά τη βύθισή του σε υγρό μέσο. Η ατμοσφαιρική διάβρωση μπορεί να ταξινομηθεί σε υγρή ατμοσφαιρική διάβρωση (wet atmospheric corrosion), σε ξηρή ατμοσφαιρική διάβρωση (dry atmospheric corrosion) και σε ατμοσφαιρική διάβρωση στην οποία απαιτείται παρουσία υδρατμών και ιχνών ρύπων (damp atmospheric corrosion). Οι ρυθμοί της ατμοσφαιρικής διάβρωσης ποικίλουν ανάλογα με τα ποσοστά υγρασίας, τη θερμοκρασία και τους ρυπαντές [14]. Πέρα από τις καθαρά χημικές ή ηλεκτροχημικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη διάβρωση όπως είναι το pH (όξινο, ουδέτερο, αλκαλικό), το είδος των εν διαλύσει ιόντων, η αγωγιμότητα του διαβρωτικού μέσου, η παρουσία ή η απουσία διαλυμένου οξυγόνου, η διάβρωση επηρεάζεται και από παραμέτρους όπως η ακινησία ή η ροή του διαβρωτικού μέσου, η μόνιμη ή περιοδική μηχανική καταπόνηση που επιβάλλεται στο υλικό από το περιβάλλον, η παρουσία ζωντανών οργανισμών κ.α. [6]. Γενικά, ως λιγότερο διαβρωτικές θεωρούνται οι ατμόσφαιρες των ξηρών περιοχών(έρημοι), ενώ ως πιο διαβρωτικές οι βιομηχανικές ή περιοχές κοντά σε ναυπηγεία, εξαιτίας της μεγάλης διάρκειας υγρασία και των υψηλών θερμοκρασιών.

Διάβρωση των μετάλλων πραγματοποιείται και στο έδαφος, φαινόμενο που είναι σύνθετο και στο οποίο εμπλέκεται πλήθος μεταβλητών, καθώς κάθε μέταλλο διαβρώνεται με διαφορετικό τρόπο κάτω από το έδαφος, κάνοντας την εξέλιξη του φαινομένου να καθορίζεται από τις ιδιότητες του υλικού και από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η υγρασία και το οξυγόνο. Εδάφη με υψηλή οξύτητα και υψηλή περιεκτικότητα διαλυμένων αλάτων είναι πιο διαβρωτικά, ενώ η προσθήκη μικρού ποσοστού άλλων στοιχείων στα κράματα μπορεί να βοηθήσει στην αντίσταση της διάβρωσης δοκιμίων χάλυβα στο έδαφος. Οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των μετάλλων όταν βρίσκονται κάτω από το έδαφος είναι το νερό, ο βαθμός αερισμού, το pH του εδάφους, η ειδική του αντίσταση, η συγκέντρωση ιόντων χλωρίου σε αυτό και το επίπεδο των θεικών που επιδρά κατά βάση στο σκυρόδεμα και όχι τόσο πολύ στο χάλυβα [14].

Παράλληλα, μικροοργανισμοί (βακτηρίδια) αναπτύσσονται στο νερό, στο έδαφος, στα φυσικά προϊόντα πετρελαίου και τα διαλύματα πλύσης μεταλλευμάτων, οι οποίοι και επηρεάζουν είτε άμεσα τις ανοδικές και καθοδικές δράσεις, είτε έμμεσα

προσβάλλοντας τα προστατευτικά επιστρώματα και τους αναστολείς ή παράγοντας διαβρωτικές ουσίες και αποθέσεις με τη μορφή σωρών και εξογκωμάτων [11]. Ταξινόμηση της διαβρωτικής ικανότητας των εδαφών γίνεται με κριτήριο την ειδική αντίστασή του, με τα αμμώδη να θεωρούνται τα λιγότερα διαβρωτικά, ενώ στο άλλο άκρο τοποθετούνται τα αργιλώδη και κυρίως αυτά που περιέχουν αλατούχο νερό [14]. Ωστόσο, η βιολογική διάβρωση παρατηρείται κυρίως σε άλλα υλικά, όπως ξύλο, πέτρα και οφείλεται στην άμεση προσβολή αυτών από μικροοργανισμούς φυτικής και ζωικής προέλευσης και θαλάσσιων οργανισμών που με τις εκκρίσεις τους οδηγούν σε ανταλλαγή της ύλης και σε δημιουργία ανομοιογένειας στην επιφάνεια των προσβαλλόμενων υλικών [12].

Έντονα διαβρωτικό για τις μεταλλικές κατασκευές είναι το θαλάσσιο περιβάλλον, ιδιαίτερα για τις παράκτιες ή υπεράκτιες κατασκευές, τις υποθαλάσσιες σωληνώσεις ή τις μονάδες επεξεργασίας θαλασσινού νερού. Σημαντικότεροι παράγοντες σε σχέση με τη διάβρωση είναι το περιεχόμενο σε οξυγόνο, η ταχύτητα, η θερμοκρασία και οι βιολογικοί οργανισμοί, ενώ από το πλήθος των οργανικών και των ανόργανων μορίων που περιέχονται στο θαλασσινό νερό ορισμένα δημιουργούν σύμπλοκα, που επηρεάζουν σημαντικά τόσο το μηχανισμό της διάβρωσης όσο και τη φυσιολογία των βιολογικών οργανισμών. Τα δυναμικά διαφόρων μετάλλων σε θαλάσσιο περιβάλλον μεταβάλλονται ανάλογα με το περιεχόμενο σε οξυγόνο, την ταχύτητα του νερού, τη θερμοκρασία, ορισμένους μεταλλουργικούς παράγοντες και ανάλογα με την κατάσταση της επιφάνειας του μετάλλου [13].

#### **4.5.2** *Με κριτήριο το υλικό*

Ορισμένοι παράμετροι επηρεάζουν κατά περίπτωση τη διάβρωση, όπως είναι η χημική σύστασή του, η κρυσταλλογραφική δομή του, η μέθοδος και οι συνθήκες χύτευσης, οι μηχανικές κατεργασίες και η τελική επεξεργασία της επιφάνειας[6].

#### **4.5.3** *Με κριτήριο την αιτία στην οποία οφείλεται η εμφάνιση της διαβρωτικής δράσης.*

Πραγματοποιείται διάκριση στις εξής κατηγορίες:

- *Ηλεκτροχημική.* Πρόκειται για το πιο συνηθισμένο είδος διάβρωσης, κύριο χαρακτηριστικό της πορείας της οποίας είναι η μετακίνηση ιόντων και ηλεκτρονίων μέσω της οριακής επιφάνειας του μετάλλου προς το διαβρωτικό



περιβάλλον, οδηγώντας στη δημιουργία διαφοράς δυναμικού και ροής ρεύματος.

- *Χημική*. Εκδηλώνεται με προσβολή του μετάλλου από χημική ένωση και αλλοίωση της επιφάνειας λόγω χημικών αντιδράσεων, αποτέλεσμα των οποίων είναι η ομοιόμορφη διάλυση της επιφάνειας του μετάλλου. Κύριο χαρακτηριστικό αυτού του είδους είναι το γεγονός ότι η οξειδοαναγωγική δράση τελείται σε ένα κλειστό χημικό σύστημα και τα ηλεκτρόνια δεν οδεύουν μέσα στο μέταλλο.
- *Μηχανική*. Είναι ουσιαστικά η φυσική φθορά που προκαλείται στην επιφάνεια του μετάλλου λόγω τριβής, οδηγώντας σε απομάκρυνση μερών του με μηχανικό τρόπο.
- *Μικροβιολογική (microbiologically influenced corrosion)*. Οφείλεται στις εκκρίσεις φυτικών και ζωικών μικροοργανισμών που προσκολλώνται στο μέταλλο [13]. Ποικιλίες αυτών των οργανισμών αναπτύσσονται στο νερό, στο έδαφος, στα φυσικά προϊόντα πετρελαίου και στα διαλύματα πλύσης μεταλλευμάτων [14].

#### **4.5.4** *Με κριτήριο τη μορφή των ηλεκτροχημικών δράσεων μεταξύ υλικού και περιβάλλοντος*

Γίνεται διάκριση σε διάβρωση με μηχανισμό οξυγόνου ή με μηχανισμό υδρογόνου[6]. Αυτό το είδος διάβρωσης οφείλεται στην προδιάθεση του μετάλλου να υποβαθμιστεί ενεργειακά λόγω της παρουσίας δυναμικού μεταξύ μετάλλου και περιβάλλοντος, κάτι που οδηγεί στη μεταφορά φορτίων(ιόντων και ηλεκτρονίων) δια μέσου της οριακής επιφάνειας του μετάλλου προς το διαβρωτικό περιβάλλον[12].

#### **4.5.5** *Με κριτήριο την ύπαρξη επιπλέον μηχανικών τάσεων στο σύστημα ή την παρουσία εξωτερικών τάσεων στο υλικό σε:*

##### **4.5.5.1** *Ρευστομηχανική διάβρωση/μηχανική δράση ενός υγρού στο μέταλλο.*

Μπορεί να παρουσιαστεί είτε λόγω διάβρωσης εκτριβής ή ρευστού, ή με τη μορφή σπηλαιώδους διάβρωσης. Η διάβρωση εκτριβής αναφέρεται στην ταχύτερη απώλεια μάζας ενός μεταλλικού υλικού λόγω της σχετικής κίνησης του υγρού διαβρωτικού μέσου και της μεταλλικής επιφάνειας, ενώ η σπηλαιώδης διάβρωση οφείλεται στο σχηματισμό φυσαλίδων ατμού στο ρευστό που κινείται με μεγάλη ταχύτητα [11]. Η αντοχή των υλικών σε

διάβρωση εκτριβής καθορίζεται από τη χημική τους σύσταση, την αντίσταση στη διάβρωση, τη σκληρότητά τους(ειδικά του επιφανειακού στρώματος) καθώς και από τις μεταλλουργικές διεργασίες που έχουν υποστεί [14].

#### **4.5.5.2** *Διάβρωση λόγω τριβής(fretting corrosion).*

Αναφέρεται στη διάβρωση από τριβή που συμβαίνει στη διεπιφάνεια δύο σε επαφή επιφανειών όταν υφίσταται ελαφριά σχετική ολίσθηση της μίας προς την άλλη, με τη μια τουλάχιστον να είναι μεταλλική[11]. Η ολίσθηση είναι κυρίως παλμική, όπως αυτή που προκαλείται από δόνηση. Εμφανίζεται συνήθως σε στοιχεία μηχανών, σε πλάκες με μπουλόνια, σε σιδηροτροχιές σιδηροδρόμων, σε γρανάζια με σφήνα, σε ηλεκτρικές επιφάνειες κα, έχοντας ως αποτέλεσμα το σχηματισμό σκόνης οξειδίων που απομακρύνονται δύσκολα προκαλώντας βελονισμούς ή αυλακώσεις που περιβάλλονται από προϊόντα διάβρωσης[14].

#### **4.5.5.3** *Διάβρωση από μηχανική καταπόνηση (stress corrosion cracking)*

Είναι η συνδυασμένη δράση διαβρωτικού περιβάλλοντος και μηχανικών τάσεων ή τοπικής διαβρωτικής προσβολής και εσωτερικών ή εξωτερικών εφελκυστικών τάσεων, αποτέλεσμα των οποίων είναι η δημιουργία λεπτών ρωγμών που προχωρούν στο εσωτερικό του μετάλλου κάθετα στη διεύθυνση της μηχανικής τάσης ακολουθώντας περικρυσταλλικό ή ενδοκρυσταλλικό δρόμο (κατά μήκος των ορίων των κόκκων είτε διαμέσου των κόκκων κατά μια διεύθυνση ή διακλαδισμένα αντίστοιχα) [11,12]. Τα στάδια της διάβρωσης αυτής περιλαμβάνουν τη δημιουργία της εσοχής από διάβρωση με βελονισμούς, μια περίοδο εκκόλαψης που στο εσωτερικό του μετάλλου γίνονται διεργασίες ώστε να δημιουργηθεί ο ενεργός δρόμος, ο οποίος κατά το τρίτο στάδιο οδηγεί σε γρήγορη προώθηση της ρωγμής και θραύση της κατασκευής[13]. Αυτό το είδος διάβρωσης οδηγεί σε εξαιρετικά μεγάλες καταστροφές, συνοδευόμενη από μικρή απώλεια υλικού και από ακόλουθες οικονομικές επιπτώσεις. Βασική προϋπόθεση για να συμβεί αυτό το είδος διάβρωσης είναι η ικανοποίηση τριών παραγόντων: η ύπαρξη κατάλληλου διαβρωτικού περιβάλλοντος που θα προωθεί τη ρηγμάτωση, η δράση εφελκυστικών τάσεων και η ευπαθής φύση του κράματος[4].

#### **4.5.5.4** *Βλάβη από υδρογόνο (hydrogen damage).*

Προκαλείται από ρόφιση υδρογόνου από το μέταλλο χωρίς να υπάρχει δράση διάβρωσης στην επιφάνεια [11]. Γίνεται διάκριση σε ευθραυστιτοποίηση από υδρογόνο όπου ελαττώνεται η δυνατότητα πλαστικής παραμόρφωσης και σε δημιουργία φλυκταίνων εξαιτίας αυτού, η οποία συνήθως οδηγεί σε θραύση[14].

#### **4.5.5.5** *Διάβρωση κόπωσης (fatigue corrosion).*

Είναι η συνδυασμένη δράση διαβρωτικής προσβολής και γρήγορα εναλλασσόμενων εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων[11]. Η αστοχία επέρχεται σε χαμηλότερες τιμές τάσης ή σε λιγότερους κύκλους φόρτισης από το όριο συνεχούς αντοχής του υλικού και οφείλεται στην ανάπτυξη ρωγμών σε διαβρωτικό περιβάλλον κάτω από ταυτόχρονη εφαρμογή κύκλων φόρτισης. Για κάθε συγκεκριμένο υλικό το όριο αντοχής σε κόπωση ή το συμβατικό όριο κόπωσης μειώνεται όταν το υλικό εκτίθεται σε διαβρωτικό περιβάλλον[14].

#### **4.5.6** *Με κριτήριο τη μορφολογία της προσβολής σε:*

##### **4.5.6.1** *Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση.*

Αυτό το είδος διάβρωσης συμβαίνει στις περιπτώσεις που λαμβάνουν χώρα μικρές ποσότητες υγρασίας, όταν το μέταλλο έρχεται σε επαφή με οξύ ή διάλυμα ή ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες ξηρής ατμόσφαιρας, ενώ εμφανίζεται στα δομικά στοιχεία ως μια σχισμή παράλληλη προς την τοποθέτηση της ράβδου του χάλυβα[9,12]. Χαρακτηρίζεται γενικά από χημική ηλεκτροχημική δράση που προχωρά ομοιόμορφα στο σύνολο ή στο μεγαλύτερο μέρος της εκτεθειμένης επιφάνειας, οδηγώντας στο σχηματισμό ενός ομοιόμορφου, περίπου ισόπαχου στρώματος προϊόντος διάβρωσης ή στην περίπτωση ομοιόμορφη διάλυση της επιφάνειας του υλικού λόγω της ύπαρξης πολλών ανόδων και καθόδων που λειτουργούν στη μεταλλική επιφάνεια σε δεδομένη στιγμή[4,13].

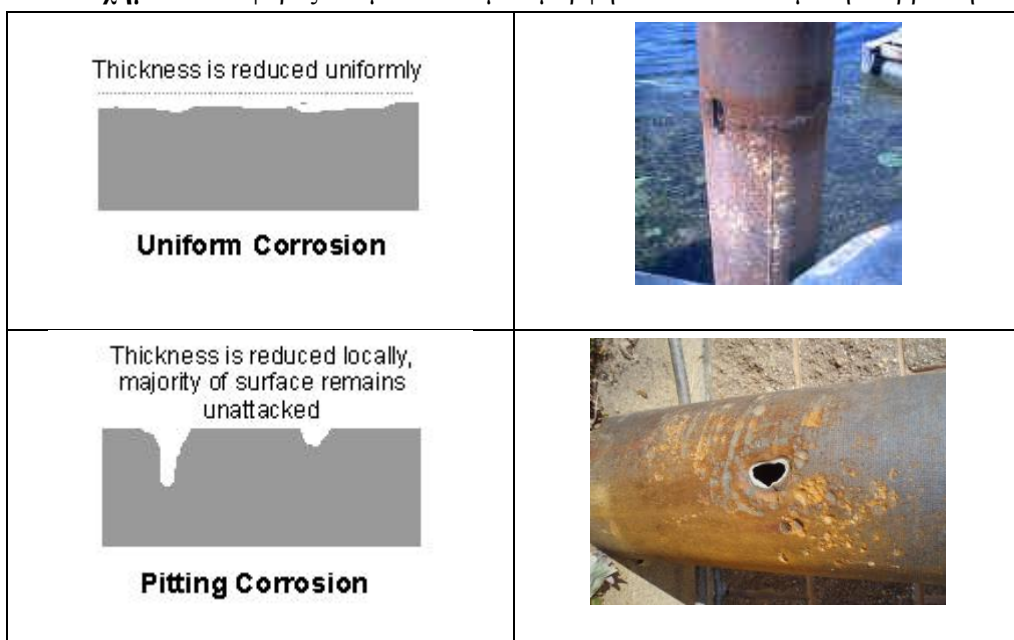
##### **4.5.6.2** *Διάβρωση με βελονισμούς(pitting corrosion).*

Πρόκειται για εκλεκτικό τοπικό σχηματισμό προϊόντος διάβρωσης ή για εκλεκτική τοπική διάλυση της επιφάνειας που σχετίζεται με τον εκλεκτικό τοπικό σχηματισμό οπών, κρατήρων και εσοχών στο μέταλλο[4,13]. Οφείλεται

αποκλειστικά στην τοπικά αυξημένη συγκέντρωση είτε υαρχόντων είτε διεισδυόντων μέσω των πόρων χλωριόντων[9]. Αποτελεί μία από τις πιο καταστροφικές και ύπουλες μορφές διάβρωσης, καθώς προκαλεί αστοχία εξοπλισμού λόγω διάτρησης σε συνδυασμό με πολύ μικρή απώλεια στο σύνολο της κατασκευής. Αυτό το είδος διάβρωσης μπορεί να θεωρηθεί το ενδιάμεσο στάδιο ανάμεσα στην ομοιόμορφη διάβρωση και στην πλήρη παθητικοποίηση, κατά την οποία συντελείται μηδενική διάβρωση[13].

Το τσιμέντο έχει τη δυνατότητα να δεσμεύει ποσότητα χλωριόντων μέχρι 0.4-0.6% του βάρους του σχηματίζοντας άλας Friedell, το οποίο είναι αρχικά αβλαβές για τον οπλισμό. Ωστόσο, με την παρουσία θεϊκών αλάτων ή μετά την ενανθράκωση του σκυροδέματος το άλας διασπάται ελευθερώνοντας τα χλωριόντα και αυξάνοντας τον κίνδυνο της διάβρωσης του οπλισμού [5]. Αυτό το είδος διάβρωσης γίνεται ορατό με την εμφάνιση τοπικής μείωσης της διατομής των ράβδων και μείωση της ικανότητάς τους να φέρουν φορτίο, ενώ είναι από τα πιο καταστρεπτικά είδη διάβρωσης γιατί προκαλεί καταστροφή των υλικών λόγω διάτρησης ακόμα και για πολύ μικρό εκατοστιαίο ποσοστό απώλειας βάρους της κατασκευής[9,12]. Τα περισσότερο ευπαθή μέταλλα σε αυτό το είδος διάβρωσης είναι αυτά που προστατεύονται από λεπτά στρώματα οξειδίων, όπως ο χαλκός, ο ανοξείδωτος χάλυβας, το αλουμίνιο, το τιτάνιο, το μαγνήσιο, αλλά και ο κοινός χάλυβας, ο σίδηρος, ο μόλυβδος κα.[12].

**Σχήμα 7:** Διαφορές ανάμεσα σε ομοιόμορφη και σε εντοπισμένη διάβρωση



#### **4.5.6.3** *Μικρορρηγματώδης διάβρωση/διάβρωση σχισμών (crevice corrosion).*

Είναι μια εντοπισμένη μορφή διάβρωσης, που συνήθως συνδέεται με διάφορες σχισμές και την ύπαρξη μικρών όγκων στάσιμων διαλυμάτων ή στερεών σε οπές, φλάντζες ή παρεμβύσματα, σε σχισμές, μπουλόνια και πιτσίνια, καθώς και κάτω από χρώματα που έχουν υποστεί αποκόλληση[14]. Ξεκινάει σε μικρορρογμές και σε μικροκοιλότητες της επιφάνειας του χάλυβα, του αλουμινίου, του τιτανίου και γενικά όσων μετάλλων σχηματίζουν προστατευτικό φιλμ οξειδίων, συνεχίζοντας με ανάλογη με το βελονισμό διάβρωση[5].

#### **4.5.6.4** *Περικρυσταλλική διάβρωση (μεταξύ των κόκκων-intergranular corrosion).*

Αυτή η διάβρωση κάνει την εμφάνισή της κυρίως στα περατωτικά όρια των μεταλλικών κόκκων όπου σχηματίζονται τοπικά γαλβανικά στοιχεία είτε λόγω υψηλότερης κρυσταλλικής ενέργειας των σημείων αυτών είτε λόγω συγκέντρωσης εκεί ακαθαρσιών και στοιχείων κραματοποίησης[11]. Γι αυτό και εμφανίζεται συνήθως μέσα σε κράματα και όχι στην επιφάνεια του μετάλλου, σε σημεία δηλαδή που εντοπίζεται διαφορά δυναμικού[5]. Το πιο σύνηθες παράδειγμα περικρυσταλλικής διάβρωσης παρουσιάζεται στους ωστενιτικούς χάλυβες στην περιοχή των συγκολλήσεων, όπου κατακρημνίζονται καρβίδια λόγω της θερμικής κατεργασίας και της χημικής σύστασης των χαλύβων, τα οποία και οδηγούν στην εμφάνιση τοπικών γαλβανικών στοιχείων[14].

#### **4.5.6.5** *Θερμογαλβανική διάβρωση (thermo-galvanic corrosion).*

Προκαλείται από την εμφάνιση διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ δύο τμημάτων της ίδιας κατασκευής, λόγω της οποίας εμφανίζεται διαφορετική πόλωση του μετάλλου και κατ' επέκταση δημιουργούνται ανοδικές και καθοδικές περιοχές που οδηγούν σε τοπική προσβολή[11].

Οι πιο συνηθισμένες μορφές διάβρωσης είναι η ομοιόμορφη και η τοπική διάβρωση, αφού εντοπίζονται εύκολα και είναι εύκολα ορατές [5]. Όμως, συνήθως παρατηρείται επαλληλία ή και συνύπαρξη των παραμέτρων και των συστημάτων διάβρωσης, τα οποία είναι δυνατόν να δρουν άμεσα ή έμμεσα, οδηγώντας όλα στην επιφανειακή

αλλοίωση του υλικού. Τα προϊόντα της διάβρωσης συσσωρεύονται στην επιφάνεια καλύπτοντάς την τοπικά ή σε ολόκληρη την έκτασή της, ενώ ακόμα μπορούν να διαφύγουν προς το διαβρωτικό περιβάλλον. Σε κάθε περίπτωση, τα προϊόντα αυτά είναι χημικώς διάφορα από το μέταλλο ή το κράμα, κάτι που εξηγείται από το γεγονός ότι το μέταλλο ή τα συστατικά του κράματος βρίσκονται σε μηδενική οξειδωτική βαθμίδα, ενώ τα προϊόντα της διάβρωσης σε υψηλότερη, κάτι που εμφανίζεται σαν μεταβολή της οξειδωτικής βαθμίδας του μετάλλου[6].

#### **4.5.7** *Συνέπειες διάβρωσης*

Τα προϊόντα που παράγονται από τις αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την ενανθράκωση αντιδρούν μεταξύ τους, παράγοντας υδροξείδια του σιδήρου που εμφανίζονται με τη μορφή σκουριάς. Η σκουριά αυτή εναποτίθεται στη ράβδο στις περιοχές των καθόδων και, όντας διαπερατή τόσο από το νερό όσο και από τον αέρα και αντιδρώντας με το διαλυμένο οξυγόνο των πόρων, πραγματοποιείται ο σχηματισμός νέων προϊόντων σκουριάς [5]. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνει χώρα μια συνεχόμενη αύξηση του όγκου των προϊόντων σκουριάς (η σκουριά έχει 2 έως 6 φορές μεγαλύτερο όγκο από τον σίδηρο από τον οποίο έχει παραχθεί), η οποία και οδηγεί στην αύξηση των συνοδευτικών εσωτερικών τάσεων προκαλώντας ρηγματώσεις, αποτινάξεις της επικάλυψης και αποκολλήσεις ολόκληρων τμημάτων σκυροδέματος, μειώνοντας ή μηδενίζοντας τη συνάφεια και εκθέτοντας ακόμα περισσότερο τη ράβδο σε διάβρωση [7]. Οι φθορές αυτές που εμφανίζονται στον όγκο του σκυροδέματος αποτελούν διόδους του νερού, το οποίο περνώντας από αυτές καταλήγει στον οπλισμό, εντείνοντας με αυτόν τον τρόπο τη διαδικασία της διάβρωσής του. Έτσι, ο οπλισμός που έρχεται σε επαφή με την υγρασία οξειδώνεται, διογκώνοντας με τη σειρά του τις ρωγμές και οδηγώντας σε μια κυκλική συνέχεια της πορείας διάβρωσης [5].

Η εκτίμηση της κατάστασης μιας κατασκευής από πλευράς διάβρωσης των οπλισμών γίνεται μέσω της αυτοψίας και των περαιτέρω δοκιμών σε κατάλληλα επιλεγμένες θέσεις προκειμένου να προσδιοριστεί ο βαθμός διάβρωσης των ράβδων, να μετρηθεί η επικάλυψη, να εκτιμηθεί ο βαθμός ενανθράκωσης και να διαπιστωθεί η ύπαρξη χλωριόντων, ενώ ο κίνδυνος διάβρωσης του χάλυβα μπορεί να ελεγχθεί μετρώντας το ελεύθερο δυναμικό του χάλυβα [7].

Τα τελευταία χρόνια το φαινόμενο της διάβρωσης έχει εξαπλωθεί ιδιαίτερα εξαιτίας της αυξανόμενης χρήσης μεταλλικών και άλλων τεχνολογικά ανεπτυγμένων υλικών,

καθώς και της συνεπαγόμενης ρύπανσης της ατμόσφαιρας, των υδάτων και του εδάφους. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η διάβρωση και οι προσπάθειες για την αντιμετώπιση της καταστροφικής επίδρασής της στα υλικά να έχουν σημαντική επίπτωση κυρίως στην οικονομική και στη βιομηχανική διαδικασία, καθώς το 40% των μετάλλων και των κραμάτων που παράγονται παγκόσμια καταστρέφεται κάθε χρόνο λόγω της διάβρωσης [11]. Το κόστος διάβρωσης διακρίνεται στο άμεσο κόστος το οποίο περιλαμβάνει την προστασία και την αντικατάσταση των κατασκευών που διαβρώθηκαν, και στο έμμεσο κόστος το οποίο αναφέρεται στις απώλειες στην παραγωγικότητα λόγω των διακοπών λειτουργίας, των καθυστερήσεων, των αποτυχιών, της πρόσφυσης σε ένδικο μέσο και στο φόρο του αυξημένου κόστους διάβρωσης [13]. Με σκοπό τον περιορισμό αυτού του ιδιαίτερα υψηλού κόστους κρίνεται απαραίτητη η πρόβλεψη και ο περιορισμός της κυρίως από τον υπεύθυνο μηχανικό του έργου, ο οποίος πρέπει να είναι σε θέση να προβλέψει τις δυσμενείς συνθήκες και να προλάβει την καταστροφή του υλικού. Οι χρησιμοποιούμενοι μέθοδοι για την εκτίμηση του κόστους της διάβρωσης σε εθνική οικονομική κλίμακα είναι:

- Μέθοδος Uhlig που εστιάζει στις επιπτώσεις στην παραγωγή
- Μέθοδος Hoar που εξετάζει κάθε βιομηχανικό τομέα λεπτομερώς και υπολογίζει το σύνολο από τις άμεσες απώλειες και από τις δαπάνες για την πρόληψη της διάβρωσης
- Μέθοδος In/Out που συνυπολογίζει το έμμεσο κόστος διάβρωσης, διαχωρίζοντας τη συνολική διάβρωση σε άμεσο και έμμεσο κόστος.

Σύμφωνα με εκτενείς έρευνες που πραγματοποιήθηκαν βασιζόμενες στις παραπάνω μεθόδους, διαπιστώθηκε ότι το 1995 οι περισσότερες δαπάνες των ΗΠΑ οφείλονταν στην εκτενή ανάπτυξη και εφαρμογή των ανθεκτικών στη διάβρωση κραμάτων(56%) και των προστατευτικών επιστρωμάτων(30%), ενώ η μέθοδος καθοδικής προστασίας, η εφαρμογή αναστολέων διάβρωσης καθώς και η χρήση αμέταλλων υλικών που δρουν συμπληρωματικά στο προστατευτικό επίστρωμα συμβάλλουν μόνο στο 4% του συνολικού κόστους διάβρωσης [11].

Το κόστος διάβρωσης αυξάνεται από διάφορες αιτίες, μερικές από τις οποίες είναι:

- Η απώλεια παραγωγής από διαβρωμένα τμήματα πριν τη συντήρησή τους ή από την αναστολή των εργασιών των φθαρμένων εγκαταστάσεων, καθώς και τους μεγάλους χρόνους συντήρησης και αντικατάστασης των διαβρωμένων τμημάτων.

- Η μείωση της απόδοσης των εγκαταστάσεων από συσσώρευση προϊόντων.
- Οι συχνά ενεργειακές απώλειες ως συνέπεια της διάβρωσης.
- Οι αυξημένες ανάγκες συνεχούς συντήρησης για αποφυγή αναστολής της παραγωγής.
- Οι γενικές απώλειες μη υπολογίσιμου κόστους, οι οποίες μπορεί να αφορούν κρίσιμα τμήματα εγκαταστάσεων ή ενδεχομένως να είναι αιτίες πρόκλησης ατυχημάτων [13].

Οι οικονομικές συνέπειες της διάβρωσης έχουν σημαντικές επιπτώσεις και στην τεχνολογία, καθώς η ανάπτυξη του τεχνολογικού τομέα πολλές φορές περιορίζεται λόγω προβλημάτων διάβρωσης και νέων απαιτήσεων των υλικών, κυρίως σε θέματα αντοχής τους σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις και σε ακόμα πιο διαβρωτικά περιβάλλοντα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτών των κολλημάτων είναι η άντληση πετρελαίου στη θάλασσα και στην ξηρά στην οποία εμπλέκονται πολλά είδη διάβρωσης, όπως είναι η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση παρουσία σουλφιδίων, η βιολογική διάβρωση όπως και το ευρύ φάσμα δυσκολιών που εμπλέκονται στο εξαιρετικά διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον. Κατά αυτόν τον τρόπο η διάβρωση γίνεται ένας περιοριστικός παράγοντας που αποτρέπει την ανάπτυξη οικονομικά ή ακόμα και τεχνολογικά λειτουργικών συστημάτων [14].

Εκτός όμως από τις εμφανείς οικονομικές και τις συνδυασμένες άρρηκτα με αυτές τεχνολογικές συνέπειες, η διάβρωση επηρεάζει και πολλούς άλλους τομείς, όπως είναι η ασφάλεια, η υγεία και η πολιτιστική κληρονομιά.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα είναι η ασφάλεια των κατασκευών η οποία μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο με την επίδραση της διάβρωσης αυτών, συμβάλλοντας έτσι στην αστοχία γεφυρών, αεροσκαφών, αυτοκινήτων, αγωγών αερίου, στο σύνολο δηλαδή των μεταλλικών κατασκευών και γενικότερα των συσκευών που συνθέτουν το σύγχρονο κόσμο. Πιθανές συνέπειες της εκτεταμένης διάβρωσης των κατασκευών είναι οι σοβαροί τραυματισμοί ή ακόμα και η απώλεια της ζωής [14].

Όσο αφορά ένα διαφορετικό κομμάτι του τομέα της υγείας, παρατηρείται μια σημαντική ανάπτυξη νέων κραμάτων και καλύτερων τεχνικών εμφύτευσης μεταλλικών προσθετικών συσκευών στο σώμα όπως πλάκες, αρθρώσεις του ισχίου, βηματοδότες όπως και άλλων εμφυτευμάτων, χωρίς ωστόσο να έχει βρεθεί κάποιος αποτελεσματικός και οριστικός τρόπος καταπολέμησης του φαινομένου της



διάβρωσης και της φθοράς των χρησιμοποιούμενων υλικών. Φθορά με τη μορφή της γήρανσης μετά από μικρό χρονικό διάστημα σε μικρό σχετικά αλλά όχι αμελητέο βαθμό υφίστανται και τα εμφυτευμένα στον οργανισμό πολυμερή, όπως είναι το τεφλόν, το νάυλον, τα πολυμερή σιλικόνης, τα ακρυλικά, το πολυπροπυλένιο κ.α., καθώς και τα κεραμικά υλικά, όπως οι χρησιμοποιούμενες πορσελάνες. Αποτέλεσμα της διάβρωσης και της συνεπαγόμενης διάσπασης των μεταλλικών κυρίως βιοϋλικών είναι η πρόκληση τοπικών δυνητικών αλλοιώσεων στους ιστούς και σε αρκετές περιπτώσεις η πρόκληση γενικότερων βλαβών στον οργανισμό λόγω της διάχυσής τους [14].

Οι επιπτώσεις της διάβρωσης γίνονται φανερές και στον τομέα του πολιτισμού, όπου διαπιστώνεται μια επιταχυνόμενη επιδείνωση της διαβρωτικής διαδικασίας των πολύτιμων αντικειμένων και της πολιτιστικής κληρονομιάς λόγω του πολύ μολυσμένου περιβάλλοντος που επικρατεί στις περισσότερες χώρες του κόσμου. Το διεθνές ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο τομέα εντάθηκε όταν αποκαλύφθηκε η σοβαρή φθορά την οποία έχουν υποστεί επιχρυσωμένα χάλκινα αγάλματα στη Βενετία [14].

## 4. Προληπτικά μέτρα και μέτρα επέμβασης

Η χρήση κατάλληλων μέτρων για την αποφυγή ή τον περιορισμό του προβλήματος της διάβρωσης που θα δημιουργηθεί με την πάροδο του χρόνου αποτελεί επιτακτική ανάγκη εξαιτίας του πολλαπλάσιου κόστους που θα στοιχίσει η εκ των υστέρων αποκατάσταση της κατασκευής [5]. Βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή οποιασδήποτε μεθόδου προστασίας από τη διάβρωση είναι η εξακρίβωση του είδους της διάβρωσης και η εξέταση των συνθηκών που επικρατούν στο διαβρωτικό περιβάλλον [11]. Έτσι, οι γενικότερες μέθοδοι προστασίας επιδιώκουν την άμεση ή την έμμεση ελάττωση του δυναμικού διάβρωσης και την ανασχεση των οξειδοαναγωγικών δράσεων στο σύστημα της διάβρωσης προκειμένου να ελαττωθεί και η ένταση της διάβρωσης. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από το διαβρωτικό σύστημα, τις λειτουργικές απαιτήσεις του υλικού, τον αναμενόμενο χρηστικό χρόνο του και το κόστος εφαρμογής της μεθόδου [12].

Έτσι, μπορεί να γίνει ομαδοποίηση των επεμβατικών μεθόδων σε τέσσερις κατηγορίες με κριτήριο το είδος επέμβασης στο σύστημα.

- Επέμβαση στο ίδιο το υλικό που εξαρτάται από την αντίσταση του κάθε υλικού στο εκάστοτε διαβρωτικό περιβάλλον.
- Επέμβαση το σύστημα με ενεργή προστασία ή ηλεκτροχημική προστασία.
- Επέμβαση στο διαβρωτικό περιβάλλον του συστήματος με την προσθήκη αναστολέων διάβρωσης.
- Επέμβαση στην επιφάνεια του υλικού που είναι και η συνηθέστερη πράξη. Η επέμβαση στην επιφάνεια του υλικού είναι η γνωστή παθητική προστασία, η οποία γίνεται με την εφαρμογή οργανικών επικαλύψεων(χρωμάτων) και συνδυασμού συστημάτων προστασίας με διάφορους τρόπους(μηχανικός, θερμικός, χημικός, ηλεκτροχημικός, ηλεκτροστατικός), μη αποσκοπώντας μόνο στην προστασία, αλλά και στη διακόσμηση, τη βελτίωση άλλων επιθυμητών ιδιοτήτων ή και την επίτευξη νέων ιδιοτήτων των επιφανειών [12].

Μια άλλη συνήθης κατηγοριοποίηση των επεμβάσεων στο σκυρόδεμα είναι ανάλογα με τον τρόπο που παρέχουν προστασία. Έτσι, όλες οι μέθοδοι μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Ποιότητα σκυροδέματος, η οποία αφορά μόνο το κατασκευαστικό στάδιο.

- Χρήση εναλλακτικού οπλισμού, η οποία περιλαμβάνει υλικά που απομονώνουν ηλεκτρικά το χάλυβα από το σκυρόδεμα και δημιουργούν φράγμα για τα ιόντα χλωρίου και το νερό, αφορώντας το κατασκευαστικό στάδιο.
- Επικαλύψεις σκυροδέματος που απομονώνουν την επιφάνειά του από διαβρωτικούς παράγοντες.
- Ηλεκτροχημικές μέθοδοι που χρησιμοποιούν ρεύμα και ανόδους για να προστατεύσουν το χάλυβα.
- Αναστολείς διάβρωσης που προσφέρουν προστασία αυξάνοντας την κρίσιμη συγκέντρωση των χλωριόντων, απομονώνοντας το σκυρόδεμα ή κάνοντας και τα δύο [14].

Παράλληλα, γίνεται διάκριση σε άμεσες και έμμεσες μεθόδους καταπολέμησης του δυναμικού διάβρωσης.

Στις άμεσες μεθόδους ανήκουν οι:

- Καθοδική προστασία με θυσιαζόμενα ηλεκτρόδια ή με εξωτερική ηλεκτρική τάση
- Καθοδική προστασία από θυσιαζόμενες αταξίες
- Καθοδική προστασία από ακίδες-διόδους

Με το γενικότερο όρο καθοδική προστασία περιγράφεται η τεχνητή μετατροπή σε κάθοδο του μετάλλου του οποίου επιδιώκεται η προστασία και που αρχικά ήταν άνοδος, κάτι που γίνεται δυνατό με αρνητή φόρτιση της εγκατάστασης αυτής [12].

Στις έμμεσες μεθόδους ανήκουν οι:

- Εναζώτηση, φωσφάτωση, ενανθράκωση, χρήση laser και πλάσματος
- Κάλυψη των χαλύβων με  $Fe_3O_4$  και των κραμάτων του αλουμινίου με  $Al_2O_3 \cdot H_2O$
- Ανοδική προστασία
- Επιμεταλλώσεις

Οι έμμεσες μέθοδοι προστασίας περιλαμβάνουν μια σειρά επιφανειακών επεξεργασιών των μετάλλων και των κραμάτων, έτσι ώστε να δημιουργηθούν πάνω τους επιστρώματα φυσικών ή χημικών ιδιοτήτων. Το δυναμικό διάβρωσης των ουσιών αυτών είναι μικρότερο, καθώς οι ουσίες αυτές είναι ευγενέστερες ή παθητικότερες,

κάτι που τις κάνει και λιγότερο ευπαθείς στη διάβρωση. Τα επιστρώματα αυτά μπορεί να είναι μεταλλικά, μη μεταλλικά ή οργανικά και να εφαρμοστούν είτε στην επιφάνεια του χάλυβα ή του σκυροδέματος. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στις επικαλύψεις του οπλισμού, όπου ενέχεται ο κίνδυνος απώλειας της συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος [12].

## 5.1 Προστασία οπλισμένου σκυροδέματος

Σε συνήθεις περιπτώσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος ο περιορισμός της διάβρωσης μπορεί να γίνει σχετικά εύκολα με την κατάλληλη επιλογή του πάχους της επικάλυψης, με την καταλληλότερη διάταξη των οπλισμών καθώς και με τη βελτίωση της ποιότητας του σκυροδέματος.

- Το πάχος και η ποιότητα της χρησιμοποιούμενης επικάλυψης καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την πορεία της διάβρωσης, με μεγάλου πάχους και καλής ποιότητας επικαλύψεις να προσφέρουν μακρόχρονη προστασία. Όσο αφορά στη βελτίωση της ποιότητας, μπορεί να γίνει με μείωση του πορώδους, με αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου και κατ' επέκταση αύξηση του προστατευτικού  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  καθώς και με καλή συμύκνωση και ωρίμανση (μείωση κακοτεχνιών, φωλιών αδρανών, ρωγμών). Συνήθως χρησιμοποιούνται τσιμεντοειδούς βάσης υλικά τροποποιημένα με πολυμερή και πιθανώς ενισχυμένα με προσθήκη ινών, απαραίτητα χαρακτηριστικά των οποίων πρέπει να είναι η μηδενική συρρίκνωση, το λείο φινίρισμα, η στεγανότητα έναντι του νερού, των υδρατμών και χημικών παραγόντων, καθώς και η συνάφεια του μέτρου ελαστικότητας, των μηχανικών αντοχών και του συντελεστή θερμικής διαστολής με αυτά του σκυροδέματος ούτως ώστε να επιτυγχάνεται ομοιογένεια [5].

- Ο περιορισμός του εύρους και του αριθμού της ρηγμάτωσης τόσο του νεπού όσο και του σκληρυμένου σκυροδέματος μπορεί να επιτευχθεί με χρήση συνθετικών ινών, προσεγμένη χάραξη και συντήρηση των αρμών διαστολής και επαρκή αερισμό [5]. Χρήση σιλοξυ-σιλανίων (άχρωμων ουσιών που δεν επηρεάζουν την εξωτερική εμφάνιση) έχει αποδειχθεί μερικώς επαρκής στη σφράγιση διαρροών υγρασίας στις περιπτώσεις που η ενανθράκωση δεν έχει προχωρήσει σε μεγάλο βαθμό [9].

- Η σημαντικότερη παράμετρος σχετικά με την ποιότητα του σκυροδέματος είναι η διαπερατότητα, η μείωση της οποίας επιτυγχάνεται με επιλογή χαμηλού λόγου N/T και υψηλή περιεκτικότητα τσιμέντου προκειμένου να μειωθεί ο όγκος του παγιδευμένου στους πόρους του τσιμέντου νερού. Γι' αυτό το λόγο επιδιώκεται καλή

συμπύκνωση και υγρή συντήρηση με υγρές λινάτσες για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, καθώς και χρήση στεγανών ξυλοτύπων ώστε να περιορίζεται η διαρροή τσιμεντοπολτού. Παράλληλα, πρέπει να γίνεται κατάλληλη διαμόρφωση των δομικών μελών έτσι ώστε να αποφεύγεται η συγκράτηση νερού στην επιφάνειά τους και η κατ' επέκταση διείσδυση του νερού στο εσωτερικό τους.

- Ακόμα μια μέθοδος προστασίας είναι η χρήση *φραγμάτων* κατά της ενανθράκωσης τα οποία είναι βαφές, εμπλουτισμοί ή λεπτά επιχρίσματα που λειτουργούν σαν φράγματα κατά της εισόδου του CO<sub>2</sub>, ενώ είναι συγχρόνως διαπερατά σε υδρατμούς λόγω μικρότερου μεγέθους μορίου [5]. Τα υλικά των χρωματισμών που παρέχουν ουσιαστική μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος δεν είναι οικονομικά, ενώ τα συνηθισμένα επιχρίσματα και ιδιαίτερα αυτά που έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε άσβεστο μειώνουν τον κίνδυνο διάβρωσης δεσμεύοντας το CO<sub>2</sub> και τα χλωριόντα [7]. Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται και οι οργανικές επικαλύψεις(χρώματα, ρητίνες, βερνίκια κτλ. αμιγή ή με πρόσθετα) που πρακτικά αποτελούν την κυριότερη μέθοδο προστασίας από τη διάβρωση με σκοπό την επιβράδυνση και κατά το δυνατόν την αναστολή της, ενώ συνήθως είναι ο συνδυασμός μεθόδων, όπως φωσφάτωση(χημική επεξεργασία) ή ανοδίωση με χρώμα [4,6].

## **5.2 Προστασία των μετάλλων με αντιδιαβρωτικά χρώματα**

Για την προστασία των μετάλλων τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα χρώματα είναι τα αντιδιαβρωτικά, καλύπτοντας το 50% των μεταλλικών επιφανειών και ικανοποιώντας την ανάγκη για επιφάνεια χωρίς πόρους αλλά με καλή εμφάνιση και με προστατευτικές ιδιότητες, ενώ το 40% των μετάλλων καλύπτεται με πορώδη αντιδιαβρωτικά. Ως αντιδιαβρωτικό επίστρωμα μπορεί να οριστεί ένα ρευστό μέσο, ικανό να εφαρμοστεί ή να απλωθεί στη συμπαγή επιφάνεια, το οποίο και στη συνέχεια ξηραίνεται και σκληραίνει δημιουργώντας ένα προσκολλημένο, συνεχές στρώμα υπό μορφή μεμβράνης [12]. Οι απαιτήσεις των ιδιοτήτων αυτών των χρωμάτων είναι ίδιες με αυτές των υπολοίπων επιστρωμάτων, με βασική τους ιδιότητα την αυξημένη ηλεκτρική αντίσταση έτσι ώστε να μειώνεται το ρεύμα διάβρωσης και κατ' επέκταση και το δυναμικό διάβρωσης. Επιπροσθέτως, τα χρώματα αυτά πρέπει να ακολουθούν τις συστολές και τις διαστολές της επιφάνειας πάνω στην οποία εφαρμόζονται.

## *Βαφές*

Η εφαρμογή βαφών αποτελεί την περισσότερο οικονομικά και τεχνικά πλεονεκτική αντιδιαβρωτική προστασία τόσο σε καινούργιες όσο και στην αποκατάσταση ήδη διαβρωμένων κατασκευών, ενώ το σύστημα βαφής που επιλέγεται εξαρτάται από το είδος του διαβρωτικού περιβάλλοντος, τη θέση της επιφάνειας βαφής, το χρόνο ζωής της βαφής και το είδος της κατασκευής. Η απόδοση της αντιδιαβρωτικής προστασίας εξαρτάται από το συνολικό σύστημα: το μεταλλικό υπόστρωμα, την προκατεργασία της επιφάνειας, το σύστημα επικάλυψης, τις μεθόδους εφαρμογής, τη διαδικασία γήρανσης και τη φύση του περιβάλλοντος [11].

Κάθε οργανική βαφή προκειμένου να θεωρείται αποτελεσματική πρέπει να έχει την ικανότητα να αντιμετωπίζει την υψηλή αλκαλικότητα του σκυροδέματος, την ανταλλαγή υγρασίας μεταξύ του περιβάλλοντος και του εσωτερικού του σκυροδέματος, καθώς και τη διάβρωση του σκυροδέματος. Ωστόσο, απαραίτητη είναι και η συγκράτηση του νερού έξω από την κατασκευή, ενώ συγχρόνως είναι επιθυμητός ο υψηλός ρυθμός μεταφοράς των υδρατμών καθώς και η ανθεκτικότητα έναντι της διείσδυσης CO<sub>2</sub> και SO<sub>2</sub>. Επιπρόσθετες απαιτήσεις είναι η καλή πρόσφυση της βαφής στο υπόστρωμα σκυροδέματος, η υψηλή αντοχή και η καλύτερη δυνατή σταθερότητα στις αναμενόμενες συνθήκες (περιβαλλοντικές, χημικής, θερμικής και μηχανικής αντίστασης, αντίσταση στην ώσμωση, την ιοντική μεταφορά κ), καθώς και η ελαχιστοποίηση του συνολικού απαιτούμενου κόστους (κόστος εργασίας κατά την προκατεργασία επιφάνειας και βαφής και κόστος πρώτων υλών) [1,11].

Τα αντιδιαβρωτικά χρώματα έχουν αυξημένη ηλεκτρική αντίσταση καθώς είναι μονωτές του ηλεκτρικού ρεύματος. Έτσι, η εφαρμογή τους στην επιφάνεια της κατασκευής πέρα από την προστασία από την άμεση επαφή με το περιβάλλον που της παρέχει, τη μονώνει ηλεκτρικά ή θερμικά και προκαλεί μείωση της έντασης του δυναμικού διάβρωσης. Βασικός παράγοντας στη λειτουργία τέτοιων ουσιών είναι ο βαθμός πρόσφυσής τους στην επιφάνεια του μετάλλου ή του κράματος. Γι' αυτό το λόγο και προηγείται συνήθως προετοιμασία της επιφάνειας του μετάλλου με ψηγματοβολή, προκειμένου να καθαριστεί και να αποκτήσει η επιφάνεια την απαιτούμενη τραχύτητα [11].

Το σύστημα της κάθε βαφής αποτελείται από το αστάρι, από μια ή περισσότερες επιστρώσεις, καθώς και από ένα τελικό φινίρισμα που προστατεύει το αστάρι από τις

καιρικές συνθήκες, λειτουργεί ως ηλεκτρικός μονωτής ως προς το περιβάλλον και δίνει το τελικό αισθητικό αποτέλεσμα μέσω των χρωστικών της και της στιλπνότητας ή μη της επιφάνειάς της [8]. Τα οργανικά επιστρώματα διακρίνονται σε χρώματα, βερνίκια που είναι μίγματα ελαίου που ξηραίνεται με οξείδωση διαλυμένων ρητινών και ενός πτητικού αραιωτικού και λάκες, που ουσιαστικά είναι φυσικές ή συνθετικές ρητίνες σε έναν πτητικό οργανικό διαλύτη [11].

Ιδιαίτερη είναι η χρησιμότητα των ασταριών (*priming systems*), τα οποία ήρθαν να αντικαταστήσουν το μίνιο που λόγω της περιεκτικότητάς του σε μόλυβδο ως 'μέσο θυσιασμού' απαγορεύτηκε ως τοξικό, ενώ επωμίζονται κατά κύριο λόγο την προστασία της μεταλλικής κατασκευής με κάποια στοιχεία της σύνθεσής τους (πχ. ψευδάργυρος) να λειτουργούν ως θυσιαζόμενο υλικό έναντι του διαβρωτικού περιβάλλοντος [8]. Ο βασικός σκοπός του ασταριού είναι η εξασφάλιση της καλής πρόσφυσης με τη μεταλλική επιφάνεια και η παροχή αντιδιαβρωτικής προστασίας σε αυτή, περιλαμβάνοντας έτσι εκτός από το συνδετικό και ένα ενεργό πιγμέντο ως αναστολέα διάβρωσης. Τα πιο κοινά αστάρια είναι το λινέλαιο με μίνιο, η αλκυδική ρητίνη με χρωμικό ή φωσφορικό ψευδάργυρο, η εποξειδική ρητίνη και το χρώμα πλούσιο σε ψευδάργυρο με σκόνη ψευδαργύρου [11].

Συνήθεις είναι οι συνδυασμοί δύο ή περισσότερων τύπων αρχικών επιστρωμάτων για τη δημιουργία ενός συστήματος το οποίο να πληροί όλες τις ιδανικές απαιτήσεις, καθώς κανένας από τους τύπους αυτών δεν κατέχει από μόνος του όλες τις βασικές ιδιότητες που απαιτούνται για την προστασία της διάβρωσης. Χαρακτηριστικό είναι ένα τυπικό σύστημα χρώματος βασισμένο σε λάδια για χάλυβα που εκτίθεται μόνο σε ατμοσφαιρική διάβρωση, το οποίο αποτελείται από ένα πρώτο στρώμα που περιέχει ενεργά χημικά εναντίον της σκουριάς και έναν αριθμό τελικών επιστρωμάτων που δρουν ως μια προχωρημένη γραμμή άμυνας εναντίον του νερού και του οξυγόνου. Ωστόσο, τόσο το αρχικό προστατευτικό επίστρωμα όσο και τα τελικά φθείρονται με τον καιρό και τελικά αποσυντίθενται, οπότε και είναι απαραίτητη η πλήρης απομάκρυνση όλων των χρωμάτων έως το γυμνό μέταλλο και η εφαρμογή ενός νέου προστατευτικού επιστρώματος [11].

Το αστάρι (*primer*) που εφαρμόζεται στο μέταλλο επιλέγεται με βάση το βαθμό επεξεργασίας της προς κάλυψη επιφάνειας και τον τύπο του τελικού επιστρώματος, ενώ πρέπει να πληροί και κάποιες βασικές ιδιότητες, όπως είναι η επιβράδυνση οποιασδήποτε διαβρωτικής αντίδρασης του βασικού μετάλλου, η καλή και συνεχής

πρόσφυση στις μεταλλικές επιφάνειες, η αντοχή στην αποφλοιώση και στην αστοχία λόγω φλукταινών στα ραγίσματα και στις οπές καθώς και καλή συνοχή με τα τελικά επιστρώματα που εφαρμόζονται πάνω σε αυτό. Παράλληλα, πρέπει να έχει καλή αντοχή στην υγρασία και στις καιρικές συνθήκες, καλή χημική αντίσταση, αλλά πρέπει να είναι εύχρηστο, δηλαδή να εφαρμόζεται εύκολα και να στεγνώνει γρήγορα πάνω στις μεταλλικές επιφάνειες [11].

Υπάρχουν τρεις τύποι ασταριών:

- Αστάρι νερού, το οποίο είναι η πρώτη ύλη των ακρυλικών χρωμάτων, χρησιμοποιείται σε εσωτερικούς χώρους και αραιώνεται με νερό.
- Αστάρι διαλυτού, το οποίο είναι καλύτερο από το αστάρι νερού, εφαρμόζεται τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους και αραιώνεται με white spirit.
- Σιλοξανικό αστάρι, που είναι πιο σύγχρονο από τα προηγούμενα και έχει την ικανότητα να διεισδύει στην τοιχοποιία, μονώνοντάς την, ενώ παράλληλα είναι υδροπερατό, επιτρέποντας στην υγρασία να αποβληθεί από την τοιχοποιία, ιδιότητα που δε χαρακτηρίζει τα προηγούμενα [12].

### **5.3 Σύσταση των οργανικών επιστρωμάτων**

Τα οργανικά επιστρώματα είναι συνήθως μίγματα τεσσάρων συστατικών, του συνδετικού μέσου, του διαλύτη, του πιγμέντου και των προσθέτων.

#### **5.3.1 Συνδετικό μέσο(φορέας)**

Η φύση του συνδετικού μέσου καθορίζει τον τύπο και τις ιδιότητες του χρώματος όπως τη διαλυτότητα, τη διαπερατότητα, τις μηχανικές ιδιότητες, τη ρεολογική συμπεριφορά, αποτελώντας έτσι το πιο σημαντικό από τα συστατικά του χρώματος, εξασφαλίζοντας την προσκόλληση και τη συνοχή του. Σαν συνδετικά χρωμάτων, τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά είναι:

##### **5.3.1.1 Συνθετικά πολυμερή**

Αλκυδικές ρητίνες που είναι στη βάση τους πολυεστέρες μεγάλου μοριακού βάρους και υποδιαιρούνται ανάλογα με τη χρήση τους σε ξηραίνόμενες στον αέρα ή σε φούρνο, σε πλαστικοποιούμενες και σε τροποποιημένες

Εποξειδικές ρητίνες σκέτες ή με πίσσα (cole tar epoxy) που είναι στη βάση τους πολυμερισμένες πολυυδρικές αλκοόλες μακράς αλυσίδας με εποξειδικές



ομάδες στα δύο άκρα. Οι επικαλύψεις που προκύπτουν διακρίνονται για την καλή τους αντοχή στην κρούση και στην τριβή, για την καλή τους πρόσφυση στα μέταλλα και στο σκυρόδεμα, ενώ χρησιμοποιούνται για προστασία από το γλυκό νερό, το αλατόνερο, τα οξέα και κάθε είδους αλκάλια. Ωστόσο, παρόλο που δεν έχουν καλή αντίδραση σε σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες και δεν διαλύονται εύκολα σε χαμηλού κόστους διαλύτες, συχνά χρησιμοποιούνται σε διάφορες συγκολλητικές ουσίες μόνες τους ή σε συνδυασμό με άλλα πολυμερή. Ακρυλικές ρητίνες που έχουν μεγάλες αντοχές σε περιβαλλοντικές συνθήκες, δεν κιτρινίζουν, διατηρούν τη στιλπνότητά τους και χρησιμοποιούνται ευρέως στο χώρο των επιχρισμάτων που σκληραίνουν με την επίδραση υπεριωδών ακτινών. Μειονέκτημά τους είναι το υψηλό κόστος τους και η ανάγκη τους για σκληρούς διαλύτες.

Βινυλικές ρητίνες, οι οποίες παρέχουν μεγάλη αντοχή στην υγρασία, αντισκωριακή προστασία, εύκολη πρόσφυση και εύκολη εφαρμογή. Ιδιαίτερο πλεονέκτημά τους είναι η μη τοξικότητά τους[12].

#### **5.3.1.2** *Παράγωγα*

Αναφέρονται σε φυσικό ή τεχνητό καουτσούκ με τη μορφή αιωρήματος σε νερό (χρώματα υδατικής διασποράς ή πλαστικά χρώματα, σε φυσικά έλαια (π.χ. λινέλαιο) ή σε οργανικά μέσα όπως εστέρες, κετόνες και αρωματικοί υδρογονάνθρακες (μη υδατικά χρώματα) [11].

#### **5.3.1.3** *Άλλα συνδετικά μέσα*

Αυτά που χρησιμοποιούνται είναι τα πολυμερή σιλικόνης που έχουν μεγάλη σταθερότητα στη θέρμανση και εξαιρετική αντοχή στα χημικά, καθώς και τα φθοριωμένα πολυμερή που χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές, όπως αυτά που περιέχουν τιτάνιο και διακρίνονται για την πολύ καλή θερμική τους σταθερότητα.

Συνήθως γίνεται ανάμειξη των συνδετικών μέσων έτσι ώστε να επιτευχθούν συγκεκριμένες ιδιότητες στο ξηρό στρώμα χρώματος ή για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί συγκεκριμένη μέθοδος επικάλυψης, κατά την οποία ωστόσο πρέπει να αξιολογείται η συμβατότητα των διαφόρων τύπων συνδετικών μέσων [12].

### 5.3.2 Διαλύτες

Ως διαλύτης ορίζεται κάθε υγρό που επιτυγχάνει διασπορά ενός στερεού ή ημι-στερεού υλικού και χρησιμοποιείται όταν το συνδετικό υλικό είναι στερεά ουσία σε συνηθισμένη θερμοκρασία, οδηγώντας σε δημιουργία ενός ομοιογενούς υγρού διαλύματος με μειωμένο ιξώδες. Ο διαλύτης συνεισφέρει στην ομογενοποίηση όλων των ετερογενών υλικών που συμμετέχουν στην παραγωγή επιχρισμάτων, στη δημιουργία ενιαίου ρευστού σώματος, επιτρέποντας έτσι την εφαρμογή επιχρίσματος προς δημιουργία του τελικού film. Η φύση και το ποσό του διαλυτικού επηρεάζει τη συνολική συγκέντρωση των διαφόρων ουσιών του χρώματος και κατ' επέκταση την ταχύτητα πήξης του, ενώ είναι πιθανή η ανάγκη χρήσης μιας επιπλέον ποσότητας κάποιου συγκεκριμένου διαλύτη προκειμένου να απελευθερωθούν οι μικρές φυσαλίδες αέρα από τα ψεκασμένα στρώματα ή να ενεργοποιηθούν οι παχυντές [12].

Η κατάταξη των διαλυτών γίνεται συμβατικά, μέσω της χημικής τους σύνθεσης [12]. Τυπικά διαλυτικά είναι υδρογονάνθρακες, κετόνες, αλκοόλες, εστέρες κτλ, ενώ για περιβαλλοντικούς λόγους αναπτύσσονται νέα επιστρώματα με λιγότερους οργανικούς διαλύτες, όπως τα υδατικά χρώματα [11].

#### 5.3.2.1 Υδρογονάνθρακες

Το white spirit είναι μίγμα υδρογονανθράκων που συνίσταται κυρίως από παραφινικούς υδρογονάνθρακες, όπως C8, C9, C10, αλλά περιέχει και μικρές ποσότητες ναφθενικών αρωματικών υδρογονανθράκων. Η ποικιλία στη σύστασή του επηρεάζει θετικά τη διαλυτική του δράση, καθώς οι αρωματικοί διαλύτες είναι ισχυρότεροι από τους παραφινικούς.

#### 5.3.2.2 Αλκοόλες

Οι πλέον γνωστές αυτής της κατηγορίας είναι η αιθυλική αλκοόλη, η ισοπροπυλική αλκοόλη, η μεθανόλη και η βουτανόλη.

#### 5.3.2.3 Εστέρες

Συνήθως συναντώνται ο βουτυλεστέρας και ο ισοβουτυλεστέρας.

#### 5.3.2.4 Κετόνες

Η ακετόνη είναι ένα πολύ πτητικό και εύφλεκτο υλικό, με χαρακτηριστικά ευχάριστη οσμή και ισχυρή διαλυτική δράση. Χρήση της γίνεται ως μετατροπέας δύο φάσεων, ως διαλύτης πολλών οργανικών φυσικών και

συνθετικών ρητινών, ως συστατικό των *paintre movers*, καθώς και στην παραγωγή των μεθακρυλικών και εποξειδικών ρητινών.

#### **5.3.2.5** *Γλυκολαιθέρες*

Πρόκειται για εξαιρετικής φύσεως διαλύτες και πλαστικοποιητές, που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις συνθετικές ρητίνες των βερνικοχρωμάτων ως οργανικοί διαλύτες, ενώ προέρχονται από τη διαδοχική αντίδραση αλκοολών με αιθυλενοξείδιο ή προπυλενοξείδιο [12].

#### **5.3.3** *Πιγμέντα*

Πρόκειται κατά βάση για ξηρές αδιάλυτες στο χρώμα σκόρες(από φυσικά μεταλλεύματα μέχρι συνθετικές οργανικές ενώσεις) που διασπείρονται σε αυτό με την τεχνική αλέσματος. Το μέγεθός τους κυμαίνεται μεταξύ 0.50-10μm για τα αδιαφανή και 0.01-0.05μm για τα διαφανή πιγμέντα, ενώ η κύρια δράση τους είναι να απορροφούν ή να ανακλούν την υπεριώδη ακτινοβολία και να τη μετατρέπουν σε έναν αβλαβή παράγοντα. Χρήση αυτών γίνεται για λόγους δομικής ενίσχυσης του επιστρώματος, για πρόσδωση γυαλάδας και χρώματος, για προστασία του μετάλλου, για ενίσχυση της διαπερατότητας και για διατήρηση της στιλπνότητας [11]. Αυτά δίνουν το χρώμα, την καλυπτικότητα και τη γεμιστικότητα, δηλαδή την ικανότητα να καλύπτουν κοιλότητες τις επιφάνειας που βάφεται [12]. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιλογή τους είναι η συμβατότητά τους με το συνδετικό υλικό και η μη αλλοίωσή τους εξαιτίας του περιβάλλοντος στο οποίο εφαρμόζονται, καθώς και η μικρή περιεκτικότητά τους σε άλατα στο αστάρι όταν εφαρμόζεται σε χάλυβες, αφού τα υδατοδιαλυτά άλατα ενισχύουν τη διαβρωτική δράση [11].

Κύριες ιδιότητες του εκάστοτε πιγμέντου καθορίζουν την επιλογή του κατάλληλου υλικού μεταξύ των οποίων συγκαταλέγεται το χρώμα του, η αδιαφάνειά του, η διάρκεια και η αντοχή του(στην υπεριώδη ακτινοβολία, το νερό, τη φωτιά), οι μηχανικές του ιδιότητες, η χημική αντοχή και δραστηριότητά του, η έκχυσή του, οι ρεολογικές του ιδιότητες και η θερμική του σταθερότητα. Με βάση αυτές τις ιδιότητες και την προέλευση του κάθε πιγμέντου γίνεται διάκρισή τους σε οργανικά/ανόργανα πιγμέντα και σε φυσικά/συνθετικά, ενώ ανάλογα με το είδος χρήσης τους διακρίνονται σε αντιδιαβρωτικά, βελτιωτικά, επιβραδυντές και χρωστικές ουσίες [11].

### **5.3.3.1** *Οργανικά/ανόργανα*

Τα οργανικά πιγμέντα είναι συνήθως πολύπλοκα οργανικά μόρια, κάποια από τα οποία είναι μερικώς διαλυτά σε συγκεκριμένες ρητίνες και διαλύτες, ενώ το βασικό τους χαρακτηριστικό είναι η ποικιλία χρωμάτων που μπορούν να δώσουν αλλά και η ευαισθησία τους. Από την άλλη μεριά, τα ανόργανα αποτελούνται από ξεχωριστά, συνήθως κρυσταλλικά σωματίδια που βρίσκονται σε διασπορά μέσα στο χρώμα και με τη βοήθεια προσθέτων βελτιώνεται η συμβατότητά τους με τα διάφορα είδη ρητινών. Τα δύο πιο συνηθισμένα ανόργανα πιγμέντα είναι το διοξείδιο του τιτανίου (το πιο σύνηθες λευκό πιγμέντο άριστης καλυπτικότητας και σταθερότητας σε υπεριώδη ακτινοβολία) και το οξείδιο του σιδήρου (το πιο σύνηθες κόκκινο πιγμέντο που χρησιμοποιείται στα ανώτερα και κατώτερα επιστρώματα) [11].

### **5.3.3.2** *Φυσικά/συνθετικά*

Τα φυσικά πιγμέντα παράγονται από ιζημογενή πετρώματα που υφίστανται κατάλληλη προεργασία και η κύρια οικογένεια φυσικών πιγμένων είναι τα οξείδια του σιδήρου (ώχρα, όμβρα, σιέννα και κόκκινα, κίτρινα και μαύρα οξείδια του σιδήρου). Συχνά παράγονται συνθετικά ισοδύναμα πιγμέντα, που φαινομενικά μοιάζουν ίδια με τα φυσικά, αλλά συχνά διαφέρουν ως προς τις ιδιότητές τους [11].

### **5.3.3.3** *Αντιδιαβρωτικά/βελτιωτικά/επιβραδυντές/χρωστικές ουσίες*

Το κύριο συστατικό ενός αντιδιαβρωτικού χρώματος είναι ένας αριθμός ουσιών που ελαττώνουν τυχόν πορώδες του φορέα επιτείνοντας τη μόνωσή του, υδρόφοβες ουσίες όπως οι σιλικόνες, μοριακές κόλλες που ελαττώνουν το δυναμικό διάβρωσης, ουσίες που αυξάνουν την ηλεκτρική αντίσταση του φορέα, σκόνες που προστατεύουν καθοδικά το μέταλλο ή ουσίες που δρουν με θυσιαζόμενες αταξίες. Στα βελτιωτικά ανήκουν ουσίες που βελτιώνουν αισθητικά τα επιστρώματα, όπως την ανακλαστικότητα, τη μεταλλική λάμψη, τη θολερότητα κα. Οι επιβραδυντές δρουν ανασταλτικά ως προς τη διάβρωση κυρίως σιδηρούχων υποστρωμάτων, ενώ οι χρωστικές ουσίες προσδίδουν χρώμα στο επίστρωμα [11].

#### **5.3.4 Πρόσθετα**

Πέρα από το πιγμέντο που προστίθεται σε διασπορά σε ένα συνδετικό μέσο συνήθως προστίθενται σε αυτό μικρές ποσότητες βοηθητικών ουσιών, τα πρόσθετα, τα οποία είναι χημικοτεχνικά σκευάσματα που βελτιώνουν ιδιότητες ή αποτρέπουν παρενέργειες, χωρίς ωστόσο να λαμβάνει χώρα καμία χημική αντίδραση [12]. Στο σύνολό τους διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες.

##### **5.3.4.1 Ξηραντικά πρόσθετα**

Πρόκειται για οργανικά άλατα μετάλλων, όπως το κοβάλτιο, το μαγγάνιο και ο μόλυβδος που χρησιμοποιούνται σε όλα τα ξηραίνόμενα στον αέρα και σε πολλά ξηραίνόμενα σε φούρνο πρόσθετα [11].

##### **5.3.4.2 Στεγνωτικά πρόσθετα**

Ενεργούν καταλυτικά ως μεταφορείς οξυγόνου, ελαττώνοντας το χρόνο του στεγνώματος και χρησιμοποιούνται κυρίως στα οξειδωτικά στεγνούμενα λάδια και στις αλκυδικές ρητίνες [12].

##### **5.3.4.3 Αντιοξειδωτικά πρόσθετα**

Γίνεται χρήση τους δια αποφυγή του σχηματισμού πηγματος στα τοιχώματα του δοχείου και για την ελάττωση της οξείδωσης της περισσειας του χρώματος που στραγγίζει από τα αντικείμενα και ανακυκλώνεται [11].

##### **5.3.4.4 Ενεργά προϊόντα(antifouling)**

Είναι υλικά που εμποδίζουν την ανάπτυξη διαφόρων μορφών της θαλάσσιας χλωρίδας και πανίδας στην υποθαλάσσια ή βυθισμένη επιφάνεια ενός σκάφους [12].

##### **5.3.4.5 Βακτηριοκτόνα και μυκητοκτόνα**

Υλικά με τοξικές ιδιότητες που καταπολεμούν τα βακτήρια και τους μύκητες στα κουτιά των πλαστικών χρωμάτων και σε μέρη επεξεργασίας τροφίμων [12].

##### **5.3.4.6 Επιφανειακά ενεργά πρόσθετα**

Διευκολύνουν και διατηρούν τη διασπορά των στερεών κατά την αποθήκευση, καθώς και την ομοιογένεια του μίγματος κατά την ξήρανση του χρώματος [11].

#### **5.3.4.7** *Αντιπετσωτικά*

Σκοπός τους είναι η εμπόδιση της εμφάνισης ανεπιθύμητης μεμβράνης στο δοχείο κατά τον χρόνο αποθήκευσης των χρωμάτων. Αντίστοιχη αποστολή επιτελούν και οι γαλακτοματοποιητές, οι οποίοι προστίθενται στα χρώματα διασποράς βοηθώντας στη διατήρηση του χρώματος κατά το διάστημα αποθήκευσης [12].

#### **5.3.4.8** *Απορροφητές UV*

Αναστέλλουν την οξειδωτική αποσύνθεση του συνδετικού φορέα απορροφώντας τις επιβλαβείς υπεριώδεις ακτίνες 200-400nm [12].

#### **5.3.4.9** *Διαμορφωτές επιστρώματος*

Επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της ροής προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κατάλληλη μέθοδος επίχρισης (π.χ. πινέλο, εκνέφωση) ενώ συγχρόνως μεταβάλλουν το ιξώδες του υγρού, επηρεάζοντας έτσι το πάχος της επικάλυψης [11]. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν και τα αντιφραστικά που χρησιμοποιούνται για να αποφευχθεί η ανεπιθύμητη εμφάνιση φυσαλίδων [12].

#### **5.3.4.10** *Παχυντές και παράγοντες αντικαθίζησης*

Επηρεάζουν τη ροή και ελαττώνουν την προς τα κάτω ροή του χρώματος αμέσως μετά την επικάλυψη αποτρέποντας την ανομοιόμορφη (παχύτερη) κάλυψη του κάτω άκρου του αντικειμένου [11].

### **5.4** **Τύποι οργανικών επιστρώσεων**

Έχουν μελετηθεί αρκετοί τύποι επιστρώσεων αναφορικά με την προστασία που προσφέρουν στο οπλισμένο σκυρόδεμα, ανάμεσα στους οποίους περιλαμβάνονται ακρυλικές διασπορές, εποξειδικές ρητίνες, χλωριομένο καουτσούκ, ελαστομερείς και πολυουθερανικές επιστρώσεις. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι όπως αποδεικνύεται από πειραματικές διατάξεις, οι ελαστομερείς βαφές παρουσιάζουν τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ της διείσδυσης του υγρού νερού και της εξάτμισης των υδρατμών, παρέχοντας παράλληλα σε ικανοποιητικό βαθμό προστασία έναντι της διάβρωσης χλωριόντων. Αντιθέτως, οι βαφές σιλικόνης φαίνονται να είναι οι πιο αδύναμες επιστρώσεις έναντι της διάβρωσης, ενώ και η υδρο-αποθητικότητα τους και η συμπεριφορά τους στη διείσδυση χλωριόντων δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως ικανοποιητική [1].

#### **5.4.1** *Ακρυλικές διασπορές*

Μια από τις πιο βασικές κατηγορίες χρωμάτων που εφαρμόζονται στην επιφάνεια του σκυροδέματος για την προστασία του οπλισμού λόγω της αποτελεσματικότητας και των ιδιοτήτων τους είναι οι ακρυλικές διασπορές. Αυτές, όπως έχει προκύψει από πειραματικές διαδικασίες, δεν επιτρέπουν τη διείσδυση ιόντων χλωρίου στη μάζα του σκυροδέματος, ενώ παράλληλα μειώνουν και το βάθος διείσδυσης της ενανθράκωσης (το βάθος ενανθράκωσης σε μη επικαλυμένα δοκίμια κυμαίνεται μεταξύ 7.6-8.9mm, ενώ σε αντίστοιχα με ακρυλική επικάλυψη δεν υπερβαίνει τα 6mm)[10]. Ωστόσο, δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως υδρο-απωθητικές βαφές καθώς η συμπεριφορά τους έναντι της διείσδυσης CO<sub>2</sub> και νερού δεν κρίνεται ικανοποιητική σε σύγκριση με άλλες βαφές [1].

#### **5.4.2** *Χρώματα χλωριομένου καουτσούκ*

Ευρεία εφαρμογή ως βιομηχανικά χρώματα για χημικές μονάδες, διυλιστήρια, δεξαμενές και γέφυρες βρίσκουν χρώματα με βάση το χλωριομένο καουτσούκ, τα οποία όπως και τα εποξειδικά χρησιμοποιούνται και σε θεμέλια και προβλήτες με σκοπό την αποφυγή της υποβάθμισης του σκυροδέματος λόγω δράσης θεικών αλάτων. Σχετικές έρευνες έχουν δείξει ενθαρρυντικά αποτελέσματα όσον αφορά τη συμπεριφορά των επικαλύψεων αυτών ως προστατευτικές επικαλύψεις, ως μονωτικά υλικά και ως υδρατμοπερατές επιφάνειες. Γι' αυτό και χρησιμοποιούνται συχνά για την προστασία των επιφανειών από τη διάβρωση, ενώ παράλληλα παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε νερό και χημικά [10]. Όπως προκύπτει από πειραματικές διατάξεις, τα εν λόγω χρώματα συγκρινόμενα με τα χρώματα ακρυλικής διασποράς και νανοτεχνολογίας σε ειδικές εφαρμογές προσφέρουν τη μεγαλύτερη δυνατή προστασία έναντι της διάβρωσης [1,10].

#### **5.4.3** *Χρώματα νανοτεχνολογίας*

Τα χρώματα νανοτεχνολογίας αποτελούν νέα συστήματα επικαλύψεων τα οποία έχουν ήδη αρχίσει να χρησιμοποιούνται εκτενώς, εξαιτίας των ιδιαίτερων ιδιοτήτων τους που περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων προστατευτική επίδραση σε επιθετικά περιβάλλοντα, αντιμικροβιακές ιδιότητες, ανακλαστική ικανότητα στο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και αντοχή σε συχνό πλύσιμο [10]. Τα χρώματα νανοτεχνολογίας χρησιμοποιούνται ως οι πλέον αποτελεσματικές επικαλύψεις για συμβατικές εφαρμογές (εσωτερική και εξωτερική επικάλυψη τοιχοποιίας σε κατοικίες) καθώς

επιδεικνύουν τη βέλτιστη συμπεριφορά όσον αφορά την υδατοπερατότητα και την υδρατμοπερατότητα, περιορίζοντας την πιθανότητα αποκόλλησης της επικάλυψης από το υπόστρωμα. Οι αυτοκαθαριζόμενες ιδιότητες που παρουσιάζουν τα συγκεκριμένα χρώματα νανοτεχνολογίας τα φέρουν σε πλεονεκτικότερη θέση έναντι όλων των υπολοίπων χρωμάτων, μεγιστοποιώντας τη χρήση τους σε προσόψεις κατασκευών ιδιαίτερα σε παραθαλάσσιες περιοχές [10].

Οι παραπάνω αποτελούν τις πιο διαδεδομένες μεθόδους προστασίας από τη διάβρωση σε κατασκευές του εσωτερικού, ενώ στο εξωτερικό έχουν εφαρμοστεί και άλλες μεγαλύτερου κόστους λύσεις, όπως είναι η χρήση ανοξειδωτων ή γαλβανισμένων ή μη μεταλλικών ράβδων και ράβδων με εποξειδική ρητίνη, η καθοδική προστασία των οπλισμών, η επικάλυψη των επιφανειών με διαπερατές μεμβράνες ή στρώσεις αδιαπέραστου σκυροδέματος ειδικής σύνθεσης και η χρήση χημικών προσθέτων γνωστών ως “αναστολείς διάβρωσης” [7]. Επαλοιφόμενα κονιάματα ενός ή δύο συστατικών που περιέχουν αναστολείς διάβρωσης μπορούν να προστατεύσουν τον οπλισμό, από τα οποία απαιτούνται δύο στρώσεις συνολικού πάχους επικάλυψης 1-2mm. Τα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται από ικανοποιητική πρόσφυση στους οπλισμούς, στο μπετόν και στα κάθε είδους επισκευαστικά κονιάματα [5].

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες οφείλουν την παθητικοποίηση της επιφάνειάς τους λόγω του σχηματιζόμενου λεπτού στρώματος οξειδίου του χρωμίου ή του νικελίου, τα οποία εμποδίζουν την περαιτέρω διάβρωση. Περαιτέρω αύξηση της ανθεκτικότητας πραγματοποιείται με την προσθήκη μολυβδενίου καθώς και με τη μείωση του πλήθους των φάσεων στη μάζα του υλικού(περιορισμός της δημιουργίας ημιστοιχείων δυναμικού διάβρωσης) [5]. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες διακρίνονται σε ωστενιτικούς, φερριτικούς, μαρτενσιτικούς και duplex που αποτελούνται από συνδυασμό ωστενιτικών και φερριτικών με πλέον διαδεδομένους τους χρωμονικελιούχους ωστενιτικούς [5].

## **5.5 Ιδιότητες αντιδιαβρωτικών χρωμάτων**

Τα αντιδιαβρωτικά χρώματα που χρησιμοποιούνται για την προστασία του χάλυβα από τη θαλάσσια διάβρωση πρέπει να έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τις συνηθισμένες επικαλύψεις ως προς τη συνάφεια, τη συνεκτικότητα, την αντίσταση σε χημικά περιβάλλοντα, σε καιρικές συνθήκες, στην υγρασία και στο νερό. Συγχρόνως, τα χρώματα αυτά διατηρούν τις ιδιότητες και των απλών ουσιών, όπως ορισμένο πάχος,



ορισμένη συνάφεια, σκληρότητα και ορισμένο πορώδες [12]. Συγκεκριμένα, οι ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τα αντιδιαβρωτικά χρώματα είναι:

*Πάχος:* η χρονική αντοχή ενός μετάλλου ή κράματος είναι ανάλογη του πάχους του αντιδιαβρωτικού που το προστατεύει, καθώς μεγάλο πάχος καταναλώνεται σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ενώ συγχρόνως και τα διαβρωτικά χλωριόντα έχουν να διατρέξουν μεγαλύτερη απόσταση. Αρνητικό στοιχείο του μεγάλου πάχους επικάλυψης είναι η αντιοικονομική του διάσταση.

*Πορώδες:* χαμηλό πορώδες του χρώματος δρα ανασταλτικά στην άμεση επαφή μεταξύ διαβρωτικού περιβάλλοντος και προστατευόμενου μετάλλου, περιορίζοντας τη διάβρωση. Ωστόσο, σε επιστρώματα με σκόνη μετάλλων το πορώδες πρέπει να είναι αρκετό ώστε να υπάρχει ηλεκτρική επαφή μεταξύ της σκόνης και του μετάλλου που προστατεύεται.

*Συνάφεια-πρόσφυση:* η αντοχή του χρώματος σε αποφλοίωση καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την όσο το δυνατόν ισχυρότερη πρόσφυση του αντιδιαβρωτικού χρώματος στο προστατευόμενο μέταλλο.

*Σκληρότητα:* η έλλειψη ικανοποιητικής σκληρότητας είναι δυνατόν να οδηγήσει σε τραυματισμό και αποφλοίωση του αντιδιαβρωτικού χρώματος.

*Συνοχή:* μετριέται με έλεγχο της ρηγμάτωσης που προκαλείται στην επίστρωση με την εφαρμογή ελκτικής δύναμης.

*Αντίσταση στο νερό:* η συνεχής έκθεση του συστήματος μετάλλου-επικάλυψης στο θαλασσινό νερό μπορεί να επιφέρει μείωση της συνάφειας ή της αντοχής της επικάλυψης με ρηγμάτωσή της ή σχηματισμό φλυκταίνων.

*Χημική αντίσταση σε αλκαλικά διαλύματα:* η χημική αντοχή μπορεί να τεθεί υπό έλεγχο, καθώς τα καλυπτικά χρώματα συνδυάζονται με τη μέθοδο της καθοδικής προστασίας.

*Χαμηλή απορρόφηση υγρασίας:* αναφέρεται στην ποσότητα του νερού που παραμένει μεταξύ των μορίων της βασικής ρητίνης. Όσο χαμηλότερη είναι η απορρόφηση υγρασίας από την επικάλυψη, τόσο πιο αποτελεσματική θεωρείται η επικάλυψη.

*Ρυθμός μεταφοράς υγρασίας:* είναι ο ρυθμός με τον οποίο το νερό περνάει μέσα από το φιλμ της επικάλυψης και όσο μικρότερος είναι αυτός, τόσο καλύτερη είναι η επικάλυψη.

*Αντίσταση στην ώσμωση:* ως ώσμωση ορίζεται η μεταφορά νερού διαμέσου ημιδιαπερατής μεμβράνης(όπως συμπεριφέρονται οι οργανικές επικαλύψεις) από ένα διάλυμα μικρής σε ένα άλλο μεγαλύτερης συγκέντρωσης, με την αύξηση του φαινομένου αυτού να οδηγεί σε μείωση της διάρκειας ζωής και της αποτελεσματικότητας της επιφάνειας.

*Αντίσταση στην ιοντική μεταφορά:* όταν τα ιόντα περάσουν μέσα από το φιλμ της επίστρωσης πραγματοποιείται διάβρωση του μετάλλου ή του κράματος που αυτή καλείται να προστατεύσει.

*Αντίσταση στην ηλεκτροενδόσμωση:* πρόκειται για το φαινόμενο μεταφοράς νερού διαμέσου μεμβράνης υπό την επίδραση ηλεκτρικού ρεύματος προς την κατεύθυνση του πόλου που έχει το ίδιο φορτίο με τη μεμβράνη, με την πλειονότητα των επικαλύψεων να είναι αρνητικά φορτισμένες και τις μεταλλικές περιοχές γύρω από την ασυνέχεια της επικάλυψης να είναι καθοδικές.

#### *Ποκνότητα του στρώματος*

*Συγκέντρωση όγκου πιγμέντου:* ο λόγος του όγκου του πιγμέντου στη μονάδα όγκου ενός δοσμένου μίγματος πιγμέντου-φορέα, με άμεση την εξάρτηση της συμπεριφοράς ενός αντιδιαβρωτικού από τον παράγοντα αυτόν.

*Εσωτερικές τάσεις:* αυτές συνδυάζονται κυρίως με την πρόσφυση των επικαλύψεων, με αύξηση των τάσεων αυτών να σημαίνει εύθραπτη επικάλυψη.

*Μηχανικές ιδιότητες:* αναφέρεται στις μηχανικές ιδιότητες όχι μόνο της επικάλυψης αλλά ολόκληρου του συστήματος φιλμ-μέταλλου, πραγματοποιώντας μετρήσεις της σκληρότητας και της αντοχής σε κρούση.

*Οπτικές ερμηνείες:* οι οπτικές ιδιότητες της επικάλυψης μετρώνται από το χρώμα και την ανακλαστικότητά της.

*Ρεολογικές ιδιότητες:* αναφέρεται στη μελέτη του ιξώδους κάτω από διάφορες συνθήκες, παίζοντας αποφασιστικό ρόλο στην αποθήκευση, στο σχηματισμό και στην εφαρμογή του στρώματος ενός χρώματος.

*Ιδιότητες πρόσφυσης:* η πρόσφυση μιας επικάλυψης στο υπόστρωμα οφείλεται σε δυνάμεις που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια επικάλυψης-μετάλλου.

*Ιδιότητες γήρανσης:* είναι ουσιαστικά ο υπολογισμός της ανθεκτικότητας μιας επιφάνειας στην επίδραση διαφορετικών περιβαλλόντων, όπως ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασιακές αλλαγές, οξυγόνο, υγρασία κα.

Σύμφωνα με τις παραπάνω ιδιότητες, τα αντιδιαβρωτικά χρώματα προστατεύουν το μέταλλο με τον τρόπο τον οποίο δρουν, δηλαδή μονώνοντάς το από το περιβάλλον ηλεκτρικά αλλά και θερμικά από την υφιστάμενη υγρασία(μη ύπαρξη πόρων), ελαττώνοντας το δυναμικό με δίπολα μόρια ή περιέχοντας μέσα τους υλικά που θυσιάζονται γαλβανοστατικά για να προστατεύσουν το υπόστρωμα. Ο τρόπος δράσης τους μπορεί να αναφέρεται σε μια από τις παραπάνω ενέργειες ή να αφορά συνδυασμό των δράσεων αυτών.

Αναλυτικότερα, τα αντιδιαβρωτικά επικαλυπτικά πρέπει να παρέχουν *μόνωση*, δηλαδή να αποκλείουν τη μεταφορά μάζας με τη μορφή διαβρωτικών ουσιών από το περιβάλλον στο μέταλλο και αντίστροφα και να αποτρέπουν την απορρόφηση νερού με τη χρήση επιφανειακά ενεργών ουσιών, καθώς και να εξασφαλίζουν θερμική μόνωση, έτσι ώστε να διατηρείται σταθερή η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ μετάλλου και περιβάλλοντος. Παράλληλα, ορισμένα χρώματα βοηθούν στην *παθητικοποίηση* που σχηματίζει ο χάλυβας από μόνος του μέσω της επιτάχυνσης και του καθορισμού των συνθηκών σχηματισμού, προκειμένου το στρώμα οξειδίων να έχει καλή πρόσφυση στην επιφάνεια και να είναι συνεκτικό. Ορισμένα χρώματα στοχεύουν στην *ελάττωση του δυναμικού διάβρωσης*, είτε χρησιμοποιώντας τη διπολικότητα των μορίων τους, είτε θυσιάζοντας φυσικές(θηραϊκή γη) ή τεχνικές(SIMAC) αταξίες τους, είτε θυσιάζοντας σκόνες ψευδαργύρου, αλουμινίου ή μαγνησίου που όντας ανοδικότερες του χάλυβα, επιβάλλουν καθοδική προστασία του. Άλλη μια αποτελεσματική μέθοδος προστασίας του μετάλλου είναι η χρήση χρωμάτων που ελαττώνουν την ένταση του ρεύματος διάβρωσης, όπως είναι τα πολυμερή που είναι κατ' εξοχήν ηλεκτρικοί μονωτές. Τα χρώματα αυτά περιέχουν ουσίες σαν φορείς(πολυμερή) ή σαν προσμίξεις(φυλλώδης μίκα) που επιβάλλουν μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση. Γενικότερα, επιδιώκεται η επιλογή ενός χρώματος με μικτή δράση, συνδυάζοντας όσο το δυνατόν περισσότερες ιδιότητες, λαμβάνοντας υπόψη την ένταση του διαβρωτικού περιβάλλοντος, το μηχανισμό διάβρωσης και την αξία της κατασκευής της οποίας επιδιώκεται η προστασία [11].

## 5.6 Επιλογή του αντιδιαβρωτικού επιστρώματος

Η επιλογή του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου αντιδιαβρωτικού χρώματος καθορίζεται από κάποιους παράγοντες και τις γενικότερες απαιτήσεις της κατασκευής, οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι:

*Απαιτήσεις περιβάλλοντος:* Σε όχι ιδιαίτερα επιβαρυμένα περιβάλλοντα γίνονται οι κατάλληλες προσαρμογές ως προς τον τύπο του επιστρώματος, την προετοιμασία της επιφάνειας και τη βαφή, ενώ σε περιβάλλοντα αρκετά επιβαρυμένα κρίνεται αδύνατη η προστασία με κάποιο χρώμα. Σε αυτά τα περιβάλλοντα όπου σημειώνεται ρυθμός διάβρωσης πάνω από 50mpy, χρησιμοποιούνται συνθετικές ρητίνες ως συνδετικό υλικό σε ιδιαίτερα ανθεκτικές καλυπτικές ουσίες.

*Αναμενόμενη διάρκεια ζωής:* Στην περίπτωση που το αντιδιαβρωτικό χρώμα χρησιμοποιείται για την καλύτερη δυνατή προστασία, είναι επιθυμητό να επιλεγεί αυτό με την όσο το δυνατό μεγαλύτερη διάρκεια.

*Κόστος:* Περιλαμβάνει την προετοιμασία της επιφάνειας και τη βαφή της και ελαχιστοποιείται όταν οι δυο αυτές διεργασίες πραγματοποιούνται σε ειδικούς εργοστασιακούς χώρους ή αναλαμβάνονται από ειδικά εξοπλισμένες ομάδες τεχνικών. Σε διαβρωτικά περιβάλλοντα η προετοιμασία της επιφάνειας καλύπτει το 50% του συνολικού κόστους βαφής, ενώ το χρώμα έχει μικρή συμμετοχή στο συνολικό κόστος.

*Καταλληλότητα προετοιμασίας της επιφάνειας και των μέσων εφαρμογής του χρώματος:* Σε ορισμένα περιβάλλοντα δεν είναι δυνατή η χρήση ορισμένων τεχνικών βαφής ή προετοιμασίας της επιφάνειας.

*Ασφάλεια:* Οι απαιτήσεις ασφαλείας περιλαμβάνουν αερισμό του χώρου, απομάκρυνση των διαλυτών από το χώρο βαφής, κατάλληλη και ασφαλή πρόσβαση προς το αντικείμενο βαφής κα. Ιδιαίτερα για την εργασία σε χαλύβδινες κατασκευές όπως ψηλά κτίρια και γέφυρες θεωρείται προτιμότερη η βαφή με επίστρωμα πλούσιο σε ψευδάργυρο έτσι ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος γλιστερότητας.

*Ευκολία συντήρησης και επιδιόρθωσης:* Πολλά επικαλυπτικά που προσφέρουν καλή και μεγάλης διάρκειας προστασία είναι αρκετά δύσκολο να αντικατασταθούν σε περίπτωση φθοράς ή τοπικής αστοχίας. Η πρόσφυση πρόσφατα επιστρωμένων χρωμάτων σε παλιότερα επιστρώματα (π.χ. εποξειδικών, ουρεθάνης) είναι συνήθως μειωμένη με αποτέλεσμα την αποφλοίωση του πρόσφατου επιστρώματος, ενώ

αντίστοιχα αποτελέσματα διαπιστώνονται και με επιστρώματα που έχουν μεγάλο ποσοστό πιγμέντου. Αντίθετα, τα θερμοπλαστικά έχουν την ικανότητα να διαλύονται κατά την επίστρωση του νέου χρώματος σχηματίζοντας ένα επίστρωμα που είναι μίγμα μεταξύ του παλιού και του νέου χρώματος. Γενικά, τα ελαιοχρώματα (αλκύδια, εποξειδικοί εστέρες και τα τροποποιημένα παράγωγα τους) παρουσιάζουν τα καλύτερα αποτελέσματα πάνω σε όχι καλά προετοιμασμένες επιφάνειες αλλά και πάνω σε παλαιά στρώματα χρώματος.

*Αισθητική:* Πολλά από τα αντιδιαβρωτικά χρώματα είναι και αισθητικά ελκυστικά (π.χ. αλειφατική ουρεθάνη). Η αντιδιαβρωτική ικανότητα αυτών των χρωμάτων είναι περίπου η ίδια με αυτήν που έχουν π.χ. ορισμένα εποξικά των οποίων το κόστος είναι περίπου το μισό. Ωστόσο, η μεγάλη διαφορά στο αισθητικό αποτέλεσμα έχει οδηγήσει στην ευρύτετη χρήση τους, π.χ. της ουρεθάνης, (αυτοκίνητα, αεροπλάνα, δεξαμενές νερού και καυσίμων και σε πολλές κατασκευές οι οποίες είναι εκτεθειμένες σε κοινή θέα και η εξωτερική εμφάνιση τους είναι σημαντική) [11].

## **5.7 Μέθοδοι επικάλυψης με αντιδιαβρωτικά χρώματα**

Πριν τη βαφή της μεταλλικής επιφάνειας είναι απαραίτητος ο καθαρισμός και η προετοιμασία της επιφάνειας αυτής, έτσι ώστε να είναι απαλλαγμένη από ακαθαρσίες και να έχει ικανοποιητική τραχύτητα για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή πρόσφυση του χρώματος στη χαλύβδινη επιφάνεια [11]. Συχνά γίνεται αρχικά χρήση στόκου, μιας πάστας υψηλού περιεχομένου σε στερεά που τοποθετούνται με σπάτουλα για ένα πρωτογενές γέμισμα των βαθιών ανωμαλιών. Ακολουθούν οι ενδιάμεσες επικαλύψεις, γνωστές ως πληρωτικά υλικά που καλούνται να εξαλείψουν τις ρηχές ανωμαλίες, και τέλος το φινίρισμα ή τελικό επίστρωμα που εφαρμόζεται για να επανορθώσει τις ατέλειες του ασταριού, προστατεύοντάς το και προσφέροντας το απαιτούμενο χρώμα και βαθμό λάμψης [12]. Η βαφή της επιφάνειας γίνεται με κάποια μέθοδο επικάλυψης, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος της προς βαφή επιφάνειας και από το είδος του επιχρίσματος. Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι επικάλυψης είναι:

*Πινέλο ή ρολό:* Η μέθοδος αυτή συνιστάται για βαφή μικρών επιφανειών, για βαφή μεταλλικών επιφανειών που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή εξαιτίας του γεωμετρικού τους σχήματος και της μεγαλύτερης ευαισθησίας τους στη διάβρωση. Σε μεγάλες και πλατειές επιφάνειες γίνεται κυρίως χρήση αυτόματων μηχανικών ρολών.

*Εκνέφωση(spray)*: Η μέθοδος αυτή βρίσκει κυρίως εφαρμογή σε βιομηχανική κλίμακα, όπου μεγάλες μεταλλικές επιφάνειες καλύπτονται γρήγορα και ομοιόμορφα και μπορεί να είναι ψυχρή ή θερμή εκνέφωση, με τη θερμή να δίνει μεγαλύτερου πάχους επιστρώματα.

*Εμβάπτιση*: Εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου γίνεται σε μεταλλικές επιφάνειες που οι απαιτήσεις καλής εμφάνισης δεν είναι αυστηρές.

*Θέρμανση*: Σε θερμαινόμενους από ρεύμα αέρα φούρνους, γίνεται η ξήρανση των χρωμάτων που έχουν διαλυτικό, ενώ αν το χρώμα είναι από ρητίνες που απαιτούν ψήσιμο σε υψηλές θερμοκρασίες, γίνεται χρήση ειδικών εγκαταστάσεων. Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζονται τεχνικές με ακτινοβολία υπερύθρων όπου γίνεται γρήγορη ανύψωση της θερμοκρασίας επιφανειακά, χωρίς να πειραχτεί το μεταλλικό υπόστρωμα και οι μηχανικές του ιδιότητες [11].

## **5.8 Φθορά επιστρωμάτων**

Το μεγαλύτερο ποσοστό φθοράς των προστατευτικών οργανικών επιστρωμάτων οφείλεται σε ανεπαρκή προκατεργασία και καθαρισμό της επιφάνειας του μεταλλικού υποστρώματα πριν την εφαρμογή της βαφής, ενώ σε μικρότερο ποσοστό συμβάλλει η ακατάλληλη εφαρμογή του επιστρώματος, η φύση του διαβρωτικού περιβάλλοντος, οι δυσκολίες πρόσφυσης και η λανθασμένη εφαρμογή του χρωστικού υλικού και της μεθόδου επικάλυψης [11]. Αναλυτικότερα, η αστοχία των χρωμάτων και των επιστρωμάτων μπορεί να αποδοθεί στις αιτίες:

1. Ανεπαρκής προετοιμασία της επιφάνειας του υποστρώματος. Σε αυτό το ενδεχόμενο συνήθως περιλαμβάνεται καθαρισμός της επιφάνειας για την απομάκρυνση των ακαθαρσιών, χημική προεπεξεργασία αλλά και τράχυνση της επιφάνειας.
2. Ακατάλληλη επιλογή επιστρώματος.

Οι κυριότεροι παράγοντες αστοχίας μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με το στάδιο κατά το οποίο εμφανίζονται αυτές, δηλαδή είτε κατά την εφαρμογή της επίστρωσης, είτε κατά την αντίδραση ή ξήρανση της επίστρωσης, είτε μετά την εφαρμογή της [12].

### 5.8.1 Διάβρωση κατά την εφαρμογή

Η διάβρωση των οργανικών επιστρωμάτων κατά τη διάρκεια της εφαρμογής οφείλεται σε:

*Χονδρούς κόκκους από κατάλοιπα και σκόνη:* η ύπαρξη καταλοίπων οφείλεται σε κακή προετοιμασία της επιφάνειας και καταλήγει στον εγκλωβισμό τους στη βαμμένη επιφάνεια, επηρεάζοντας την εμφάνιση και την απόδοση του συστήματος.

*Δάκρυσμα ή τρέξιμο:* μπορεί να συμβεί σε περιπτώσεις που το χρώμα εφαρμόζεται σε μεγαλύτερη ποσότητα από το επιτρεπτό όριο, οδηγώντας σε εμφάνιση ρωγμών και αποκάλυψη του υποστρώματος.

*Κρατήρες, τρύπες και πόροι:* βασική αίτια μπορεί να είναι εφαρμογή μεγάλου πάχους βαφής, ο υψηλός εξαερισμός ή άνεμος, η μεγάλη πίεση αέρα κατά την εφαρμογή με πιστόλι ή η μεγάλη απόσταση εφαρμογής, όπου και παγιδεύεται αέρας στο χρώμα, ο οποίος διαφεύγει κατά την αντίδραση και προκαλεί τα φαινόμενα.



**Σχήμα 8:** Εμφάνιση κρατήρων στην εφαρμογή του χρώματος  
[<http://www.vechro.gr/el/solutions/problems-and-solutions>]

*Ανεπαρκές ή υπερβολικό πάχος βαφής:* και οι δυο περιπτώσεις εμφανίζονται λόγω λανθασμένης τεχνικής βαφής ή ελέγχου, επηρεάζοντας δυσμενώς την απόδοση του χρώματος.

*Διακοπές:* έτσι χαρακτηρίζονται περιοχές που διέφυγαν της προσοχής του βαφέα ή όπου εφαρμόστηκε ανεπαρκές πάχος επικάλυψης.

*Κυκλικά κενά-κακή διαβροχή:* ορισμένες περιοχές της επιφάνειας δεν διαβρέχονται σωστά από το χρώμα, κάτι που οφείλεται σε μόλυνση της επιφάνειας από λάδια, γράσα, σκόνη, υγρασία, σιλικόνη κτλ.

*Blushing*: οφείλεται σε συμπυκνώματα και υγρασία στην επιφάνεια της βαφής, που πριν από την αντίδραση του χρώματος μορφοποιεί λευκά σημεία στην επιφάνεια.

*Blooming*: εποξειδικά χρώματα και ιδιαίτερα αυτά που αντιδρούν με αμίνες, είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε ελλιπή αντίδραση σε ψυχρές συνθήκες με υψηλή υγρασία, οδηγώντας στην εμφάνιση λευκών λεκέδων στην επιφάνεια του χρώματος [12].

### **5.8.2** *Διάβρωση κατά την ξήρανση ή την αντίδραση της επίστρωσης*

Κατά την εφαρμογή της βαφής η μόνη αστοχία που μπορεί να παρατηρηθεί είναι το *ζάρωμα*, το οποίο αναφέρεται σε αλκυδικά χρώματα ή χρώματα με βάση λαδιού που εφαρμόζονται σε μεγάλο πάχος. Σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχει ο κίνδυνος να αντιδράσει ο εξωτερικό στρώμα πλήρως, ενώ το εσωτερικό στρώμα παραμένει μαλακό [12].

### **5.8.3** *Διάβρωση μετά την εφαρμογή της επίστρωσης*

Μετά την εφαρμογή της επίστρωσης μπορεί να παρατηρηθεί:

*Μετανάστευση και αποχρωματισμός*: η μετανάστευση αναφέρεται στο λέκιασμα του χρώματος τελικής στρώσης από ενδιάμεσο χρώμα που περιέχει συνήθως λιθανθρακόπισσα ή άσφαλτο, η οποία και μεταναστεύει μέσα από το τελικό χρώμα, οδηγώντας σε αλλαγή χρωματισμού. Ο αποχρωματισμός είναι φαινόμενο που οφείλεται στη ρητίνη που έχει χρησιμοποιηθεί στο χρώμα, η οποία μπορεί να κιτρινίζει στον ήλιο ή στο σκοτάδι [12].

*Δημιουργία φυσαλίδων*: οι φυσαλίδες είναι η πρώτη ένδειξη φθοράς του επιστρώματος, εκκινώντας τη διάβρωση, ενώ σχηματίζονται εκεί που έχει χαθεί η πρόσφυση και έχει διεισδύσει νερό [11]. Οι φυσαλίδες μπορεί να είναι ξηρές ή να περιέχουν νερό και μπορεί να δημιουργηθούν μεταξύ του συστήματος βαφής και του υποστρώματος ή μεταξύ των διαφόρων στρώσεων του συστήματος, ή ακόμα και μέσα στην ίδια στρώση από εγκλωβισμό αέρα ή και διαλύτη [12].





**Σχήμα 9:** Δημιουργία φουσαλίδων

[<http://www.webstudio.gr/aquapol/moisture/entopismos-ygrasias.html>]

*Πρώιμη διάβρωση:* πραγματοποιείται όταν ένα μέταλλο επικαλυμμένο με χρώμα που δεν έχει ξηρανθεί σωστά εκτεθεί σε περιβάλλον υψηλής υγρασίας, διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο τη διείσδυση υδρατμών.

*Διάβρωση αμμοβολημένων χαλύβδινων επιφανειών:* εμφανίζεται με τη μορφή κηλίδων σκουριάς καφέ χρώματος μετά την εφαρμογή ενός υδατικού πρώτου στρώματος.

*Ανοδική υπονόμηση:* παρουσιάζεται στο αλουμίνιο, στον κασσίτερο και στους χάλυβες στις περιπτώσεις που εφαρμόζεται εξωτερικό ρεύμα ή σχηματίζεται γαλβανικό στοιχείο, προκαλώντας διαχωρισμό του επιστρώματος από το υπόστρωμα.

*Νηματοειδής διάβρωση:* εμφανίζεται συνήθως σε βερνίκια και λάκες και λιγότερο σε χρώματα και μόνο σε περιβάλλοντα υψηλού ποσοστού υγρασίας. Η διαβρωτική αυτή δράση εκδηλώνεται με τη μορφή νημάτων κόκκινου χρώματος που ακολουθούν τυχαία μονοπάτια κάτω από το επίστρωμα, ενώ η κεφαλή τους είναι μπλε ή πράσινη, ανάλογα με την παρουσία ιόντων σιδήρου [11].



**Σχήμα 10:** Νηματοειδής διάβρωση σε θερμογέφυρα τοιχοποιίας  
[<http://econorm.gr/diaf.php?id=2&lang=1>]

*Απώλεια στιλπνότητας:* συνήθως οφείλεται σε κακή ποιότητα ή κακή επιλογή φορέα χρώματος.

*Ρηγμάτωση:* στις περισσότερες περιπτώσεις οφείλεται σε γήρανση και σε έκθεση σε καιρικές συνθήκες. Διακρίνεται σε τρεις τύπους, είτε ως μικρές ρωγμές στην επιφάνεια που δεν διαπερνούν το συνολικό βάθος της επικάλυψης (checking), είτε ως ρωγμές που εκτείνονται μέχρι το υπόστρωμα (ρηγμάτωση), ή ως σκάσιμο που παίρνει μορφή παρόμοια με αυτήν της ξεραμένης και σκασμένης λάσπης (mud-cracking).

*Αποφλοίωση-ξεφλούδισμα:* συσχετίζεται πάντα με την πρόσφυση και οφείλεται στην έκθεση σε καιρικές συνθήκες, στη γήρανση και σε κιμωλίαση λόγω ανεπαρκούς προεργασίας [12].



**Σχήμα 11:** Αποφλοίωση του χρώματος [<http://www.greekarchitects.gr>]

*Καθοδική αποφλοίωση:* κατά την εφαρμογή καθοδικής προστασίας σε επικαλυμμένο υπόστρωμα παρατηρείται εν γένει απώλεια της συνάφειας στις ατέλειες του επιστρώματος, διάβρωση που μπορεί να προκύψει ακόμα και όταν οι δράσεις είναι απομακρυσμένες μεταξύ τους και δεν συνοδεύονται από εφαρμογή δυναμικού. Τέτοιας μορφής αποφλοίωση μπορεί να συμβεί κάτω από μια φυσαλίδα, όπου τα υδροξείλια που ελευθερώνονται δρουν πολύ καταστρεπτικά για το δεσμό μεταλλικού υποστρώματος και οργανικού επιστρώματος οδηγώντας σε τελική αποφλοίωση της επίστρωσης.

*Απώλεια συνάφειας λόγω ύγρυνσης:* τα πολικά μόρια του νερού αλληλεπιδρώντας με τα πολυμερικά μόρια του επιστρώματος με το υπόστρωμα μειώνουν την ισχύ του δεσμού υποστρώματος/επιστρώματος, οδηγώντας σε αρκετές περιπτώσεις σε ρήξη του δεσμού αυτού [11].

*Έλλειψη πρόσφυσης:* οφείλεται σε μη συμβατότητα του χρώματος με την επιφάνεια βαφής ή σε κακή προετοιμασία της επιφάνειας πριν την πρώτη ή την επόμενη βαφή της [12].

## 5. Μέτρα προστασίας σε υφιστάμενες κατασκευές

Η εκ των υστέρων αντιμετώπιση του προβλήματος διάβρωσης του οπλισμού είναι πολύ πιο δαπανηρή από τη λήψη μέτρων για την πρόληψη του φαινομένου με το κόστος να αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση του χρόνου και του βαθμού της διάβρωσης, ενώ υπάρχει και ο κίνδυνος διατάραξης της ομαλής λειτουργίας που αφορά κτίρια κοινής χρήσης [5]. Η επιλογή της επέμβασης εξαρτάται από το αν οι παράγοντες που ευνοούν τη διάβρωση έχουν περιοριστεί στην επικάλυψη ή έχουν προχωρήσει στη φθορά των οπλισμών. Στο εμπόριο διατίθενται τα τελευταία χρόνια μια πληθώρα υλικών τα οποία θεωρούνται ότι επιβραδύνουν τη δράση της διάβρωσης στις υφιστάμενες κατασκευές ή προκαλούν ακόμα και επαναπαθητικοποίηση του οπλισμού που έχει προσβληθεί από ενανθράκωση ή χλωριόντα. Μερικά από αυτά είτε είναι σε μορφή διαλύματος που απλώνεται στην επιφάνεια με σκοπό το διαποτισμό της μάζας του σκυροδέματος, είτε σαν υλικά επικαλύψεων της επιφάνειάς του ώστε να στεγανοποιηθεί έναντι σε υγρά και αέρια [7].

### 6.1 Προστασία της επικάλυψης

Τα προστατευτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην επικάλυψη των οπλισμών είναι υδατοστεγείς μεμβράνες, προστατευτικά επιστρώματα και εμπλουτισμός του σκυροδέματος με πολυμερή.

- Οι *υδατοστεγείς μεμβράνες* διατίθενται είτε σε έτοιμα βιομηχανοποιημένα φύλλα είτε σε υγρά υλικά, τα οποία είναι πιο ακριβά αλλά και πιο εύχρηστα και πιο ακριβή στην εφαρμογή, ενώ χαρακτηρίζονται και από καλή πρόσφυση με το υπόστρωμα. Αρνητικό χαρακτηριστικό τους είναι η ανάγκη αντικατάστασής τους σε τακτά χρονικά διαστήματα, διαδικασία αρκετά δύσκολη και χρονοβόρα [7].

- Τα *προστατευτικά επιστρώματα* στο σκυρόδεμα γίνονται συνήθως από σκυροδέματα υψηλής ποιότητας και αντοχής, όπως τσιμέντο Portland ή σκυρόδεμα με πρόσθετα πολυμερή, με σκοπό να μειώσουν τη διαπερατότητα του ήδη υπάρχοντος σκυροδέματος [7].

- Ο *εμπλουτισμός* του σκυροδέματος με *πολυμερή* χρησιμοποιείται σε ιδιαίτερες περιπτώσεις διαβρωτικού περιβάλλοντος με πλήρωση των κενών με πολυμερή σε βάθος 35-50mm. Η διαδικασία που ακολουθείται περιλαμβάνει τη προσθήκη του μονομερούς (συνήθως μεθακρυλικού μεθυλίου), την προσθήκη αδιάβροχων

μεμβρανών στην επιφάνεια για αποφυγή της εξάτμισης του μονομερούς και τέλος το θερμικό καταλυτικό πολυμερισμό του μονομερούς στους 74° C για 5 ώρες[7]. Χημικές ενώσεις με τη μορφή *αναστολέων διάβρωσης* εισάγονται και σε ήδη σκληρυμένο σκυρόδεμα αποτελώντας μια προοπτική για αύξηση της ζωής των χαλύβων στο σκυρόδεμα με απλούστερη εφαρμογή και ελάχιστες επεμβατικές απαιτήσεις [9].

## 6.2 Επεμβατικές μέθοδοι

Μια ακόμα κατηγορία επεμβάσεων είναι οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι προστασίας που μπορούν να πραγματοποιηθούν με την εγκατάσταση μιας εξωτερικής ανόδου είτε στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό του σκυροδέματος (εμφύτευση) και το πέρασμα ρεύματος μεταξύ της ανόδου και του χάλυβα. Η διάταξη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τρεις τρόπους:

- Με ηλεκτοώσμωση του ενανθρακωμένου σκυροδέματος παρουσία εξωτερικού δυναμικού έτσι ώστε να προκληθεί *επανακαλοποίηση* του σκυροδέματος [7]. Στη διεργασία αυτή γίνεται σύνδεση με υγρή άνοδο που περιέχει ανθρακικό ασβέστιο, το οποίο και μετατοπίζεται και αποκαθιστά την αλκαλικότητα από την επιφάνεια του χάλυβα προς την εξωτερική επιφάνεια [9].

- Με δυναμικού υψηλότερης έντασης το οποίο εφαρμόζεται στην περίπτωση *αφαίρεσης χλωριόντων(αφαλάτωση)* συνήθως από καταστρώματα γεφυρών αλλά εμπεριέχει κινδύνους για τη μετέπειτα αντοχή ρηγμάτωσης και συνάφειας της κατασκευής. Αντίστοιχη μέθοδος είναι η *αφαίρεση της υγρασίας*, διαδικασία που απαιτεί υψηλό pH σκυροδέματος και μικρή περιεκτικότητα του κονιάματος σε άλατα [7].

- Με *καθοδική προστασία* που πραγματοποιείται με την επιβολή τάσεων είτε από πηγή συνεχούς ρεύματος είτε με τη χρήση ενός μετάλλου ή κράματος υψηλότερου δυναμικού από το προς προστασία μέταλλο. Οι χρησιμοποιούμενοι άνοδοι μπορούν να έχουν μορφή πλέγματος, να είναι άνοδοι μεταλλικού επιστρώματος, να είναι αγωγία χρώματα και κονιάματα ή να είναι μεμονωμένες εσωτερικές άνοδοι. Το μέτρο αυτό προστατεύει άμεσα τους οπλισμούς, γεγονός αρκετά χρήσιμο σε περιπτώσεις που η διάβρωση έχει φτάσει στον οπλισμό. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα μόνα αποτελεσματικά μέτρα είναι η αντικατάσταση της επικάλυψης, ο καθαρισμός των ράβδων και η τοποθέτηση εποξειδικής ρητίνης [7].

## **6. Πειραματικό μέρος**

### **6.1 Σκοπός**

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας και των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής είναι η μελέτη της επίδρασης συγκεκριμένου είδους οργανικής επικάλυψης στη διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος. Η διερεύνηση αυτή εστιάζει κυρίως στη θέση όπου εφαρμόζεται η επικάλυψη, καθώς και στην επίδραση που έχει αυτή η εφαρμογή στη διάβρωση των δοκιμίων. Για αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκε εφαρμογή της βαφής τόσο στην επιφάνεια του χάλυβα όσο και στην επιφάνεια του σκυροδέματος των δοκιμίων, ενώ απαραίτητη κρίθηκε και η κατασκευή δοκιμίων που δεν έφεραν καμία επικάλυψη, ως δοκίμια αναφοράς.

### **7.2 Υλικά**

#### **7.2.1 Προετοιμασία χαλύβων και καλουπιών**

Πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας, απαραίτητη κρίνεται η προετοιμασία και ο καθαρισμός τόσο των χαλύβων που θα εγκιβωτιστούν στο χάλυβα όσο και των καλουπιών μέσα στα οποία θα γίνει η χύτευση του τσιμεντοπολτού.

Όλες οι χαλύβδινες ράβδοι, αν και προήλθαν κατευθείαν από το εργοστάσιο παρασκευής τους και δεν είχαν υποστεί κάποια προηγούμενη επεξεργασία, καθαρίστηκαν πριν τη χρήση τους στην πειραματική διαδικασία, προκειμένου να απομακρυνθούν σκόνες και οξείδια από την επιφάνειά τους. Άλλος ένας σημαντικός λόγος για την πραγματοποίηση της προετοιμασίας τους ήταν η ενεργοποίηση της επιφάνειάς τους, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί καλύτερη πρόσδεση με το τσιμεντοκονίαμα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλάμβανε αρχικά την τοποθέτησή τους σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος με αναστολέα διάβρωσης, όπου και παρέμειναν για 10-15 λεπτά. Στη συνέχεια, ξεπλύθηκαν διαδοχικά με νερό βρύσης και απιονισμένο νερό και εμβαπτίστηκαν σε ακετόνη. Μετά τον καθαρισμό, κάθε ράβδος ζυγίστηκε σε ζυγό ακριβείας, με το βάρος της να προσδιορίζεται με ακρίβεια τετάρτου δεκαδικού ψηφίου.

Όσο αφορά τα καλούπια, καθαρίστηκαν και λειάνθηκαν εσωτερικά ούτως ώστε να απομακρυνθούν τυχόν υπολείμματα από προηγούμενες χρήσεις. Παράλληλα, με τον εσωτερικό καθαρισμό τους αποφεύχθηκαν ανωμαλίες της επιφάνειας και έγινε πιο εύκολη η αποκόλλησή τους μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος.

### 7.2.2 Δοκίμια

Στην παρούσα εργαστηριακή έρευνα μεταπτυχιακού επιπέδου κατασκευάστηκαν αποκλειστικά δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με σκοπό τη σύγκριση της συμπεριφοράς της υπό μελέτη επικάλυψη σε διαφορετικά υποστρώματα. Παρασκευάστηκαν συνολικά 18 δοκίμια, χωρισμένα σε τρεις κατηγορίες. Τα 6 πρώτα ήταν δοκίμια αναφοράς, που αποτελούνταν αποκλειστικά από τον χαλύβδινο οπλισμό και το τσιμεντοκονίαμα. Η δεύτερη κατηγορία δοκιμίων περιελάμβανε 6 δοκίμια, στα οποία έγινε εφαρμογή της επικάλυψη στους χαλύβδινους οπλισμούς, ενώ το τσιμεντοκονίαμα παρέμεινε ανέπαφο, εξωτερικά των επικαλυμμένων οπλισμών. Η τρίτη κατηγορία αποτελούνταν από τα τελευταία 6 κοινά μεταξύ τους δοκίμια, στα οποία ο χάλυβας τοποθετήθηκε ως είχε και η επικάλυψη εφαρμόστηκε στην εξωτερική επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος.

Για όλα τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM II 32.5N με χημική σύσταση που δίνεται στον **Πίνακα 4**, άμμος θραυστή λατομείου κοκκομετρίας 250μm-4mm και νερό Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, το οποίο θεωρείται κατάλληλο για παρασκευή σκυροδέματος σύμφωνα με το ΕΛΟΤ 452. Η κοκκομετρική διαβάθμιση και η χημική σύσταση της άμμου δίνεται στον **Πίνακα 5**. Όσο αφορά τους οπλισμούς που χρησιμοποιήθηκαν, όλοι ήταν τύπου B500C με τη χημική σύσταση που δίνεται στον **Πίνακα 6**, ενώ οι διαστάσεις όλων αυτών ήταν κοινές, με διάμετρο 10mm, ύψος 100mm και σύμφωνα με το ΕΛΟΤ 1421-3.

**Πίνακας 4:** % Ορυκτολογική σύσταση τσιμέντου Portland (OPC) τύπου Π32.5N.

% Συγκέντρωση οξειδίων κ.β. τσιμέντου		Ποσοστιαία συγκέντρωση	
SiO <sub>2</sub>	20.67	C <sub>3</sub> S	56.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.99	C <sub>2</sub> S	16.49
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.18	C <sub>3</sub> A	7.85
CaO	63.60	C <sub>4</sub> AF	9.67
MgO	2.73		
K <sub>2</sub> O	0.37		
Na <sub>2</sub> O	0.29		
SO <sub>3</sub>	2.414		
CaO	2.41		
LOI	2.52		

**Πίνακας 5:** Κοκκομετρική διαβάθμιση και χημική σύσταση άμμου για δοκίμια τσιμεντοκονιάματος

	Βάρος (g)	%
<b>4mm&lt;d</b>	23	5.23
<b>2mm&lt;d&lt;4mm</b>	106.08	24.13
<b>1mm&lt;d&lt;2mm</b>	77.62	17.66
<b>500μm&lt;d&lt;1mm</b>	56.47	12.85
<b>250μm&lt;d&lt;500μm</b>	45.88	10.44
<b>D&lt;2500μm</b>	130.55	29.7

**Πίνακας 6:** % Χημική σύσταση χαλύβων B500C

	C	Mn	S	P	Si	Ni	Cr	Cu	V	Mo
<b>%</b>	0.22	1.24	0.044	0.032	0.28	0.10	0.10	0.52	0.075	0.028

Η εφαρμοζόμενη αναλογία άμμου/τσιμέντου/νερού ήταν 1/3/0.55 και τα δοκίμια κατασκευάστηκαν κυλινδρικά με διαστάσεις διαμέτρου 40mm και μήκους 100mm. Οι χαλύβδινοι οπλισμοί πριν τον εγκιβωτισμό τους καθαρίστηκαν σύμφωνα με το ISO/DIS 8407.3 και ζυγίστηκαν με ακρίβεια 0.1mg. Η τοποθέτησή τους ήταν ομοαξονική, κατά 20mm από τη βάση του δοκιμίου.

Μετά την παρασκευή των δοκιμίων οπλισμένου σκυροδέματος ακολούθησε παραμονή τους στα καλούπια για 24ώρες σε περιβάλλον θερμοκρασίας 20°C και σχετικής υγρασίας RH=100%. Μετά την απομάκρυνσή τους από τα καλούπια, συντηρήθηκαν σε θάλαμο συντήρησης για 24ώρες όπου επικρατούσε θερμοκρασία 25°C και σχετική υγρασία RH=99%. Η ξήρανση και η σταθεροποίηση των δοκιμίων οπλισμένης τσιμεντοκονίας πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον εργαστηρίου για 8ημέρες. Για τη λήψη ηλεκτροχημικών μετρήσεων, η ηλεκτρική συνέχεια των οπλισμών επιτεύχθηκε δια μέσω χάλκινου καλωδίου γύρω από κάθε οπλισμό και στο πάνω μέρος των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ένα μείγμα από δύο διαφορετικές εποξειδικές ρητίνες. Η



συγκεκριμένη ρητίνη με αναλογία 2μερών κόλλας και 3μερών ρητίνης επιτέλεσε και το ρόλο της κάλυψης του εκτεθειμένου μέρους του οπλισμού και την προστασία του από την ατμοσφαιρική διάβρωση. Η διαδικασία εφαρμογής της κόλλας επαναλήφθηκε 2 ή 3 φορές, προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης μόνωση του οπλισμού.

### **7.2.3** *Συστήματα επικάλυψεων*

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετήθηκε μια επικάλυψη εφαρμοσμένη σε διαφορετικά υποστρώματα. Το πρώτο από αυτά ήταν ο χαλύβδινος οπλισμός, ο οποίος καλύφθηκε περιμετρικά στην επιφάνεια που βυθίστηκε στο τσιμεντοκονίαμα, ενώ το δεύτερο ήταν η εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου.

#### **7.2.3.1** *Μέθοδος βαφής*

Η επικάλυψη εφαρμόστηκε στην επιφάνεια τόσο των οπλισμών όσο και των δοκιμίων με πινέλο. Οι οπλισμοί βάφτηκαν σε μια στρώση και αφέθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου για τουλάχιστον 7 ημέρες πριν τη βύθισή τους στο παρασκευαζόμενο τσιμεντοκονίαμα. Μετά την τελική σταθεροποίηση του τσιμεντοκονιάματος πραγματοποιήθηκε η βαφή των δοκιμίων σε δύο στρώσεις, η δεύτερη από τις οποίες εφαρμόστηκε 24ώρες μετά την πρώτη και κάθετα σε αυτήν. Μετά το τέλος και της δεύτερης στρώσης τα δοκίμια αφέθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου για τουλάχιστον 7ημέρες πριν από την έκθεσή τους σε διαβρωτικό περιβάλλον.

#### **7.2.3.2** *Επικάλυψη*

Η επικάλυψη που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα επαλειφόμενο αστάρι οπλισμού (brusable steel protection primer EN 1504-7) παρασκευασμένο από την εταιρία MARMOLINE\_ Προηγμένα οικοδομικά υλικά. Η αναγραφόμενη ονομασία του ήταν MSTEEL 44, 100% ελληνικό προϊόν. Η αραιώση του προϊόντος έγινε με τρεχούμενο νερό, με την αναλογία τσιμεντοχρώματος/νερό να γίνεται σε 2/1, αντί της αναγραφόμενης προτεινόμενης αναλογίας 4/1, παρέμβαση που κρίθηκε απαραίτητη για την περαιτέρω αραιώση του εφαρμοζόμενου ασταριού και την καλύτερη δυνατή εφαρμογή του.

### **7.2.4** *Περιβάλλον έκθεσης των δοκιμίων*

Μετά την εφαρμογή του ασταριού και την ξήρανσή του, όλα τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου, προκειμένου να επιτευχθεί η ταχύτερη διάβρωσή τους

εντός του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Η σκόνη NaCl διαλύθηκε κατά 3.5% κ.β. σε τρεχούμενο νερό της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, ενώ χρειάστηκαν 2lt H<sub>2</sub>O και 70gr NaCl για να παρασκευαστεί το απαραίτητο διαβρωτικό περιβάλλον.

Η πειραματική διαδικασία διήρκησε περίπου 7 μήνες και λαμβάνονταν μετρήσεις δυναμικού και ρεύματος διάβρωσης σε τακτά χρονικά διαστήματα.

## **7. Μέθοδοι εκτίμησης αποτελεσματικότητας οργανικών επικαλύψεων έναντι διάβρωσης και ενανθράκωσης**

Το δεύτερο μέρος της μεταπτυχιακής εργασίας εξετάζει το βαθμό προστασίας του επαλειφόμενου ασταριού έναντι διάβρωσης του οπλισμού από χλωριόντα και ενανθράκωση καθώς τόσο τα χλωριόντα όσο και η ενανθράκωση αποτελούν αιτίες διάβρωσης του οπλισμού, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό. Για την έρευνα αυτή απαραίτητη κρίθηκε η έκθεση των δοκιμίων σε χλωριούχο διάλυμα προκειμένου να πραγματοποιηθεί επιταχυνόμενη διάβρωση μακράς διάρκειας. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της επικάλυψης ήταν ηλεκτροχημικές μετρήσεις αποτίμησης της διάβρωσης μέσω μέτρησης του δυναμικού διάβρωσης και της τεχνικής της γραμμικής πόλωσης καθώς και αποτίμηση της απώλειας μάζας των οπλισμών μετά το πέρας της έκθεσης.

### **7.1 Ηλεκτροχημικές Μετρήσεις Αποτίμησης της Διάβρωσης**

#### **7.1.1 Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης (OCP)**

Η χρονική καταγραφή του δυναμικού διάβρωσης ( $E_{\text{corr}}$ ) είναι από τις πλέον συνηθισμένες τεχνικές για την αποτίμηση της διαβρωτικής κατάστασης του χάλυβα καθώς αποτελεί μια μη καταστροφική μέθοδο που επιτρέπει την παρακολούθηση και τον χαρακτηρισμό της κατάστασης του οπλισμού που βρίσκεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου. Ωστόσο, μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κινητική της διάβρωσης, με αποτέλεσμα να φανερώνει την κατάσταση του οπλισμού σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, αλλά όχι και το ρυθμό με τον οποίο εξελίσσεται το φαινόμενο.

##### **7.1.1.1 Αρχή της μεθόδου**

Ως δυναμικό διάβρωσης ( $E_{\text{corr}}$ ) ή δυναμικό ισορροπίας ή δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος ( $E_{\text{OCP}}$ ) ορίζεται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο χαλύβδινο οπλισμό (ημιστοιχείο) και σε ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς (ημιστοιχείο). Οι προκύπτουσες τιμές εξαρτώνται από το ηλεκτρόδιο αναφοράς που χρησιμοποιείται και από την κατάσταση του εγκιβωτισμένου χάλυβα, ενώ οι μετρήσεις περιγράφονται αναλυτικά στο πρότυπο ASTM C876-09. Οι τιμές του δυναμικού διάβρωσης δεν μετρούνται άμεσα στη διεπιφάνεια μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού, κάτι που οφείλεται στο πάχος

επικάλυψης του σκυροδέματος και του οπλισμού. Σαν αποτέλεσμα, οι τιμές επηρεάζονται από την πτώση του δυναμικού ( $iR_{drop}$ ) που εμφανίζεται εξαιτίας της επικάλυψης του σκυροδέματος και από τα δυναμικά συνένωσης/επαγόμενα ρεύματα (junction potentials) [14].

Όταν επιτευχθεί ηλεκτρολυτική σύνδεση ανάμεσα στον οπλισμό και σε ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς, το ηλεκτρικό κύκλωμα κλείνει, βοηθώντας στη μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης με τη βοήθεια ενός βολτόμετρου μεγάλης εσωτερικής αντίστασης ούτως ώστε το ρεύμα που διέρχεται από αυτό και το γινόμενο  $iR$  να είναι πρακτικά μηδενικά.

#### *7.1.1.2 Ηλεκτρόδιο αναφοράς*

Η μέτρηση του δυναμικού του χάλυβα γίνεται πάντα ως προς κάποιο ηλεκτρόδιο αναφοράς προκειμένου να προσφερθούν πληροφορίες για την πιθανότητα διάβρωσής του. Τα πιο συνήθως χρησιμοποιούμενα ηλεκτρόδια είναι το ηλεκτρόδιο κεκορεσμένου χαλκού/θεικού χαλκού, το ηλεκτρόδιο κεκορεσμένου καλομέλινα και το ηλεκτρόδιο αργύρου/χλωριούχου αργύρου ( $Ag/AgCl$ )KCl, το οποίο και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

#### *7.1.1.3 Κατάσταση οπλισμένου σκυροδέματος συναρτήσει του δυναμικού διάβρωσης*

Η τιμή του δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα συναρτήσει του χρόνου αποτελεί ένδειξη της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα, φανερώνοντας εάν ο χαλύβδινος οπλισμός βρίσκεται σε ενεργή ή παθητική κατάσταση. Οι τιμές ωστόσο του δυναμικού εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι το πάχος της επικάλυψης, η αντίσταση του σκυροδέματος (περιεχόμενη υγρασία) και η διαθεσιμότητα του οξυγόνου.

Η κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο οπλισμός στο σκυρόδεμα γίνεται εμφανής από τις τιμές του μετρούμενου δυναμικού διάβρωσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87, που για την περίπτωση ηλεκτροδίου χλωριούχου αργύρου οι τιμές διαμορφώνονται όπως παρουσιάζονται στον **Πίνακα 7**.

**Πίνακας 7:** Πιθανότητα διάβρωσης ανάλογα με την τιμή του δυναμικού διάβρωσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87 για ηλεκτρόδιο αργύρου/χλωριούχου αργύρου (Ag/AgCl)KCl.

Δυναμικό διάβρωσης (mV) vs SCE	Πιθανότητα διάβρωσης
>-106	Παθητική κατάσταση (90% πιθανότητα, ο οπλισμός δε διαβρώνεται)
-106 έως -256	Ασαφής κατάσταση
<-256	Υψηλή (90% κίνδυνος διάβρωσης)
<-406	Διάβρωση σε εκτεταμένο βαθμό

### 7.1.2 Τεχνική γραμμικής πόλωσης (LPR)

Η τεχνική της γραμμικής πόλωσης περιγράφεται στο πρότυπο ASTM G59-97(2009), παρέχοντας τις απαραίτητες πληροφορίες για τη μέτρηση των βασικών ηλεκτροχημικών παραμέτρων κατά τη διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος. Τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι:

- η ταχύτητα των μετρήσεων, που σε ορισμένες πειραματικές διαδικασίες είναι ιδιαίτερα χρήσιμη.
- ο μη καταστροφικός της χαρακτήρας, αφού η πόλωση που εφαρμόζεται είναι μικρής έντασης, επηρεάζοντας ελάχιστα την επιφάνεια του δοκιμίου.
- μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ακριβείς μετρήσεις πολύ μικρών ποσοστών διάβρωσης που είναι δύσκολο να προσδιοριστούν μέσω συμβατικών τεχνικών απώλειας βάρους ή τεχνικές αναλυτικής χημείας.
- οι μετρήσεις του ποσοστού διάβρωσης που προκύπτουν από την τεχνική αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε κατασκευές που δεν μπορούν να ελεγχθούν οπτικά ή να υποβληθούν σε δοκιμές απώλειας βάρους, όπως είναι οι υπόγειοι αγωγοί και οι δεξαμενές.
- οι ωμικές πτώσεις τάσης είναι συνήθως αμελητέες και με τη βοήθεια της ηλεκτρονικής μπορούν πρακτικά να μηδενιστούν.

#### 7.1.2.1 Αρχή της μεθόδου

Η τεχνική της γραμμικής πόλωσης συνίσταται στη σάρωση του δυναμικού σε μια περιοχή πόλωσης  $\pm 20\text{mV}$  από το δυναμικό διάβρωσης και την καταγραφή του αντίστοιχου ρεύματος. Η πειραματική διάταξη είναι ένα ηλεκτροχημικό κελί που αποτελείται από τρία ηλεκτρόδια, ένα εκ των οποίων είναι οι χαλύβδινοι οπλισμοί που αποτελούν το ηλεκτρόδιο εργασίας, το ηλεκτρόδιο κεκορεσμένου καλομέλανα (SCE) που αντιπροσωπεύει το ηλεκτρόδιο αναφοράς και οι ράβδοι άνθρακα που αποτελούν το βοηθητικό ηλεκτρόδιο. Μέσω της διάταξης αυτής προσδιορίζεται η κινητική των ηλεκτροχημικών δράσεων ενός μετάλλου που διαβρώνεται από τουλάχιστον τρεις παραμέτρους: την πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης ( $i_{\text{corr}}$ ), το δυναμικό διάβρωσης ( $E_{\text{corr}}$ ) και τις σταθερές Tafel ( $\beta_a$  και  $\beta_c$ ), οπότε και από τις καμπύλες πόλωσης (E-i). Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται η αντίσταση πόλωσης  $R_p$  και ο ρυθμός διάβρωσης.

### 7.1.2.2 Κατάσταση του χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος συναρτήσει των μετρήσεων γραμμικής πόλωσης

Οι μετρήσεις του ρυθμού διάβρωσης επηρεάζονται από τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία, οδηγώντας σε συσχέτιση του ρεύματος διάβρωσης και της αντίστασης πόλωσης συναρτήσει της κατάστασης του οπλισμού του σκυροδέματος, οι τιμές των οποίων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 8**.

**Πίνακας 8:** Συσχέτιση των τιμών της πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης χαλύβδινων οπλισμών σε σκυρόδεμα και της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα.

$i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	Κατάσταση οπλισμού
<0.1	>260	Παθητική κατάσταση
0.1-0.5	52-260	Χαμηλός έως μέτριος ρυθμός διάβρωσης
0.5-1	26-52	Μέτριος έως υψηλός βαθμός διάβρωσης
>1	<26	Υψηλός ρυθμός διάβρωσης

## 7.2 Απώλεια μάζας χαλύβδινων οπλισμών

Για τον υπολογισμό της απώλειας μάζας των χαλύβων οπλισμού του σκυροδέματος λαμβάνεται το βάρος του οπλισμού πριν την έκθεσή του στο διαβρωτικό περιβάλλον ως αρχικό βάρος, ενώ ως τελικό βάρος λαμβάνεται το βάρος του οπλισμού μετά την έκθεσή του στο διαβρωτικό διάλυμα. Απαραίτητη είναι η απομάκρυνση υπολειμμάτων

σκουριάς και εποξειδικών ρητινών από τον οπλισμό πριν γίνει καταγραφή του βάρους του. Η διαφορά βάρους προκύπτει από τη διαφορά της αρχικής μείον την τελική τιμή μάζας του οπλισμού, οδηγώντας στην εκτίμηση της διάβρωσης που γίνεται με τον υπολογισμό του ποσοστού της μεταβολής κατά βάρος των οπλισμών καθώς και από τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης [14].

Πριν από κάθε ζύγιση των οπλισμών προηγείται μια διαδικασία καθαρισμού τους με διάλυμα υδροχλωρικού οξέος που περιέχει αναστολέα διάβρωσης έτσι ώστε να απομακρυνθούν τυχόν οξειδία από την επιφάνειά τους. Στη συνέχεια, οι οπλισμοί ξεπλένονται με απιονισμένο νερό και εμβαπτίζονται σε ακετόνη για την απομάκρυνση των λιπαρών ουσιών από την επιφάνειά τους. Της διαδικασίας έπεται η ζύγιση με ακρίβεια δευτέρου δεκαδικού ψηφίου 0.1mg, διαδικασία που ακολουθείται μετά το σπάσιμο των δοκιμίων και απεγκιβωτισμού των χαλύβδινων οπλισμών.

## 8. Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Στην ενότητα που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια τα πειραματικής διαδικασίας με την εφαρμογή των προαναφερθέντων μεθόδων.

### 8.1 Μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης

Κατά τη διάρκεια των 7 μηνών, τα δοκίμια παρέμειναν εμβαπτισμένα στο διαβρωτικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου, προκειμένου να επιτευχθεί επιταχυνόμενη διάβρωσή τους. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων του δυναμικού διάβρωσης για κάθε ομάδα δοκιμίων.

#### 9.1.1 Τυφλά δοκίμια

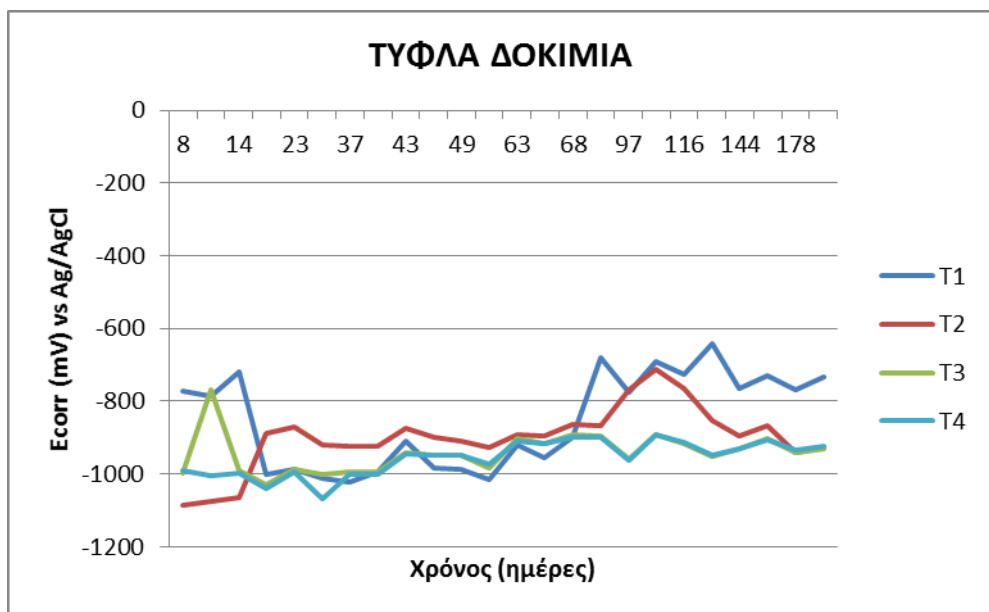
Τα 6 δοκίμια της κατηγορίας αποτελούνταν μόνο από οπλισμένο σκυρόδεμα, χωρίς να φέρουν καμία επικάλυψη, παίζοντας το ρόλο των δοκιμίων αναφοράς. Οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης των τεσσάρων εκ των έξι δοκιμίων και του συνολικού μέσου όρου αυτών διαμορφώθηκαν όπως φαίνεται στον πίνακα και στο διάγραμμα που ακολουθούν.

**Πίνακας 9:** Δυναμικό διάβρωσης (mV) *δοκιμίων αναφοράς* συναρτήσει του χρόνου.

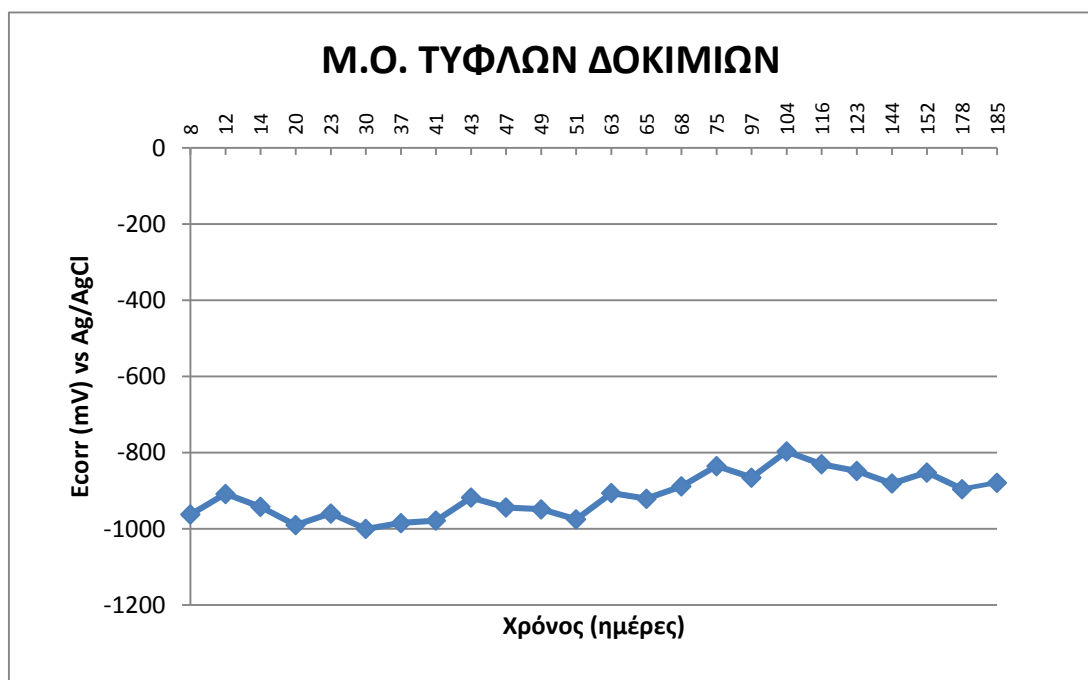
Ημέρες	T1	T2	T3	T4	M.O.T
8	-772	-1087	-999	-992	-962.5
12	-785	-1076	-767	-1006	-908.5
14	-719	-1065	-989	-996	-942.25
20	-1000	-890	-1031	-1040	-990.25
23	-986	-870	-988	-994	-959.5
30	-1013	-920	-1002	-1067	-1000.5
37	-1021	-924	-994	-1001	-985
41	-995	-924	-994	-1001	-978.5
43	-910	-875	-942	-945	-918
47	-982	-900	-947	-947	-944
49	-988	-910	-948	-948	-948.5
51	-1017	-928	-982	-974	-975.25
63	-920	-893	-904	-908	-906.25
65	-954	-895	-918	-916	-920.75
68	-900	-865	-891	-898	-888.5
75	-680	-867	-894	-900	-835.25



97	-774	-767	-959	-961	-865.25
104	-691	-711	-892	-893	-796.75
116	-726	-766	-916	-914	-830.5
123	-640	-854	-951	-948	-848.25
144	-766	-897	-929	-932	-881
152	-729	-869	-904	-906	-852
178	-767	-941	-940	-934	-895.5
185	-734	-926	-931	-924	-878.75



Σχήμα 12: Δυναμικό διάβρωσης (mV) τυφλών δοκιμών συναρτήσει του χρόνου έκθεσης.



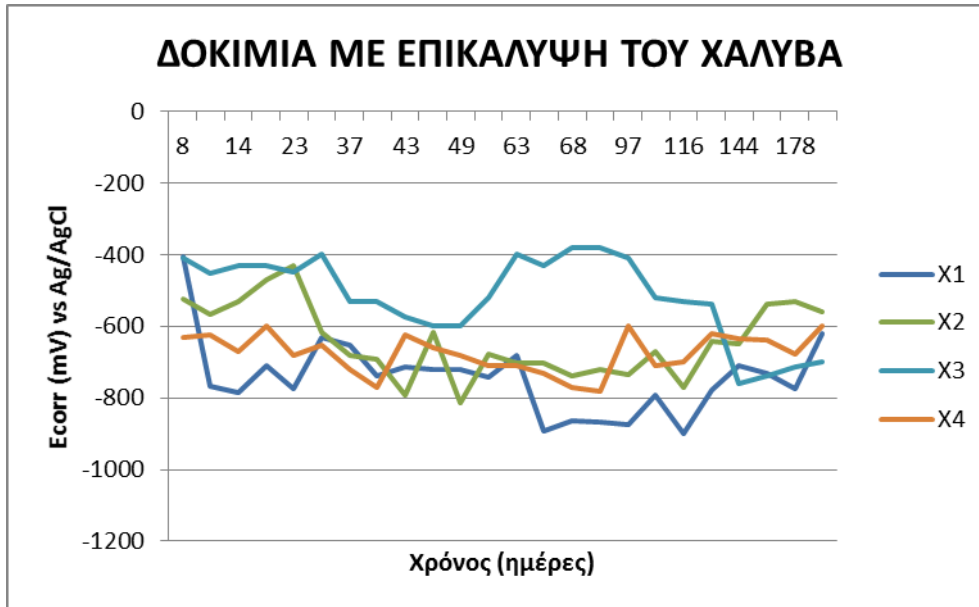
Σχήμα 13: Μέσος όρος δυναμικού διάβρωσης (mV) τυφλών δοκιμών συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο διάλυμα NaCl.

### 9.1.2 Δοκίμια με επικάλυψη του χάλυβα

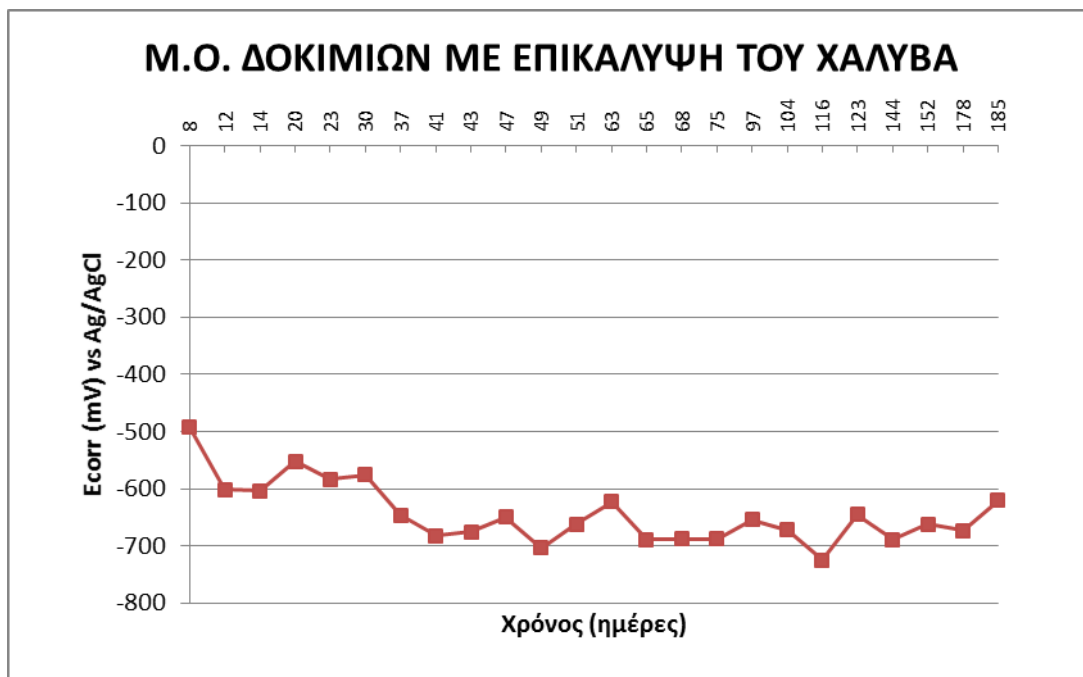
Η δεύτερη ομάδα δοκιμίων αποτελείται από δοκίμια στα οποία έχει γίνει επικάλυψη του χάλυβα με το προαναφερθέν αστάρι οπλισμού και ξήρανσή του πριν τον εγκιβωτισμό του οπλισμού στο σκυρόδεμα. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων το χάλκινο σύρμα μέσω του οποίου πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις έσπασε, με αποτέλεσμα την έλλειψη μετρήσεων μερικών εκ των έξι αρχικών δοκιμίων. Οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης του κάθε δοκιμίου και του συνολικού μέσου όρου αυτών διαμορφώθηκαν όπως φαίνεται στον πίνακα και στο διάγραμμα που ακολουθούν.

**Πίνακας 10:** Δυναμικό διάβρωσης (mV) *δοκιμίων με επικάλυψη του χάλυβα*, συναρτήσει του χρόνου.

Ημέρες	X1	X2	X3	X4	M.O.X
8	-407	-525	-410	-631	-493.25
12	-766	-565	-453	-624	-602
14	-784	-530	-430	-670	-603.5
20	-710	-469	-430	-600	-552.25
23	-774	-429	-450	-681	-583.5
30	-630	-618	-400	-654	-575.5
37	-653	-683	-530	-720	-646.5
41	-737	-693	-530	-770	-682.5
43	-713	-792	-574	-625	-676
47	-720	-617	-600	-660	-649.25
49	-721	-814	-600	-680	-703.75
51	-741	-677	-520	-710	-662
63	-682	-701	-400	-710	-623.25
65	-894	-702	-430	-730	-689
68	-862	-738	-380	-769	-687.25
75	-869	-721	-380	-780	-687.5
97	-875	-734	-409	-600	-654.5
104	-792	-669	-520	-709	-672.5
116	-898	-772	-530	-700	-725
123	-779	-643	-539	-620	-645.25
144	-709	-650	-760	-635	-688.5
152	-732	-538	-740	-640	-662.5
178	-773	-530	-713	-676	-673
185	-621	-559	-700	-600	-620



Σχήμα 14: Δυναμικό διάβρωσης (mV) δοκιμών με επικάλυψη του χάλυβα συναρτήσει του χρόνου έκθεσης.



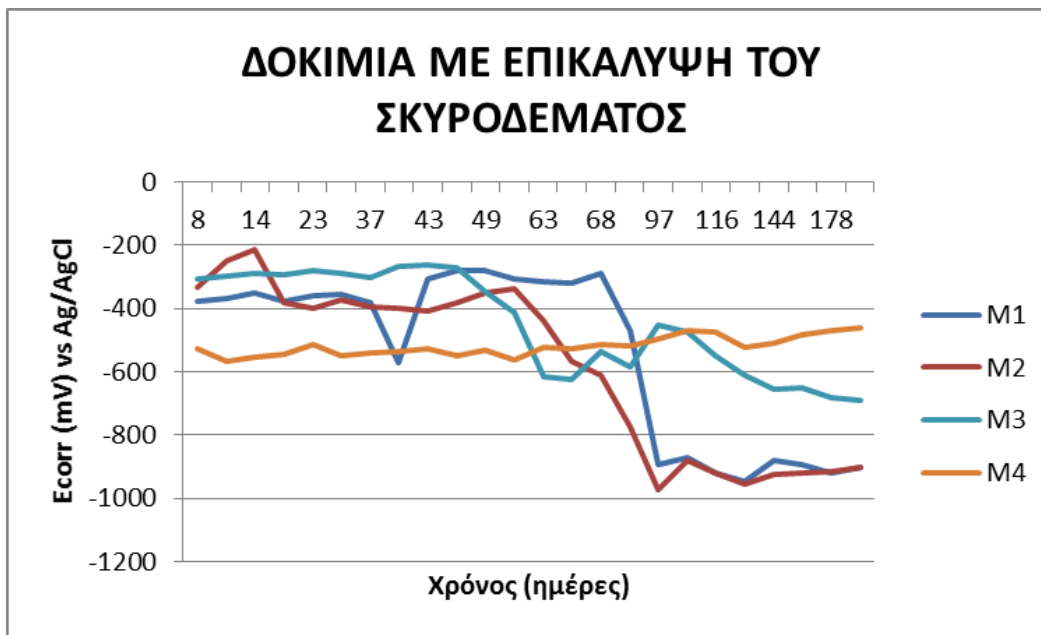
Σχήμα 15: Μέσος όρος δυναμικού διάβρωσης (mV) δοκιμών με επικάλυψη του χάλυβα συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο διάλυμα NaCl.

### 9.1.3 Δοκίμια με επικάλυψη του σκυροδέματος

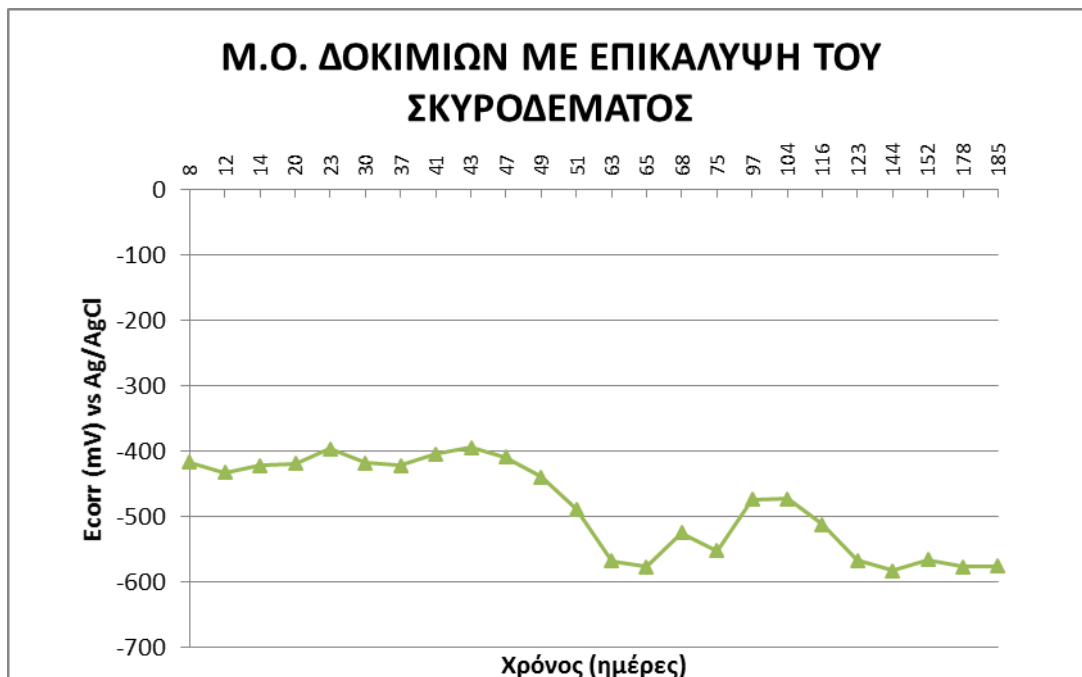
Στην τρίτη ομάδα δοκιμίων περιλαμβάνονται δοκίμια στα οποία ο οπλισμός έχει παραμείνει ανέπαφος, ενώ έχει επικαλυφθεί το σκυρόδεμα με το προαναφερθέν αστάρι οπλισμού και έχει προηγηθεί ξήρανσή του πριν τη βύθιση των δοκιμίων στο διάλυμα χλωριούχου νατρίου. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων το χάλκινο σύρμα μέσω του οποίου πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις έσπασε, με αποτέλεσμα την έλλειψη μετρήσεων ορισμένων δοκιμίων. Οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης του κάθε δοκιμίου και του συνολικού μέσου όρου αυτών διαμορφώθηκαν όπως φαίνεται στον πίνακα και στο διάγραμμα που ακολουθούν.

**Πίνακας 11:** Δυναμικό διάβρωσης (mV) δοκιμίων με επικάλυψη του σκυροδέματος, συναρτήσει του χρόνου.

Ημέρες	M1	M2	M3	M4	M.O.M
8	-376	-335	-308	-525	-416.5
12	-369	-248	-299	-566	-432.5
14	-350	-214	-289	-554	-421.5
20	-376	-382	-295	-543	-419
23	-358	-399	-280	-512	-396
30	-355	-373	-288	-547	-417.5
37	-380	-394	-302	-542	-422
41	-572	-399	-269	-538	-403.5
43	-306	-409	-263	-525	-394
47	-281	-383	-271	-547	-409
49	-279	-351	-347	-532	-439.5
51	-306	-337	-413	-564	-488.5
63	-314	-441	-615	-521	-568
65	-318	-565	-624	-529	-576.5
68	-288	-610	-536	-513	-524.5
75	-469	-775	-585	-519	-552
97	-893	-972	-451	-496	-473.5
104	-872	-880	-476	-470	-473
116	-919	-921	-550	-474	-512
123	-944	-955	-613	-521	-567
144	-879	-924	-657	-508	-582.5
152	-891	-918	-650	-481	-565.5
178	-919	-913	-681	-471	-576
185	-904	-903	-689	-462	-575.5

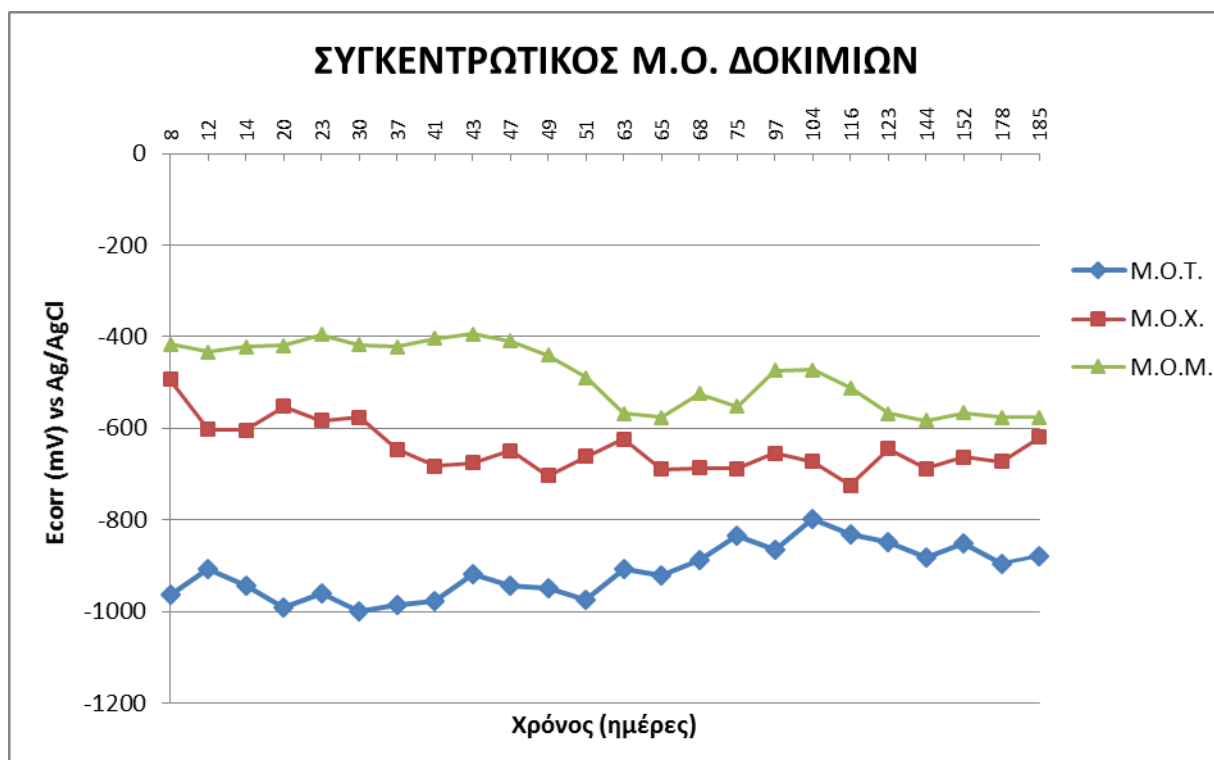


Σχήμα 16: Δυναμικό διάβρωσης (mV) δοκιμών με επικάλυψη του σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης.



Σχήμα 17: Μέσος όρος δυναμικού διάβρωσης (mV) δοκιμών με επικάλυψη του σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο διάλυμα NaCl.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται συγκεντρωτικά ο μέσος όρος των τριών κατηγοριών δοκιμών, στα οποία εφαρμόστηκε το επαλειφόμενο αστάρι σε διαφορετικό υπόστρωμα.



**Σχήμα 18:** Συγκεντρωτικός πίνακας Μ.Ο. δοκιμών αναφοράς (*Μ.Ο.Τ.*), δοκιμών με επικάλυψη του χάλυβα (*Μ.Ο.Χ.*) και δοκιμών με επικάλυψη του σκυροδέματος (*Μ.Ο.Μ.*).

Στον πίνακα αυτό παρατηρείται ότι και οι τρεις κατηγορίες δοκιμών παρουσιάζουν αρκετά υψηλή πιθανότητα διάβρωσης, με τις τιμές του  $E_{corr}$  να βρίσκονται κάτω από την τιμή των  $-426\text{mV}$ . Ωστόσο, η καμπύλη μέσου όρου των δοκιμών αναφοράς αγγίζει πολύ χαμηλότερες τιμές από τις άλλες δύο καμπύλες, φανερώνοντας τη θετική επίδραση του επαλειφόμενου ασταριού στη διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος. Συγκριτικά, πιο αποτελεσματική φαίνεται να είναι η εφαρμογή του στην επιφάνεια του σκυροδέματος, ενώ ακολουθεί η εφαρμογή του ασταριού στην επιφάνεια του χαλύβδινου οπλισμού, χωρίς ωστόσο να σημειώνονται ιδιαίτερα θετικά αποτελέσματα.

## 8.2 Τεχνική γραμμικής πόλωσης Linear Polarization Technique, LPR

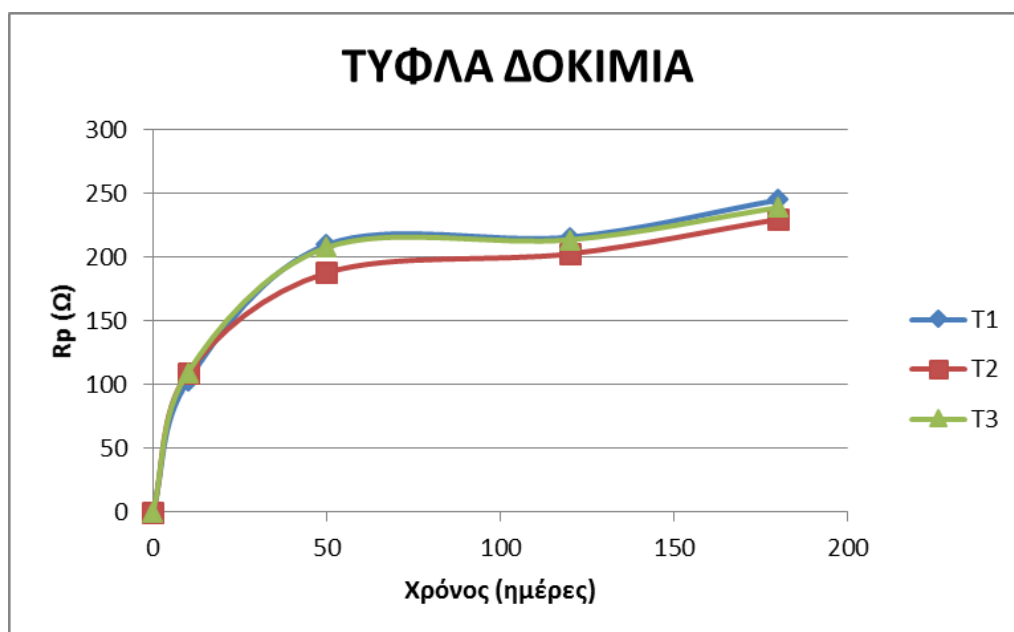
Ο ρυθμός διάβρωσης κάθε κατηγορίας δοκιμίων προσδιορίζεται μέσω των μετρήσεων γραμμικής πόλωσης, οι οποίες καταγράφουν την αντίσταση πόλωσης ( $R_p$ ) συναρτήσει του χρόνου έκθεσης. Προκειμένου να προσδιοριστεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο η αντίσταση της κάθε κατηγορίας στη διάβρωση, χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια από κάθε κατηγορία, τα οποία και υποβλήθηκαν σε τέσσερις διαφορετικές χρονικές στιγμές στη διαδικασία της τεχνικής αυτής.

### 9.2.1 Τυφλά δοκίμια

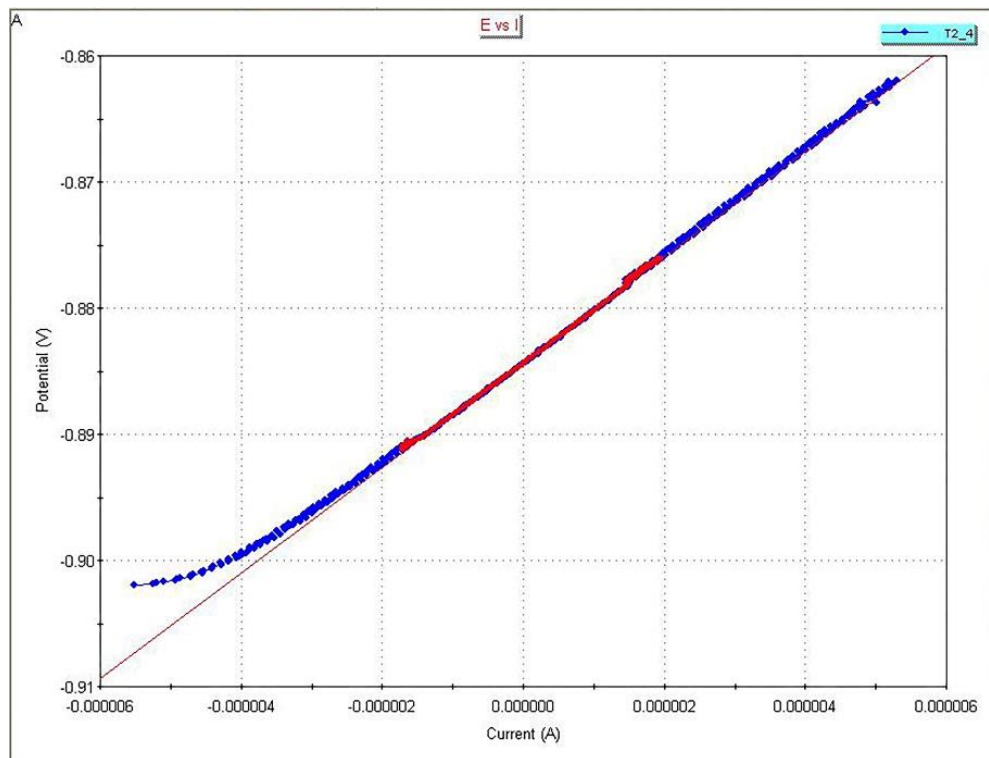
Η αντίσταση πόλωσης των τριών δοκιμίων αναφοράς (*τυφλά δοκίμια*) παρουσιάζονται στον πίνακα και στο διάγραμμα που ακολουθούν, ενώ παρατίθεται και μια ενδεικτική καμπύλη πόλωσης, όπως αποτυπώθηκε σε μια εκ των μετρήσεων γραμμικής πόλωσης.

**Πίνακας 12:** Αντίσταση πόλωσης  $R_p$  ( $\Omega$ ) *τυφλών δοκιμίων*, συναρτήσει του χρόνου έκθεσης.

Ημέρες	T1	T2	T3	ΜΟ
0	0	0	0	0
10	102.743	108.984	109.552	107.093
50	209.732	187.704	207.643	201.693
120	215.698	202.632	213.632	210.654
180	244.881	229.635	238.881	237.799



**Σχήμα 19:** Διαγράμματα αντίστασης πόλωσης ( $R_p$ ) *τυφλών δοκιμίων* συναρτήσει του χρόνου έκθεσης.



Σχήμα 20: Ενδεικτική καμπύλη πόλωσης τυφλού δοκιμίου.

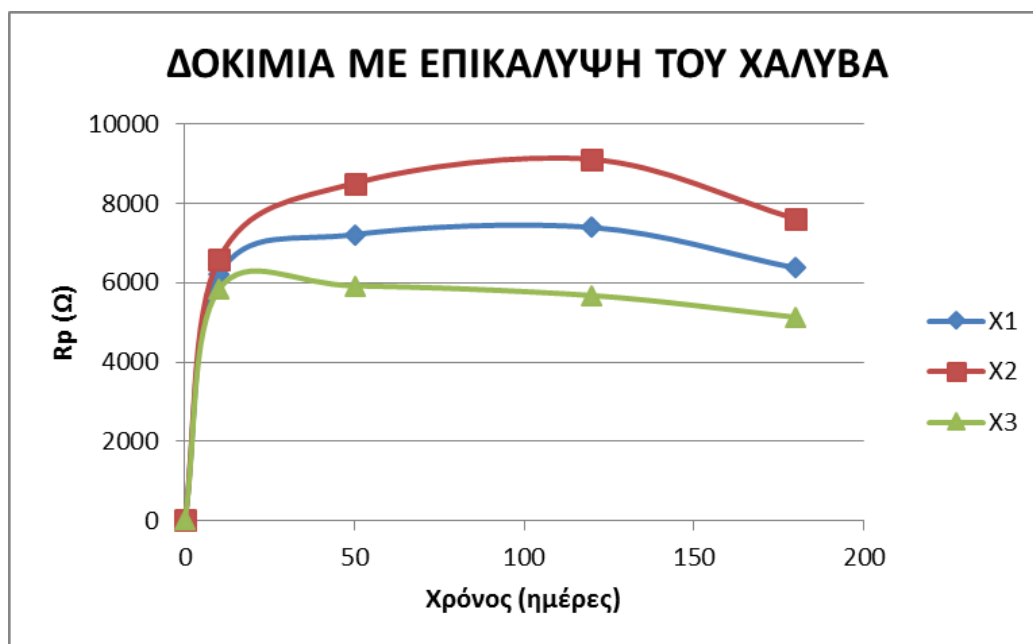


### 9.2.2 Δοκίμια με επικάλυψη του χάλυβα

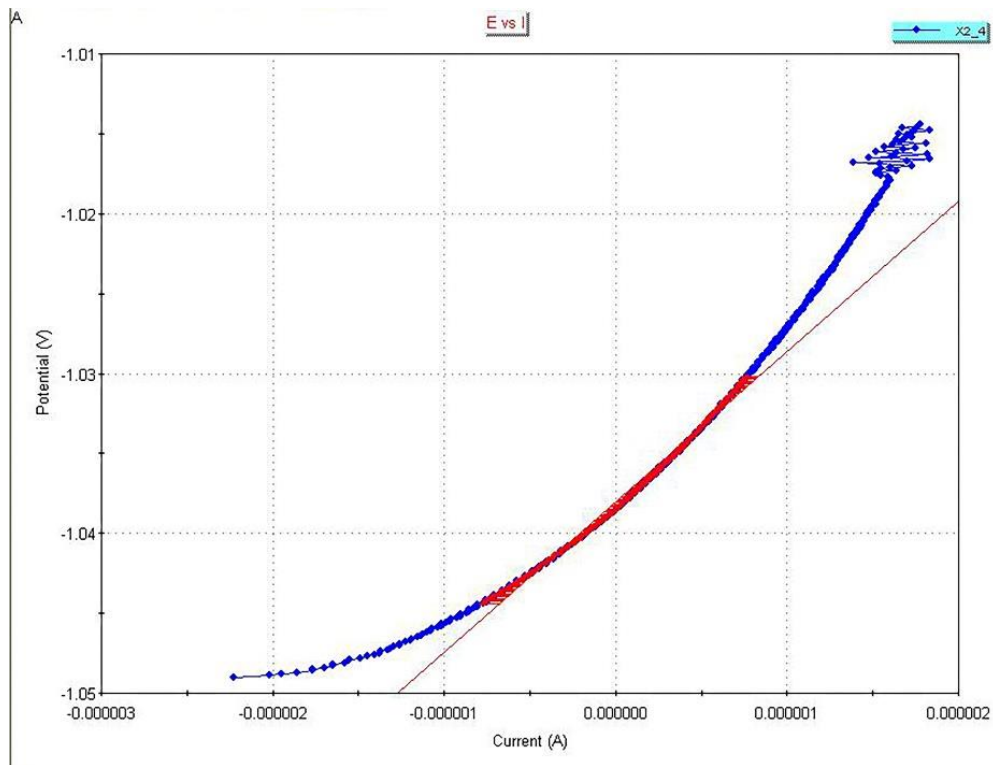
Για την παρατήρηση της δεύτερης κατηγορίας δοκιμίων, αυτών στα οποία είχε γίνει εφαρμογή του ασταριού στην επιφάνεια των χαλύβδινων οπλισμών, χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά από τα αναφοράς δοκίμια. Οι τιμές της αντίστασης πόλωσης που προέκυψαν από τις τέσσερις μετρήσεις γραμμικής πόλωσης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και στο διάγραμμα καμπυλών, ενώ παρατίθεται και μια καμπύλη που πιστοποιεί στην εγκυρότητα των καταγραφόμενων τιμών.

**Πίνακας 13:** Αντίσταση πόλωσης  $R_p$  ( $\Omega$ ) δοκιμίων με επικάλυψη του χάλυβα, συναρτήσει του χρόνου έκθεσης.

Ημέρες	X1	X2	X3	ΜΟ
0	0	0	0	0
10	6210.804	6590.32	5831.288	6210.804
50	7218.362	8512.77	5923.953	7218.362
120	7398.514	9116.732	5680.296	7398.514
180	6372.391	7612.995	5131.786	6372.391



**Σχήμα 21:** Διαγράμματα αντίστασης πόλωσης ( $R_p$ ) δοκιμίων με επικάλυψη του χάλυβα συναρτήσει του χρόνου έκθεσης.



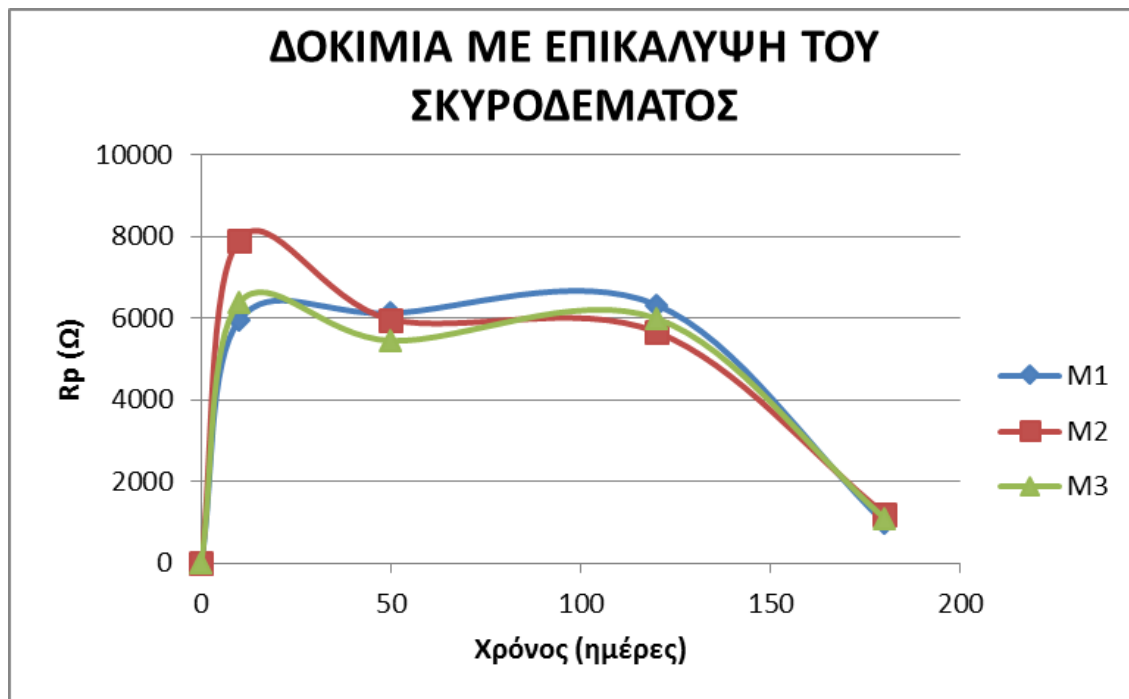
**Σχήμα 22:** Ενδεικτική καμπύλη πόλωσης δοκιμίου με επικάλυψη του χάλυβα.

### 9.2.3 Δοκίμια με επικάλυψη του σκυροδέματος

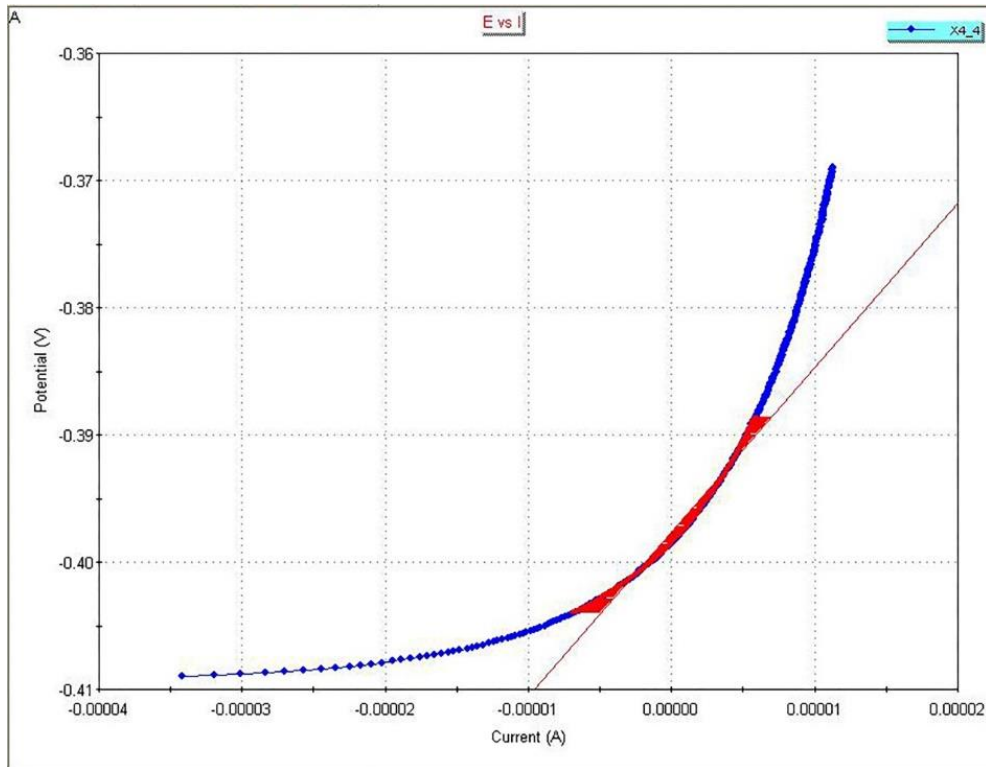
Στην κατηγορία των δοκιμών στα οποία πραγματοποιήθηκε εφαρμογή του επαλειφόμενου ασταριού στην επιφάνεια του σκυροδέματος, οι μετρήσεις γραμμικής πόλωσης διαμορφώνονται όπως φαίνονται στον πίνακα και στο διάγραμμα καμπυλών που ακολουθούν.

**Πίνακας 14:** Αντίσταση πόλωσης  $R_p$  ( $\Omega$ ) δοκιμών με επικάλυψη του σκυροδέματος, συναρτήσει του χρόνου έκθεσης.

Ημέρες	M1	M2	M3	ΜΟ
0	0	0	0	0
10	5944.21	7910.773	6377.812	6744.265
50	6119.02	5967.099	5446.883	5844.334
120	6321.932	5656.934	5989.433	5989.433
180	992.558	1209.302	1100.93	1100.93

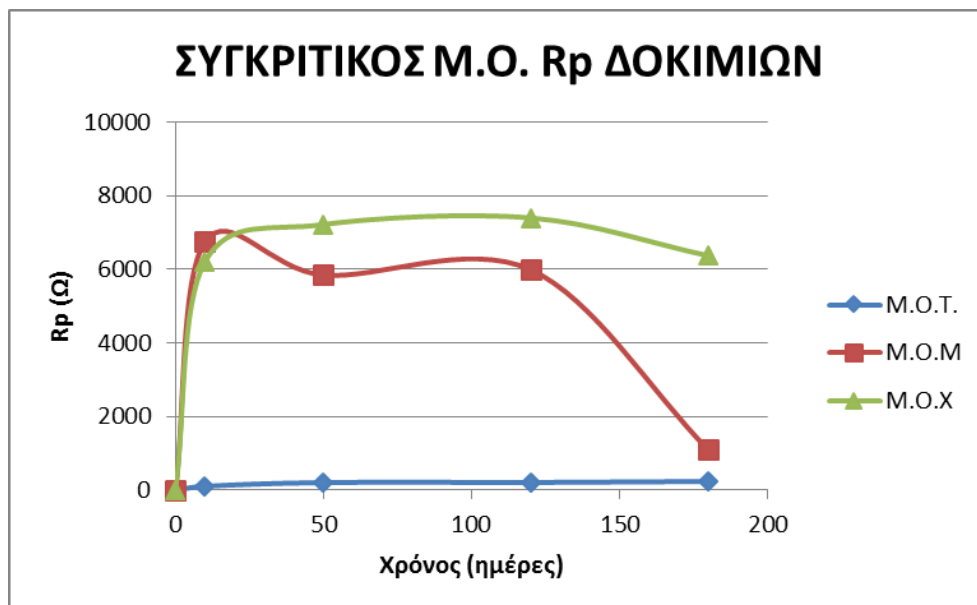


**Σχήμα 23:** Διαγράμματα αντίστασης πόλωσης ( $R_p$ ) δοκιμών με επικάλυψη του σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης.



**Σχήμα 24:** Ενδεικτική καμπύλη πόλωσης δοκιμίου με επικάλυψη του σκυροδέματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται συγκεντρωτικά ο μέσος όρος των τριών κατηγοριών δοκιμών, στα οποία εφαρμόστηκε το επαλειφόμενο αστάρι σε διαφορετικό υπόστρωμα, ο οποίος και επιβεβαιώνει την υψηλότερη τιμή του  $R_p$  και κατ' επέκταση το μικρότερο ρυθμό διάβρωσης των επικαλυμμένων έναντι των τυφλών δοκιμών.



**Σχήμα 25:** Συγκεντρωτικός πίνακας  $R_p$  Μ.Ο. δοκιμών αναφοράς (M.O.T), δοκιμών με επικάλυψη του χάλυβα (M.O.X) και δοκιμών με επικάλυψη του σκυροδέματος (M.O.M).

Παράλληλα, για την ασφαλέστερη διεξαγωγή συμπερασμάτων, προσδιορίστηκε η ηλεκτροχημική απώλεια μάζας των χαλύβων με χρήση του νόμου του Faraday:

$$m = \frac{MIt}{zF}$$

Όπου:  $m$  η μάζα του μετάλλου που καταναλώνεται [g],  $I$  το ηλεκτρικό ρεύμα [A],  $t$  ο χρόνος [s],  $F$  η σταθερά Faraday [A·s ή Cb/mol],  $z$  ο αριθμός ανταλλάσσόμενων ηλεκτρονίων ( $z=2$  για την αντίδραση  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^-$ ) και  $M$  το Ατομικό Βάρος μετάλλου [56g για το Fe]. Για τον προσδιορισμό της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας, χρησιμοποιήθηκαν οι μέσοι όροι των τιμών του  $I_{\text{corr}}(A)$ .

Τα αποτελέσματα της υπολογιζόμενης απώλειας μάζας για τις τρεις κατηγορίες δοκιμίων δίνονται στους παρακάτω πίνακες και το συγκεντρωτικό διάγραμμα.

**Πίνακας 15:** Υπολογιζόμενη απώλεια μάζας *τυφλών δοκιμίων*.

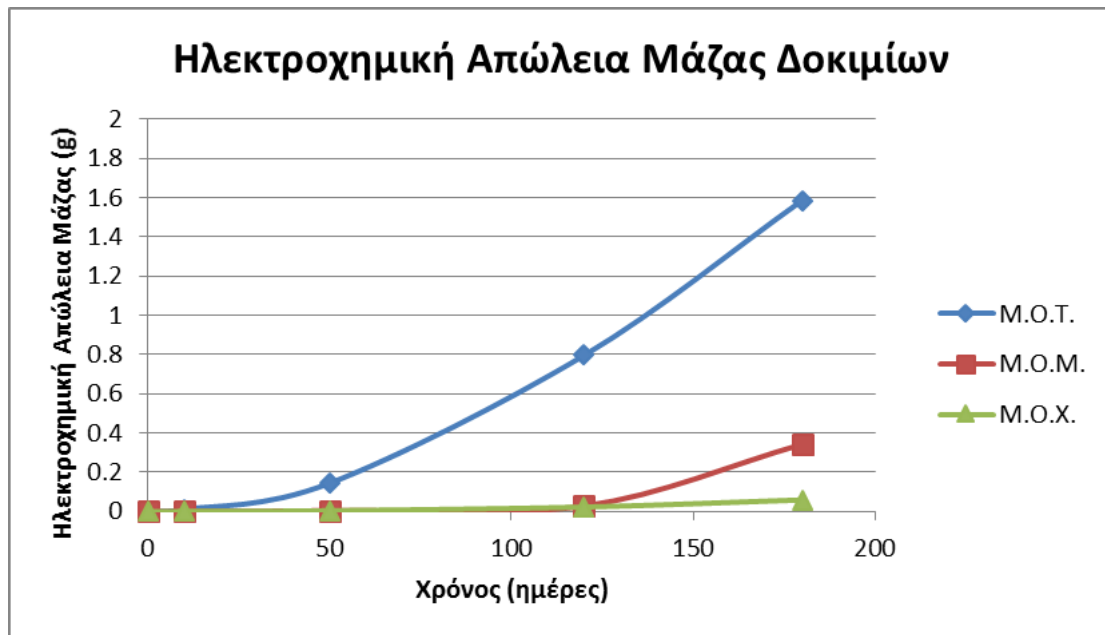
Χρόνος (ημέρες)	Χρόνος (sec)	M(g)	I (A)	Z	F (As)	Απώλεια Μάζας m (g)
0	0	56	0	2	96500	0
10	864000	56	0.00024278	2	96500	0.010868
50	4320000	56	0.000128909	2	96500	0.144271
120	10368000	56	0.000123425	2	96500	0.795651
180	15552000	56	0.000109336	2	96500	1.58586

**Πίνακας 16:** Υπολογιζόμενη απώλεια μάζας *δοκιμίων με επικάλυψη του χάλυβα*.

Χρόνος (ημέρες)	Χρόνος (sec)	M(g)	I (A)	Z	F (As)	Απώλεια Μάζας m (g)
0	0	56	0	2	96500	0
10	864000	56	4.18625E-06	2	96500	0.000187
50	4320000	56	3.60193E-06	2	96500	0.004031
120	10368000	56	3.51422E-06	2	96500	0.022654
180	15552000	56	4.0801E-06	2	96500	0.05918

**Πίνακας 17:** Υπολογιζόμενη απώλεια μάζας *δοκιμίων με επικάλυψη του σκυροδέματος*.

Χρόνος (ημέρες)	Χρόνος (sec)	M(g)	I (A)	Z	F (As)	Απώλεια Μάζας m (g)
0	0	56	0	2	96500	0
10	864000	56	3.85513E-06	2	96500	0.000173
50	4320000	56	4.44875E-06	2	96500	0.004979
120	10368000	56	4.34098E-06	2	96500	0.027984
180	15552000	56	2.36164E-05	2	96500	0.342543



**Σχήμα 26:** Συγκεντρωτικός πίνακας Ηλεκτροχημικής Απώλειας Μάζας δοκιμίων αναφοράς (*MO.T*), δοκιμίων με επικάλυψη του χάλυβα (*MO.X*) και δοκιμίων με επικάλυψη του σκυροδέματος (*MO.M*).

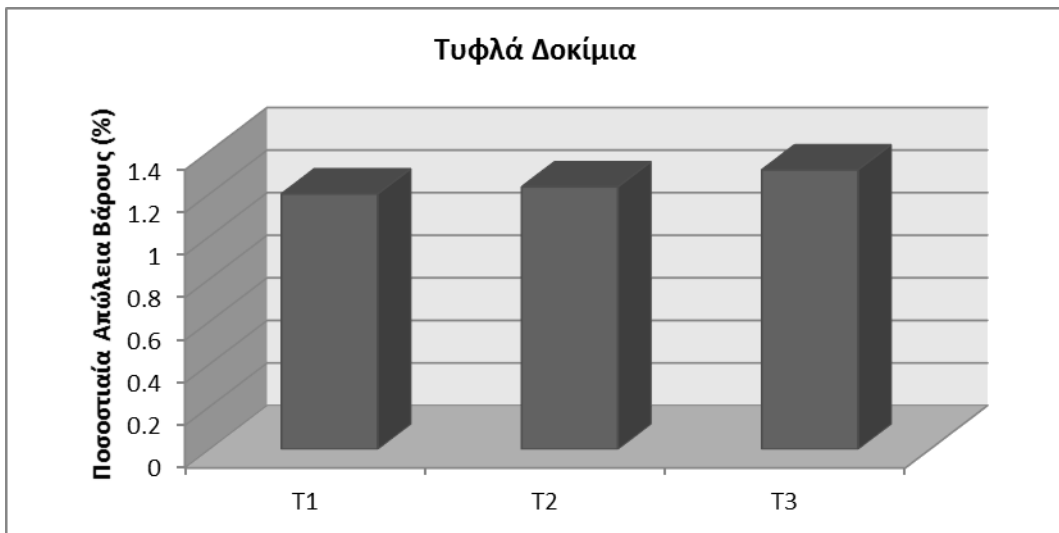
### 8.3 Μετρήσεις Απώλειας Μάζας

Και για τις τρεις κατηγορίες δοκιμίων, οι χάλυβες που εγκιβωτίστηκαν στο τσιμεντοκονίαμα ζυγίστηκαν πριν την εισαγωγή τους στα δοκίμια, καθώς και μετά από την απομάκρυνσή τους από αυτά. Και στις δυο διαδικασίες αυτές προηγήθηκε ο καθαρισμός των χάλυβων από υπολείμματα με τη χρήση μείγματος υδροχλωρικού οξέος με αναστολέα, στο οποίο και εμβαπτίστηκαν τα χάλυβδινα τεμάχια για 30'.

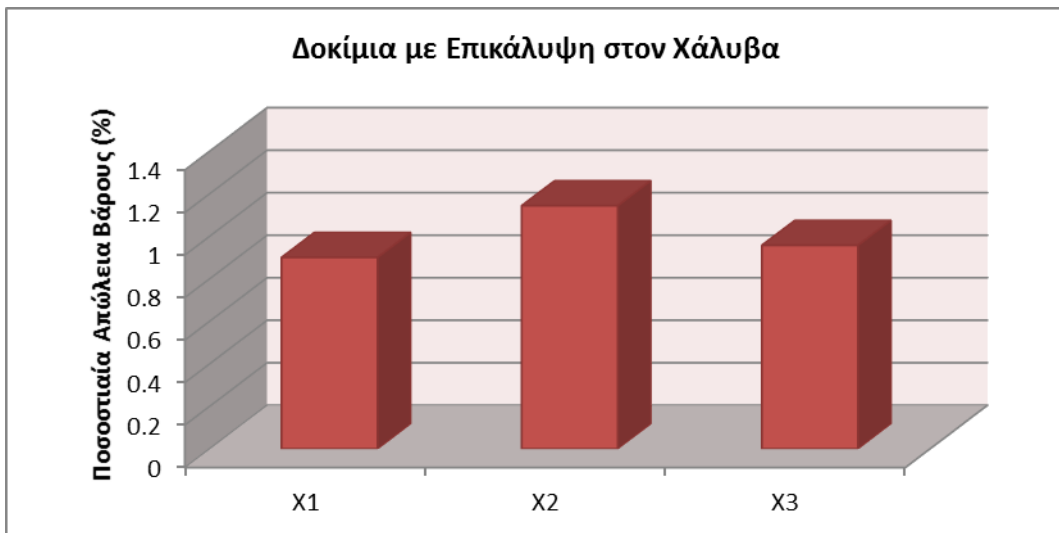
Οι μετρούμενες τιμές του βάρους τριών χάλυβων κάθε κατηγορίας παρατίθενται στον πίνακα και στα διαγράμματα που ακολουθούν, με τη μορφή της αρχικής και της τελικής μάζας των οπλισμών και της ποσοστιαίας απώλειας μάζας.

**Πίνακας 18:** Απώλειες μάζας μετά το τέλος της πειραματικής διαδικασίας

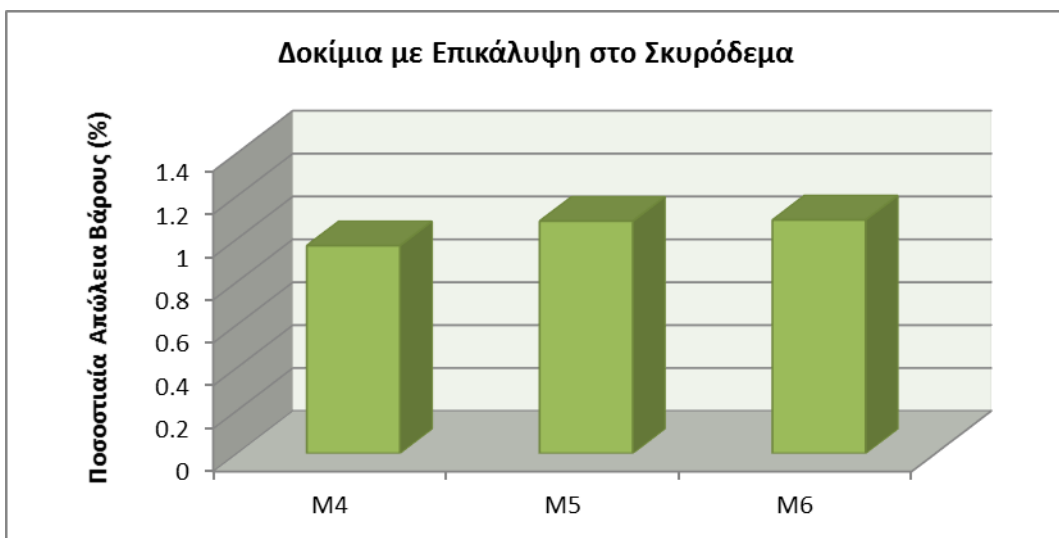
	Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια Βάρους (g)	Απώλεια Βάρους (%)
T1	64.19	63.42	0.77	1.199563795
T2	63.28	62.5	0.78	1.232616941
T3	61.72	60.91	0.81	1.312378483
MO				<b>1.248186406</b>
X1	62.17	61.61	0.56	0.900755992
X2	58.57	57.9	0.67	1.14393034
X3	62.67	62.07	0.6	0.957395883
MO				<b>1.000694072</b>
M4	64.01	63.39	0.62	0.968598656
M5	61.87	61.2	0.67	1.082915791
M6	61.55	60.88	0.67	1.088545898
MO				<b>1.046686782</b>



Σχήμα 27: Διάγραμμα απώλειας βάρους δοκιμίων αναφοράς.



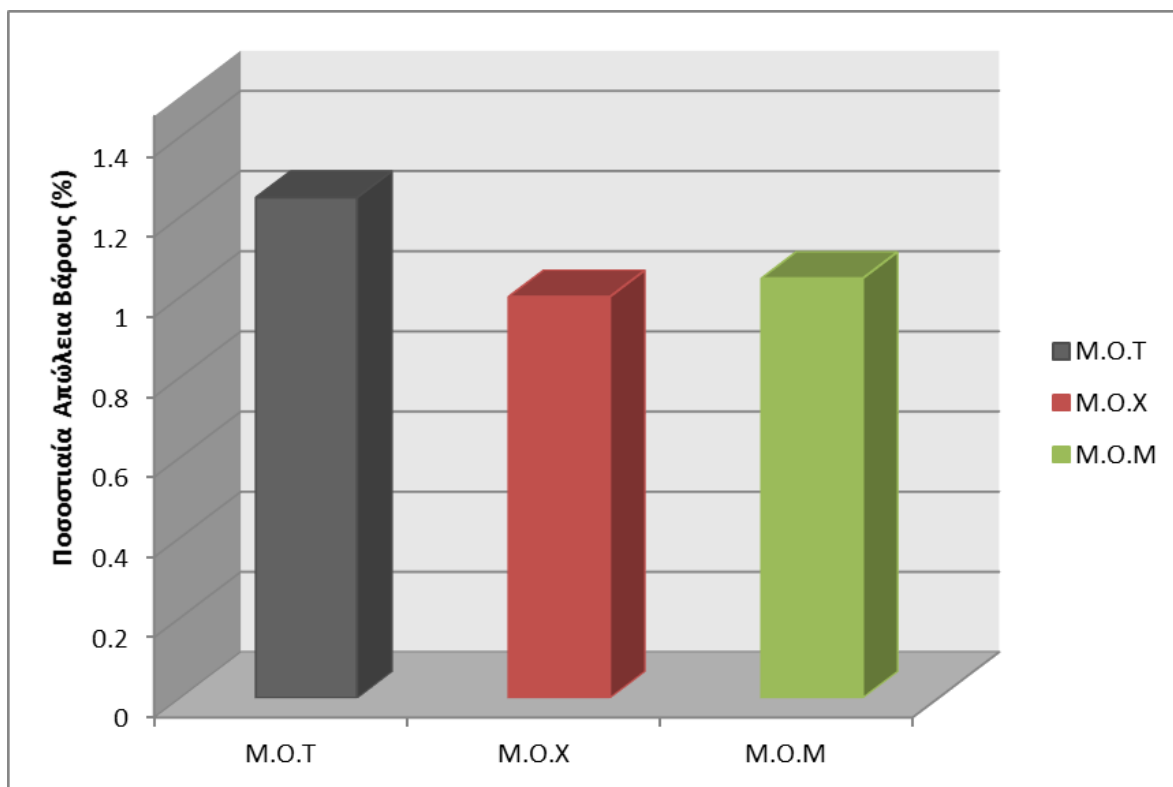
Σχήμα 28: Διάγραμμα απώλειας βάρους δοκιμίων με επικάλυψη του χάλυβα.



Σχήμα 29: Διάγραμμα απώλειας βάρους δοκιμίων με επικάλυψη του σκυροδέματος.



Στη συνέχεια, παρατίθεται σε συγκριτικό διάγραμμα ο μέσος όρος της απώλειας μάζας των δοκιμίων αναφοράς (*MO.T*), των δοκιμίων με επικάλυψη του χάλυβα (*MO.X*) καθώς και των δοκιμίων με επικάλυψη του σκυροδέματος (*MO.M*).



**Σχήμα 30:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα Μ.Ο. απώλειας βάρους δοκιμίων αναφοράς (*MO.T*), δοκιμίων με επικάλυψη του χάλυβα (*MO.X*) και δοκιμίων με επικάλυψη του σκυροδέματος (*MO.M*).

Όπως παρατηρείται στο παραπάνω διάγραμμα, τα δοκίμια αναφοράς που δεν έφεραν καμία επικάλυψη σημείωσαν μεγαλύτερη ποσοστιαία απώλεια μάζας έναντι των δοκιμίων με επικάλυψη του σκυροδέματος και των δοκιμίων με επικάλυψη του χάλυβα. Οι δύο κατηγορίες δοκιμίων που φέρουν επικάλυψη κυμαίνονται σε παράλληλα επίπεδα απώλειας μάζας, με τους πιο ανθεκτικούς στη διάβρωση χάλυβες να βρίσκονται στα δοκίμια στα οποία πραγματοποιήθηκε επικάλυψη του ίδιου του χαλύβδινου οπλισμού.

## 9. Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της έντασης του δυναμικού, της αντίστασης πόλωσης και της απώλειας μάζας των τριών κατηγοριών δοκιμίων, παρατηρούμε ότι, παρόλο που η διάβρωση του οπλισμού και των τριών κατηγοριών ήταν εκτεταμένη, το επαλειφόμενο αστάρι προστάτευσε μέχρι κάποιο βαθμό τον οπλισμό από την ταχύτατη διάβρωση. Συγκεκριμένα, από τις τιμές του δυναμικού γίνεται φανερό πως όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν στο τέλος της περιόδου έκθεσης βρίσκονται σε τιμές δυναμικού χαρακτηριστικές της διάβρωσης σε εκτεταμένο βαθμό, το οποίο συμβαίνει λόγω της υψηλής συγκέντρωσης χλωριόντων στο διάλυμα εμβάπτισης των δοκιμίων.

Ωστόσο, σαφής διαφορά παρατηρείται στα δοκίμια με επικαλύψεις είτε στον χαλύβδινο οπλισμό είτε στην επιφάνεια του κονιάματος, όπου οι τιμές του δυναμικού είναι σαφώς πιο ηλεκτροθετικές, επιβεβαιώνοντας την επιτυχία των μεθόδων προστασίας.

Με τη βοήθεια της μελέτη των καμπυλών πόλωσης που προκύπτουν από την τεχνική της γραμμικής πόλωσης, μεθόδου που εξετάζει την ταχύτητα της διάβρωσης καθώς και το ρυθμό απώλειας του μετάλλου, είναι εμφανής η προσφερόμενη προστασία και από τις δύο μεθόδους που δοκιμάστηκαν, εφόσον οι τιμές της αντίστασης πόλωσης είναι πολύ μεγαλύτερες από της αντίστοιχες των δοκιμίων αναφοράς.

Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους προστασίας, με τη μια να γίνεται εφαρμογή της επικάλυψης στον οπλισμό και την άλλη στο σκυρόδεμα, η άμεση επικάλυψη των χαλύβδινων οπλισμών δείχνει μεγαλύτερη αντίσταση στη διάβρωση αλλά για πιο ασφαλή συμπεράσματα απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος έκθεσης.

Τέλος η απώλεια μάζας που προσδιορίστηκε μετά το τέλος της πειραματικής διαδικασίας, συμφωνεί με τα αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών μετρήσεων, όπου μικρότερη απώλεια μεταλλικού υλικού παρουσιάζεται στους επικαλυμμένους χάλυβες.

## **Βιβλιογραφικές αναφορές**

- 1\_ T. Zafeiropoulou, E. Rakanta, G. Batis, “*Performance evaluation of organic coatings against corrosion in reinforced cement mortars*”, Progress in Organic Coatings, Vol. 72, 2011, pp.175-180
- 2\_ Γ. Μπατής, “*Φθορά και προστασία υλικών-Φθορά και Προστασία Οπλισμένου Σκυροδέματος*”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2006
- 3\_ Π. Α. Μιχάλης, Σ. Χ. Δημητρίου, “*Μελέτη Σύνθεσης Σκυροδέματος*”, Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Θεσσαλονίκη 2007
- 4\_ Γ. Πατερμαράκης, “*Άσκηση 10-11. Διάβρωση και προστασία μεταλλικών υλικών. Βασική θεωρία & εργαστηριακή άσκηση*”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2011
- 5\_ Δ. Κουρνέτας, “*Διάβρωση Οπλισμένου Σκυροδέματος-Μέτρα Επέμβασης*”, 16<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα 2010
- 6\_ Π. Καρατζής, Μ. Κωνσταντακοπούλου, Ν. Φίλο, “*Προστασία και Επιμεταλλώσεις*”
- 7\_ Π. Τσίκας, Χ. Παπασπυριδάκος, “*Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος σε διάρκεια*”
- 8\_ Ξ.Α. Λιγνός, Σ. Π. Κατσατσίδης, “*Αντιδιαβρωτική προστασία μεταλλικών κατασκευών*”, Κτίριο, Τεύχος 3, 2011, pp. 87-92
- 9\_ Λ. Γκίβαλου, Μ. Ε. Μιτζήθρα, “*Διάβρωση και προστασία οπλισμένου σκυροδέματος*”
- 10\_ Θ. Ζαφειροπούλου, Ε. Ρακαντά, Γ. Μπατής, “*Προστατευτική επίδραση συμβατικών, υδατικών διασπορών και χρωμάτων νανοτεχνολογίας στο οπλισμένο σκυρόδεμα*”, Αθήνα
- 11\_ Α. Ιωσηφίδου, “*Προστασία χαλύβων σε θαλάσσιο περιβάλλον με αντιδιαβρωτικό επικαλυπτικό που περιέχει πιγμέντο από ανοξείδωτο χάλυβα*”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2009
- 12\_ Μ. Γιαρτ, “*Ανθεκτικότητα οργανικών επικαλύψεων σκυροδέματος σε θαλάσσιο περιβάλλον*”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2013
- 13\_ Ο. Θ. Ντηλιά, “*Διάβρωση Οπλισμού τσιμεντοκονιάματος με οργανικές επικαλύψεις σε εναλλασσόμενο διαβρωτικό περιβάλλον*”, Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα 2013
- 14\_ Θ. Β. Ζαφειροπούλου, “*Προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα με τη χρήση οργανικών επικαλύψεων με και χωρίς προϊόντα νανοτεχνολογίας*”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2014

**15\_ Κ. Τσακαλάκης, “Τεχνολογία παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2010**

**16\_ Α. Καραντώνης, Δ. Δραγατογιάννης, “Επιταχυνόμενες μέθοδοι μελέτης της φθοράς: Μέθοδος Tafel και μέθοδος ηλεκτρικής εμπέδησης”**

## ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

---

### ΑΤΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

---

Όνομα // Αφροδίτη  
Επίθετο // Βερβέρη  
Ημερ.Γέννησης // 21-08-1987  
Διεύθυνση // Αριστομένους 25, Ζωγράφου, 15773  
Τηλέφωνο // 6976776448  
Email // aververi87@gmail.com

### ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ

---

- 2012-2014 // Συμμετοχή στο ΔΠΜΣ *Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών*, τμήμα Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- 2005-2012 // Πτυχίο Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.  
Βαθμός πτυχίου: 8,66 *Άριστα*.
- 2002-2005 // 1<sup>ο</sup> Γενικό Λύκειο Θερμαϊκού.  
Βαθμός απολυτηρίου 19 και 3/10, *Άριστα*.

### ΠΤΥΧΙΑΚΕΣ ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

---

- 2013 – 2014 // Μεταπτυχιακή Εργασία με θέμα *‘Ανθεκτικότητα ανόργανων επικαλύψεων σε επισκευές οπλισμένου σκυροδέματος’*.  
Επιβλέπων: Γ. Μπατής, καθηγητής ΕΜΠ.
- 2011 – 2012 // Ερευνητική Εργασία με θέμα *‘Η θέση της street art μεταξύ αφομοίωσης και νομιμότητας’*.  
Επιβλέπουσα: Λ. Γυϊόκα, καθηγήτρια ΑΠΘ.  
Βαθμολογία 10, *Άριστα*.
- 2010 – 2011 // Διπλωματική Εργασία με θέμα *‘Agrohostel: Αγροτουριστικός ξενώνας για νέους’*.  
Επιβλέπουσα: Φ. Βαβύλη, καθηγήτρια ΑΠΘ.  
Βαθμολογία 10, *Άριστα*.

---

## ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

- // Εργασία στα κεντρικά γραφεία της εταιρίας σταθερής τηλεφωνίας *Hellas On Line*.  
Υπεύθυνη θέσης ως *Fixed Outbound Sales Agent*.
- // Συνεργασία με το φροντιστήριο μέσης εκπαίδευσης *Ορόσημο Πειραιά*.  
Δημιουργία σχημάτων φυσικής σε ηλεκτρονική μορφή.
- // Εθελοντική εργασία στην «Κιβωτό του κόσμου».  
Διδασκαλία γραμμικού σχεδίου με σκοπό την προετοιμασία για συμμετοχή στις πανελλαδικές εξετάσεις.

---

## ΣΥΝΕΧΗΣ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ//ΣΕΜΙΝΑΡΙΑ

- 2012 // Συμμετοχή στο *workshop* «επεμβάσεις παρά θιν αλός», Πανεπιστημιακή Κατασκήνωση Καλάνδρας Χαλκιδικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- 2011 // Συμμετοχή στο διαγωνισμό «*Βραβείο Νέου Μηχανικού*» με το έργο «*Ηχητικό-διαδραστικό καταφύγιο βροχής*», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος/ Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας.
- 2009 // 3<sup>ο</sup> Εθνικό Συνέδριο «*Ηπιες Επεμβάσεις για την Προστασία των Ιστορικών Κατασκευών- Νέες τάσεις σχεδιασμού*», Υπουργείο Πολιτισμού, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Θεσσαλονίκη.
- 2009 // 3<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο «*Κλιματική Αλλαγή, Βιώσιμη Ανάπτυξη, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Αναζητώντας λύσεις για το ελληνικό περιβάλλον*», Συμβούλιο Περιβάλλοντος ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- 2009 // 16<sup>ο</sup> International Medieval Congress «*International Congress on Medieval Studies*», Institute for Medieval Studies, University of Leeds, Leeds.
- 2008 // 23<sup>ο</sup> Παγκόσμιο Συνέδριο UIA «*Μεταδίδοντας την αρχιτεκτονική: Πολιτισμός, Δημοκρατία, Ελπίδα*», ΣΑΔΑΣ-ΠΕΑ, Τορίνο.

---

## ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

Αγγλικά // Άριστο Επίπεδο [*Certificate of Proficiency in English, University of Michigan*].

Γαλλικά // Ικανοποιητική κατανόηση και έκφραση της γλώσσας.

## ΓΝΩΣΕΙΣ Η/Υ

Δίπλωμα στις δεξιότητες της τεχνολογίας πληροφορικής // University of Cambridge.  
Λειτουργικά Προγράμματα // Windows, Access, Excel, Word, PowerPoint, Internet, Outlook.

Σχεδιαστικά Προγράμματα // AutoCAD, ArchiCAD, Photoshop.

Τρισδιάστατη σχεδίαση // 3D Studio Max, Rhinoceros.