



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα (Τ.Ε.Ι.) Πειραιά

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.

Πτυχιακή Εργασία :

“Μελέτη της επίδρασης της χρήσης οργανικών επικαλύψεων στην επιφάνεια σκυροδέματος έναντι της διάβρωσης των οπλισμών του σε περιβάλλον διαλύματος χλωριούχου νατρίου”.

Σπουδαστές : Καρατζόγλη Παναγούλα
Φουσέκης Παναγιώτης

Εισηγητής : Καθηγητής Φουντουκίδης Ευάγγελος

Αθήνα, Ιανουάριος 2014

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως σκοπό τη μελέτη της προστασίας που προσφέρουν στον οπλισμό οργανικές επικαλύψεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος που εκτίθεται σε περιβάλλον μερικής εμβάπτισης διαλύματος χλωριούχου νατρίου 3.5% κ.β.

Η πτυχιακή εργασία αποτελείται από τέσσερις (4) ενότητες:

Το *Θεωρητικό Μέρος* (κεφάλαια 1-3), όπου γίνεται αναφορά στο σκυρόδεμα (συστατικά, ιδιότητες, ανθεκτικότητα, χάλυβες σκυροδέματος), στη διάβρωση του χάλυβα οπλισμού του σκυροδέματος, καθώς και στην προστασία του χάλυβα από τη διάβρωση κυρίως με τη μέθοδο των επικαλύψεων.

Το *Πειραματικό Μέρος* (κεφάλαιο 4), όπου τοποθετείται το αντικείμενο της πτυχιακής, παρουσιάζονται τα υλικά, η παρασκευή των δοκιμίων, η μεθοδολογία των μετρήσεων όπως επίσης και οι πειραματικές μετρήσεις με τα αποτελέσματά τους.

Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από οπλισμένο σκυρόδεμα, τα οποία επικαλύφθηκαν με δύο ακρυλικά χρώματα εξωτερικής χρήσης, που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Επίσης, για λόγους αναφοράς και σύγκρισης, δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος παρέμειναν ανεπίχριστα. Τα δοκίμια εκτέθηκαν στο διαβρωτικό περιβάλλον της μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου 3.5% κ.β. για συνολικό χρόνο έξι μηνών. Η μεθοδολογία ελέγχου περιελάμβανε την εκτίμηση της χρονικής εξέλιξης του δυναμικού διάβρωσης, τη μέτρηση της έντασης ρεύματος διάβρωσης υπό ανοδική φόρτιση, τον σταθμικό προσδιορισμό της απώλειας μάζας των οπλισμών και τη μέτρηση του βάθους ενανθράκωσης.

Η πτυχιακή εργασία ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των *Συμπερασμάτων*, και τη *Βιβλιογραφία*.

Σε αυτό το σημείο, θα θέλαμε να εκφράσουμε θερμές ευχαριστίες στην εταιρεία ΑΦΟΙ ΓΙΑΝΝΙΔΗ – VITEX ΑΕ, και ιδιαίτερα στον Δρ. Απόστολο Ζαγγογιάννη για την προμήθεια των ακρυλικών χρωμάτων.

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Χημικής Τεχνολογίας και Περιβαλλοντικής Χημείας του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε. του Τ.Ε.Ι. Πειραιά υπό την επίβλεψη και ανεκτίμητη βοήθεια της εργαστηριακής συνεργάτιδας κυρίας Πανταζοπούλου Παρασκευής. Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τον καθηγητή κύριο Φουντουκίδη Ευάγγελο για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε με την ανάθεση της πτυχιακής εργασίας.

Αθήνα, Ιανουάριος 2014

Καρατζόγλη Παναγούλα, Φουσέκης Παναγιώτης

Περίληψη

Κατά τη διάρκεια της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας ασχοληθήκαμε και επικεντρώσαμε το ενδιαφέρον μας στο αντικείμενο του οπλισμένου σκυροδέματος, της διάβρωσης των μετάλλων, της προστασίας του σκυροδέματος έναντι της διάβρωσης και των μεθόδων προστασίας του.

Το σκυρόδεμα είναι ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται κυρίως από τσιμέντο, αδρανή και νερό. Η ενίσχυση του σκυροδέματος με χάλυβα, συνήθως ράβδους κυκλικής διατομής, δημιουργεί το οπλισμένο σκυρόδεμα.

Όπως είναι γνωστό οι μεταλλικές κατασκευές υπό την επίδραση του περιβάλλοντος διαβρώνονται. Με τον όρο διάβρωση εννοούμε το σύνολο των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στα μέταλλα και οδηγούν στη φθορά και αλλοίωσή τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υποβάθμιση των φυσικών, χημικών και μηχανικών τους ιδιοτήτων με μεγάλες πολλές φορές οικονομικές συνέπειες.

Η διάβρωση του σκυροδέματος, αποτελεί ένα από τα κυριότερα κατασκευαστικά και οικονομικά προβλήματα στις μέρες μας διεθνώς. Για αυτό το λόγο λαμβάνει χώρα και η ανάπτυξη μεθόδων προστασίας των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον στρέφεται στη χρήση επικαλύψεων που εφαρμόζονται στην εξωτερική επιφάνεια του οπλισμένου σκυροδέματος.

Η μελέτη μας πραγματοποιήθηκε με κυλινδρικά δοκίμια κονιάματος με μήκος 10 cm και διάμετρο 50 mm με αξονικό οπλισμό μιας ράβδου χάλυβα μήκους 10 cm και διαμέτρου 12 mm. Τα δοκίμια επικαλύφθηκαν με δυο ακρυλικές επικαλύψεις και εμβαπτίστηκαν μερικώς σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου 3.5% κ.β. για συνολικό χρονικό διάστημα έξι μηνών. Οι μέθοδοι ελέγχου που εφαρμόστηκαν ήταν:

- Μετρήσεις της χρονικής εξέλιξης του δυναμικού διάβρωσης
- Μέτρηση της έντασης ρεύματος διάβρωσης υπό ανοδική φόρτιση
- Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας των οπλισμών
- Μέτρηση του βάθους ενανθράκωσης

Από το σύνολο των προαναφερθέντων μετρήσεων εξάγεται ως συμπέρασμα της εργασίας η προστατευτική δράση και των δυο επικαλύψεων έναντι της διάβρωσης του οπλισμού του σκυροδέματος σε περιβάλλον χλωριόντων.

Abstract

During the present thesis we dealt and focused on the subjects of reinforced concrete, corrosion of metals, protection of concrete against corrosion and protection methods for concrete.

Concrete is a complex material which consists mainly of cement, aggregate and water. The strengthening of concrete, usually with steel round rods, creates the reinforced concrete.

As is known metallic constructions corrode under the influence of their environment. By the technical term corrosion is meant the sum of phenomena which occur to metals and lead to their wear and deterioration. This results in degradation of their physical, chemical and mechanical properties often with huge economic consequences.

Nowadays corrosion of concrete is one of the main structural and financial problems internationally. For this reason methods of protection of reinforced concrete structures are developed. Specifically in the present thesis attention is focused on the use of coatings applied to the external surface of reinforced concrete.

Our study was performed using cylindrical mortar specimens of 10 cm length and 50 mm diameter with an axial reinforcement of a steel rod of 10 cm length and 12 mm diameter. The specimens were coated with two acrylic coatings and were partially immersed in 3.5% w/w sodium chloride solution for a total period of 6 months along with uncoated specimens. Methods employed were:

- Measurements of time evolution of the corrosion potential
- Measurement of corrosion current under anodic charge
- Gravimetric determination of the mass loss of steel reinforcement
- Measurement of carbonation depth

From all the above measurements in this thesis the conclusion is derived that both coatings present a protective effect against corrosion of steel reinforcement in chloride environment.

| | |
|--|----------|
| Πρόλογος | 2 |
| Περίληψη..... | 3 |
| Abstract | 4 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ..... | 5 |
| 1.1. Γενικότητες..... | 5 |
| 1.2. Η ιστορία του σκυροδέματος..... | 5 |
| 1.3. Τσιμέντο..... | 6 |
| 1.3.1. Είδη τσιμέντου..... | 7 |
| 1.3.2. Παρασκευή τσιμέντου..... | 7 |
| 1.3.3. Τσιμέντο Portland..... | 8 |
| 1.3.4. Αντοχή τσιμέντου..... | 8 |
| 1.4. Αδρανή υλικά..... | 9 |
| 1.5. Νερό και βελτιωτικά..... | 10 |
| 1.5.1. Νερό..... | 10 |
| 1.5.2. Βελτιωτικά | 11 |
| 1.6. Πρόσθετα..... | 12 |
| 1.6.1. Φυσικές και Τεχνητές ποζολάνες..... | 12 |
| 1.7. Χάλυβες οπλισμένου σκυροδέματος..... | 13 |
| 1.7.1. Γενικά..... | 13 |
| 1.7.2. Χαρακτηριστικά χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος..... | 14 |
| 1.7.2.1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά..... | 14 |
| 1.7.2.2. Μηχανικά χαρακτηριστικά..... | 16 |
| 1.7.2.3. Χημικά χαρακτηριστικά..... | 17 |
| 1.7.2.4. Συμπεριφορά σε ακραίες θερμοκρασίες..... | 18 |
| 1.8. Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος..... | 19 |
| 1.8.1. Γενικά..... | 19 |
| 1.8.2. Διαδικασία μελέτης σύνθεσης..... | 19 |
| 1.9. Ιδιότητες σκυροδέματος..... | 24 |
| 1.9.1. Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος | 24 |
| 1.9.1.1. Εργασιμότητα..... | 24 |
| 1.9.1.2. Μοναδιαίο βάρος..... | 25 |
| 1.9.2. Ιδιότητες σκληρυμένου σκυροδέματος..... | 26 |
| 1.9.2.1. Μηχανική αντοχή σκυροδέματος..... | 26 |
| 1.9.2.2. Μεταβολή όγκου..... | 26 |
| 1.9.2.3. Ερπυσμός και Συρρίκνωση..... | 26 |
| 1.10. Αντοχή σκυροδέματος..... | 27 |

| | | |
|---------------------------------|---|-----------|
| 1.10.1. | Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος..... | 27 |
| 1.10.2. | Κατηγορίες σκυροδέματος..... | 27 |
| 1.11. | Ανθεκτικότητα..... | 28 |
| 1.11.1. | Εισαγωγή..... | 28 |
| 1.11.2. | Υδατοπερατότητα..... | 29 |
| 1.11.3. | Φυσικά Αίτια Μείωσης της Ανθεκτικότητας σε Διάρκεια..... | 30 |
| 1.11.3.1. | Επιφανειακή Φθορά..... | 31 |
| 1.11.3.2. | Ρηγμάτωση λόγω Κρυστάλλωσης Αλάτων στους πόρους..... | 32 |
| 1.11.3.3. | Επίδραση πυρκαγιάς..... | 32 |
| 1.11.3.4. | Δράση Παγετού..... | 33 |
| 1.11.4. | Χημικές Διεργασίες..... | 33 |
| 1.11.5. | Βιολογική Επίδραση..... | 34 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΔΙΑΒΡΩΣΗ..... | | 36 |
| 2.1. | Γενικά..... | 36 |
| 2.2. | Ιστορική εξέλιξη..... | 36 |
| 2.3. | Ορισμός της διάβρωσης..... | 37 |
| 2.4. | Ηλεκτροχημικό στοιχείο..... | 39 |
| 2.5. | Σημασία – Οικονομικές επιπτώσεις..... | 41 |
| 2.6. | Είδη Διάβρωσης..... | 42 |
| 2.6.1. | Ανάλογα με τα αίτια που την προκαλούν..... | 42 |
| 2.6.2. | Ανάλογα με τη μορφή εμφάνισης..... | 42 |
| 2.6.3. | Ανάλογα με το είδος του διαβρωτικού περιβάλλοντος..... | 43 |
| 2.7. | Μέθοδοι Εκτίμησης της Διάβρωσης Οπλισμού..... | 44 |
| 2.8. | Η ταχύτητα της διάβρωσης..... | 46 |
| 2.9. | Συνθήκες εμφάνισης της διάβρωσης..... | 48 |
| 2.10. | Δράσεις που γίνονται κατά τη διάβρωση..... | 48 |
| 2.11. | Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση..... | 49 |
| 2.12. | Διάβρωση οπλισμού σκυροδέματος..... | 51 |
| 2.12.1. | Γενικά..... | 51 |
| 2.12.2. | Διάβρωση οπλισμού..... | 51 |
| 2.12.3. | Το pH του πηγμένου σκυροδέματος..... | 52 |
| 2.12.4. | Ενανθράκωση του σκυροδέματος..... | 53 |
| 2.12.4.1. | Παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα ενανθράκωσης..... | 53 |

| | |
|---|----|
| 2.12.4.2. Διάγνωση ενανθράκωσης..... | 54 |
| 2.12.5. Διάβρωση του οπλισμού σε σκυρόδεμα με χλωριόντα..... | 55 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ - ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ.....62

| | |
|--|----|
| 3.1. Μέθοδοι προστασίας οπλισμένου σκυροδέματος..... | 62 |
| 3.1.1. Γενικά..... | 62 |
| 3.1.2. Επισκευή και αποκατάσταση δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα..... | 63 |
| 3.1.3. Καθοδική προστασία οπλισμένου σκυροδέματος..... | 64 |
| 3.1.4. Ηλεκτροχημική επαναφορά της αλκαλικότητας του σκυροδέματος..... | 64 |
| 3.1.5. Ηλεκτροχημική αφαλάτωση σκυροδέματος..... | 65 |
| 3.1.6. Χρήση αναστολέων διάβρωσης..... | 66 |
| 3.1.7. Μηχανισμοί προστασίας μέσω οργανικών επιστρωμάτων..... | 67 |
| 3.1.7.1. Προστασία με δράση φράγματος..... | 68 |
| 3.1.7.2. Προστασία με παροχή αναστολέων διάβρωσης..... | 69 |
| 3.1.7.3. Προστασία με θυσιαζόμενα επιστρώματα..... | 69 |
| 3.1.8. Χρήση επιστρωμάτων..... | 70 |
| 3.2. Επικαλύψεις σκυροδέματος..... | 70 |
| 3.2.1. Ανόργανα χρώματα..... | 71 |
| 3.2.2. Οργανικά χρώματα..... | 71 |
| 3.2.3. Διαφορές ανόργανων και οργανικών χρωμάτων..... | 73 |
| 3.3. Οργανικά επιστρώματα..... | 74 |
| 3.3.1. Εισαγωγή..... | 74 |
| 3.3.2. Είδη οργανικών επιστρωμάτων..... | 75 |
| 3.3.3. Σύνθεση οργανικών επιστρωμάτων..... | 75 |
| 3.3.3.1. Συνδετικό..... | 75 |
| 3.3.3.2. Διαλύτες..... | 77 |
| 3.3.3.3. Πιγμέντα..... | 79 |
| 3.3.3.4. Πληρωτικά υλικά..... | 80 |
| 3.3.3.5. Πρόσθετα..... | 80 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3.3.4. | Πολυστρωματικά συστήματα..... | 81 |
| 3.3.5. | Κριτήρια επιλογής ενός συστήματος επικάλυψης..... | 81 |
| 3.3.6. | Οργανικές επικαλύψεις, Υγεία και Περιβάλλον..... | 82 |
| 3.3.6.1. | Εισαγωγή..... | 82 |
| 3.3.6.2. | Κίνδυνοι της υγείας των εργαζομένων..... | 83 |
| 3.3.6.3. | Οι περιβαλλοντικές συνέπειες των οργανικών επικαλύψεων..... | 83 |
| 3.3.7. | Διεθνείς τάσεις στη βιομηχανία παραγωγής και εφαρμογής οργανικών επικαλύψεων..... | 84 |
| 3.3.8. | Συμπεράσματα – Προτάσεις..... | 84 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....87

| | | |
|----------|---|----|
| 4.1. | Υλικά – Όργανα..... | 87 |
| 4.1.1. | Υλικά..... | 87 |
| 4.1.2. | Όργανα..... | 88 |
| 4.1.3. | Βοηθητικά υλικά συναρμολόγησης, επεξεργασίας..... | 88 |
| 4.2. | Χρώματα..... | 89 |
| 4.2.1. | Ελαστικό και μονωτικό χρώμα καθέτων επιφανειών (Χρώμα Α)..... | 89 |
| 4.2.1.1. | Γενικά χαρακτηριστικά..... | 89 |
| 4.2.1.2. | Τεχνικά χαρακτηριστικά..... | 90 |
| 4.2.2. | Ελαστομερές στεγανωτικό για ταράτσες (Χρώμα V)..... | 90 |
| 4.2.2.1. | Γενικά χαρακτηριστικά..... | 90 |
| 4.2.2.2. | Τεχνικά χαρακτηριστικά..... | 91 |
| 4.2.3. | Αστάρι διαλύτη (D)..... | 92 |
| 4.2.3.1. | Γενικά χαρακτηριστικά..... | 92 |
| 4.2.3.2. | Τεχνικά χαρακτηριστικά..... | 93 |
| 4.2.4. | Διαλυτικό πινέλου (T)..... | 93 |
| 4.2.4.1. | Γενικά χαρακτηριστικά..... | 93 |
| 4.2.4.2. | Τεχνικά χαρακτηριστικά..... | 93 |
| 4.3. | Διαδικασία παρασκευής των προς μέτρηση δοκιμίων..... | 93 |
| 4.3.1. | Καλούπια..... | 93 |
| 4.3.2. | Οπλισμός..... | 94 |
| 4.3.3. | Σκυρόδεμα..... | 94 |
| 4.3.4. | Παρασκευή δοκιμίων..... | 95 |
| 4.4. | Μεθοδολογία..... | 97 |

| | |
|---|-----|
| 4.4.1. Δυναμικό διάβρωσης..... | 97 |
| 4.4.2. Ένταση ρεύματος υπό ανοδική φόρτιση..... | 99 |
| 4.4.3. Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας των οπλισμών..... | 100 |
| 4.4.4. Βάθος ενανθράκωσης..... | 100 |
| 4.4.5. Δοκίμια..... | 100 |
| 4.5. Μετρήσεις..... | 102 |
| 4.5.1. Μετρήσεις Δυναμικού Διάβρωσης..... | 102 |
| 4.5.1.1. Συμπεράσματα..... | 111 |
| 4.5.2. Μέτρηση έντασης ρεύματος υπό ανοδική φόρτιση..... | 111 |
| 4.5.2.1. Συμπεράσματα..... | 119 |
| 4.5.3. Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας των οπλισμών..... | 119 |
| 4.5.3.1. Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας των οπλισμών μετά από τις μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης..... | 120 |
| 4.5.3.1.1. Συμπεράσματα..... | 126 |
| 4.5.3.2. Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας των οπλισμών μετά από τις μετρήσεις της έντασης του ρεύματος υπό ανοδική φόρτιση..... | 127 |
| 4.5.3.2.1. Συμπεράσματα..... | 129 |
| 4.5.4. Βάθος ενανθράκωσης..... | 129 |
| 4.6. Γενικά Συμπεράσματα..... | 129 |
| 4.7. Φωτογραφικό υλικό..... | 131 |
| Βιβλιογραφία..... | 137 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1. Γενικότητες (1,4)

Το σκυρόδεμα είναι σύνθετο υλικό, που αποτελείται κυρίως από τσιμέντο, αδρανή και νερό, του οποίου η σύσταση και οι ιδιότητες ποικίλουν πολύ. Χαρακτηριστικά μπορεί να αναφερθεί η διακύμανση της πυκνότητάς του η οποία μπορεί να κυμαίνεται από 800 έως 4000 kg/m³, της τελικής θλιπτικής αντοχής, από 1 έως 140 MPa και της διαπερατότητας σε αέρια, η οποία μπορεί να είναι από μεγάλη έως ελάχιστη.

Ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται, προστίθενται ορισμένα βελτιωτικά των ιδιοτήτων του. Η ποιότητα του σκυροδέματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των υλικών από τα οποία συντίθεται, αλλά και από άλλους παράγοντες όπως η αναλογία και ο τρόπος ανάμειξής τους, η κατασκευή των καλουπιών και η συμπίκνωση του σκυροδέματος μέσα στα καλούπια.

1.2. Η ιστορία του σκυροδέματος (8)

Η ιστορία του σκυροδέματος είναι στενά συνδεδεμένη με την ιστορία του τσιμέντου, το οποίο αποτελεί ένα από τα βασικά συστατικά του. Πρόκειται για μια ιστορία που συνεχίζεται μέχρι σήμερα, καθώς το σκυρόδεμα εξελίσσεται διαρκώς, ώστε να παραμείνει ένα υλικό που προσφέρει χιλιάδες δυνατότητες και αποτελεί μια διαρκή πηγή έμπνευσης για τους αρχιτέκτονες.

Από το τσιμέντο στο σκυρόδεμα

Το τσιμέντο πρωτοχρησιμοποιήθηκε στην αρχαία Ρώμη, αλλά η ιδανική σύνθεση εξελίχθηκε μόλις τον 19^ο αιώνα. Μόλις προσδιορίστηκε, εξαπλώθηκε γρήγορα η πρακτική έγχυσης του «σκυροδέματος από τσιμέντο» σε καλούπια. Στο τσιμέντο προστέθηκαν άμμος και χαλίκια και άρχισε να καλουπώνεται, ώστε να μιμείται τη φυσική πέτρα και τον λαξευτό λίθο.

Σιδηρός οπλισμός, η ιδέα ενός κηπουρού!

Το 1845, ο Joseph-Louis Lambot, ο «επίσημος» εφευρέτης του οπλισμένου σκυροδέματος, χρησιμοποίησε σύρμα και κονίαμα, για να δημιουργήσει δεξαμενές και φυτευτικά αυλάκια για πορτοκαλιές. Το 1867, ο Joseph Monier πρότεινε ένα σύστημα «κινητών κάδων ή λεκανών, κατασκευασμένων από σίδηρο και τσιμέντο, για να χρησιμοποιούνται στην κηπευτική», μια ιδέα, την οποία τελειοποίησε τα επόμενα χρόνια.

Οι τεχνικές οπλισμένου σκυροδέματος τελειοποιήθηκαν μερικά χρόνια αργότερα. Το 1892, ο François Hennebique κατέθεσε αίτηση για δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και ανακηρύχθηκε ο εφευρέτης του οπλισμένου σκυροδέματος. Στην Παγκόσμια Έκθεση του 1900, τον αποκάλεσαν «τον σημαντικότερο ανάδοχο δημόσιων έργων από οπλισμένο σκυρόδεμα». Η αληθινή περιπέτεια των κατασκευών από σκυρόδεμα ξεκίνησε τον επόμενο αιώνα...

Η καθιέρωση του υλικού

Η χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος ως δομικό υλικό εγκρίθηκε με μια εγκύκλιο του γαλλικού κράτους με ημερομηνία 20 Οκτωβρίου 1906.

Από το 1897, το οπλισμένο σκυρόδεμα και οι τεχνικές του αρχίζουν να διδάσκονται στη γαλλική σχολή Ecole des Ponts et Chaussées. Μεταξύ των επίδοξων πολιτικών μηχανικών ήταν ο Eugène Freyssinet, ο εφευρέτης του προεντεταμένου σκυροδέματος, το οποίο κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1929.

Μετά το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, οι ανάγκες στέγασης ώθησαν την ανάπτυξη των προκατασκευών. Από το 1950 έως το 1965, ο αριθμός των κατοικιών που χτίζονταν κάθε χρόνο στη Γαλλία αυξήθηκε από 50.000 σε περισσότερες από 550.000 κατοικίες. Το σκυρόδεμα είχε επιτέλους καθιερωθεί!

Μια ιστορία δίχως τέλος: ολοένα πιο πρωτοποριακά σκυροδέματα

Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 παρουσιάστηκαν σκυροδέματα υψηλής αντοχής, όπως τα ινοπλισμένα σκυροδέματα υπερυψηλής αντοχής και τα αυτοσυμπυκνούμενα, αυτοεπιπεδούμενα σκυροδέματα.

1.3. Τσιμέντο (1,4,6,8,10)

Συνδετική ύλη ή κονία είναι κάθε υλικό το οποίο με κατάλληλη προεργασία, για παράδειγμα όταν αναμειχθεί με νερό μπορεί να γίνει πλαστικό, να εκδηλώνει συγκολλητικές ιδιότητες και βαθμιαία να στερεοποιείται έως ότου σχηματίσει μια σκληρή και συμπαγή μάζα με φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Η αιτία των συγκολλητικών ιδιοτήτων μπορεί να οφείλεται στην εξάτμιση του νερού όπως συμβαίνει στον πηλό ή λόγω χημικών αντιδράσεων όπως συμβαίνει στην άσβεστο ή στο τσιμέντο.

Το τσιμέντο μπορεί να είναι φυσικό ή τεχνητό. Το φυσικό τσιμέντο προέρχεται από την όπτηση αργιλούχων ασβεστόλιθων με περιεκτικότητα 20-25% κ.β. σε άργιλο. Το προϊόν της όπτησης αλέθεται σε λεπτή σκόνη και αποτελεί το φυσικό τσιμέντο. Λόγω της έλλειψης σταθερότητας στη σύσταση των πετρωμάτων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή φυσικού τσιμέντου, οι ιδιότητες του υπολείπονται

αυτών του τεχνητού και για αυτό το φυσικό τσιμέντο σήμερα ουσιαστικά δεν χρησιμοποιείται. Γι' αυτό και τα τεχνητά τσιμέντα, μονοπωλούν σήμερα την αγορά.

1.3.1. Είδη τσιμέντου

Υπάρχουν διάφορα είδη τσιμέντων αλλά σήμερα στην αγορά κυριαρχεί ένα είδος τσιμέντου, το τσιμέντο Portland. Τα άλλα είδη, περιέχουν προσμίξεις οι οποίες δρουν φυσικά ή χημικά και επηρεάζουν τις ιδιότητες του τσιμέντου (π.χ. μεταβολή πορώδους, αντοχών, κ.α.). Ανάλογα με τη σύνθεση, τα τσιμέντα διακρίνονται σε :

1. Τσιμέντο Portland (CEM I)
2. Σύνθετο τσιμέντο Portland (CEM II)
3. Σκωριακά τσιμέντα ή υψικαμίνου (CEM III)
4. Ποζολανικά τσιμέντα (CEM IV)
5. Σύνθετα τσιμέντα (CEM V)

1.3.2. Παρασκευή Τσιμέντων

Από το λατομείο μέχρι το τελικό προϊόν, τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας τσιμέντου είναι τα εξής:

1. Εξόρυξη και προετοιμασία πρώτων υλών: Οι πρώτες ύλες που απαιτούνται για την παραγωγή τσιμέντου εξορύσσονται από τα λατομεία (ασβεστολίθου, αργίλου, σχιστόλιθου, κ.λ.π.) μετά από γεωλογικές έρευνες και χημικές αναλύσεις, σε συγκεκριμένες ποσότητες και αναλογίες. Στη συνέχεια συνθλίβονται και μεταφέρονται για αποθήκευση στο εργοστάσιο.

2. Άλεση πρώτων υλών και έψηση: Τα υλικά αλέθονται σε μια πολύ λεπτή πούδρα, ένα μείγμα φαρίνας όπως αποκαλείται. Το μίγμα υλικών ομογενοποιείται, προθερμαίνεται και στη συνέχεια οδηγείται στην κάμινο, η οποία θερμαίνεται με φλόγα που μπορεί να φθάσει τους 2.000°C. Το μείγμα ψήνεται σε θερμοκρασία 1.500°C. Σε αυτή τη θερμοκρασία και μετά από χημικές αντιδράσεις προκύπτει το κλίνκερ, η βάση για την παρασκευή κάθε είδους τσιμέντου. Στη συνέχεια το κλίνκερ ψύχεται απότομα με ροή αέρα και αποθηκεύεται.

3. Άλεση τσιμέντου : Κλίνκερ μαζί με γύψο αλέθονται σε πολύ λεπτή σκόνη, το γνωστό τσιμέντο. Σε αυτό το στάδιο μπορούν να προστεθούν μαζί με γύψο διάφορα άλλα υλικά, τα οποία λέγονται πρόσθετα. Χρησιμοποιώντας τα πρόσθετα σε διάφορες αναλογίες έχουμε συγκεκριμένους τύπους τσιμέντου. Το τσιμέντο αποθηκεύεται σε σιλό.

1.3.3. Τσιμέντο Portland

Το τσιμέντο Portland ανακαλύφθηκε το 1824 από τον Άγγλο J.Asplin. Η ονομασία του οφείλεται στον ίδιο χρωματισμό που είχε με τα εδάφη της περιοχής Portland της Αγγλίας.

Το τσιμέντο τύπου Portland, είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο τσιμέντο, το οποίο προκύπτει από το ψήσιμο σε θερμοκρασία 1400°C έως 1500°C, ομογενοποιημένου μίγματος ασβεστόλιθου σε περιεκτικότητα 75% και αργιλοπυριτικών ενώσεων σε περιεκτικότητα 25% και στη συνέχεια συνάλεση του ενδιάμεσου προϊόντος (κλίνκερ) με κατάλληλη ποσότητα γύψου ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Η γύψος προστίθεται προκειμένου να ελέγξει το χρόνο πήξης του τσιμέντου. Οι κυριότερες φάσεις και τα ποσοστά αυτών, του τσιμέντου τύπου Portland, φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα (1.1.) :

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1 Οι φάσεις του τσιμέντου Portland

| Φάσεις | Χημικός Τύπος | Συμβολισμός | Ποσοστό |
|-----------------------------|---|-----------------------|----------------|
| Πυριτικό Τριασβέστιο | $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | C_3S | 55% |
| Πυριτικό Διασβέστιο | $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | C_2S | 20% |
| Αργιλικό Τριασβέστιο | $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ | C_3A | 11% |
| Αργιλοσιδηρικό τετρασβάστιο | $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | C_4AF | 10% |
| Θευκό Ασβέστιο | CaSO_4 | - | 3% |

1.3.4. Αντογή τσιμέντου

Από άποψη αντοχής, τα τσιμέντα κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- 32,5 MPa
- 42,5 MPa
- 52,5 MPa

Οι τιμές αυτές είναι χαρακτηριστικές τιμές δηλαδή εξασφαλίζονται με ασφάλεια 95%.

Επιπλέον σε κάθε κατηγορία χαρακτηριστικής αντοχής εισάγονται και κατηγορίες πρώιμης αντοχής N και R με αποτέλεσμα να δημιουργούνται συνολικά 6 κατηγορίες αντοχής

1.4. Αδρανή υλικά (1,4)

Αυτά αποτελούν το 60-80% του όγκου του σκυροδέματος και οι ιδιότητες τους επηρεάζουν την ποιότητά του. Τα αδρανή υλικά οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι παραμένουν χημικώς αδρανή στο σκυρόδεμα. Τα αδρανή τα οποία είναι βασικό συστατικό του σκυροδέματος είναι άθραυστες ή θραυσμένες φυσικές ή τεχνητές ορυκτές ή ανακυκλωμένες ύλες. Φυσικά θεωρούνται αυτά που χρησιμοποιούνται όπως είναι ή μετά από θραύση, ενώ τεχνητά θεωρούνται είτε τα φυσικά που χρησιμοποιούνται μετά από ειδική επεξεργασία εκτός της θραύσης, είτε τα διογκωμένα πλαστικά. Συνδέονται ή συγκολλούνται μεταξύ τους και συμβάλλουν μηχανικά μόνο στην αντοχή του τελικού προϊόντος. Τα καταλληλότερα πετρώματα για να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή υλικά είναι τα ασβεστολιθικά και τα πυριτικά.

Τα αδρανή πρέπει να διαθέτουν τρία (3) βασικά χαρακτηριστικά :

- Επαρκή αντοχή
- Επαρκή πρόσφυση
- Χημική συνεκτικότητα με την τσιμεντοκονία

Άλλα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι η αντοχή του μητρικού πετρώματος, η καθαρότητα (ύπαρξη ή όχι πρόσμεικτων ουσιών), η χημική τους συμπεριφορά, η κοκκομετρική διαβάθμιση (το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων). Διακρίνονται επτά (7) κατηγορίες αδρανών ανάλογα με τη χρήση :

1. Αδρανή σκυροδέματος (ΕΛΟΤ EN 12620)
2. Αδρανή ασφαλτομιγμάτων (ΕΛΟΤ EN 13043)
3. Αδρανή κονιαμάτων (ΕΛΟΤ EN 13139)
4. Αδρανή για ογκόλιθους για λιμενικά και υδραυλικά έργα (ΕΛΟΤ EN 13389-1)
5. Αδρανή για έρμα σιδηροδρομικής γραμμής (ΕΛΟΤ EN 13450)
6. Αδρανή για βάσεις και υποβάσεις σταθεροποιημένες ή μη (ΕΛΟΤ EN 13242)
7. Ελαφροβαρή αδρανή (ΕΛΟΤ EN 13055)

Το μέγεθος των αδρανών ορίζεται με ένα κατώτερο (d) και ένα ανώτερο (D) μέγεθος κόσκινου και εκφράζεται ως d/D (mm). Ανάλογα με τη χρήση χρησιμοποιούμε διάφορα κλάσματα αδρανών. Για παράδειγμα στο σκυρόδεμα

χρησιμοποιούμε τέσσερα κλάσματα (Χαλίκι, Γαρμπίλι, Άμμος 0/4 ή 0/2). Ακριβέστερη εικόνα για το μέγεθος των αδρανών δίνει η κοκκομετρική τους σύνθεση ή διαβάθμιση, δηλαδή ο διαχωρισμός και η κατάταξη των κόκκων σε ομάδες με βάση το μέγεθος. Το μέγεθος των κόκκων προσδιορίζεται με πρότυπα κόσκινα που έχουν καθορισμένες διαμέτρους οπών. Οι κόκκοι που περνούν από το κόσκινο με διάμετρο οπών 7mm και δεν περνούν από το κόσκινο με διάμετρο 3mm θεωρείται ότι έχουν διάμετρο (μέγεθος) μεταξύ 3mm και 7mm. Τα κόσκινα που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα είναι τα κόσκινα των Γερμανικών και Αμερικανικών Κανονισμών. Με βάση τις παραπάνω συμβατικές διαμέτρους των κόκκων προσδιορίζεται η κοκκομετρική σύνθεση ενός μείγματος κόκκων ως ποσοστιαία κατά βάρος αναλογία κάθε κατηγορίας μεγέθους κόκκων υλικού.

1.5. Νερό και Βελτιωτικά (1,2,9)

1.5.1. Νερό

Το νερό είναι ένα από τα δυο ενεργά συστατικά του σκυροδέματος. Μαζί με το τσιμέντο παίρνει μέρος σε σειρά χημικών αντιδράσεων που οδηγούν, με τη δημιουργία ένυδρων κρυστάλλων, στην πήξη και στη σκλήρυνση του μείγματος. Η βασική απαίτηση για το νερό είναι να μην περιέχει συστατικά που μπορούν να βλάψουν ή να επηρεάσουν τις αντιδράσεις ενυδάτωσης.

Για το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος υπάρχει μια ανοχή σχετικά με την ποιότητά του, σε αντίθεση με τα νερά που δρουν εξωτερικά και μόνιμα. Και αυτό γιατί η ποσοστιαία αναλογία του νερού ανάμειξης, και συνεπώς και κάθε ξένης ουσίας μέσα σε αυτό, είναι μικρή και εξάλλου οι ουσίες αυτές δρουν μέχρι να εξαντληθούν. Στην περίπτωση όμως εξωτερικών νερών, όπως το θαλασσινό νερό ή τα νερά αποχετεύσεων, η δράση τους είναι μόνιμη και η ποσότητα των επιβλαβών ουσιών ανεξάντλητη, αφού τα νερά αυτά ανανεώνονται συνεχώς.

Οι κυριότερες από τις χημικές ουσίες που έχουν δυσμενή επίδραση στην εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων, με αποτέλεσμα είτε τη μείωση της τελικής αντοχής, είτε την καθυστέρηση της πήξης είναι η ζάχαρη, τα οξέα, τα λάδια, τα λίπη και οι οργανικές ουσίες.

Το χρησιμοποιούμενο νερό πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγραφή EN 1008 (νερό ανάμειξης). Συμμετέχει σε ποσοστό περίπου 6% κ.β. σε μία τυπική σύνθεση σκυροδέματος. Κατά βάση χρησιμοποιείται το πόσιμο νερό. Σε μερικές περιπτώσεις (άοπλο σκυρόδεμα), μπορεί να χρησιμοποιηθεί θαλασσινό νερό ή νερό γεώτρησης.

1.5.2. Βελτιωτικά

Βελτιωτικά ή χημικά πρόσμικτα (admixture), είναι τα υλικά που προστίθενται σε μικρές ποσότητες σε σχέση με τη μάζα του τσιμέντου, κατά τη διάρκεια ανάμειξης του σκυροδέματος με σκοπό να τροποποιήσουν τις ιδιότητες κυρίως του νωπού αλλά και του σκληρυμένου σκυροδέματος.

Ανάλογα με την κύρια δράση τους, τα υλικά αυτά κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες :

- i. Ρευστοποιητικά
- ii. Αερακτικά
- iii. Επιβραδυντικά
- iv. Επιταχυντικά
- v. Στεγανωτικά

Αναλυτικότερα :

Τα ρευστοποιητικά στηρίζονται στη μείωση της επιφανειακής τάσης του νερού και των δυνάμεων συνοχής μεταξύ των κόκκων του τσιμέντου, με αποτέλεσμα, όσο διαρκεί η δράση τους, να αυξάνουν τη ρευστότητα του σκυροδέματος. Σημαντική εξέλιξη στον τομέα αυτό είναι οι υπερρευστοποιητές που δημιουργούν πολύ μεγάλη ρευστότητα χωρίς αύξηση του απαιτούμενου νερού. Τα υλικά αυτά λύνουν το πρόβλημα της εργασιμότητας και κατ' επέκταση της αντλησιμότητας και διάστρωσης του σκυροδέματος, χωρίς την επιζήμια αύξηση του νερού ανάμειξης, ενώ έχουν επιπρόσθετα και επιβραδυντική δράση.

Τα αερακτικά είναι τα υλικά που προκαλούν την ανάπτυξη μικρών φυσαλίδων, μεγέθους 0.02-0.2 mm, μέσα στο σκυρόδεμα και αυξάνουν τον περιεχόμενο αέρα στα επίπεδα 6-8%. Επιπρόσθετα έχουν και ρευστοποιητική δράση.

Τα επιβραδυντικά στηρίζονται στην απομόνωση των ταχύπηκτων αργιλικών ενώσεων και κυρίως του αργιλικού τριασβεστίου. Η δράση αυτή διαρκεί περίπου 1-2 h, και έτσι το σκυρόδεμα μπορεί να μεταφερθεί στον τόπο διάστρωσής του. Για το λόγο αυτό, τέτοια υλικά χρησιμοποιούνται κατά κανόνα στο έτοιμο σκυρόδεμα.

Αντίθετη δράση έχουν τα επιταχυντικά, τα οποία διευκολύνουν την ενυδάτωση του αργιλικού τριασβεστίου και των πυριτικών ενώσεων.

Οι κανονισμοί ορίζουν την απαιτούμενη ελάχιστη βελτιωτική δράση καθώς και το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο αλλοίωσης των άλλων ιδιοτήτων, επίσης, σύμφωνα και με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό EN 206-1 (Σκυρόδεμα μέρος 1: Προδιαγραφή, επιτελεστικότητα, παραγωγή και συμμόρφωση), η ολική ποσότητα των πρόσμικτων

δεν πρέπει να ξεπερνά την μέγιστη συνιστώμενη από τον κατασκευαστή δόση και σε κάθε περίπτωση να μην ξεπερνά τα 50 g/kg τσιμέντου.

1.6. Πρόσθετα (1,2,9)

1.6.1. Φυσικές και Τεχνητές Ποζολάνες

Τα πρόσθετα συστατικά (additive), είναι τα λεπτομερώς διαμερισμένα ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα με στόχο τη βελτίωση ή τη ρύθμιση κάποιων ιδιοτήτων. Το EN 206-1 αναφέρεται σε δύο κατηγορίες προσθέτων : τα σχεδόν αδρανή πρόσθετα (τύπου I, όπου υπάγονται τα φίλλερ αδρανών με προδιαγραφές σύμφωνες με το ΕΛΟΤ EN 12620 και τα χρώματα) και τα πρόσθετα που έχουν ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες (τύπου II). Τα πυριτικά παραπροϊόντα (τύπου 2) που χρησιμοποιούνται στο τσιμέντο και στο σκυρόδεμα, συμπεριλαμβάνουν τις Ιπτάμενες Τέφρες, σύμφωνα με το EN450 (Ιπτάμενη τέφρα για σκυρόδεμα), και την πυριτική παιπάλη κατά prEN13263 (Πυριτική παιπάλη για σκυρόδεμα), και ταξινομούνται στις εξής πέντε (5) κατηγορίες :

➤ Υλικά με υδραυλικές ιδιότητες. Περιλαμβάνονται λεπτόκοκκα υλικά με υαλώδη πυριτική φάση, η οποία έχει τροποποιηθεί σημαντικά από την παρουσία σε αξιοσημείωτες ποσότητες ιόντων ασβεστίου, μαγνησίου και αργιλίου. Τα υλικά της κατηγορίας αυτής απαιτούν μικρές ποσότητες τσιμέντου Πόρτλαντ ή άλλων διεγερτών για να επιταχύνουν την ενυδάτωσή τους. Η ταχέως ψυχθείσα σκωρία υψικαμίνων και μερικές υψηλού ασβεστίου ιπτάμενες τέφρες ανήκουν στην κατηγορία αυτή.

➤ Υλικά με ποζολανικές και υδραυλικές ιδιότητες. Περιλαμβάνονται υλικά με μείγμα αργιλοπυριτικής και πυριτικής υαλώδους φάσης που περιέχουν μεγάλες ποσότητες ασβεστίου και μαγνησίου. Στην κατηγορία αυτή, όπου τα υλικά εμφανίζουν τόσο υδραυλική όσο και ποζολανική δράση ανήκουν οι υψηλού ασβεστίου ιπτάμενες τέφρες με περιεκτικότητα CaO 10-20%.

➤ Κανονικές ποζολάνες. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται υλικά που συνίστανται από πυριτική υαλώδη φάση τροποποιημένη με άργιλο ή σίδηρο. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι χαμηλού ασβεστίου ιπτάμενες τέφρες.

➤ Υλικά με ισχυρώς ποζολανικές ιδιότητες. Σε αυτή περιλαμβάνονται υλικά με πολύ μεγάλη λεπτότητα, που συνίσταται από SiO₂ σε μη κρυσταλλική φάση. Τα υλικά αυτά, στα οποία ανήκει η πυριτική παιπάλη, έχουν μεγάλη ποζολανική δραστηριότητα.

➤ Υλικά μικρής δραστηριότητας. Τέτοια υλικά είναι η σκωρία υψικαμίνων που ψύχθηκε με αργό ρυθμό ή οι τέφρες βάσης. Τα υλικά αυτά πρέπει να

αλεσθούν σε πολύ μεγάλη λεπτότητα για να αποκτήσουν αποδεκτές ιδιότητες (κυρίως αντοχές), όταν συνεργάζονται με το τσιμέντο.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ιδιότητες των παραπάνω προσθέτων, ενισχύονται σημαντικά εάν τα υλικά αυτά αλεσθούν σε μεγάλες λεπτότητες. Τα περισσότερα από τα παραπροϊόντα, των οποίων προβλέπεται η προσθήκη στο EN 197-1 (Τσιμέντο μέρος 1: Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα) και στο EN 206-1 προέρχονται από παραγωγική διαδικασία που περιλαμβάνει διεργασία μετασχηματισμού σε υψηλές θερμοκρασίες. Μόνο φυσικές ποζολάνες, ο μετακαολίνης και ο ασβεστόλιθος είναι φυσικά υλικά. Ο ασβεστόλιθος είναι το μόνο υλικό που δεν περιέχει πυρίτιο, η δράση του οποίου κατά την ενυδάτωση θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την εκδήλωση συμπεριφοράς των επιμέρους τσιμέντων. Δικαιολογείται επομένως η μη συμμετοχή του ασβεστόλιθου στα βιομηχανικά παραπροϊόντα.

1.7. Χάλυβες οπλισμένου σκυροδέματος (5,12)

1.7.1. Γενικά

Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό με υψηλή αντοχή σε θλίψη αλλά με μικρή εφελκυστική αντοχή, γι' αυτό και η ανάληψη των εφελκυστικών δυνάμεων στις κατασκευές σκυροδέματος γίνεται από τον χάλυβα οπλισμού, που είναι σε μορφή ράβδων κυκλικής διατομής. Οι ράβδοι φέρουν συνήθων επιφανειακές νευρώσεις, που βελτιώνουν τη συνάφεια με το σκυρόδεμα μέσω μηχανικής αλληλεμπλοκής. Στην Ελλάδα παράγεται και κυκλοφορεί χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος σε μορφή ευθύγραμμων ράβδων, ρολών, ηλεκτροσυγκολλητών πλεγμάτων, προκατασκευασμένων κλωβών συνδετήρων και προκατασκευασμένων ηλεκτροσυγκολλητών δικτυωμάτων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι από το 2005 η μόνη ποιότητα χάλυβα που πρακτικά χρησιμοποιείται στην Ελλάδα είναι η B500C και για τα πλέγματα η B500A.

Οι χάλυβες για τον οπλισμό του σκυροδέματος κατατάσσονται σύμφωνα με τις κοινοτικές και ελληνικές διατάξεις στα υλικά ασφαλείας. Λόγω της έντονης σεισμικής δραστηριότητας που παρουσιάζει η Ελλάδα, η ανάγκη ελέγχου της ποιότητας του χάλυβα είναι υψίστης σημασίας. Σήμερα, η κατηγορία, οι διαστάσεις, οι αντοχές και οι λοιπές απαιτήσεις χαρακτηρισμών που πρέπει να ικανοποιούν οι χάλυβες του οπλισμένου σκυροδέματος προδιαγράφονται από τον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (Κ.Τ.Χ. 2008), καθώς επίσης και σε διάφορα Πρότυπα στα οποία γίνονται παραπομπές όπως για παράδειγμα το ΕΛΟΤ EN 10080 (Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος - Συγκολλήσιμοι χάλυβες - Γενικές απαιτήσεις), και τα ΕΛΟΤ 1421-2 (Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος-

Συγκολλησιμοι χάλυβες - Μέρος 2: Τεχνική κατηγορία B500A) και ΕΛΟΤ 1421-3 (Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος- Συγκολλησιμοι χάλυβες - Μέρος 3: Τεχνική κατηγορία B500C).

Σύμφωνα λοιπόν με τον Κ.Τ.Χ. και τα διάφορα Πρότυπα, οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος διακρίνονται σύμφωνα με:

➤ Τη μέθοδο παραγωγής, που μπορεί να είναι θερμή έλαση χωρίς περαιτέρω κατεργασία (ΘΕ-Χ), θερμή έλαση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία (ΘΕ-Θ), και ψυχρής κατεργασίας, με ολκή ή έλαση του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση (χάλυβες ΨΚ-Ο) ή με στρέψη του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση (χάλυβες ΨΚ-Σ) ή με συνδυασμό των παραπάνω.

➤ Τη μορφή επιφάνειας της ράβδου, σε λείους χάλυβες κυκλικής διατομής, σε χάλυβες με ανάγλυφες νευρώσεις, υψηλής συνάφειας και σε χάλυβες με κοιλότητες (έγγλυφες αυλακώσεις).

➤ Τη ολκιμότητα, σε χάλυβες χαμηλής ολκιμότητας, χάλυβες μέσης ολκιμότητας και χάλυβες υψηλής ολκιμότητας.

➤ Τη συγκολλησιμότητα σε χάλυβες μη συγκολλησίμους ή συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις και σε χάλυβες συγκολλησίμους.

➤ Την αντοχή τους σε διάβρωση, σε κοινούς χάλυβες, που είναι κράματα σιδήρου με άνθρακα (Fe-C) και με άλλα στοιχεία σε μικρές περιεκτικότητες και σε ανοξείδωτους χάλυβες, που είναι κράματα σιδήρου με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο (Cr) 12%. Οι χάλυβες αυτοί είναι ανθεκτικοί σε διάβρωση. Η αντοχή τους σε διαβρωτικό περιβάλλον είναι μεγαλύτερη αν περιέχουν και άλλα κραματικά στοιχεία όπως νικέλιο (Ni), μολυβδένιο (Mo), τιτάνιο (Ti) κ.λ.π.

1.7.2. Χαρακτηριστικά χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος

1.7.2.1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Οι ονομαστικές διαμέτροι δίνονται στον Πίνακα 1.2. Στον ίδιο πίνακα, για κάθε ονομαστική διάμετρο, δίνονται επίσης το πεδίο εφαρμογής καθώς και η ονομαστική διατομή, η ονομαστική μάζα και οι ανοχές ως προς την ονομαστική μάζα.

Πίνακας 1.2. Ονομαστικές διαμέτρους, ονομαστικές διατομές, ονομαστική μάζα και ανοχές ως προς την ονομαστική μάζα - Πεδίο εφαρμογής

| Ονομ. διάμετρος (mm) | Πεδίο εφαρμογής | | | | | Ονομ. διατομή (mm ²) | Ονομ. μάζα/μέτρο (kg/m) | Ανοχές μάζας/μέτρο (%) |
|----------------------------|-----------------|--|-------|--|-------|--|-------------------------------|------------------------------|
| | Ράβδοι | Κουλούρες και ευθυγραμμισμένα προϊόντα | | Ηλεκτρο- συγκολλημένα πλέγματα και δικτυώματα | | | | |
| | | B500C | B500A | B500C | B500A | | | |
| 5,0 | | ✓ | | ✓ | | 19,6 | 0,154 | ±6□ |
| 5,5 | | ✓ | | ✓ | | 23,8 | 0,187 | ±6□ |
| 6,0 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 28,3 | 0,222 | ±6□ |
| 6,5 | | ✓ | | ✓ | | 33,2 | 0,260 | ±6□ |
| 7,0 | | ✓ | | ✓ | | 38,5 | 0,302 | ±6□ |
| 7,5 | | ✓ | | ✓ | | 44,2 | 0,347 | ±6□ |
| 8,0 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 50,3 | 0,395 | ±6□ |
| 10,0 | ✓ | | ✓ | | ✓ | 78,5 | 0,617 | ±4,5 |
| 12,0 | ✓ | | ✓ | | ✓ | 113 | 0,888 | ±4,5 |
| 14,0 | ✓ | | ✓ | | ✓ | 154 | 1,21 | ±4,5 |
| 16,0 | ✓ | | ✓ | | ✓ | 201 | 1,58 | ±4,5 |
| 18,0 | ✓ | | | | | 254 | 2,00 | ±4,5 |
| 20,0 | ✓ | | | | | 314 | 2,47 | ±4,5 |
| 22,0 | ✓ | | | | | 380 | 2,98 | ±4,5 |
| 25,0 | ✓ | | | | | 491 | 3,85 | ±4,5 |
| 28,0 | ✓ | | | | | 616 | 4,83 | ±4,5 |
| 32,0 | ✓ | | | | | 804 | 6,31 | ±4,5 |
| 40,0 | ✓ | | | | | 1257 | 9,86 | ±4,5 |

1.7.2.2. Μηχανικά χαρακτηριστικά

Τα υποχρεωτικά όρια των μηχανικών χαρακτηριστικών σε εφελκυσμό των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος δίνονται στον Πίνακα 1.3.

Για το όριο διαρροής f_y , οι αναφερόμενες στον Πίνακα τιμές είναι χαρακτηριστικές, ποσοστημορίου 95%. Για τη συνολική ανηγμένη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο, ϵ_u , για τον λόγο f_t/f_y και για τον λόγο $f_{y,act}/f_{y,nom}$ οι αναφερόμενες στον Πίνακα τιμές είναι χαρακτηριστικές ποσοστημορίου 90%.

Οι τιμές των f_y και f_t υπολογίζονται με βάση την ονομαστική διατομή.

Όταν δεν υπάρχει διακριτό όριο διαρροής, θα προσδιορίζεται το συμβατικό όριο διαρροής $f_{0,2}$.

Πίνακας 1.3. Όρια μηχανικών ιδιοτήτων χαλύβων σε εφελκυσμό κατά ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3 (Χαρακτηριστικές τιμές, Xk)

| Ιδιότητα | Τεχνική κατηγορία ποιότητας | |
|--|---|------------------------------|
| | B500A | B500C |
| Όριο διαρροής, f_y (MPa) | ≥ 500 | ≥ 500 |
| Λόγος της πραγματικής προς την ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής, $f_{y,act}/f_{y,nom}$ □ | -- | $\leq 1,25$ □ |
| Λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής, f_t/f_y | $\geq 1,05$ ($\geq 1,03$ για $d < 6\text{mm}$) | $\geq 1,15$ $\leq 1,35$ □ |
| Συνολική ανηγμένη παραμόρφωση (επιμήκυνση) στο μέγιστο φορτίο ϵ_u (%) | $\geq 2,5$ (≥ 2 για $d < 6\text{mm}$) | $\geq 7,5$ □ |

1.7.2.3. Χημικά χαρακτηριστικά

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος είναι χάλυβες ελαφρά κραματωμένοι ή μη κραματωμένοι. Η διαδικασία παραγωγής (μεταλλουργική μέθοδος) και ο τύπος της αποξείδωσης του χάλυβα επαφίενται στην κρίση του παραγωγού.

Οι περιορισμοί που αναφέρουμε στη συνέχεια για τη χημική σύσταση εξασφαλίζουν τη συγκολλησιμότητα και την ανθεκτικότητα στον χρόνο των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος.

Η **χημική σύσταση** αποτελεί κριτήριο της συγκολλησιμότητας των οπλισμών. Οι μέγιστες επιτρεπτές τιμές για τα στοιχεία C, P, S, N και του Cu καθώς και για το ισοδύναμο σε άνθρακα δίνονται στον Πίνακα 1.4. Το ισοδύναμο σε άνθρακα εκφράζεται με το άθροισμα:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15}$$

Όπου **C, Mn, Cr, Mo, V, Cu** και **Ni** είναι τα επί της εκατό ποσοστά των στοιχείων αυτών. Οι χάλυβες θεωρούνται συγκολλησιμοι, όταν η μέγιστη περιεκτικότητα σε άνθρακα C, θείο S, φώσφορο P, άζωτο N, καθώς και η μέγιστη ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα C_{eq} δεν υπερβαίνουν τις τιμές που δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 1.4.

Πίνακας 1.4. Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές για τη χημική σύσταση (περιεκτικότητα % κ.β.) κατά ΕΛΟΤ EN 10080.

| | Άνθρακας C ⁽²⁾ | Θείο S | Φώσφορος P | Άζωτο N ⁽¹⁾ | Χαλκός Cu | Ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα C _{eq} ⁽²⁾ |
|---|----------------------------------|---------------|-------------------|-------------------------------|------------------|---|
| Ανάλυση ρευστού χάλυβα κατά τη χύτευση | 0,22 | 0,050 | 0,050 | 0,012 | 0.80 | 0,50 |
| Ανάλυση τελικού προϊόντος | 0,24 | 0,055 | 0,055 | 0,014 | 0.85 | 0,52 |

(1) Υψηλότερες τιμές σε άζωτο επιτρέπονται εάν υπάρχουν επαρκείς ποσότητες στοιχείων που το δεσμεύουν

(2) Επιτρέπεται η υπέρβαση των μέγιστων τιμών για τον άνθρακα κατά 0,03% κ.β., με την προϋπόθεση ότι μειώνονται αντίστοιχα οι ισοδύναμες τιμές σε άνθρακα κατά 0,02% κ.β.

1.7.2.4. Συμπεριφορά σε ακραίες θερμοκρασίες

Για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος, ως ακραίες μπορούν να θεωρηθούν θερμοκρασίες μικρότερες των 0°C και μεγαλύτερες των 200°C περίπου. Στις περιοχές των ακραίων θερμοκρασιών, ενδέχεται να υπάρξουν μεταβολές των μηχανικών χαρακτηριστικών των χάλυβων, αλλά και του σκυροδέματος και της συνάφειάς του με τον οπλισμό. Μετά την επάνοδο των χάλυβων στην θερμοκρασία περιβάλλοντος, ορισμένες από τις μεταβολές είτε παραμένουν είτε αίρονται μερικώς ή ολικώς.

Οι ιδιότητες που επηρεάζονται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας είναι κυρίως το όριο διαρροής, η εφελκυστική αντοχή και η παραμόρφωση.

Η συμπεριφορά των χαλύβων σε ακραίες θερμοκρασίες επηρεάζεται από:

- Τη θερμοκρασία έκθεσης
- Τον χρόνο έκθεσης
- Τη χημική σύσταση και τη μέθοδο παραγωγής.

1.8. ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (1,5)

1.8.1. Γενικά

Η μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Αρχικά, με την επιλογή των συστατικών (είδος τσιμέντου, αδρανών, νερού και προσθέτων - πρόσμικτων), η οποία γίνεται σύμφωνα με τις κοινές τεχνικές προδιαγραφές για το σκυρόδεμα. Σε δεύτερη φάση πραγματοποιείται ο καθορισμός της αναλογίας ανάμειξης των συστατικών του σκυροδέματος, δηλαδή του τσιμέντου, του νερού, των αδρανών και τυχόν χρησιμοποιούμενων προσθέτων, έτσι ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές που έχουν τεθεί από τον κατασκευαστή ή τον υπεύθυνο μηχανικό ενός έργου. Η διαδικασία αυτή αποτελεί μία περισσότερο εμπειρική και λιγότερο επιστημονική διαδικασία, ώστε να προκύψει σκυρόδεμα με το ελάχιστο δυνατό κόστος, ικανοποιώντας ταυτόχρονα και συγκεκριμένες απαιτήσεις. Οι απαιτήσεις αυτές αφορούν σε μία σειρά από παραμέτρους επιτελεστικότητας, όπως είναι η αντοχή και η εργασιμότητα, ενώ παράλληλα θα πρέπει να ικανοποιούνται συγκεκριμένες απαιτήσεις ως προς το μέγιστο κόκκο αδρανών, την ελάχιστη ποσότητα τσιμέντου, το μέγιστο λόγο N/T κ.τ.λ., ώστε να εξασφαλίζεται η προστασία των οπλισμών έναντι διάβρωσης αλλά ίσως και άλλες ιδιότητες (π.χ. η ανθεκτικότητα σε παγετό κ.α.).

Το κόστος των υλικών του σκυροδέματος καθορίζεται κυρίως από το κόστος του τσιμέντου. Επομένως είναι σκόπιμο όχι μόνο να χρησιμοποιείται η ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα τσιμέντου στο ανάμιγμα, αλλά και το ίδιο το τσιμέντο να είναι χαμηλού κόστους περιέχοντας προσμίξεις (π.χ. ποζολανικές), όπου φυσικά αυτό είναι δυνατό και στο βαθμό που επιτρέπεται, ώστε να μην επηρεάζονται δυσμενώς τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος.

1.8.2. Διαδικασία Μελέτης Σύνθεσης

Η μελέτη σύνθεσης μπορεί να γίνει μόνο εργαστηριακά, βάσει μιας διαδικασίας διαδοχικών δοκιμών, χρησιμοποιώντας τα συγκεκριμένα υλικά που είναι διαθέσιμα για την παρασκευή του σκυροδέματος. Η μελέτη σύνθεσης κάθε ποιότητας σκυροδέματος πρέπει να γίνεται στην αρχή κάθε έργου και να επαναλαμβάνεται όταν:

- α) αλλάζει η πηγή λήψης αδρανών

β) τα αδρανή παρουσιάζουν διαφορετική διαβάθμιση από εκείνη που είχαν στη μελέτη σύνθεσης

γ) αλλάζουν τα πρόσμικτα ή ο τύπος του τσιμέντου

δ) το μίγμα παρουσιάζει τάσεις απόμιξης ή η κάθισή του δεν ικανοποιεί τις σχετικές απαιτήσεις μονολότι τηρούνται οι αναλογίες της μελέτης σύνθεσης

Παρακάτω περιγράφεται μια διαδικασία, βασισμένη στις Αμερικάνικες Προδιαγραφές (ACI 211.1.1-91), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση μιας προκαταρκτικής σύνθεσης σκυροδέματος χωρίς ειδικές απαιτήσεις.

1) Αρχικά προσδιορίζεται η απαιτούμενη περιεκτικότητα νερού στο ανάμιγμα, ανάλογα με το μέγιστο κόκκο αδρανών και την επιθυμητή κάθιση. Συγκεκριμένες ελάχιστες τιμές κάθισης δίνονται στον Πίνακα 1.5, ενώ σαφή όρια των τιμών κάθισης δίνονται στον Πίνακα 1.6. Οι τιμές αυτές ισχύουν για συνηθισμένα στοιχεία, συμπύκνωση με καλή δόνηση, μέσες θερμοκρασίες και συνηθισμένες πυκνότητες οπλισμού (για οπλισμένα στοιχεία). Ο προσδιορισμός του νερού γίνεται από τον Πίνακα 1.7., που δίνει και τον αναπόφευκτο όγκο κενών. Οι τιμές του Πίνακα 1.7. ισχύουν για σκυρόδεμα θραυστών αδρανών χωρίς αερακτικά πρόσμικτα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.5. Ελάχιστες συνιστώμενες τιμές κάθισης

| Είδος στοιχείου | Κάθιση (mm) |
|---|-------------|
| Ογκώδη άοπλα στοιχεία, οδοστρώματα | 25 |
| Δάπεδα, πεζοδρόμια, βάθρα | 50 |
| Πέδιλα θεμελίωσης, οπλισμένοι τοίχοι αντιστήριξης | 50 |
| Υποστρώματα | 80 |
| Πλάκες, Τοιχεία, Δοκοί | 100 |

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.6. Μέγιστες και ελάχιστες τιμές κάθισης

| Είδος στοιχείου | Μέγιστη κάθιση (mm) | Ελάχιστη κάθιση (mm) |
|---|---------------------|----------------------|
| Οπλισμένοι τοίχοι θεμελίων και πέδιλα | 75 | 25 |
| Άοπλα θεμέλια, τοιχεία και εγκιβωτισμού, τοιχεία στο έδαφος | 75 | 25 |
| Δοκοί και οπλισμένα τοιχεία | 100 | 25 |
| Υποστυλώματα | 100 | 25 |
| Δάπεδα, πεζοδρόμια, πλάκες | 75 | 25 |
| Ογκώδη στοιχεία | 50 | 25 |

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.7. Απαιτούμενη ποσότητα νερού ανάμειξης συναρτήσει κάθισης και μέγιστου κόκκου

| | Νερό σε kg/m ³ σκυροδέματος για μέγιστο κόκκο αδρανών (mm) | | | | | | | |
|-----------------|---|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| Κάθιση (mm) | 9.5 | 12.5 | 19 | 25 | 37.5 | 50 | 75 | 150 |
| 25-50 | 207 | 199 | 190 | 179 | 166 | 154 | 130 | 113 |
| 75-100 | 228 | 216 | 205 | 193 | 181 | 169 | 145 | 124 |
| 150-175 | 243 | 228 | 216 | 202 | 190 | 178 | 160 | --- |
| Όγκος κενών (%) | 3 | 2.5 | 2 | 1.5 | 1 | 0.5 | 0.3 | 0.2 |

2) Στη συνέχεια, εκλέγεται ο λόγος N/T από τον παρακάτω Πίνακα (1.8.), ανάλογα με την απαιτούμενη μέση συμβατική αντοχή του σκυροδέματος σε 28 ημέρες και τον τύπο του τσιμέντου. Ως μέγιστος λόγος N/T ορίζεται κατά τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Κ.Τ.Σ.) το 0.70 για επιχρισμένο σκυρόδεμα ή το 0.67 για ανεπίχριστο ή βαμμένο ή με επικάλυψη μαρμάρου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.8. Λόγος N/T συναρτήσει μέσης συμβατικής αντοχής 28 ημερών (MPa), τύπου δοκιμίου και τύπου τσιμέντου.

| N/T | Σύνθετο Τσιμέντο Portland (Τύπου CEM II / 32.5) | | Τσιμέντο Portland (Τύπου CEM I / 42.5) | |
|------|--|-------------------------|---|-------------------------|
| | Κύβος 150 mm | Κύλινδρος 150x300 mm | Κύβος 150 mm | Κύλινδρος 150x300 mm |
| 0.40 | 43 | 36 | 49 | 41 |
| 0.5 | 34 | 27 | 41 | 34 |
| 0.6 | 28 | 22 | 34 | 27 |
| 0.7 | 23 | 18 | 28 | 22 |
| 0.8 | 19 | 15 | 24 | 19 |

3) Κατόπιν υπολογίζεται η περιεκτικότητα του αναμίγματος σε τσιμέντο, από την περιεκτικότητα νερού και τον λόγο N/T.

Επισημαίνεται, ότι για να επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό επίπεδο ανθεκτικότητας (αλλά, δευτερευόντως, και να εξασφαλισθούν ομαλές και λείες επιφάνειες σκυροδέματος), πρέπει η ποσότητα τσιμέντου στο ανάμιγμα να είναι μεγαλύτερη από μία ελάχιστη τιμή, που σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ. ορίζεται ως 270 kg/m^3 για επιχρισμένο σκυρόδεμα χωρίς ειδικές απαιτήσεις και σε 300 kg/m^3 για ανεπίχριστο ή βαμμένο ή με επικάλυψη μαρμάρου.

4) Ακολούθως, υπολογίζεται ο συνολικός στερεός όγκων των αδρανών σε 1 m^3 αναμίγματος. Αυτό γίνεται αφαιρώντας από το 1 m^3 τον όγκο του νερού, του τσιμέντου και του αέρα των κενών:

➤ Όγκος στερεών αδρανών / $m^3 = 1 - m_T/\rho_T - m_N/1000 - \text{Όγκος αέρα}$

όπου :

- m_T = μάζα τσιμέντου (kg) σε $1m^3$ σκυροδέματος
- ρ_T = πυκνότητα στερεών του τσιμέντου (συνήθως ίση με $3100 \text{ kg}/m^3$)
- m_N = μάζα νερού (kg) σε $1m^3$ σκυροδέματος

5) Τέλος, αν για την παρασκευή σκυροδέματος χρησιμοποιούνται και ορυκτά πρόσθετα, αυτά λαμβάνονται υπόψη στην παραπάνω διαδικασία για τον προσδιορισμό του λόγου N/T και της ελάχιστης ποσότητας τσιμέντου ως ισοδύναμη ποσότητα τσιμέντου, θεωρώντας ότι μία μονάδα βάρους τσιμέντου ισοδυναμεί (από άποψη ιδιοτήτων του σκυροδέματος) με k μονάδες βάρους του πρόσθετου, όπου k ο συντελεστής ενεργότητας. Έτσι, η ισοδύναμη ποσότητα T ισούται με την πραγματική μάζα τσιμέντου συν k επί τη μάζα του πρόσθετου. Οι τιμές του συντελεστή k, εξαρτώνται από τον τύπο πρόσθετου και καθορίζονται στο Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206-1.

Κλείνοντας, πρέπει να τονίσουμε, ότι η παραπάνω διαδικασία είναι εμπειρική και δίνει προσεγγιστικά αποτελέσματα, τα οποία θα πρέπει να ελεγχθούν στο εργαστήριο. Έτσι, το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται βάσει της παραπάνω μελέτης σύνθεσης θα πρέπει να ελεγχθεί κυρίως ως προς την εργασιμότητα και την αντοχή, και ενδεχομένως ως προς τον όγκο κενών. Οι τελικές αναλογίες σύνθεσης προκύπτουν συνήθως μετά από αρκετές δοκιμές.

1.9. Ιδιότητες σκυροδέματος (1,2)

1.9.1. Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

Νωπό σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται το σκυρόδεμα που μόλις έχει παρασκευαστεί περιέχοντας όλα τα συστατικά του. Παραμένει σε ρευστή-πλαστική κατάσταση και δύναται να συμπυκνωθεί-μορφοποιηθεί σε καλούπια διατηρώντας την ομοιογένεια του.

1.9.1.1. Εργασιμότητα

Με τον όρο εργασιμότητα ή εργάσιμο χαρακτηρίζεται γενικά, η ευκολία με την οποία είναι δυνατόν να μεταφερθεί, διαστρωθεί και συμπυκνωθεί το σκυρόδεμα. Σύμφωνα με έναν άλλον ορισμό, η εργασιμότητα ορίζεται ως το έργο που απαιτείται για να υπερνικηθούν οι εσωτερικές τριβές και να επιτευχθεί πλήρης συμπύκνωση.

Το εργάσιμο είναι μια πολύ χρήσιμη έννοια στην πράξη, γιατί αποδίδει ακριβώς αυτό που ενδιαφέρει τον κατασκευαστή κατά το χρόνο της σκυροδέτησης. Είναι μια σύνθετη ιδιότητα που συνδέεται με άλλες ρεολογικές ιδιότητες, όπως οι παρακάτω:

- 1) Τη ρευστότητα, που σημαίνει την ευκολία με την οποία ρέει ένα υλικό. Η ρευστότητα εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του νερού ανάμειξης.
- 2) Την πλαστικότητα, δηλαδή η ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς διακοπή της συνέχειάς του.
- 3) Τη συνοχή, που εκφράζει το αποτέλεσμα των δυνάμεων που έλκουν τα μόρια μεταξύ τους και επομένως είναι μία από τις ιδιότητες που συντελούν στην πλαστικότητα.
- 4) Τη συμπτκνωσιμότητα, που εκφράζει τη δυνατότητα του υλικού να συμπτκνωθεί και εξαρτάται από τον αρχικό βαθμό συμπύκνωσης.

Το εργάσιμο αυξάνεται γενικά όσο αυξάνεται το νερό ανάμειξης, δηλαδή η ρευστότητα του μείγματος. Η ρευστότητα εξαρτάται περισσότερο από την ποσότητα του νερού ανάμειξης και πολύ λιγότερο από το λόγο N/T. Για την ίδια ρευστότητα το απαιτούμενο νερό γενικά ελαττώνεται, όσο ελαττώνεται η ειδική επιφάνεια των αδρανών. Έτσι ελαττώνεται όσο αυξάνεται ο μέγιστος κόκκος και η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών κατεβαίνει. Από την άλλη πλευρά όμως, η αύξηση του μεγίστου κόκκου και των χονδρόκοκκων αδρανών συντελεί στη μείωση της πλαστικότητας και της συνοχής, με κίνδυνο την απόμειξη του νωπού σκυροδέματος.

Η μέτρηση της εργασιμότητας δεν μπορεί να γίνει άμεσα. Γι' αυτό έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι με τις οποίες μετριέται μία ή περισσότερες από τις άλλες ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Με τις μετρήσεις αυτές αποκτάται μία έμμεση κατά προσέγγιση εικόνα του βαθμού εργασιμότητας του σκυροδέματος. Η κυριότερη από τις μεθόδους είναι η κάθιση σύμφωνα με την οποία ένας μεταλλικός κόλουρος κώνος προτυποποιημένων διαστάσεων, ανοιχτός πάνω και κάτω, τοποθετείται σε ειδική τράπεζα, πληρώνεται με σκυρόδεμα και συμπυκνώνεται με καθορισμένο τρόπο. Μετά την πλήρωση αφαιρείται ο κώνος κατακόρυφα, οπότε το σκυρόδεμα παραμορφώνεται και κάθεται. Μετριέται η διαφορά του ύψους του υλικού μετά την πτώση, σε σχέση με το αρχικό του ύψος και η προκύπτουσα τιμή, σε mm, είναι η κάθιση.

1.9.1.2 . Μοναδιαίο βάρος

Πυκνότητα ή μοναδιαίο βάρος ορίζεται ως το βάρος (kg) ενός m³ σκυροδέματος. Εκφράζει το βαθμό συμπύκνωσης του μείγματος και σχετίζεται άμεσα με την τιμή της αντοχής. Ένα τυπικό σκυρόδεμα έχει μοναδιαίο βάρος περίπου 2300 kg/m³.

1.9.2. Ιδιότητες σκληρυμένου σκυροδέματος

Σκληρυμένο σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται το σκυρόδεμα που έχει στερεοποιηθεί και έχει αναπτύξει μηχανικές αντοχές.

1.9.2.1. Μηχανική αντοχή σκυροδέματος

Η αντοχή του σκυροδέματος σε μηχανική καταπόνηση θεωρείται ως η πιο σημαντική ιδιότητά του και εκφράζει την ικανότητα του υλικού να ανταπεξέλθει στη μηχανική καταπόνηση που υπόκειται. Η ποσοτική της εκτίμηση δίνεται σε μονάδες φορτίου ανά επιφάνεια (N/mm^2 ή MPa). Η αντοχή συνδέεται άμεσα με τη δομή της τσιμεντόπαστας και είναι μία αναντικατάστατη μεταβλητή στο σχεδιασμό των κατασκευών. Η αντοχή του σκυροδέματος, σε συγκεκριμένη ηλικία, συντήρηση και θερμοκρασία, θεωρείται ότι εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες :

- ❖ Τον λόγο N/T
- ❖ και το βαθμό συμπύκνωσης

1.9.2.2 Μεταβολή όγκου

Η ιδιότητα αυτή αναφέρεται στις μεταβολές του όγκου του σκυροδέματος που οφείλονται στη μετακίνηση του περιεχόμενου νερού προς το περιβάλλον ή στο εσωτερικό του σκυροδέματος, στις θερμοκρασιακές μεταβολές, στην ανεπιθύμητη δράση διαφόρων συστατικών που άγονται στο σκυρόδεμα με τον αέρα ή το νερό.

1.9.2.3 Ερπυσμός και Συρρίκνωση

Τόσο ο ερπυσμός (creep), όσο και η συρρίκνωση (shrinkage), αποτελούν δύο αιτίες δημιουργίας παραμορφώσεων στο σκυρόδεμα και φαίνεται να προκαλούνται εξαιτίας της κίνησης του νερού στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Στην περίπτωση της συρρίκνωσης η αιτία κίνησης του νερού είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες (διαφορά πίεσης και θερμοκρασίας) που προκαλούν τη διάχυση του νερού προς το εξωτερικό περιβάλλον με τη διαδικασία της εξάτμισης. Αντίθετα, στο φαινόμενο του ερπυσμού, η εφαρμογή θλιπτικής τάσης είναι αυτή που προκαλεί την κίνηση του νερού μέσα στη μάζα του σκυροδέματος. Για τον λόγο αυτό ερπυσμός συμβαίνει και στο κορεσμένο σε υγρασία σκυρόδεμα και είναι γνωστός σαν «βασικός ερπυσμός».

1.10. Αντοχή σκυροδέματος (11)

1.10.1. Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος

Από τη φύση του το σκυρόδεμα είναι ανομοιογενές υλικό. Η ανομοιογένεια αυτή οφείλεται σε μικροδιαφορές στην ποιότητα των υλικών (κυρίως των αδρανών) και την αναλογία τους στο μίγμα (λόγω π.χ. απορρύθμισης των ζυγιστηρίων, του αναμκτήρα κλπ) και σε διαφορές στη διάστρωση, συμπύκνωση ή συντήρηση του σκυροδέματος από θέση σε θέση κατασκευής (π.χ. περιοχές μεγάλης ή μικρής πυκνότητας οπλισμού, επιφάνεια ή εσωτερικό ενός δομικού στοιχείου, βάση ενός υποστρώματος ή τοιχώματος κλπ). Λόγω της ανομοιομορφίας αυτής η ποιότητα, και πιο συγκεκριμένα η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε ένα σημείο της κατασκευής, f_c , θεωρείται σαν τυχαία μεταβλητή, χαρακτηρίζεται δηλ από μία πιθανοτική κατανομή, με μέσο όρο, f_{cm} , τυπική απόκλιση s κλπ.

Καθοριστικά για την ασφάλεια μιας κατασκευής είναι τα αδύνατα σημεία της. Γι' αυτό ο σχεδιασμός των δομικών στοιχείων βασίζεται όχι στη μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, f_{cm} , αλλά σε μία μικρότερη τιμή, τη χαρακτηριστική αντοχή, f_{ck} . Κατά γενικά αποδεκτή σήμερα σύμβαση, σαν χαρακτηριστική αντοχή ορίζεται η τιμή εκείνη κάτω από την οποία έχει πιθανότητα 5% να βρεθεί η αντοχή ενός τυχαίου δοκιμίου σκυροδέματος (δηλαδή αν ολόκληρη η ποσότητα του σκυροδέματος μετατρεπόταν σε δοκίμια, μόνο το ποσοστό υποαντοχής $p=5\%$ των αντοχών αυτών των δοκιμίων θα ήταν κάτω από την χαρακτηριστική αντοχή και το υπόλοιπο 95% θα ήταν πάνω απ' αυτήν). Έτσι αν η αντοχή του σκυροδέματος ακολουθεί την κανονική κατανομή πιθανοτήτων (κατανομή Gauss), με μέση τιμή f_{cm} και τυπική απόκλιση s , είναι: $f_{ck} = f_{cm} - 1,645 X s$ όπου ο συντελεστής $-1,645$ αντιστοιχεί σε τιμή της σωρευτικής συνάρτησης κατανομής κατά Gauss ίση με 5%. Έτσι δύο σκυροδέματα με διαφορετική διασπορά ή διαφορετικό έλεγχο ποιότητας και επομένως διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης, s , θεωρούνται ισοδύναμα από άποψης ασφάλειας, αν έχουν την ίδια χαρακτηριστική αντοχή, f_{ck} . Αυτό σημαίνει πως αυτό που έχει τη μεγαλύτερη διασπορά ή το χειρότερο έλεγχο ποιότητας (δηλαδή τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση), θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη μέση τιμή f_{cm} και επομένως μεγαλύτερο κόστος.

1.10.2. Κατηγορίες σκυροδέματος:

Οι νεότεροι κανονισμοί ορίζουν κατηγορίες σκυροδέματος, με βάση την χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή, f_{ck} . Έτσι σύμφωνα με τον νέο Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος οι κατηγορίες σκυροδέματος είναι οι ακόλουθες:

Πίνακας 1.9. Κατηγορίες σκυροδέματος

| Κατηγορία σκυροδέματος | f_{ck},κυλίνδρου (MPa) | f_{ck},κύβου (MPa) |
|-----------------------------------|--|--|
| C8/10 | 8 | 10 |
| C12/15 | 12 | 15 |
| C16/20 | 16 | 20 |
| C20/25 | 20 | 25 |
| C25/30 | 25 | 30 |
| C30/37 | 30 | 37 |
| C35/45 | 35 | 45 |
| C40/50 | 40 | 50 |
| C45/55 | 45 | 55 |
| C50/60 | 50 | 60 |

όπου ο πρώτος αριθμός κάθε κατηγορίας ορίζει την χαρακτηριστική αντοχή κυλίνδρου (f_{ck}), ενώ ο δεύτερος την χαρακτηριστική αντοχή κύβου ($f_{ck,cube}$) σε MPa, στις 28 ημέρες.

1.11. Ανθεκτικότητα (3,5)

1.11.1. Εισαγωγή

Η ανθεκτικότητα εκφράζει τη δυνατότητα του σκυροδέματος να διατηρεί την αντοχή του και τη λειτουργικότητά του στην κατασκευή, στη μέγιστη δυνατή διάρκεια. Συγκεκριμένα αναφέρεται στην ικανότητα του υλικού να μη φθείρεται από το περιβάλλον (φυσικό ή μη) στο οποίο εκτίθεται. Η φθορά είναι το αποτέλεσμα των φυσικών και χημικών δράσεων που συμβαίνουν μεταξύ των συστατικών του σκυροδέματος και των συστατικών (διαβρωτικών μέσων) που συνιστούν το περιβάλλον όπου εκτίθεται. Εκδηλώνεται με ρωγμές και διογκώσεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος αλλά και με μείωση της μηχανικής αντοχής του και απώλεια μάζας.

Έτσι, το πρόβλημα της ανθεκτικότητας σε διάρκεια θεωρείται σήμερα διεθνώς ίσως το σημαντικότερο πρόβλημα των κατασκευών σκυροδέματος. Για αυτό και η επίλυσή του μελετάται τουλάχιστον με την ίδια σοβαρότητα που επιδεικνύεται στα προβλήματα μηχανικής συμπεριφοράς και αντοχής. Η άποψη αυτή ενισχύεται θεωρώντας αφενός το αρκετά μεγάλο κόστος των επισκευών ή ανακατασκευών έργων από σκυρόδεμα, αφετέρου την άμεση σχέση μεταξύ ανθεκτικότητας των υλικών σε διάρκεια και σεβασμού προς το περιβάλλον.

1.11.2. Υδατοπερατότητα

Το πλέον καθοριστικό στοιχείο για την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε διάρκεια είναι το νερό. Το πολύ μικρό μέγεθος των μορίων του νερού έχει ως αποτέλεσμα τη διείσδυσή του ακόμα και σε εξαιρετικά λεπτούς πόρους του σκυροδέματος, και έτσι τυχόν αλλαγές στη δομή του, όπως η μετατροπή του λόγω ψύξης σε πάγο, επιφέρουν μεταβολή του όγκου του προκαλώντας την ανάπτυξη τάσεων που μπορεί να οδηγήσουν σε ρηγμάτωση. Επιπλέον, λόγω της εξαιρετικά καλής διαλυτικής του ικανότητας, το νερό μπορεί να μεταφέρει χημικές ουσίες που ενδέχεται να προκαλέσουν βλάβες στο σκυρόδεμα. Η ροή του νερού (ή άλλων ρευστών) μέσα από τη μάζα του σκυροδέματος, ελέγχεται από τη διαπερατότητα (η ιδιότητα που χαρακτηρίζει το ρυθμό μεταφοράς ρευστών μέσω των πόρων στερεών σωμάτων, και που, ειδικά για το νερό, ονομάζεται υδατοπερατότητα).

Πριν ασχοληθούμε με την υδατοπερατότητα του σκυροδέματος, θα αναφερθούμε στην υδατοπερατότητα των συστατικών του:

Στο σκληρυμένο τσιμεντοπολτό, η υδατοπερατότητα εξαρτάται από το μέγεθος και το βαθμό συνέχειας των τριχοειδών πόρων, που ελαττώνονται με το βαθμό ενυδάτωσης και με το λόγο Νερό/Τσιμέντο (N/T). Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι για $N/T = 0.7$, ο συντελεστής υδατοπερατότητας είναι της τάξης του $10^{-3} - 10^{-4}$ mm/sec λίγο μετά τη διάστρωση, μειώνεται σε 10×10^{-8} mm/sec στις 6 μέρες, σε 50×10^{-10} mm/sec στις 13 ημέρες και σε 6×10^{-10} mm/sec τελικά σε μεγάλη ηλικία, χωρίς να υπάρχει αναλογία μεταξύ υδατοπερατότητας και ηλικίας. Για παράδειγμα, μείωση του τριχοειδούς πορώδους από 40% σε 30% αντιστοιχεί σε μείωση του συντελεστή υδατοπερατότητας, από 110×10^{-11} mm/sec σε 20×10^{-11} mm/sec, ενώ περαιτέρω μείωση του πορώδους σε 20% δίνει ελάχιστη μόνο μείωση του συντελεστή υδατοπερατότητας. Αυτό οφείλεται στο ότι ακόμα και μικρή μείωση του πορώδους κατά τα αρχικά στάδια της ενυδάτωσης έχει ως αποτέλεσμα τη διακοπή της συνέχειας σημαντικού ποσοστού πόρων, ιδιαίτερα μάλιστα των μεγαλύτερων. Έτσι, μια τιμή τριχοειδούς πορώδους γύρω στο 30%, θεωρείται οριακή όσον αφορά στο συντελεστή υδατοπερατότητας, καθιστώντας την επικοινωνία των τριχοειδών πόρων πολύ περιορισμένη και το μέγεθός τους μικρό. Για λόγους N/T 0.4, 0.5, 0.6 και 0.7 αυτό

επιτυγχάνεται μετά από υγρή συντήρηση 3, 14, 180 και 365 περίπου ημερών, αντίστοιχα, με συντελεστή υδατοπερατότητας της τάξης του 10^{-11} mm/sec. Είναι λοιπόν προφανές ότι η συνεισφορά του τσιμεντοπολλτού στην υδατοπερατότητα σκυροδέματος με καλή συντήρηση είναι μικρή, αρκεί βέβαια ο λόγος N/T να είναι κάτω από μία ορισμένη τιμή (της τάξης του 0.5).

Το πορώδες των συνηθισμένων αδρανών είναι γενικά μικρό, γύρω στο 3-10%, αλλά ο συντελεστής υδατοπερατότητας είναι της ίδιας τάξης με αυτόν του τσιμεντοπολλτού. Αυτό οφείλεται στο ότι η διάμετρος των πόρων των αδρανών είναι σχετικά μεγάλη, πάνω από 10 μm , ενώ αυτή των τριχοειδών πόρων του τσιμεντοπολλτού είναι σαφώς μικρότερη, γύρω στα 10-100 nm.

Παρότι οι συντελεστές υδατοπερατότητας τσιμεντοπολλτού και αδρανών είναι παρόμοιοι, ο συντελεστής για το σκυρόδεμα είναι κατά πολύ μεγαλύτερος και μάλιστα αυξάνεται με τον μέγιστο κόκκο των αδρανών. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη μικρορωγμών στη μεταβατική ζώνη (λόγω συστολής ξήρανσης, διαφορετικών θερμοκρασιακών συστολών κ.τ.λ.) οι οποίες είναι αρκετά μεγαλύτερες από τους τριχοειδείς πόρους και παρέχουν ένα νέο δίκτυο πόρων. Ενδεικτικά, ο συντελεστής υδατοπερατότητας σκυροδέματος με $N/T = 0.5$ είναι περίπου 10^{-9} mm/sec.

Συνοψίζοντας, η διαπερατότητα του σκυροδέματος είναι καθοριστική για την ανθεκτικότητά του σε διάρκεια. Επειδή μάλιστα είναι, όπως και η αντοχή, άμεσα συνδεδεμένη με το τριχοειδές πορώδες, οι ίδιοι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή του σκυροδέματος είναι, σε πρώτη προσέγγιση, σημαντικοί και για την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε διάρκεια. Οι παράγοντες αυτοί συνοψίζονται στους εξής : σύσταση του τσιμέντου, λόγος N/T, πορώδες, συντήρηση, συμπίκνωση, ύπαρξη ρωγμών.

1.11.3. Φυσικά Αίτια Μείωσης της Ανθεκτικότητας σε Διάρκεια

Τα φυσικά αίτια που μπορεί να μειώσουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε διάρκεια κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες που σχετίζονται με την επιφανειακή φθορά και τη ρηγμάτωση και δίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 1.1.). Μερικά από τα αίτια αναπτύσσονται παρακάτω.



Σχήμα 1.1. Φυσικά αίτια μείωσης της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε διάρκεια

1.11.3.1. Επιφανειακή Φθορά

Η επιφανειακή (ή μηχανική) φθορά του σκυροδέματος μπορεί να προκληθεί λόγω απότριψης, υδροφθοράς και σπηλαίωσης. Αναλυτικότερα :

Η απότριψη προκαλείται από την κυκλοφορία πεζών ή οχημάτων (π.χ. σε βιομηχανικά δάπεδα). Η απότριψη του σκυροδέματος ξεκινά από το συστατικό με τη μικρότερη αντοχή, τον σκληρυμένο τσιμεντοπολτό, και προχωρεί σταδιακά έως ότου αποκαλυφθούν τα αδρανή, που με τη σειρά τους αφαιρούνται δημιουργώντας ανώμαλες επιφάνειες, επιρρεπείς σε περαιτέρω φθορά. Η ανθεκτικότητα σε απότριψη αυξάνεται με τη μείωση του λόγου N/T , διότι έτσι αυξάνεται η αντοχή του επιφανειακού στρώματος και βελτιώνεται η συνάφεια τσιμεντοπολτού και αδρανών. Επίσης εξαρτάται από το είδος των αδρανών. Άλλος παράγοντας που επηρεάζει την ανθεκτικότητα σε απότριψη είναι η μέγιστη διάσταση κόκκων των αδρανών, γεγονός που οφείλεται στο ότι αδρανή με μικρές διαστάσεις στοιβάζονται πιο κοντά στην επιφάνεια και επομένως δίνουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε απότριψη από τους κόκκους μεγάλων διαστάσεων. Σημαντικός παράγοντας είναι ακόμη η συντήρηση

του σκυροδέματος, σκοπός της οποίας είναι η αποφυγή πρόωρης ρηγμάτωσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία σκληρών επιφανειών ικανοποιητικής αντοχής.

Η υδροφθορά οφείλεται στη δράση του νερού που συνήθως περιέχει αιωρούμενα σωματίδια (π.χ. σε βάθρα γεφυρών, φράγματα κ.α.). Όλα όσα είπαμε για την απότριψη, ισχύουν και για το φαινόμενο της υδροφθοράς, που εξαρτάται επίσης σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα του νερού, και από την ποσότητα, το μέγεθος, το σχήμα, το βάρος, την ταχύτητα και το είδος της κίνησης των σωματιδίων που μεταφέρονται σε αυτό.

Τέλος, το φαινόμενο της σπηλαιώσης, εμφανίζεται όταν νερό κινείται με μεγάλη ταχύτητα παράλληλα σε επιφάνεια της οποίας η γεωμετρία αλλάζει ξαφνικά (π.χ. συμβολή αγωγών κ.α.), με αποτέλεσμα το σχηματισμό και την καταστροφή φυσαλίδων, φαινόμενο που επιφέρει κρουστικά κύματα προκαλώντας κοιλότητες και ανωμαλίες. Χαρακτηρίζεται δηλαδή από ανομοιόμορφη φθορά, η οποία σε πρώτη φάση είναι περιορισμένη αλλά κατόπιν γίνεται αρκετά έντονη, λόγω του μεγάλου τυρβώδους που εμφανίζεται τοπικά. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες δράσεις, η ανθεκτικότητα σε σπηλαιώση αυξάνεται με το ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού, ενώ η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος δεν είναι κατ' ανάγκη ευεργετική.

Ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Κ.Τ.Σ. 1997), έχει προδιαγράψει ότι για σκυρόδεμα ανθεκτικό σε επιφανειακή φθορά θα πρέπει να χρησιμοποιούνται χονδρόκοκκα αδρανή, η κάθιση να είναι μικρότερη από 50mm, η περιεκτικότητα σε τσιμέντο να είναι τουλάχιστον 350kg/m^3 και το σκυρόδεμα να είναι κατηγορίας αντοχής τουλάχιστον C25/30.

1.11.3.2. Ρηγμάτωση λόγω Κρυστάλλωσης Αλάτων στους Πόρους

Κάτω από ορισμένες συνθήκες, τα άλατα που πιθανόν να βρίσκονται στους πόρους του σκυροδέματος κρυσταλλώνονται προκαλώντας ρηγμάτωση λόγω ανάπτυξης εσωτερικών τάσεων. Το φαινόμενο είναι συχνό όταν η μία πλευρά δομικών στοιχείων, όπως οι τοίχοι αντιστήριξης, από σκυρόδεμα σχετικά μεγάλης διαπερατότητας είναι σε επαφή με διαλύματα αλάτων, ενώ η άλλη πλευρά “αναπνέει”, είναι δηλαδή ελεύθερη, επιτρέποντας την εξάτμιση νερού από τους πόρους. Ο μηχανισμός αυτός είναι σχετικός και με τη φθορά άλλων κατασκευών, όπως οι τοιχοποιίες και τα λιθόκτιστα μνημεία.

1.11.3.3. Επίδραση πυρκαγιάς

Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε πυρκαγιά είναι γενικώς εξαιρετική. Εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι σχετίζονται με την ποιότητα του τσιμεντοπολτού και των αδρανών, που αποσυντίθενται σε πολύ υψηλές

θερμοκρασίες, με το μέγεθος των δομικών στοιχείων και με το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας κατά την πυρκαγιά.

Η επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας στον ενυδατωμένο τσιμεντοπολτό εξαρτάται από τον βαθμό ενυδάτωσης και τον βαθμό κορεσμού των πόρων. Γενικά, όσο περισσότερο είναι το νερό στη μάζα του τσιμεντοπολτού τόσο η αύξηση της θερμοκρασίας σε αυτόν καθυστερεί. Το μόνο πρόβλημα που μπορεί να εμφανιστεί λόγω ύπαρξης μεγάλου ποσοστού νερού είναι όταν ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας είναι πολύ μεγάλος και ο τσιμεντοπολτός έχει μικρή υδατοπερατότητα. Στις περιπτώσεις αυτές, η πίεση ατμών στο εσωτερικό του υλικού ενδέχεται να αυξάνεται γρηγορότερα από την απελευθέρωση του ατμού στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα τη ρηγμάτωση και την αποφλοίωση του σκυροδέματος.

1.11.3.4. Δράση Παγετού

Παρότι η επίδραση του παγετού στο σκυρόδεμα αφορά κυρίως στις χώρες με ψυχρά κλίματα, το φαινόμενο παρουσιάζει ενδιαφέρον και για τη χώρα μας, ιδιαίτερα στις βόρειες ηπειρωτικές περιοχές. Η φθορά λόγω επίδρασης παγετού εμφανίζεται με διάφορες μορφές, με πιο συνηθισμένες τη ρηγμάτωση σε όλη την επιφάνεια του σκυροδέματος, με εύρος και πλάτος ρωγμών μέχρι και 0.25mm και 35mm, αντίστοιχα, την αποφλοίωση, που χαρακτηρίζεται από την αφαίρεση μεγάλων κομματιών από την επιφάνεια, και την απολέπιση, που διακρίνεται από την αφαίρεση επιφανειακά μικρών κομματιών μορφής λεπίδων δημιουργώντας μικρές κοιλότητες. Όταν ο παγετός επιδράσει σε σκυρόδεμα μικρής ηλικίας το τελευταίο έχει υγρή εμφάνιση, είναι σκουρόχρωμο και έχει πολύ μικρή αντοχή.

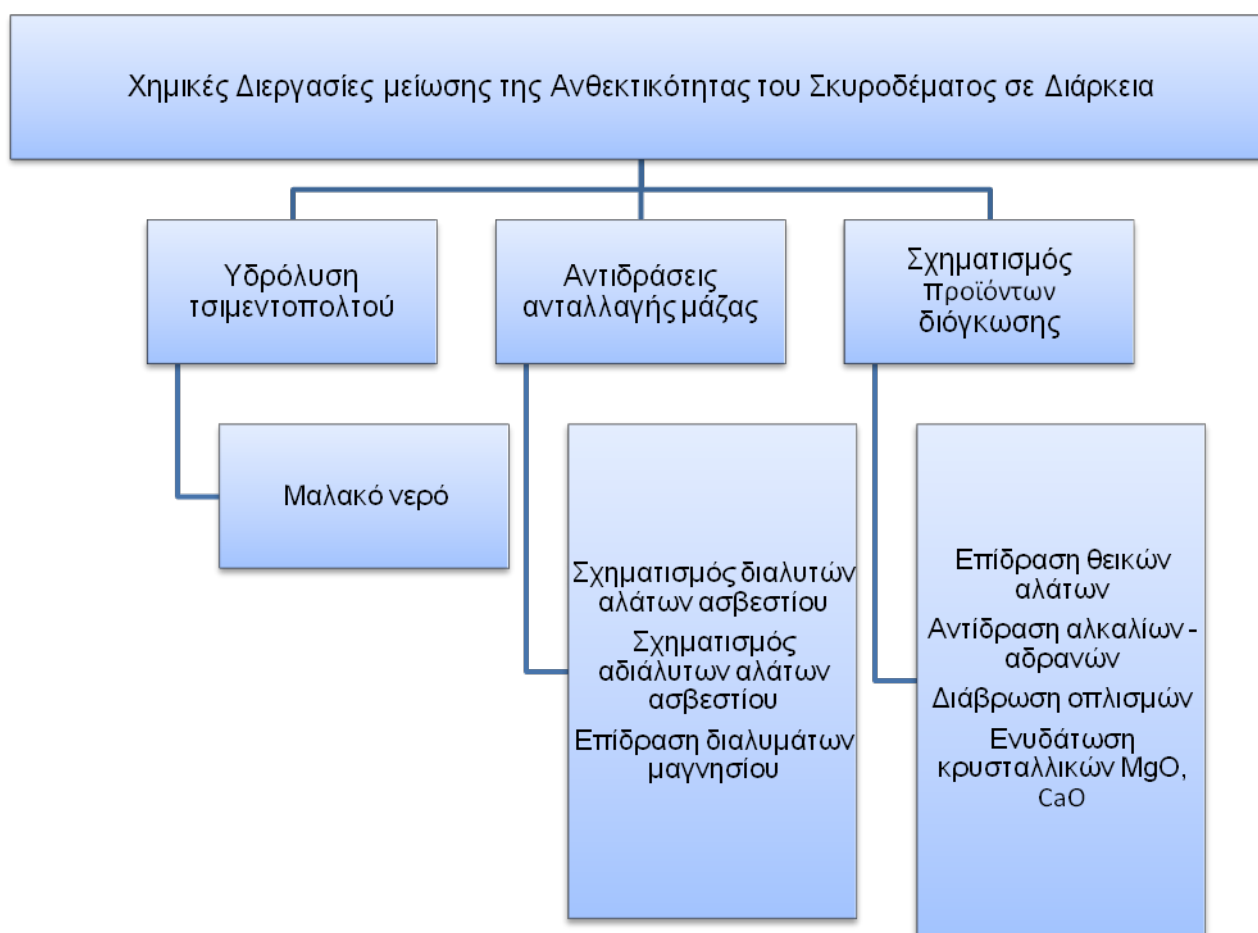
1.11.4. Χημικές Διεργασίες

Η φθορά του σκυροδέματος λόγω χημικών διεργασιών οφείλεται κυρίως σε αντιδράσεις μεταξύ των χημικώς ενεργών συστατικών του ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού και διαφόρων ουσιών του περιβάλλοντος. Εξαιρέση αποτελούν οι αντιδράσεις αλκαλίων – αδρανών, που γίνονται μεταξύ των αλκαλίων του τσιμεντοπολτού και μερικών ουσιών που βρίσκονται σε ορισμένους τύπους αδρανών, η καθυστερημένη ενυδάτωση των CaO και MgO, όταν βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες στο τσιμέντο, και η ηλεκτροχημική διάβρωση των οπλισμών.

Λόγω του υψηλού pH (μεταξύ 12.5 και 13.5) των διαλυμάτων που βρίσκονται στους πόρους του τσιμεντοπολτού, το οποίο οφείλεται στις μεγάλες συγκεντρώσεις ιόντων Na⁺, K⁺ και OH⁻, το όξινο περιβάλλον προκαλεί γενικά χημική αστάθεια στα συστατικά του τσιμεντοπολτού (κυρίως ένυδρα του ασβεστίου), ο βαθμός της οποίας εξαρτάται από το pH του διαβρωτικού μέσου που επιδρά στον τσιμεντοπολτό και από τη διαπερατότητα του σκυροδέματος. Η αστάθεια αυτή οφείλεται στη σημαντική

μείωση του pH (π.χ. κάτω από 6) και συχνά έχει καταστροφικά αποτελέσματα, όπως είναι η αύξηση του πορώδους και της διαπερατότητας, η μείωση της αντοχής, η ρηγματώση κ.τ.λ.

Ανάλογα με τον μηχανισμό που προκαλεί τη φθορά του σκυροδέματος, η χημική διάβρωση μπορεί να οφείλεται στην υδρόλυση των συστατικών του τσιμεντοπολτού, σε αντιδράσεις ανταλλαγής μάζας και στον σχηματισμό προϊόντων που προκαλούν διόγκωση, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 1.2.).



Σχήμα 1.2. Χημικές Διεργασίες μείωσης της Ανθεκτικότητας του Σκυροδέματος σε Διάρκεια

1.11.5. Βιολογική Επίδραση

Η φθορά του σκυροδέματος λόγω βιολογικών επιδράσεων μπορεί να προκληθεί από τη δράση διαφόρων φυτικών ή ζωικών μικροοργανισμών, που για την ανάπτυξή

τους δεσμεύουν συστατικά από την επιφάνεια στοιχείων σκυροδέματος κοντά στη θάλασσα, στο εσωτερικό αγωγών αποχέτευσης και γενικά σε υγρό περιβάλλον.

Μερικά από αυτά είναι: οι ρίζες των φυτών οι οποίες εισδύουν σε μικρορωγμές προκαλώντας μεγαλύτερη ρηγμάτωση, τα βρύα και οι λειχήνες αλλά ακόμα και τα φύκια είναι δυνατόν να προκαλέσουν φθορά, παρόλο που συχνά προστατεύουν το σκυρόδεμα και τον οπλισμό από τη διάβρωση επειδή καταναλώνουν το οξυγόνο του νερού προτού διεισδύσει στο σκυρόδεμα.

Η κυριότερη όμως μορφή βιολογικής επίδρασης είναι τα βακτήρια που αναπτύσσονται σε αγωγούς αποχέτευσης και σε απορρίμματα. Κάτω από αναερόβιες (χωρίς οξυγόνο) συνθήκες, τα βακτήρια συνθέτουν υδρόθειο, το οποίο μπορεί να προκαλέσει απόπλυση. Επίσης, είναι δυνατόν ακόμη και να συνθέσουν θειικά άλατα. Η φθορά λόγω των βακτηρίων όμως μπορεί να περιοριστεί με τη λήψη διαφόρων μέτρων όπως: καθάρισμα των αγωγών ώστε να περιοριστεί η διατιθέμενη ποσότητα θείου, αφαίρεση του υδρόθειου, προσθήκη διάφορων ουσιών κατά την παρασκευή του σκυροδέματος κ.α.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΔΙΑΒΡΩΣΗ

2.1. Γενικά (13,14)

Είναι γνωστό ότι όλα τα υλικά δεν είναι απεριόριστα σταθερά απέναντι στο περιβάλλον τους (π.χ. όλα τα μέταλλα έχουν την τάση να οξειδώνονται). Μηχανικές κακώσεις ή άλλοι παράγοντες (π.χ. υγρασία, θερμοκρασία) παίζουν κάποιο ρόλο – μικρό ή μεγάλο – στην καταστροφή των υλικών, που αρχίζει συνήθως από την επιφάνεια τους.

Σήμερα, τα μέταλλα και τα κράματά τους, αποτελούν το πιο βασικό υλικό για τις κάθε είδους τεχνικές κατασκευές. Αυτό οφείλεται στις πολύ καλές μηχανικές και φυσικές ιδιότητές τους (π.χ. αντοχή, σκληρότητα, αγωγιμότητα – θερμική / ηλεκτρική – κατεργασιμότητα κλπ.).

Όμως σχεδόν όλα τα μέταλλα δεν βρίσκονται στη φύση σε καθαρή μορφή αλλά σε οξειδωμένη (μεταλλεύματα). Έτσι, τα μεταλλεύματα μετατρέπονται σε μέταλλα με κατάλληλες φυσικοχημικές κατεργασίες στις οποίες απαιτείται ενέργεια. Ένα μέρος της ενέργειας αυτής με τη μορφή εντροπίας (ΔS) και ελεύθερης ενέργειας (ΔF) παραμένει στα παρασκευαζόμενα μέταλλα. Η αύξηση της ΔF , έχει σαν αποτέλεσμα τα μέταλλα να αποκτούν μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια από αυτή του αρχικού μεταλλεύματος. Εκείνο που πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα είναι ότι κάθε υλικό που έχει κατασκευαστεί με μια σειρά διεργασιών στη βιομηχανία είναι συνήθως υλικό αναβαθμισμένο ενεργειακά σε σχέση με τις πρώτες ύλες του. Επομένως, σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο έχει τη προδιάθεση να ελαττώσει την ελεύθερη ενέργεια (F) ή την ελεύθερη ενθαλπία (G) και να αυξήσει την εντροπία του (S). Δηλαδή ένα τέτοιο υλικό, αν αφεθεί στο περιβάλλον “ελεύθερο”, έχει την προδιάθεση να υποβαθμιστεί ενεργειακά. Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση των μετάλλων και των κραμάτων υπάρχει η τάση να μετατραπούν σε οξείδια (επιστροφή στην αρχική τους κατάσταση) με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας από αυτά.

Η αυθόρμητη αυτή προδιάθεση κυρίως των μεταλλικών υλικών να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση αποτελεί το αίτιο της διάβρωσης.

2.2. Ιστορική εξέλιξη (13)

Πέντε βασικοί σταθμοί ξεχωρίζουν στην ιστορική εξέλιξη της διαπίστωσης, ερμηνείας και των προσπαθειών καταπολέμησης του φαινομένου της διάβρωσης.

Η **πρώτη** παρατήρηση του φαινομένου της διάβρωσης θεωρείται πως έγινε στην Αρχαία Ελλάδα κατά την Μινωική εποχή (2000 π.Χ.). Παρατηρήθηκε τότε, πως μετά από ένα χρονικό διάστημα απ’ την κατασκευή και χρήση χάλκινων αντικειμένων, αυτά χάνουν τη στιλπνότητά τους (επειδή δημιουργούνται στην επιφάνειά τους

οξειδία ή υδροοξειδία). Αυτό αντιμετωπιζόταν με επάλειψη της επιφάνειας των με λάδι ή άλλες λιπαρές ουσίες (γιατί το λάδι με την οξύτητά του προκαλούσε μερική διάλυση των οξειδίων, πάντα δε δίνει λάμψη σε οποιοδήποτε αντικείμενο). Κατά τον 5^ο αιώνα π.Χ. ο Ηρόδοτος αναφέρει τη χρησιμοποίηση κασιτέρου για την προστασία του χάλυβα απ' τη διάβρωση.

Ο **δεύτερος** σταθμός τοποθετείται κατά το 2^ο αιώνα μ.Χ. όταν ο Πλούταρχος μελετώντας τις επιφανειακές αλλοιώσεις (τη διάβρωση) των ορειχάλκινων αγαλμάτων των Δελφών, έκανε τόσο βαθιές παρατηρήσεις στην προσπάθεια του να ερμηνεύσει το φαινόμενο, που επαληθεύτηκαν θεωρητικά και πειραματικά πλήρως το 1958 από το Wagner.

Ο **τρίτος** σταθμός τοποθετείται γύρω στο 1900, όταν ο Plank καθιέρωσε για πρώτη φορά την έννοια του κβάντου ενέργειας. Δηλαδή, κάθε σύστημα απορροφά ή εκπέμπει ενέργεια κατά ακέραια πολλαπλάσια των κβάντων ενέργειας. Η έννοια αυτή βοήθησε την κατανόηση της πραγματοποίησης του φαινομένου της διάβρωσης με τη μορφή ηλεκτρικής διέγερσης.

Ο **τέταρτος** σταθμός τοποθετείται κατά την περίοδο 1926-1936, οπότε μπήκαν οι βάσεις της θεωρίας της Αταξίας των Στερεών Σωμάτων απ' τον Frenkel, διαμορφώθηκε δε στην τελική της μορφή απ' τους Wagner και Schottky. Αποδείχτηκε επίσης η δυνατότητα αντίδρασης των στερεών σωμάτων και σε συνήθεις (χαμηλές) θερμοκρασίες.

Ο **πέμπτος** σταθμός τοποθετείται στο 1958, όταν ο Wagner ολοκλήρωσε και απέδειξε πλήρως τη θεωρία της Αταξίας απ' ενός, απ' ετέρου δε απέδειξε το μηχανισμό και έδωσε την ερμηνεία του φαινομένου της διάβρωσης.

Παράλληλα κατά τις δύο τελευταίες εκατονταετηρίδες, αναπτύχθηκε ο κλάδος της ηλεκτροχημείας, που προσέφερε πολλά στη μελέτη του φαινομένου της διάβρωσης.

Από τότε, ένας μεγάλος αριθμός επιστημόνων βοήθησε ώστε να ερευνηθούν τα διάφορα είδη της διάβρωσης, η επίδραση του διαβρωτικού περιβάλλοντος, οι πειραματικές μέθοδοι για τον έλεγχο της προδιάθεσης ενός σώματος για διάβρωση και οι μέθοδοι προστασίας του απ' τη διάβρωση.

2.3. Ορισμός της Διάβρωσης (13,14)

Στην προσπάθεια ορισμού του φαινομένου της διάβρωσης, ο μελετητής θα συναντήσει μερικές δυσκολίες. Αυτές έχουν να κάνουν με το γεγονός ότι οι διάφοροι οργανισμοί έχουν δώσει κατά καιρούς, ορισμούς όχι απόλυτα ταυτιζόμενους ο ένας με τον άλλο (π.χ. ορισμοί κατά DIN 50900, ISO, ASTM κ.λ.π.). Σήμερα, ο πιο αποδεκτός ορισμός της διάβρωσης για μέταλλα και κράματα είναι αυτός που προέκυψε από συζητήσεις στα πλαίσια της Διεθνούς Επιτροπής Θαλάσσιας

Διάβρωσης και Ρύπανσης των Υφάλων Κατασκευών και από διάφορα Διεθνή Συνέδρια.

Αυτός είναι ο εξής :

Διάβρωση (corrosion) λέγεται κάθε αυθόρμητη κατ' επέκταση εκβιασμένη ηλεκτροχημικής, κατ' επέκταση χημικής, κατ' επέκταση μηχανικής, κατ' επέκταση βιολογικής φύσης αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων και των κραμάτων που οδηγεί σε απώλεια υλικού.

Ας εξηγήσουμε όμως ορισμένους όρους της παραπάνω διατύπωσης της διάβρωσης, προκειμένου να γίνει περισσότερο κατανοητός ο συγκεκριμένος ορισμός:

i. Αυθόρμητη αλλοίωση : Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο η διάβρωση είναι φαινόμενο που αυθόρμητα εκδηλώνεται και οδηγεί το υλικό σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη.

ii. Εκβιασμένη αλλοίωση : Εδώ δεν σημαίνει εκβιασμό πραγματοποίησης θερμοδυναμικά μη αυθόρμητα φαινομένου. Και στην περίπτωση αυτή είναι θερμοδυναμικά αυθόρμητη αλλά η αλλοίωση επιταχύνεται με τη βοήθεια έντονου τεχνητού διαβρωτικού περιβάλλοντος (π.χ. χημικές ουσίες, θερμοκρασία κλπ.). Επομένως η διαφορά από την πρώτη περίπτωση (αυθόρμητη αλλοίωση) έγκειται στην ταχύτητα της διάβρωσης, ίσως και στην αλλαγή του είδους της (αν αυτή εκβιαστεί).

iii. Αλλοίωση χημικής και ηλεκτροχημικής φύσης : Κατά τις ηλεκτροχημικές δράσεις έχουμε ηλεκτρικό ρεύμα που διαπερνά το υλικό ενώ στις χημικές δεν συμβαίνει αυτό. Όμως κατά το οξειδοαναγωγικό στάδιο των χημικών δράσεων έχουμε εναλλαγή ηλεκτρονίων, που θα μπορούσε κάποιος να θεωρήσει σαν μορφή ηλεκτρικού ρεύματος. Έτσι, η διάκριση των δύο περιπτώσεων δεν είναι εύκολη.

iv. Μηχανική αλλοίωση : Θεωρείται κάθε επιφανειακή μηχανική κάκωση λόγω τριβών, κρούσεων, κόπωσης, επίδρασης ροής ρευστών.

v. Βιολογική αλλοίωση : Προκαλείται από μικροοργανισμούς (φυτικούς και ζωικούς) οι οποίοι προκαλούν με τις εκκρίσεις τους διάβρωση των μετάλλων στις ακίνητες και στις κινητές κατασκευές.

vi. Αλλοίωση της επιφάνειας : Νοείται η αλλοίωση της πραγματικής επιφάνειας. Σε αυτήν περιλαμβάνονται οι γεωμετρικές μαζί με τις επιφανειακές ανωμαλίες. Τονίζεται πως μόνο μια τέτοια επιφάνεια είναι έδρα των φαινομένων της διάβρωσης και όχι ολόκληρη η μάζα του σώματος. Επίσης μόνο διαμέσου της διεπιφάνειας

“πραγματική επιφάνεια σώματος – διαβρωτικό περιβάλλον” πραγματοποιείται μεταφορά μάζας και ενέργειας.

vii. Απώλεια υλικού : Η απώλεια υλικού λόγω διάβρωσης δε σημαίνει οπωσδήποτε ότι το υλικό γίνεται ελαφρύτερο. Είναι δυνατόν να σχηματίζονται πάνω στην επιφάνεια του ενώσεις με ισχυρή πρόσφυση και το συνολικό βάρος να παραμένει σταθερό ή και να αυξάνεται. Έτσι σαν απώλεια υλικού θεωρούμε την απώλεια ως προς την αρχική του μορφή.

Κατά ISO 8044 – 1986 (Διάβρωση των μετάλλων και των κραμάτων - Όροι και ορισμοί), η διάβρωση ορίζεται ως η φυσικοχημική αλληλεπίδραση μεταξύ ενός μετάλλου και του περιβάλλοντος του που έχει αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου που πολλές φορές οδηγούν σε εμπόδιση της λειτουργικότητας του μετάλλου, του περιβάλλοντος ή του αρχικού συστήματος όπου το μέταλλο αποτελεί μέρος του.

2.4. Ηλεκτροχημικό στοιχείο (15,16)

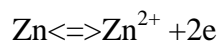
Ο μηχανισμός και η ταχύτητα με την οποία εξελίσσεται το φαινόμενο της διάβρωσης σε μια μεταλλική κατασκευή εξαρτάται από τη φύση του διαβρωτικού περιβάλλοντος και από άλλους εξωγενείς παράγοντες.

Η διάβρωση των μετάλλων λαμβάνει χώρα συνήθως κάτω από συνθήκες λειτουργίας γαλβανικού στοιχείου, δηλαδή είναι ένα ηλεκτροχημικής φύσης φαινόμενο κατά το οποίο υπάρχει μια ανοδική (το μέταλλο) και μια καθοδική περιοχή (το διαβρωτικό περιβάλλον) όπου γίνονται οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις και μεταξύ των οποίων εμφανίζεται διαφορά δυναμικού.

Το δυναμικό αυτού του γαλβανικού στοιχείου αποτελεί μέτρο της προδιάθεσης των μετάλλων για διάβρωση μέσα σε συγκεκριμένο διαβρωτικό περιβάλλον και ονομάζεται δυναμικό διάβρωσης. Η τιμή του δυναμικού διάβρωσης μπορεί να επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες μεταξύ των οποίων αναφέρονται η παρουσία υγρασίας και διαλυμένων αλάτων στο διαβρωτικό περιβάλλον, η θερμοκρασία, η ύπαρξη μεταλλικών προσμίξεων στο μέταλλο, η επαφή το μετάλλου με άλλο μέταλλο, η ύπαρξη αταξιών δομής στην κρυσταλλική δομή του μετάλλου κ.α. Σε ιδιαίτερες περιπτώσεις όπου το μέταλλο βρίσκεται σε επαφή με έντονα διαβρωτικά διαλύματα η διάβρωση οφείλεται στη χημική επίδραση αυτών στο μέταλλο, οπότε μιλάμε για χημική διάβρωση.

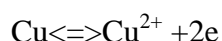
Εάν, για παράδειγμα, βυθίσουμε ένα έλασμα Zn σε ένα διάλυμα ιόντων Zn^{2+} , π.χ. διάλυμα $ZnSO_4$, τότε άτομα Zn από το μεταλλικό έλασμα έχουν την αυθόρμητη τάση να οξειδώνονται και να μετατραπούν σε ιόντα Zn^{2+} για να περάσουν στο διάλυμα,

αφήνοντας τα ηλεκτρόνια τους πάνω στο έλασμα. Το φαινόμενο συνεχίζεται μέχρι να αποκατασταθεί η χημική ισορροπία:



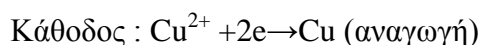
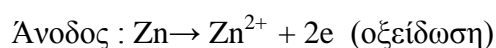
Η παραπάνω διάταξη αποτελεί το ημιστοιχείο $\text{Zn} / \text{Zn}^{2+}$.

Παρομοίως, εάν βυθίσουμε ένα έλασμα Cu σε ένα διάλυμα ιόντων Cu^{2+} , π.χ. διάλυμα CuSO_4 , τότε άτομα Cu από το μεταλλικό έλασμα έχουν την τάση να μετατραπούν σε ιόντα Cu^{2+} και να περάσουν στο διάλυμα αφήνοντας τα ηλεκτρόνια τους πάνω στο έλασμα. Το φαινόμενο συνεχίζεται μέχρι να αποκατασταθεί χημική ισορροπία.



Η παραπάνω διάταξη αποτελεί ένα δεύτερο ημιστοιχείο το $\text{Cu} / \text{Cu}^{2+}$. Εάν συνδέσουμε τα δύο ημιστοιχεία αγωγή με ένα ηλεκτρολυτικό σύνδεσμο και ένα μεταλλικό αγωγό (σύρμα), το ηλεκτρικό κύκλωμα κλείνει. Ο ηλεκτρολυτικός σύνδεσμος μπορεί να είναι ένα απορροφητικό χαρτί εμβαπτισμένο σε ένα διάλυμα άλατος (π.χ. KCl) ή ένας γυάλινος σωλήνας σχήματος U που είναι γεμάτος με ένα ζελέ (άγαρ - άγαρ) που περιέχει KCl .

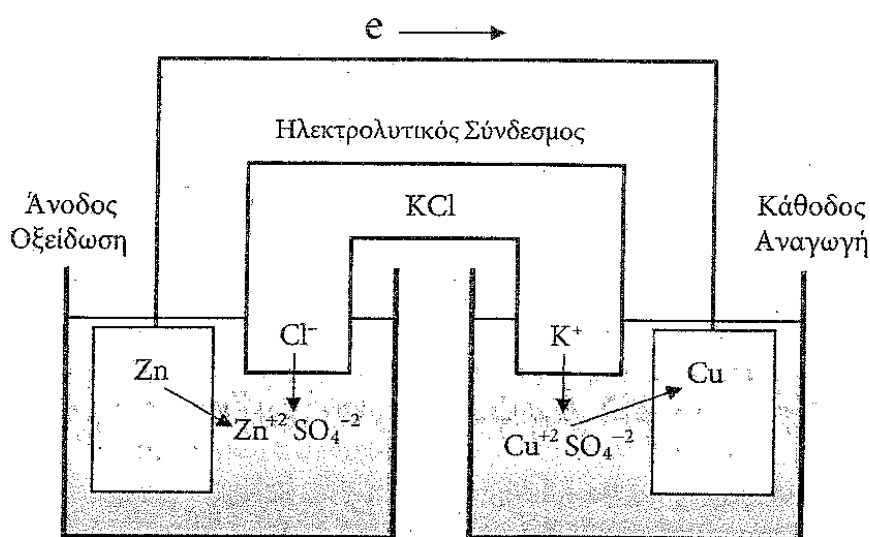
Επειδή η τάση του Zn να αποβάλλει ηλεκτρόνια είναι μεγαλύτερη από ότι στον Cu , η χημική ισορροπία στο ημιστοιχείο του $\text{Cu} / \text{Cu}^{2+}$ διαταράσσεται και μετατοπίζεται προς τα αριστερά ενώ παρατηρείται συνεχής ροή ηλεκτρονίων από τον Zn προς τον Cu διαμέσου του μεταλλικού αγωγού. Στα δύο ημιστοιχεία πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις :



Στο ημιστοιχείο $\text{Zn} / \text{Zn}^{2+}$ (άνοδος), ο Zn διαλύεται και περνά στο διάλυμα ZnSO_4 υπό μορφή ιόντων Zn^{2+} . Για να διατηρήσει το διάλυμα την ηλεκτρική ουδετερότητα του, ιόντα Cl^- προερχόμενα από τον ηλεκτρολυτικό σύνδεσμο εισέρχονται στο διάλυμα.

Στο ημιστοιχείο $\text{Cu} / \text{Cu}^{2+}$ (κάθοδος), ιόντα Cu^{2+} από το διάλυμα CuSO_4 επικάθονται στο έλασμα του Cu και μετατρέπονται σε μεταλλικό Cu . Για να διατηρήσει το διάλυμα την ηλεκτρική ουδετερότητά του, ιόντα K^+ προερχόμενα από τον ηλεκτρολυτικό σύνδεσμο εισέρχονται στο διάλυμα.

Η διάταξη αυτή αποτελεί ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο (γαλβανικό στοιχείο) που μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρικό ρεύμα.



Σχήμα 2.1. Ηλεκτροχημικό στοιχείο Daniel

Το συνολικό δυναμικό του ηλεκτροχημικού στοιχείου προκύπτει από το αλγεβρικό άθροισμα των δυναμικών των δύο ημιστοιχείων.

2.5. Σημασία – Οικονομικές επιπτώσεις (13)

Στην εποχή μας, το φαινόμενο της διάβρωσης παρουσιάζεται σε πολύ μεγάλη ένταση και ταυτόχρονα εντείνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί :

- Αυξάνεται συνεχώς η χρήση των μετάλλων και κραμάτων
- Υπάρχει αλματώδης ανάπτυξη της βιομηχανίας
- Παίρνει διαστάσεις παγκόσμιας καταστροφής η ρύπανση του φυσικού περιβάλλοντος.

Έτσι, η αποτροπή της διάβρωσης αποτελεί έναν από τους κύριους στόχους όλων των συντελεστών ενός έργου ή μιας κατασκευής (ιδιοκτήτης / χρηματοδότης, μελετητής, κατασκευαστής). Φυσικά ο αποκλεισμός της διάβρωσης σαν φυσικό φαινόμενο είναι αδύνατος για λόγους που εξηγήσαμε προηγουμένως. Όλη η προσπάθεια εστιάζεται στον περιορισμό και την επιβράδυνση της διαδικασίας αυτής.

Επειδή τα πάντα στις μέρες μας έχουν σχέση με το κόστος, είναι φανερό ότι η αστοχία ή δυσλειτουργία μιας κατασκευής λόγω διάβρωσης αποτελεί σοβαρή οικονομική ζημιά. Για παράδειγμα η ενεργός ζωή μιας κατασκευής στην οποία δεν παίρνουμε κανένα μέτρο προστασίας ενάντια στη διάβρωση αποτελεί μόνο ένα κλάσμα της αντίστοιχης ζωής της με προστασία.

Έτσι παίρνοντας υπ' όψη τον περιορισμό των αποθεμάτων πρώτων υλών είναι επιτακτική η ανάγκη της έρευνας για τον περιορισμό της διάβρωσης.

2.6. Είδη Διάβρωσης (13,14,15)

2.6.1. Ανάλογα με τα αίτια που την προκαλούν

i. Ηλεκτροχημική διάβρωση : Είναι το είδος της διάβρωσης που συναντάμε πιο συχνά και έχει σαν χαρακτηριστικό την παρουσία δυναμικού μεταξύ μετάλλου και περιβάλλοντος και θέσεων πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου με διαφορετικό δυναμικό (τοπικά γαλβανικά στοιχεία). Η πρώτη (διαφορά δυναμικού) οφείλεται στην προδιάθεση του μετάλλου να υποβαθμιστεί ενεργειακά. Η δεύτερη (τοπικά γαλβανικά στοιχεία) μπορεί να προέρχεται από αταξίες δομής, ανωμαλίες κρυσταλλικού πλέγματος κλπ.

Χαρακτηριστικό της ηλεκτροχημικής πορείας της διάβρωσης είναι η μεταφορά των φορτίων (ιόντων και ηλεκτρονίων) δια μέσου της οριακής επιφάνειας του μετάλλου προς το διαβρωτικό περιβάλλον και η δημιουργούμενη διαφορά δυναμικού καθώς και ροή ρεύματος.

ii. Χημική διάβρωση : Προσβολή μετάλλου από χημική ένωση και αλλοίωση επιφάνειας λόγω χημικών αντιδράσεων.

iii. Μηχανική (φυσική) διάβρωση : Με την τριβή προκαλείται φθορά της επιφάνειας με απομάκρυνση μερών της επιφάνειας με μηχανικό τρόπο.

iv. Βιολογική διάβρωση : Με επίδραση μικροοργανισμών που προσκολλώνται στο μέταλλο και το διαβρώνουν με τις εκκρίσεις τους.

2.6.2. Ανάλογα με τη μορφή εμφάνισης

i. Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση : Έτσι λέγεται η διάβρωση όταν πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου ή του κράματος δημιουργείται ένα ομοιόμορφο – περίπου ισόπαχο – στρώμα προϊόντος διάβρωσης ή όταν πραγματοποιείται μια ομοιόμορφη διάλυση της επιφάνειας με κάποια χημική ή ηλεκτροχημική διαδικασία.

ii. Διάβρωση με βελονισμούς : Έτσι λέγεται η διάβρωση όταν ο σχηματισμός των προϊόντων της γίνεται εκλεκτικά και τοπικά ή όταν εμφανίζεται τοπική εκλεκτική διάλυση της μεταλλικής επιφάνειας σε ορισμένα δομικά ή γεωμετρικά ενεργά κέντρα της ή με μορφή δημιουργίας κρατήρων, εσοχών ή σπηλαίων.

Αποτελεί την πιο συνηθισμένη εμφάνιση της διάβρωσης, αφού εμφανίζεται και στα επιμέρους στάδια όλων των άλλων γενικών μορφών διάβρωσης. Είναι αρκετά

επικίνδυνη γιατί δεν γίνεται έγκαιρα ορατή και οδηγεί σε καταστροφή των μεταλλικών κατασκευών σε μικρό χρονικό διάστημα και σε μικρή απώλεια βάρους.

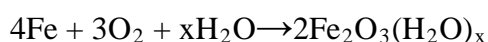
iii. Ψαθυρή θραύση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση : Πρόκειται για ταυτόχρονη καταπόνηση και διάβρωση. Αποτελεί συνέπεια εφαρμογής τάσεων και διαβρωτικού περιβάλλοντος και μπορεί να προκαλέσει καταστροφικά αποτελέσματα ακόμα και για φορτίσεις της τάξης του 10% του ορίου θραύσης.

iv. Σπηλαιώδης μηχανική διάβρωση : Είναι καθαρά μηχανικής φύσης. Πρόκειται για τη δημιουργία εσοχών, σπηλαίων, κρατήρων από τοπική εξάχνωση του υλικού εξαιτίας της υποπίεσης που δημιουργείται. Τέτοιες συνθήκες δημιουργούνται κατά τη γρήγορη ροή ρευστών σε σωλήνες ή κατά την περιστροφή πτερυγίων με ταχύτητα (π.χ. έλικες αεροπλάνων, πλοίων, αντλιών).

2.6.3. Ανάλογα με το είδος του διαβρωτικού περιβάλλοντος

i. Διάβρωση στον αέρα (ξηρό ή υγρό, καθαρό ή ρυπασμένο)

Αυτή είναι ο πιο κοινός τύπος διάβρωσης και οφείλεται στην επίδραση του ατμοσφαιρικού αέρα (και ειδικότερα του O₂), σε συνδυασμό με υγρασία και τις διαλυμένες σ' αυτήν ουσίες (ηλεκτρολυτικό διάλυμα), πάνω στα διάφορα μέταλλα. Σημειώνεται ότι η υγρασία είναι απαραίτητη για την ατμοσφαιρική διάβρωση των περισσότερων μετάλλων. Αν μάλιστα αυτή περιέχει και διαλυμένα άλατα, η διάβρωση επιταχύνεται, επειδή αυξάνει η αγωγιμότητα του ηλεκτρολυτικού διαλύματος. Γι' αυτό το λόγο η διάβρωση των μεταλλικών κατασκευών είναι εντονότερη σε παραθαλάσσιες περιοχές. Επίσης, ενώσεις που δίνουν όξινο χαρακτήρα στην υγρασία (π.χ. CO₂, SO₂, H₂S, N_xO_y κ.λ.π, οι οποίες μπορεί να υπάρχουν στον αέρα περιοχών με ατμοσφαιρική ρύπανση) αυξάνουν ακόμα περισσότερο την ταχύτητα της διάβρωσης. Για παράδειγμα για την ατμοσφαιρική διάβρωση του σιδήρου ισχύει η ακόλουθη αντίδραση:



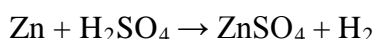
ii. Διάβρωση κάτω ή μέσα στο έδαφος (ξηρό ή υγρό, καθαρό ή ρυπασμένο)

Αυτή προκαλείται στα μέταλλα που έρχονται σε επαφή με το έδαφος. Συνήθως στο έδαφος αφθονούν περιπλανώμενα ηλεκτρικά ρεύματα, που προκαλούν πραγματικές

ηλεκτρολύσεις, στις οποίες οι υπεδάφειες μεταλλικές κατασκευές συμπεριφέρονται σαν ηλεκτρόδια και το νερό με τα διαλυμένα εντός αυτού άλατα σαν ηλεκτρολύτης.

iii. Η διάβρωση των μετάλλων από διαλύματα (χημική διάβρωση)

Αυτή προκαλείται στα μέταλλα που έρχονται σ' επαφή με διαλύματα. Συνήθως ο τύπος αυτός της διάβρωσης οφείλεται στη χημική επίδραση, επί των μετάλλων, των ουσιών που είναι διαλυμένες. Για παράδειγμα, κατά την επαφή Zn με αραιό διάλυμα H₂SO₄ λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του μετάλλου η ακόλουθη αντίδραση:



iv. Διάβρωση στο θαλασσινό νερό (μέσα, πάνω ή κοντά σε αυτό, καθαρό ή ρυπασμένο)

v. Διάβρωση στο γλυκό νερό (μέσα, πάνω ή κοντά σε αυτό, καθαρό ή ρυπασμένο)

vi. Διάβρωση από καυσαέρια ή θερμά αέρια (ξηρά ή με παρουσία υγρασίας)

vii. Πυρηνική διάβρωση (σε ξηρή ή υγρή κατάσταση) και γενικότερα διάβρωση από ακτινοβολίες

2.7. Μέθοδοι Εκτίμησης της Διάβρωσης Οπλισμού (17)

Δεδομένων των αρνητικών συνεπειών της διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού στην ασφαλή και οικονομική συν τω χρόνω λειτουργία των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος ή οπλισμένης τοιχοποιίας, έχει πραγματοποιηθεί σημαντική προσπάθεια εκτίμησης του βαθμού έκτασης και της ταχύτητας ανάπτυξης των διαβρωτικών διεργασιών στους ενσωματωμένους οπλισμούς σε σκυρόδεμα. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει δυνατότητα ελέγχου της διάβρωσης τόσο σε πειραματικό επίπεδο στο εργαστήριο, όσο και στις πραγματικές συνθήκες σε υπάρχουσες κατασκευές.

Οι μέθοδοι εκτίμησης της κατάστασης των διαβρωτικών διεργασιών χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Στην πρώτη, οι αναπτυχθείσες τεχνικές βασίζονται στην αναπτυσσόμενη ροή ηλεκτρικού ρεύματος όταν πραγματοποιείται διάβρωση του

οπλισμού από τη μάζα του εμπεριέχοντος οπλισμό υλικού (σκυροδέμα ή κονίαμα δόμησης). Οι τεχνικές αυτές χαρακτηρίζονται ως μη καταστρεπτικές καθώς για την πρόσληψη των απαραίτητων στοιχείων δεν απαιτείται καταστροφή του υλικού. Στη δεύτερη περίπτωση η διάβρωση προσδιορίζεται βάσει μετρήσεων σε τεμάχια τόσο του σκυροδέματος όσο και του ίδιου του οπλισμού. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων αυτών είναι αναγκαία η καταστροφή και αποκοπή τμήματος του εκάστοτε στοιχείου, με αποτέλεσμα αφ' ενός το χαρακτηρισμό των τεχνικών αυτών ως καταστρεπτικών, και αφ' ετέρου τον περιορισμό της χρήσης τους μονάχα σε εργαστηριακό επίπεδο.

Οι συχνότερα εφαρμοζόμενες και πλέον καθιερωμένες μη καταστρεπτικές μέθοδοι εκτίμησης της διάβρωσης οπλισμού εγκιβωτισμένου σε σκυροδέμα είναι η μέτρηση δυναμικού της διάβρωσης (corrosion current), η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του σκυροδέματος (concrete resistivity) και η μέτρηση της αντίστασης πόλωσης (polarization resistance). Στην πρώτη περίπτωση μετριέται το δυναμικό το οποίο αποτελεί την κινητήρια δύναμη με την οποία πραγματοποιείται η μετακίνηση των ιόντων στο υλικό, στη δεύτερη η ηλεκτρική αντίσταση του υλικού και στην τελευταία η ένταση του ρεύματος διάβρωσης (από όπου εκτιμάται ο ρυθμός διάβρωσης). Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται εργαστηριακά σε δοκίμια σκυροδέματος με ενσωματωμένο οπλισμό, ενώ δύνανται να εφαρμοστούν και σε υφιστάμενες κατασκευές. Τα πλεονεκτήματα των μεθόδων αυτών είναι ότι έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογής και κυρίως ότι δεν επιφέρουν καμία φθορά στο υπό εξέταση στοιχείο. Ωστόσο, λόγω της μεγάλης επιρροής των περιβαλλοντικών συνθηκών (υγρασίας και θερμοκρασίας) στις πραγματοποιούμενες μετρήσεις, η αξιοπιστία τους δεν είναι πάντοτε εξασφαλισμένη. Πάραυτα αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την παρακολούθηση και τη μελέτη φαινομένων διάβρωσης στον οπλισμό στοιχείων σκυροδέματος ή φέρουσας τοιχοποιίας.

Στις καταστρεπτικές μεθόδους εκτίμησης των διαβρωτικών φαινομένων συγκαταλέγονται η μέτρηση του βάθους ενανθράκωσης, η απώλεια βάρους του οπλισμού και η μέτρηση της συγκέντρωσης χλωριόντων στη μάζα του σκυροδέματος. Το βάθος ενανθράκωσης δίνει το βαθμό καταστροφής του αλκαλικού περιβάλλοντος γύρω από τη ράβδο, και η συγκέντρωση χλωριόντων δίνει μια ένδειξη της υφιστάμενης επικινδυνότητας για διάβρωση. Οι τρεις αυτές τεχνικές περιορίζονται σε εργαστηριακό επίπεδο. Προς τούτο κατασκευάζονται δοκίμια σκυροδέματος ορθογωνικά ή κυλινδρικά, με ή χωρίς οπλισμό, τα οποία υποβάλλονται σε διάφορες πραγματικές ή τεχνητές περιβαλλοντικές δράσεις. Στις περιόδους λήψης δεδομένων, τμήμα των δοκιμίων αποκόπτεται και πραγματοποιούνται οι επιθυμητές μετρήσεις. Στην περίπτωση ενσωμάτωσης οπλισμού, στον οποίο μετράται η απώλεια βάρους του, τα δοκίμια καταστρέφονται πλήρως ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή του

οπλισμού και η ζύγιση του (προφανώς έχει προηγηθεί η ζύγιση της ράβδου κατά την κατασκευή των δοκιμίων).

Τα εκάστοτε πειραματικά δοκίμια (ανεξάρτητα από την εφαρμοζόμενη μέθοδο) είναι δυνατόν να τοποθετηθούν σε συγκεκριμένες τοποθεσίες (οι οποίες χαρακτηρίζονται από έντονα διαβρωτικά στοιχεία) όπως παραθαλάσσιες περιοχές, εντός θαλάσσης ή πλησίον βιομηχανικών περιοχών επιβαρυσμένων με θειικά άλατα. Όμως, καθώς η διεξαγωγή συμπερασμάτων σε συνθήκες περιβάλλοντος καθίσταται χρονοβόρος, τις περισσότερες φορές επιλέγεται η επιβολή τεχνητών δράσεων με επιτάχυνση των διαβρωτικών συνεπειών, η οποία πραγματοποιείται είτε με την εμβάπτιση των δοκιμίων εντός διαλυμάτων NaCl, είτε με την τοποθέτησή τους σε ειδικούς θαλάμους αλατονέφωσης.

2.8. Η ταχύτητα της διάβρωσης (15)

Η ταχύτητα της διάβρωσης προκύπτει από την ταχύτητα του βραδύτερου ενδιάμεσου σταδίου της συνολικής αντίδρασης, που λαμβάνει χώρα κατά την διάβρωση. Ειδικότερα η ταχύτητα της επιφανειακής διάβρωσης ενός μεταλλικού αντικειμένου που διαβρώνεται ομοιόμορφα, μπορεί να εκφραστεί με έναν από τους ακόλουθους δύο τρόπους:

1. Η ταχύτητα της διάβρωσης r_1 δίνεται από τον λόγο της μεταβολής του πάχους dh του διαβρωμένου τμήματος του μεταλλικού αντικειμένου προς το χρονικό διάστημα dt στο οποίο αυτή επιτυγχάνεται.

$$r_1 = dh / dt \quad (1)$$

2. Η ταχύτητα της διάβρωσης r_2 δίνεται από τον λόγο της απώλειας της μάζας dm του διαβρωμένου μεταλλικού αντικειμένου προς το χρονικό διάστημα dt στο οποίο αυτή επιτυγχάνεται.

$$r_2 = dm / dt \quad (2)$$

Για μικρά πάχη ομοιόμορφα διαβρωμένου μεταλλικού αντικειμένου ισχύει κατά προσέγγιση η ακόλουθη σχέση :

$$m = \rho \cdot S \cdot h \quad (3)$$

όπου:

- m : η μάζα του διαβρωμένου τμήματος του μεταλλικού αντικειμένου
- ρ : η πυκνότητα του μεταλλικού αντικειμένου
- S : η επιφάνεια διάβρωσης του μεταλλικού αντικειμένου
- h : το πάχος του διαβρωμένου τμήματος του μεταλλικού αντικειμένου

Από τις σχέσεις (1), (2) και (3) προκύπτει:

$$r_2 = dm / dt = \rho \cdot S \cdot (dh / dt) = \rho \cdot S \cdot r_1 \quad (4)$$

Έχοντας υπόψη τη σχέση (4), στη συνέχεια η ταχύτητα της διάβρωσης θα δίνεται από την ακόλουθη γενική σχέση :

$$r = dy / dt \quad (5)$$

όπου:

- r : η ταχύτητα της διάβρωσης του μεταλλικού αντικειμένου
- dy : η μεταβολή της μάζας ή του πάχους του διαβρωμένου τμήματος του μεταλλικού αντικειμένου
- dt : το χρονικό διάστημα εντός του οποίου επήλθε η μεταβολή dy

Δεν υπάρχει ένας γενικός νόμος που να δίνει την ταχύτητα της διάβρωσης όλων των μετάλλων συναρτήσει του χρόνου. Σε μερικές περιπτώσεις η ταχύτητα διάβρωσης παραμένει σταθερή, σε άλλες μειώνεται και σε άλλες αυξάνει συναρτήσει του χρόνου.

Εάν είναι γνωστή η ταχύτητα $r(t)$ της διάβρωσης ενός μεταλλικού αντικειμένου συναρτήσει του χρόνου, τότε από την σχέση (5) προκύπτει η σχέση $dy = r(t)dt$, η οποία με ολοκλήρωση, για y από 0 έως y και για t από 0 έως t , δίνει μια σχέση της μορφής $y=y(t)$. Η σχέση αυτή δείχνει το πόσο έχει προωθηθεί η διάβρωση του μεταλλικού αντικειμένου από τον χρόνο έναρξης μέχρι τη χρονική στιγμή t . Αντίστροφα, αν είναι γνωστή η σχέση $y=y(t)$, τότε με βάση τη σχέση (5) μπορεί να προσδιοριστεί η ταχύτητα της διάβρωσης.

Η μορφή του μαθηματικού μοντέλου $y=y(t)$ εξαρτάται από τη φύση του μεταλλικού αντικειμένου και από τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο βρίσκεται.

Οι περισσότερο γνωστές μορφές του μαθηματικού μοντέλου $y=y(t)$, που συναντώνται στις διάφορες διαβρώσεις μεταλλικών αντικειμένων, είναι οι ακόλουθες:

1. Το παραβολικό μοντέλο του Wagner. Ισχύει σε κάθε σημαντικό αριθμό διαβρώσεων και έχει την ακόλουθη μορφή: $y = K \cdot t$

Όπου K είναι η εμπειρική σταθερά, που προκύπτει από τη σταθερά της ταχύτητας του βραδύτερου σταδίου της συνολικής αντίδρασης της διάβρωσης και εξαρτάται από τις διάφορες μεταβλητές του φαινομένου της διάβρωσης.

2. Το γραμμικό μοντέλο. Ισχύει κυρίως για τη διάβρωση μεταλλικών αντικειμένων με μεγάλη επιφανειακή τάση και έχει την ακόλουθη μορφή: $y = K \cdot t$

3. Το εκθετικό μοντέλο. Ισχύει σε πολλές περιπτώσεις διάβρωσης μεταλλικών αντικειμένων από υγρά (π.χ. διαλύματα οξέων) και έχει την ακόλουθη μορφή: $y = e^{Kt}$

2.9. Συνθήκες εμφάνισης της διάβρωσης (13)

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονίσουμε πως δεν υπάρχει μέταλλο ή κράμα, οσοδήποτε ευγενές ή παθητικό κι αν είναι αυτό, που στην πράξη να μην παθαίνει διάβρωση. Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος επεμβαίνει αμείλικτα, με αποτέλεσμα τη διάβρωση των μετάλλων και των κραμάτων. Για το λόγο αυτό, στην πράξη δεν εξαρτάται από το περιβάλλον στο οποίο είναι εκτεθειμένο το υλικό, αν θα λάβει χώρα διάβρωση ή όχι.

Η διάβρωση, όπως αναφέραμε, θα πραγματοποιηθεί σε οποιοδήποτε περιβάλλον (αν εξαιρέσει κανείς το ξηρό αέριο που δεν αντιδρά με το μέταλλο) ακόμη και χωρίς να υπάρχει άμεση επαφή των μετάλλων και των κραμάτων με οξυγόνο ή υγρασία.

Για αυτό, από την άποψη του ορισμού της διάβρωσης, το διαφορετικό είδος του διαβρωτικού περιβάλλοντος δεν οδηγεί σε καμία ουσιώδη ποιοτική διαφορά.

2.10. Δράσεις που γίνονται κατά τη διάβρωση (13)

Η κύρια και βασική δράση κατά τη διάβρωση είναι οξειδωτική, με την έννοια βέβαια της απομάκρυνσης ηλεκτρονίων από το μέταλλο ή το κράμα. Έτσι, η διάβρωση είναι η δημιουργία οποιασδήποτε ένωσης (οξειδία, θεικές, θειούχες κλπ ενώσεις). Είναι συνεπώς και η διάλυση του μετάλλου και η δημιουργία υδροξειδίων από την υδρόλυση. Επίσης, διάβρωση είναι η απομάκρυνση ηλεκτρονίων με ταυτόχρονη απομάκρυνση μεταλλικών ιόντων. Εξαιτίας της συνύπαρξης πάνω στην επιφάνεια και τοπικών γαλβανικών στοιχείων πραγματοποιούνται και τοπικές αναγωγές.

2.11. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση (15)

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση ενός μετάλλου είναι:

- Η δραστικότητα του μετάλλου

Επειδή η διάβρωση του μετάλλου είναι ένα φαινόμενο οξειδοαναγωγής, αυτή εξαρτάται από το κανονικό δυναμικό αναγωγής ενός μετάλλου. Γενικά, όσο πιο μεγάλο είναι το κανονικό δυναμικό αναγωγής ενός μετάλλου, τόσο λιγότερο δραστικό είναι, τόσο πιο δύσκολα οξειδώνεται και επομένως τόσο πιο πολύ αντέχει στη διάβρωση.

- Οι συγκεντρώσεις οξειδωτικών ουσιών στο περιβάλλον του μετάλλου

Συνήθως η ύπαρξη οξειδωτικών ουσιών στο περιβάλλον του μετάλλου επιταχύνει την διάβρωσή του. Η επιτάχυνση αυτή είναι τόσο μεγαλύτερη όσο υψηλότερες είναι οι συγκεντρώσεις των οξειδωτικών ουσιών στο περιβάλλον. Σε μερικές όμως περιπτώσεις η ύπαρξη τέτοιων ουσιών επιβραδύνει την διάβρωση του μετάλλου, λόγω συνήθως της δημιουργίας στην επιφάνεια του μετάλλου προστατευτικού οξειδίου.

- Η οξύτητα του περιβάλλοντος του μετάλλου

Κατά την επαφή του μετάλλου με διαλύματα, υπάρχει τάση του μετάλλου να διαβρωθεί αντικαθιστώντας τα ιόντα υδρογόνου του διαλύματος. Η τάση αυτή συνδέεται άμεσα με την θέση του μετάλλου στην σειρά δραστικότητας των στοιχείων. Καθώς κατά τη διάβρωση αυτή λαμβάνει χώρα εκφόρτιση των ιόντων υδρογόνου, η συγκέντρωση αυτών, η οποία εκφράζεται με το pH του διαλύματος, είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την διάβρωση του μετάλλου. Γενικά, τα όξινα διαλύματα (χαμηλό pH) είναι περισσότερο διαβρωτικά από τα ουδέτερα (pH = 7) και τα αλκαλικά διαλύματα (υψηλό pH).

- Η αγωγιμότητα του διαβρωτικού περιβάλλοντος

Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του διαβρωτικού περιβάλλοντος, τόσο μεγαλύτερη είναι η διάβρωση. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για την μεγάλη διαβρωτική ικανότητα του θαλασσινού νερού, που έχει υψηλή αγωγιμότητα λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης αλάτων που περιέχει. Για τον ίδιο λόγο, η διάβρωση των μεταλλικών κατασκευών είναι εντονότερη σε παραθαλάσσιες περιοχές, αφού σταγονίδια θαλασσινού νερού παρασύρονται από τον άνεμο (αλατονέφωση) και αυξάνουν την αγωγιμότητα της υγρασίας του αέρα.

- Η ταχύτητα ροής του ρευστού (αέρας ή υγρό) που περιβάλλει το μέταλλο

Η μετάβαση από την ακινησία στην κίνηση και η αύξηση της ταχύτητας του ρευστού που περιβάλλει ένα μέταλλο, τείνει να επιταχύνει την διάβρωσή του. Αυτή η επίδραση εξηγείται από το γεγονός ότι, η αύξηση της ταχύτητας του μέσου που περιβάλλει το μέταλλο οδηγεί στην αύξηση του ρυθμού μεταφοράς των διαβρωτικών ουσιών προς την διαβρωνόμενη επιφάνεια και στην αύξηση του ρυθμού απομάκρυνσης των προϊόντων της διάβρωσης από την επιφάνεια.

- Η θερμοκρασία του μετάλλου

Είναι γνωστό ότι οι χημικές αντιδράσεις επιταχύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επομένως, και ο ρυθμός της διάβρωσης του μετάλλου αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας.

- Η δημιουργία παθητικών στρωμάτων στην επιφάνεια του μετάλλου

Σε μερικές περιπτώσεις με την έναρξη της διάβρωσης ενός μετάλλου, η εξέλιξη αυτής ελέγχεται από τα παθητικά στρώματα, τα οποία είναι δυνατόν να σχηματιστούν πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου. Τα στρώματα αυτά μπορούν να είναι είτε αδιαπέραστα και αδρανή, οπότε εμποδίζουν την διάβρωση να προχωρήσει, είτε διαπερατά, οπότε η διάβρωση συνεχίζεται.

- Η ανομοιογένεια της επιφάνειας του υλικού

Ακαθαρσίες και ρύπανση στην επιφάνεια του υλικού επιταχύνουν τη διάβρωση. Το ίδιο συμβαίνει και στις μικροσκοπικές ή μακροσκοπικές ανωμαλίες (προεξοχές).

- Η ύπαρξη μηχανικών τάσεων

Πλαστικές παραμορφώσεις και αταξίες δομής που προκλήθηκαν από μηχανική ή θερμική κατεργασία αυξάνουν τη διάβρωση. Μηχανική καταπόνηση του υλικού προκαλεί στρέβλωση του κρυσταλλικού πλέγματος του μετάλλου, με αποτέλεσμα τοπική ενεργειακή αναβάθμιση στην καταπονηθείσα περιοχή. Οι ενεργειακά αναβαθμισμένες περιοχές είναι χημικά δραστικότερες και επομένως οξειδώνονται ευκολότερα.

- Η ύπαρξη τριεπιφανειών

Η διάβρωση στην περιοχή των τριεπιφανειών είναι εντονότερη. Για παράδειγμα αναφέρουμε την ίσαλη γραμμή των πλοίων (αέρας – θάλασσα- χάλυβας) ή σωλήνες που διαπερνούν πατώματα (αέρας- μπετόν- χάλυβας)

Πέραν των προαναφερθέντων παραγόντων, υπάρχουν και άλλοι ειδικότεροι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τη διάβρωση ενός μετάλλου.

2.12. Διάβρωση οπλισμού σκυροδέματος (15,18)

2.12.1. Γενικά

Με την πάροδο του χρόνου στο σκυρόδεμα (μπετόν) συμβαίνουν διάφορα φαινόμενα φθοράς (π.χ. ενανθράκωση, οξειδωση οπλισμού κ.λπ.) που καθιστούν αναγκαία τη συντήρηση ή επισκευή του. Μεγάλο μερίδιο στη φθορά αυτού του δομικού στοιχείου έχουν οι περιβαλλοντικές καταπονήσεις, ιδίως εκείνες που οφείλονται σε μολυσμένη ατμόσφαιρα. Μία επιθεώρηση του σκυροδέματος σε αραιά χρονικά διαστήματα δίνει τη δυνατότητα να προληφθούν και να αποκατασταθούν πολύ οικονομικά οι ζημιές, οι οποίες σε επόμενα στάδια (π.χ. αποκάλυψη διαβρωμένου οπλισμού) απαιτούν ένα ευρύ φάσμα εξειδικευμένων εργασιών μεγαλύτερου κόστους.

2.12.2. Διάβρωση οπλισμού

Η διάβρωση προκύπτει σαν αποτέλεσμα του σχηματισμού ηλεκτροχημικών (γαλβανικών) στοιχείων. Ένα γαλβανικό στοιχείο συνήθως μπορεί να σχηματιστεί, όταν υπάρχουν:

- Μία άνοδος, όπου επέρχεται η διάβρωση.
- Μία κάθοδος, όπου επέρχεται η αναγωγή των προϊόντων διάβρωσης της ανόδου.
- Ένας μεταλλικός αγωγός (χαλύβδινος οπλισμός) για τη ροή του προκαλούμενου ηλεκτρικού ρεύματος.
- Ένας ηλεκτρολύτης, όπου το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει με την μορφή ιόντων.

Οι ανοδικές/καθοδικές περιοχές προκύπτουν σαν αποτέλεσμα επαφής διαφορετικών μετάλλων ή/και από την έκθεση σε διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος (αεριζόμενο / υγρό σκυρόδεμα, περιοχές διείσδυσης ιόντων χλωρίου ή ενανθράκωσης κ.λπ.).

Εάν οποιαδήποτε από τις ανωτέρω 4 προϋποθέσεις δεν πληρούται, η διάβρωση του οπλισμού αποφεύγεται.

Επίσης, είναι προφανές ότι ιδιαίτερα υποκείμενες σε κίνδυνο διάβρωσης κατασκευές είναι οι μερικά εγκατεστημένες σε διαβρωτικό περιβάλλον (π.χ. θαλασσίνο νερό και αέρας).

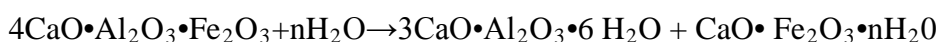
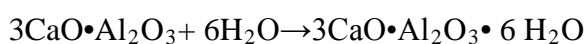
Αξιοσημείωτο είναι ότι η ενανθράκωση δεν παρατηρείται για πολλά χρόνια. Μόνον όταν οξειδωθεί ο οπλισμός παρατηρούνται αρχικά τριχοειδείς ρωγμές (βρέχοντας την επιφάνεια) λόγω της αύξησης του όγκου του, αφού τα προϊόντα της

διάβρωσης (σκουριά) έχουν μεγαλύτερο όγκο από τον αντίστοιχο χάλυβα. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη διόγκωση του οπλισμού υπερβαίνουν τις αντοχές του υπερκείμενου σκυροδέματος. Δημιουργούνται έτσι ρήγματα στο σκυρόδεμα που κάνουν ευκολότερη τη διείσδυση των ιόντων χλωρίου ή του διοξειδίου του άνθρακα και του οξυγόνου. Από το σημείο αυτό, το φαινόμενο οδηγεί σε αποσπάσεις θραυσμάτων και επιταχύνεται. Απαιτούνται τότε επίπονες προσπάθειες για τη διάγνωση των αιτιών και των αποτελεσμάτων του φαινομένου και σημαντικό κόστος για την αποκατάσταση, χωρίς να εξασφαλίζεται η αρχική κατάσταση, ακόμα και με την ενίσχυσή του με μανδύες πρόσθετου οπλισμού.

2.12.3. Το pH του πηγμένου σκυροδέματος

Οι βασικές ενώσεις που αποτελούν το κοινό τσιμέντο και συνιστούν τους καλούμενους υδραυλικούς παράγοντες έχουν καταγραφεί αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο (παράγραφος 1.3.3.).

Η πήξη και η τελική σκλήρυνση του μίγματος τσιμέντου-νερού (τσιμεντοπολτού) οφείλεται σε πολύπλοκες φυσικοχημικές μεταβολές, ανάμεσα στις οποίες βασικό ρόλο παίζουν οι αντιδράσεις ενυδάτωσης (αντίδραση με νερό). Αν και οι αντιδράσεις κατά την πήξη του τσιμέντου δεν είναι γνωστές με απόλυτη βεβαιότητα, γίνεται παραδεκτό, για τα τέσσερα βασικά συστατικά, ότι μπορούν να αποδοθούν από τις ακόλουθες αντιδράσεις:



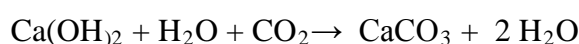
Παρατηρούμε ότι οι δύο πρώτες αντιδράσεις ενυδάτωσης παράγουν υδροξείδιο του ασβεστίου. Μπορεί να θεωρηθεί ότι το 25% περίπου του βάρους του τσιμέντου, βρίσκεται μετά την κρυστάλλωση υπό μορφή υδροξειδίου του ασβεστίου που είναι ισχυρή βάση. Σαν αποτέλεσμα το πηγμένο σκυρόδεμα έχει υψηλό αλκαλικό pH 12,5-13,9. Όσο ο οπλισμός (χάλυβας) βρίσκεται μέσα στο αλκαλικό αυτό περιβάλλον είναι προστατευμένος από τη διάβρωση. Σχηματίζεται ένα σταθερό προστατευτικό στρώμα οξειδίων στην επιφάνεια του χάλυβα (παθητικοποίηση) που εμποδίζει την ανοδική διάλυσή του. Η ανάγκη για προστατευτικά μέτρα αρχίζει όταν αυτό το σταθερό στρώμα οξειδίων γίνει ασταθές (όταν προκαλείται αποπαθητικοποίηση), χάρη στη διείσδυση χλωριόντων έως την επιφάνεια μετάλλου-μετόν ή την ενανθράκωση του σκυροδέματος που μειώνει την αλκαλικότητα. Η αποπαθητικοποίηση του

σκυροδέματος επιτρέπει τη διάβρωση του οπλισμού, όταν υπάρχει οξυγόνο και νερό στην επιφάνεια του χάλυβα.

2.12.4. Ενανθράκωση του σκυροδέματος

Όπως έχει αναφερθεί, το pH του πηγμένου σκυροδέματος είναι αλκαλικό. Αντιδράσεις όμως με διεισδύουσες όξινες ουσίες μειώνουν διαρκώς το pH.

Τη μέγιστη σημασία έχει εδώ η επίδραση του CO₂. Αυτό αφομοιώνεται τριχοειδώς από την επιφάνεια του μπετόν, διαλυμένο στο νερό της βροχής, μαζί μάλιστα με SO₂ (σε βιομηχανικές και μολυσμένες περιοχές). Τα αποτελέσματα της απορρόφησης του CO₂ είναι η εξουδετέρωση της αλκαλικότητας:



Το δημιουργούμενο ανθρακικό ασβέστιο δίνει και το όνομα της ενανθράκωσης στο φαινόμενο αυτό.

Η ενανθράκωση, ενώ δεν έχει καμία αρνητική επίπτωση στις αντοχές του μπετόν, έχει σαν μακροχρόνιο αποτέλεσμα την οξείδωση του οπλισμού, ρίχνοντας σιγά-σιγά το pH κάτω από το 9,5. Η αλκαλική προστασία δεν υφίσταται τότε. Το φαινόμενο αυτό επιταχύνεται δραστικά από πόρους, φωλεές, κακοτεχνίες, ανομοιογενή κακή δόνηση, αρμούς διακοπής εργασίας κ.λπ.

2.12.4.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα ενανθράκωσης

α. Περιεκτικότητα του μπετόν σε τσιμέντο.

Η αυξημένη περιεκτικότητα του μπετόν σε τσιμέντο μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης λόγω αύξησης της περιεκτικότητας σε Ca(OH)₂.

β. Ο λόγος νερού-τσιμέντου (N/T) και ο ρόλος των στεγανωτικών μάζας.

Το τσιμέντο δεσμεύει χημικά και φυσικά, περίπου 0,4 του βάρους του σε νερό. Για να επιτυγχάνεται όμως εργασιμότητα, συχνά αυξάνεται ο λόγος αυτός σε 0,5 ή και 0,6. Το πλεονάζον και μη δυνάμενο να δεσμευθεί νερό εξατμίζεται αφήνοντας τριχοειδή και πόρους που αργότερα θα είναι η αφετηρία της ενανθράκωσης. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ο ρόλος των στεγανωτικών μάζας τα οποία, πέραν του ότι κάνουν υδρόφοβους τους πόρους, μειώνουν την απαιτούμενη ποσότητα νερού (κατά 10-15%) λόγω των ρευστοποιητικών τους ιδιοτήτων. Κατά μία άποψη, επειδή τα στεγανωτικά μάζας δεν έχουν δοκιμαστεί στον χρόνο, πρέπει να αποφεύγονται και το πρόβλημα να αντιμετωπίζεται με σκυρόδεμα μειωμένης υδατοπερατότητας (περισσότερη ποσότητα τσιμέντου).

γ .Κακή δόνηση.

Τα σημεία που δεν έχουν δονηθεί καλά αποτελούν αφετηρίες ενανθράκωσης.

δ .Υγρασιακή καταπόνηση.

Δεν μπορεί να γίνει διείδυση των βλαπτικών ουσιών όσο αυτές είναι σε αέρια μορφή, παρά μόνο όταν διαλυθούν σε νερό.

ε .Το πάχος κάλυψης του οπλισμού.

Το πάχος κάλυψης του οπλισμού πρέπει να είναι επαρκές βάσει του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Κ.Τ.Σ.).

2.12.4.2. Διάγνωση ενανθράκωσης

Υπάρχουν διάφορες ενέργειες που μπορούμε να κάνουμε για να διαπιστώσουμε έγκαιρα την έναρξη και το βάθος της ενανθράκωσης.

1. Ξύνοντας επιφανειακά το μπετόν (π.χ. με ένα κατσαβίδι) και βρέχοντάς το, ελέγχουμε την επιφανειακή αντοχή, το πορώδες και την απορροφητικότητα νερού.

2. Περνώντας νερό με ένα πινέλο, γίνονται ορατές οι τριχοειδείς ρωγμές, λόγω έναρξης διόγκωσης του οπλισμού.

3. Κτυπώντας με ένα σφυρί, ερευνούμε για φωλεές με τη βοήθεια του ήχου.

4. Με ειδικούς μαγνήτες ή κατάλληλο όργανο ελέγχεται το πάχος κάλυψης του οπλισμού.

5. Τεστ φαινολοφθαλεΐνης. Σκάβουμε το μπετόν μέχρι να αποκαλυφθεί ο οπλισμός, απομακρύνουμε την σκόνη, διαβρέχουμε με απεσταγμένο (με πινέλο) και ακολούθως επαλείφουμε διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης 0,1% σε οινόπνευμα.

Αποτελέσματα:

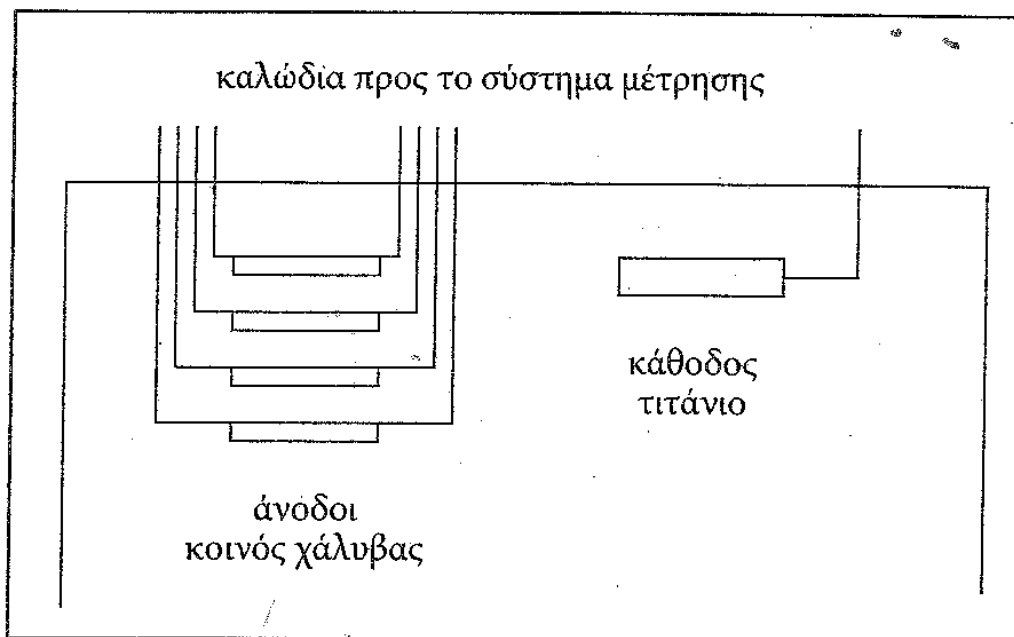
Κόκκινη βιολετιά απόχρωση pH>9

Ελαφριά ροζ απόχρωση pH=8,4

Καμία απόχρωση pH<8,4

Από τους ανάλογους χρωματισμούς μπορούμε να διαγνώσουμε το βάθος της ενανθράκωσης.

6. Άλλη μια μέθοδος, που αναπτύχθηκε στο Πολυτεχνείο του Aachen της Γερμανίας (1992), βασίζεται στην δημιουργία τεχνητών μακροστοιχείων που αποτελούν ράβδοι κοινού χάλυβα (άνοδοι) τοποθετημένες σε διάφορα βάθη στην επικάλυψη του οπλισμού (π.χ. ανά 15mm βάθος), σε συνδυασμό με μία κάθοδο από τιτάνιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Οι ράβδοι δεν έρχονται σε επαφή μεταξύ τους ή με τον οπλισμό του σκυροδέματος. Σε φυσιολογικές συνθήκες το περιβάλλον είναι αλκαλικό, η επιφάνεια των μετάλλων καλύπτεται από προστατευτικό στρώμα, δεν υπάρχει ροή ιόντων και το γαλβανικό στοιχείο είναι ανενεργό.



Σχήμα 2.2. Διάταξη τεχνητού γαλβανικού στοιχείου

Όταν όμως η διείσδυση ιόντων χλωρίου ή η ενανθράκωση φθάσει μέχρι την 1η άνοδο, το σκυρόδεμα γίνεται αγωγίμο, το προστατευτικό στρώμα στην επιφάνεια της ανόδου καταστρέφεται και το γαλβανικό στοιχείο παράγει ρεύμα. Με ένα μικροαμπερόμετρο μπορούμε να μετρήσουμε την ένταση του προκαλούμενου ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ της πρώτης ανόδου και της καθόδου, ενώ οι υπόλοιπες άνοδοι είναι ανενεργές. Όταν η διάβρωση του σκυροδέματος προχωρήσει, ενεργοποιείται η δεύτερη άνοδος, στη συνέχεια η τρίτη κ.λπ. Μετρώντας, επομένως, την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ των διαφόρων ανόδων και της καθόδου μπορούμε να καθορίσουμε σε ποιο βάθος έχει φθάσει η διείσδυση των χλωριόντων ή η ενανθράκωση και να αποφύγουμε τη διάβρωση του οπλισμού με τη λήψη κατάλληλων μέτρων.

2.12.5. Διάβρωση του οπλισμού σε σκυρόδεμα με χλωριόντα

Τα χλωριόντα δεν έχουν αξιόλογη δυνατότητα διάβρωσης του σκυροδέματος, αλλά έχουν μεγάλη διαβρωτική ικανότητα στον οπλισμό. Η διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος από τα χλωριόντα αποτελεί ένα φαινόμενο, που παρατηρείται πολύ συχνά στις κατασκευές. Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι, κατά την παρουσία χλωριόντων, η αποπαθητικοποίηση του χάλυβα μπορεί να αρχίσει σε υψηλότερες από τις κανονικές τιμές του pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος με τη μορφή βελονισμών (pitting corrosion). Η φθορά στο σκυρόδεμα από τη διάβρωση του

σιδηροπλισμού εκδηλώνεται με τη μορφή διόγκωσης, ρηγματώσης και θρυμματισμού της επικάλυψης του οπλισμού. Επιπροσθέτως, λόγω της απώλειας της επικάλυψης, το στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να υποστεί δομικές φθορές, λόγω απώλειας της συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος και μείωσης της διατομής του οπλισμού.

Τα χλωριόντα, που βρίσκονται στη μάζα του σκυροδέματος, μπορεί να προέρχονται είτε από τα υλικά κατασκευής του (π.χ. ανεπαρκώς κατεργασμένα αδρανή, άμμος θαλάσσης, γλυφό νερό), στα οποία βρίσκονται με τη μορφή αλάτων τους, είτε μπορεί να μεταφέρονται από το περιβάλλον στο εσωτερικό του (διείσδυση θαλασσινού νερού και διαλυμάτων αλάτων από διάλυση του πάγου). Τα χλωριόντα μπορούν, επίσης, να βρεθούν σε παραθαλάσσιες κατασκευές και στη μάζα του οδοστρώματος, όταν κατά τους χειμερινούς μήνες χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες αλατιού, για να απομακρυνθεί ο πάγος. Στην πρώτη περίπτωση τα χλωριόντα είναι σχεδόν ομοιόμορφα κατανεμημένα στη μάζα του σκυροδέματος, ενώ στη δεύτερη η συγκέντρωση παρουσιάζει μια μέγιστη τιμή κοντά στην επιφάνεια και ελαττώνεται όσο το βάθος από την επιφάνεια του σκυροδέματος αυξάνει.

Η μεταφορά των χλωριόντων από το περιβάλλον στο εσωτερικό του σκυροδέματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, είτε με διάχυση είτε με μεταφορά τους μέσω του νερού. Όταν η μεταφορά τους γίνεται με το δεύτερο τρόπο, τότε τα ποσά των μεταφερόμενων χλωριόντων είναι μεγαλύτερα συγκριτικά με εκείνα του πρώτου τρόπου. Η μεταφορά των αλάτων μέσω του νερού των πόρων ακολουθεί το δεύτερο νόμο του Fick. Σε αντίθεση με την ενανθράκωση, όπου παρατηρείται μέτωπο μεταφοράς, τα χλωριόντα παρουσιάζουν συνεχή κατανομή στη μάζα του σκυροδέματος. Η διείσδυση των χλωριόντων στη μάζα του σκυροδέματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, οι σπουδαιότεροι από τους οποίους είναι:

- Το πορώδες και η κατανομή του μεγέθους των πόρων του σκυροδέματος.
- Το είδος του χρησιμοποιηθέντος τσιμέντου.
- Η ποσότητα του νερού των πόρων του σκυροδέματος.
- Οι περιβαλλοντικές συνθήκες.

Από το σύνολο των χλωριόντων, που υπάρχουν μέσα στο σκυρόδεμα, εκείνα που συμμετέχουν ενεργά στη διάβρωση του οπλισμού του είναι αυτά που είναι δυνατόν να διαλυθούν στο νερό των πόρων του σκυροδέματος (διαλυτά ή ελεύθερα χλωριόντα) και τα οποία μπορούν να φτάσουν στην επιφάνεια του οπλισμού, όπου προκαλούν την αποπαθητικοποίησή του. Στα συνολικά χλωριόντα περιλαμβάνονται, εκτός από τα ελεύθερα (διαλυτά), κι εκείνα που συμμετέχουν στο σχηματισμό κρυσταλλικών ενώσεων στο σκυρόδεμα. Τα συνολικά χλωριόντα προσδιορίζονται με διάλυση του κονιοποιημένου σκυροδέματος σε διάλυμα HNO_3 1M. Τα ελεύθερα

(διαλυτά) χλωριόντα μπορούν να προσδιοριστούν με εκχύλιση του κονιοποιημένου σκυροδέματος με διάλυμα καυστικού καλίου, αιθυλικής αλκοόλης ή με συμπίεση του σκυροδέματος, σε κατάλληλη συσκευή, για την απομάκρυνση του υγρού των πόρων. Οι διάφοροι τρόποι και μέθοδοι μέτρησης των διαλυτών χλωριόντων, για το ίδιο δείγμα σκυροδέματος, δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα. Φαίνεται να επικρατεί η αντίληψη ότι η συμπίεση του σκυροδέματος για την απομάκρυνση του υγρού των πόρων δίνει τα πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Τα χλωριόντα, που είναι διαλυμένα στο υγρό των πόρων του σκυροδέματος, είναι δυνατόν να δεσμευθούν με φυσικό ή χημικό τρόπο. Ο φυσικός τρόπος συνίσταται στη ρόφηση τους στην επιφάνεια των πόρων του σκυροδέματος, ενώ ο χημικός στο σχηματισμό διαφόρων ενώσεων, η συνηθέστερη από τις οποίες είναι το άλας του Friedel (Friedel's salt: $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό του άλατος του Friedel διαδραματίζει η περιεκτικότητα του τσιμέντου σε C_3A . Βέβαια, η δέσμευση των χλωριόντων δεν εξαντλείται μόνο με το εν λόγω άλας, ούτε ο σχηματισμός του άλατος αυτού είναι δυνατόν να γίνει μόνο με το C_3A .

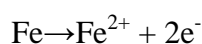
Το τσιμέντο Portland έχει τη δυνατότητα να συγκρατήσει δεσμευμένα 0.4 gCl/100 g τσιμέντου. Γενικά, στην πράξη έχει επικρατήσει το κριτήριο Ritzard, σύμφωνα με το οποίο ποσότητες χλωριόντων μεγαλύτερες από 0.4 gCl/100 g τσιμέντου μπορούν να μετατρέψουν την παθητική κατάσταση του χάλυβα στο σκυροδέμα σε ενεργή (έστω και με υψηλή τιμή pH). Ποσότητες χλωριόντων μεγαλύτερες από 1 gCl/100 g τσιμέντου απαιτούν άμεση λήψη μέτρων προστασίας της κατασκευής. Άλλοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι είναι ορθότερο να εξετάζεται η τιμή του λόγου των χλωριόντων προς το pH. Βάσει αυτής της θεώρησης, κατά την παρουσία χλωριόντων και ανάλογα της αριθμητικής τιμής του λόγου $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$, το προστατευτικό στρώμα του χάλυβα μπορεί να καταστραφεί (έναρξη αποπαθητικοποίησης) ακόμη και αν οι τιμές του pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος είναι σημαντικά υψηλότερες από τις κανονικές (>12.5). Έτσι, όταν ο λόγος $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 0.6, ο χάλυβας δεν προστατεύεται επί μακρόν έναντι της διάβρωσης, πιθανώς επειδή το στρώμα οξειδίου του σιδήρου είτε γίνεται διαπερατό, είτε γίνεται ασταθές υπό αυτές τις συνθήκες. Για τα τυπικά μίγματα σκυροδέματος, που χρησιμοποιούνται στην πράξη, αναφέρεται ότι η περιεκτικότητα σε χλωριόντα για έναρξη της διάβρωσης πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0.6-0.9 kgCl/m³ σκυροδέματος.

Τα τσιμέντα, που περιέχουν ποζολανικά πρόσθετα, έχουν τη δυνατότητα δέσμευσης μεγαλύτερης ποσότητας χλωριόντων σε σχέση με τα απλά τσιμέντα, ενώ, επειδή η χρησιμοποίησή τους επιφέρει μείωση του πορώδους, παρεμποδίζουν τη διείσδυση των χλωριόντων στη μάζα του σκυροδέματος. Επιπλέον, τα συγκεκριμένα τσιμέντα μπορούν να περιέχουν σημαντικά μεγαλύτερα ποσοστά χλωριόντων σε

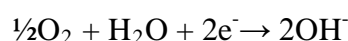
σχέση με το αμιγές τσιμέντο Portland, χωρίς τον κίνδυνο διάβρωσης του οπλισμού. Όταν τα χλωριόντα εισέρχονται στο εσωτερικό του σκυροδέματος, τότε αυτά μπορούν να οδηγήσουν σε δυο περιπτώσεις διάβρωσης:

- Διάβρωση με δημιουργία τοπικού γαλβανικού στοιχείου
- Διάβρωση με δημιουργία γαλβανικού μακροστοιχείου.

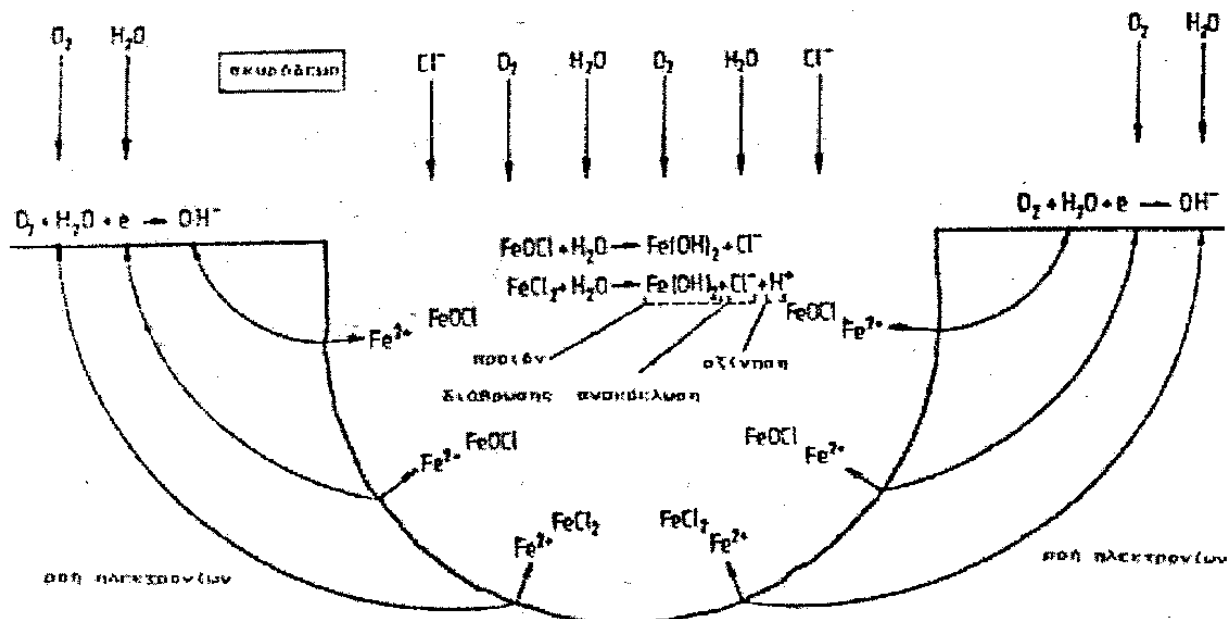
Όταν η συγκέντρωση των χλωριόντων αποκτήσει μια ορισμένη τιμή, τότε υπάρχουν αρκετά ελεύθερα χλωριόντα, τα οποία φθάνουν, λόγω διάχυσης, στην επιφάνεια του οπλισμού και προκαλούν την αποπαθητικοποίησή του. Η διάβρωση του οπλισμού παρουσία χλωριόντων απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3. και λαμβάνει χώρα με τη λειτουργία ενός τοπικού γαλβανικού στοιχείου. Στην άνοδο πραγματοποιείται διάλυση του σιδήρου κατά την αντίδραση:



και στην κάθοδο η αντίδραση:

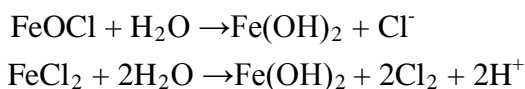


Τα ιόντα σιδήρου, που παράγονται κατά την ανοδική δράση, αντιδρούν αρχικά με τα χλωριόντα, που έχουν φθάσει στην επιφάνεια του οπλισμού, σχηματίζοντας (δι)χλωριούχο σίδηρο (FeCl_2). Στη συνέχεια ο χλωριούχος σίδηρος, παρουσία του οξυγόνου, μετατρέπεται σε χλωρίδιο του τρισθενούς σιδήρου (FeOCl – οξείδωση του σιδήρου σε τρισθενή σίδηρο).



Σχήμα 2.3. Διάβρωση του οπλισμού σε σκυρόδεμα με χλωριόντα.

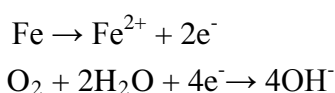
Κατόπιν, λόγω της παρουσίας νερού, λαμβάνει χώρα υδρόλυση των προϊόντων της διάβρωσης σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Από τις παραπάνω αντιδράσεις προκύπτει ότι τα χλωριόντα, που είχαν δεσμευθεί στα προϊόντα της διάβρωσης, επιστρέφουν στο διάλυμα των πόρων, λόγω της υδρόλυσης, ενώ ταυτόχρονα γίνεται και τοπική οξίνιση του διαλύματος αυτού. Συνεπώς, είναι προφανές, ότι η δράση των χλωριόντων αποτελεί ένα αυτοκαταλυόμενο σύστημα αντιδράσεων, όταν η συγκέντρωσή τους φθάσει σε ένα ορισμένο επίπεδο. Έτσι, ακόμη και αν σταματήσει η περαιτέρω είσοδος χλωριόντων, η διάβρωση του οπλισμού δεν παρεμποδίζεται και συνεχίζεται, επειδή η συγκέντρωση των χλωριόντων στην επιφάνεια του οπλισμού παραμένει σταθερή. Η αναγκαία ροή ηλεκτρονίων πραγματοποιείται μέσω του χάλυβα, ενώ η μετακίνηση των ιόντων γίνεται μέσα στους πόρους του σκυροδέματος. Μια τέτοια περίπτωση διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως ιδιοδιάβρωση, σε αντίθεση με τη δημιουργία ενός μακροσκοπικού γαλβανικού στοιχείου, που μπορεί να δημιουργηθεί στο οπλισμένο σκυρόδεμα κατά τη διείσδυση των χλωριόντων.

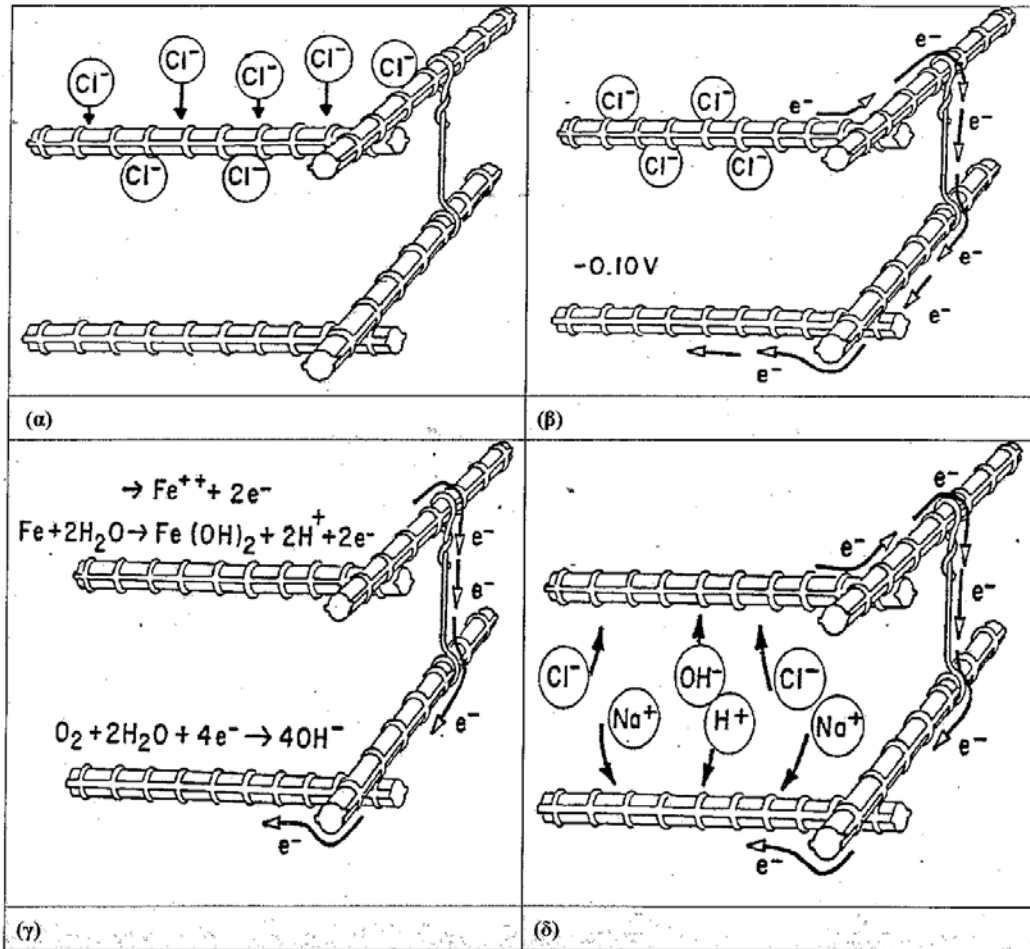
Στην περίπτωση του οπλισμένου σκυροδέματος, η δημιουργία μακροστοιχείων οφείλεται σε επιδράσεις του περιβάλλοντος. Στην πράξη (π.χ. σε θαλάσσιο περιβάλλον) συχνά παρουσιάζεται η περίπτωση της διείσδυσης των χλωριόντων από

τη μία μόνο πλευρά της κατασκευής. Τότε είναι δυνατή η περίπτωση, που περιγράφεται στο Σχήμα 2.4. Τα χλωριόντα φτάνουν, μετά από ένα χρονικό διάστημα, στις πρώτες ράβδους του οπλισμού, ενώ αυτές που βρίσκονται προς το εσωτερικό τμήμα της κατασκευής δεν έχουν γύρω τους χλωριόντα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4 (α). Μεταξύ των εσωτερικών και των εξωτερικών ράβδων αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού (δημιουργία μακροστοιχείου μέσω των συνδετήρων), όπως εικονίζεται στο Σχήμα 2.4 (β). Οι ράβδοι, με τη μεγάλη συγκέντρωση χλωριόντων αποτελούν την άνοδο, ενώ οι ράβδοι χωρίς χλωριόντα (ή με μικρή συγκέντρωση χλωριόντων) αποτελούν την κάθοδο του γαλβανικού στοιχείου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4 (γ). Στο ίδιο σχήμα περιγράφονται και οι ηλεκτροχημικές δράσεις του γαλβανικού μακροστοιχείου:



Στη συνέχεια, σχηματίζεται υδροξείδιο του σιδήρου. Μέσω των πόρων του σκυροδέματος αρχίζει η μεταφορά των ιόντων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4 (δ).

Η ταχύτητα της διάβρωσης εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος του γαλβανικού μακροστοιχείου. Η ένταση του ρεύματος, με τη σειρά της, εξαρτάται από το δυναμικό του μακροστοιχείου (δυναμικό μεταξύ ανόδου - καθόδου), από τον λόγο της ανοδικής προς την καθοδική επιφάνεια και από την ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος. Η ταχύτητα διάβρωσης στην περίπτωση σχηματισμού γαλβανικού μακροστοιχείου είναι, κατά κανόνα, πολύ μεγαλύτερη από αυτήν της ιδιοδιάβρωσης.



Σχήμα 2.4. Σχηματισμός μακροστοιχείου σε σκυρόδεμα με χλωριόντα (α). Διείσδυση των χλωριόντων μέχρι τους πρώτους σπλισμούς (β). Η δημιουργία του γαλβανικού μακροστοιχείου (γ). Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις του γαλβανικού μακροστοιχείου (δ).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ - ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ

3.1. Μέθοδοι προστασίας οπλισμένου σκυροδέματος (7,21)

3.1.1. Γενικά

Η διάβρωση του σκυροδέματος, όπως αναφέραμε αναλυτικά στο προηγούμενο Κεφάλαιο, αποτελεί ένα από τα κυριότερα κατασκευαστικά και οικονομικά προβλήματα στις μέρες μας διεθνώς. Έτσι, όπως καταλαβαίνουμε, η πρόβλεψη του χρόνου ζωής κατασκευών από σκυρόδεμα με τις μέχρι τώρα γνώσεις για τη φθορά του σκυροδέματος είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα για την πραγματοποίηση ενός συστήματος καταγραφής και διαχείρισης των φθορών και ανάπτυξης μεθόδων προστασίας των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, έτσι ώστε να αποφεύγονται τυχόν αστοχίες λόγω διάβρωσης οι οποίες έχουν δείξει ότι μπορούν να αποβούν μοιραίες.

Για καινούργιες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, η λήψη μέτρων όπως:

- Η κατάλληλη επιλογή του είδους του τσιμέντου και των αδρανών
- Η μείωση του λόγου Νερού / Τσιμέντου
- Η σωστή δόνηση του σκυροδέματος κατά τη χύτευσή του
- Η σωστή συντήρηση του σκυροδέματος και
- Η σωστή επιλογή του πάχους επικάλυψης,

μπορούν να μειώσουν σημαντικά τη φθορά του οπλισμένου σκυροδέματος. Όταν όμως λόγω του περιβάλλοντος έκθεσης της κατασκευής Ο.Σ. τα μέτρα αυτά δεν είναι αρκετά για τον απαιτούμενο χρόνο ζωής της κατασκευής, τότε θα πρέπει να λαμβάνονται επιπρόσθετα μέτρα προστασίας όπως:

- Μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος με κατάλληλα πρόσθετα
- Μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος με επικαλύψεις όπως μονωτικά χρώματα
- Χρήση ειδικών χαλύβων
- Καθοδική προστασία σε νεόδμητες κατασκευές
- Χρήση χημικών αναστολέων διάβρωσης ως πρόσθετα σκυροδέματος

Οι μέθοδοι αποκατάστασης και συντήρησης από τη διάβρωση υφιστάμενων κατασκευών από Ο.Σ. περιλαμβάνουν:

- Καθαίρεση και αποκατάσταση των σαθρών δομικών στοιχείων σκυροδέματος
- Καθοδική προστασία
- Ηλεκτροχημική επανακαλοποίηση του σκυροδέματος
- Ηλεκτροχημική αφαλάτωση του σκυροδέματος
- Χρήση αναστολέων διάβρωσης
- Χρήση επιστρωμάτων

Η τεχνική που επιλέγεται κάθε φορά εξαρτάται από το βαθμό φθοράς και το περιβάλλον διάβρωσης. Σε πολλές περιπτώσεις ο συνδυασμός περισσότερων από δύο τεχνικών μπορεί να εφαρμοστεί για την αποκατάσταση των φθορών, όπως η εφαρμογή καθοδικής προστασίας με ταυτόχρονη χρήση αναστολέων διάβρωσης. Σε κάθε περίπτωση όμως, ο στόχος και ο σκοπός είναι η παρεμπόδιση, η μείωση ως και η εξάλειψη του προβλήματος της διάβρωσης (αύξηση του χρόνου ζωής της κατασκευής), σε συνδυασμό πάντα με την αισθητική της κατασκευής και το κόστος αποκατάστασης.

Στη συνέχεια παραθέτονται συνοπτικά οι παραπάνω τρόποι αποκατάστασης και προστασία κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

3.1.2. Επισκευή και αποκατάσταση δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα

Ο πιο συνήθης τρόπος επισκευής μιας διαβρωμένης κατασκευής είναι η αποκατάσταση των δομικών στοιχείων. Τα κυριότερα στάδια της μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

1. Καθαίρεση του πάχους επικάλυψης του σκυροδέματος συνήθως μέχρι αποκαλύψεως των οπλισμών
2. Καθαρισμός των διαβρωμένων οπλισμών
3. Ενίσχυση του υπάρχοντος οπλισμού όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο για τη στατική επάρκεια της κατασκευής
4. Επικάλυψη του εκτεθειμένου οπλισμού με τσιμεντοειδή χρώματα ή εποξειδικές ρητίνες
5. Αποκατάσταση του πάχους επικάλυψης των οπλισμών με νέο σκυρόδεμα, τσιμεντοκονίαμα, εποξειδικό κονίαμα

6. Εφαρμογή συστήματος επικάλυψης με χρώματα του σκυροδέματος τόσο για λόγους αισθητικής, όσο και για τη μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος σε ρύπους όπως χλωριόντα, διοξείδιο του άνθρακα κ.α.

Κρίσιμο στάδιο της παραπάνω μεθόδου είναι η επιλογή των υλικών αποκατάστασης των φθορών αλλά και η τεχνική εφαρμογής τους. Ωστόσο θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η παραπάνω μέθοδος είναι αποτελεσματική σε κατασκευές που πάσχουν κυρίως από ενανθράκωση του σκυροδέματος. Στην περίπτωση όμως διάβρωσης λόγω χλωριόντων η μέθοδος κρίνεται ανεπαρκής. Σε αυτή την περίπτωση η αποκατάσταση και προστασία του σκυροδέματος γίνεται με εφαρμογή άλλων μεθόδων προστασίας, όπως η μέθοδος της καθοδικής προστασίας.

3.1.3. Καθοδική προστασία οπλισμένου σκυροδέματος

Η διάβρωση του χάλυβα στο σκυρόδεμα είναι ηλεκτροχημικό φαινόμενο το οποίο περιλαμβάνει μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου. Ο χαλύβδινος οπλισμός οξειδώνεται στις ανοδικές περιοχές του συστήματος, επομένως η διάλυση του χάλυβα είναι η ανοδική δράση. Ωστόσο, ο ρυθμός διάβρωσης του οπλισμού μπορεί να ελαττωθεί, ή το φαινόμενο της διάβρωσής του να αντιστραφεί εάν το δυναμικό του οπλισμού γίνει ηλεκτροαρνητικότερο (καθοδικό). Αυτό στην πράξη επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση στο σκυρόδεμα ανόδων όπου πάνω σε αυτές πραγματοποιείται η ανοδική δράση. Για την αντιστροφή του φαινομένου της διάβρωσης (αντιστροφή της πολικότητας του ηλεκτροχημικού στοιχείου), επιβάλλεται ένα σχετικά χαμηλό ρεύμα, συνήθως 2-10 mA/m² επιφάνειας σκυροδέματος, μεταξύ των ανόδων και των οπλισμών, έτσι ώστε το δυναμικό του οπλισμού να πάρει ηλεκτροαρνητικότερες τιμές. Θα πρέπει να τονιστεί ότι το σύστημα καθοδικής προστασίας (άνοδοι, ηλεκτρόδια αναφοράς) τοποθετείται μόνιμα στην κατασκευή.

Τα κριτήρια σχεδιασμού της καθοδικής προστασίας στο Ο.Σ. είναι τελείως διαφορετικά από αυτά που εφαρμόζονται για τον σχεδιασμό συστημάτων καθοδικής προστασίας στο έδαφος ή στο θαλασσινό νερό. Η καθοδική προστασία είναι μια ενδεδειγμένη αποτελεσματική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων διάβρωσης σε κατασκευές Ο.Σ. με υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων στη μάζα τους σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους προστασίας.

3.1.4. Ηλεκτροχημική επαναφορά της αλκαλικότητας του σκυροδέματος

Η διάβρωση του οπλισμού σε ένα ενανθρακωμένο σκυρόδεμα προκαλείται από τη ρήξη του παθητικού στρώματος λόγω της μείωσης της αλκαλικότητας (του pH) του σκυροδέματος. Οπότε με την αύξηση της αλκαλικότητας σε επίπεδα άνω του 12, έχουμε την επαναδημιουργία και την αποκατάσταση του παθητικού στρώματος

οξειδίων στην επιφάνεια του χάλυβα. Ένας τρόπος αύξησης και επαναφοράς της αλκαλικότητας του σκυροδέματος είναι η μέθοδος ηλεκτροχημικής επαναλκαλοποίησης του. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η παύση της διάβρωσης του ενανθρακωμένου σκυροδέματος και η μείωση του κινδύνου επανεμφάνισης του. Με την εφαρμογή της ηλεκτροχημικής επαναλκαλοποίησης αυξάνεται η αλκαλικότητα του σκυροδέματος γύρω από τον οπλισμό και επανασηματίζεται το προστατευτικό παθητικό στρώμα επιφανειακά στο χάλυβα. Η αύξηση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος επιτυγχάνεται με τον ψεκασμό αλκαλικού διαλύματος πάνω στην επιφάνεια της κατασκευής στην οποία έχει αγκυρωθεί προσωρινό δίκτυο ανόδων, διαμέσων ενός ηλεκτρολύτη. Το διάλυμα του ηλεκτρολύτη με το οποίο γίνεται ο ψεκασμός της επιφάνειας είναι συνήθως διάλυμα ανθρακικού νατρίου 1M. Τόσο το δίκτυο των ανόδων, όσο και ο οπλισμός, συνδέονται στους πόλους ενός μετασχηματιστή. Πρακτικά, η εξωτερική άνοδος αποτελείται από ελαφροβαρές πλέγμα συνήθους χάλυβα το οποίο αγκυρώνεται εξωτερικά στην επιφάνεια του σκυροδέματος με τη βοήθεια ξύλινων αποστατήρων. Στη συνέχεια γίνεται προσωρινή αγκύρωση του πλέγματος των ανόδων σε μάζα ηλεκτρολύτη η οποία αποτελείται κυρίως από ίνες κυτταρίνης, συνήθως χαρτί ανακύκλωσης. Ο εμποτισμός του ηλεκτρολύτη γίνεται με διοχέτευση ρεύματος αέρα με σύστημα ψεκασμού διασποράς με το αλκαλικό διάλυμα ($1M Na_2CO_3$). Η τροφοδοσία του επιβαλλόμενου ρεύματος προστασίας δίνεται από διάταξη μετασχηματιστή / ανορθωτή συνεχούς ρεύματος DC. Η τάση τροφοδοσίας κυμαίνεται από 4-40V, και εξαρτάται από το πάχος επικάλυψης των οπλισμών στην εκάστοτε κατασκευή αλλά και από την αντίσταση του σκυροδέματος. Συνήθως η απαιτούμενη πυκνότητα ρεύματος κυμαίνεται στην περιοχή από 0.8 – 2 A / m² επιφάνεια σκυροδέματος.

3.1.5. Ηλεκτροχημική αφαλάτωση σκυροδέματος

Η βασική αρχή της ηλεκτροχημικής αφαλάτωσης είναι παρόμοια με αυτής της καθοδικής προστασίας. Δια μέσω εξωτερικού επιβαλλόμενου ρεύματος μεταξύ του οπλισμού και της ανόδου επιτυγχάνεται η εξαγωγή των χλωριόντων από τη μάζα του σκυροδέματος. Η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει την προσωρινή αγκύρωση / τοποθέτηση ανόδων στην επιφάνεια του σκυροδέματος και την απομάκρυνση αυτών μετά το τέλος της διαδικασίας. Το ρεύμα που απαιτείται για την ηλεκτροχημική αφαλάτωση του σκυροδέματος είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό της καθοδικής προστασίας και κυμαίνεται στην περιοχή από 1 – 5 A/m² επιφάνειας σκυροδέματος, εξαρτώμενο πάντα και από την αντίσταση του σκυροδέματος.

Η δίοδος συνεχούς ρεύματος έχει σαν αποτέλεσμα την κίνηση των ηλεκτρικά φορτισμένων ιόντων. Κατά συνέπεια τα ανιόντα οδεύουν προς την άνοδο η οποία

βρίσκεται στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος. Από το συνολικό επιβαλλόμενο ρεύμα το οποίο διοχετεύεται στο σκυρόδεμα μόνο ένα μέρος από αυτό χρησιμοποιείται για την μεταφορά των χλωριόντων προς την άνοδο. Η απαίτηση του απαιτούμενου ρεύματος καθορίζεται / εξαρτάται και από την παρουσία των υπόλοιπων ιόντων στο σκυρόδεμα. Η σχετική συγκέντρωση αυτών των ιόντων είναι κύριος παράγοντας για τον προσδιορισμό του απαιτούμενου ρεύματος για την εξαγωγή των χλωριόντων. Πρακτικά, το ποσοστό του ρεύματος που χρειάζεται για την όδευση των χλωριόντων εκτός σκυροδέματος είναι μόνο το 10 – 20% του συνολικού.

Λόγω της σχετικά πρόσφατης ανάπτυξης αλλά και του υψηλού κόστους εφαρμογής της ως μέθοδος προστασία του Ο.Σ., υπάρχουν πολλά αναπάντητα ερωτήματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα, και το βαθμό απόδοσής της σε σχέση με το χρόνο ζωής που προσφέρει στην υπό προστασία κατασκευή.

3.1.6. Χρήση αναστολέων διάβρωσης

Οι αναστολείς της διάβρωσης (inhibitors) είναι ουσίες οι οποίες όταν προστίθενται στο διαβρωτικό περιβάλλον ενός υλικού ελαττώνουν την ταχύτητα της διάβρωσής του. Οι αναστολείς συνήθως είναι ενεργοί σε μικρές συγκεντρώσεις και ο μηχανισμός της δράσης τους έχει διευκρινισθεί σε λίγες μόνον περιπτώσεις. Οι αναστολείς που χρησιμοποιούνται στη πράξη συνήθως περιέχουν περισσότερα του ενός δραστικά συστατικά.

Η ταξινόμηση των αναστολέων διάβρωσης μπορεί να γίνει στηριζόμενη στο είδος της πόλωσης που αυξάνουν ως εξής:

- Ανοδικοί αναστολείς: επιβραδύνουν την ανοδική δράση δηλαδή τη δράση της διάλυσης
- Καθοδικοί αναστολείς: επιβραδύνουν την καθοδική δράση δηλαδή τη δράση της αναγωγής των οξειδωτικών
- Μικτοί αναστολείς: επιβραδύνουν και την ανοδική και την καθοδική δράση

Η ανοδική αναστολή συχνά αποδίδεται στη δημιουργία στοιβάδων που καλύπτουν την επιφάνεια του μετάλλου. Αν όμως η συγκέντρωση του αναστολέα δεν είναι επαρκής υφίσταται κίνδυνος τοπικής διάβρωσης. Αντίθετα στην περίπτωση της καθοδικής αναστολής δεν υπάρχει ο προηγούμενος κίνδυνος. Κατά συνέπεια σε περίπτωση χρησιμοποίησης ανοδικών αναστολέων επιβάλλεται προσεκτικός έλεγχος της συγκέντρωσής τους (αριστοποίηση συγκέντρωσης).

Σε κυκλώματα ροής όπου απαιτείται προστασία του μεταλλικού δικτύου οι αναστολείς προστίθενται συνήθως μέσω δοσιμετρικών αντλιών.

Η προστατευτική δράση ενός αναστολέα της διάβρωσης μπορεί να εκφραστεί από τον ακόλουθο τύπο:

$$z = (w_o - w_i) / w_o \times 100$$

Όπου:

z : ο βαθμός προστασίας %

w_o : ο ρυθμός ελάττωσης του πάχους ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$) χωρίς αναστολέα

w_i : ο ρυθμός ελάττωσης του πάχους με αναστολέα ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ όπου $a = \text{έτος}$).

Η ανασχετική δράση μιας ουσίας συνδέεται με το δυναμικό του ηλεκτροδίου. Για τον λόγο αυτό οι αναστολείς είναι ενεργοί μόνο σε ορισμένες περιοχές δυναμικού. Τα αίτια της συμπεριφοράς αυτής μπορούν να αποδοθούν σε φαινόμενα προσρόφησης ή εκρόφησης στη μεταλλική επιφάνεια ή ακόμη σε οξειδωτικές ή και αναγωγικές μεταβολές του ίδιου του αναστολέα. Μερική εκρόφηση ενός αναστολέα μπορεί να οδηγήσει σε τοπική διάβρωση με μορφή στιγμάτων ή οπών (pitting corrosion).

Η επίδραση των αναστολέων στην ανοδική και τη καθοδική περιοχή μπορεί να μελετηθεί καταρχήν ποιοτικά με τη μέτρηση του δυναμικού ηρεμίας και τη λήψη καμπυλών πυκνότητας ρεύματος/ δυναμικού σε διαλύματα (διαβρωτικό περιβάλλον) με και χωρίς αναστολέα .

3.1.7. Μηχανισμοί προστασίας μέσω οργανικών επιστρώματων

Τα οργανικά επιστρώματα αρχικά απομονώνουν το μεταλλικό υπόστρωμα από το νερό και το οξυγόνο του περιβάλλοντος, τα στοιχεία δηλαδή που απαιτούνται για να συμβεί η διάβρωση. Στην πραγματικότητα όμως όλες οι οργανικές επικαλύψεις είναι άλλες λιγότερο και άλλες περισσότερο διαπερατές. Παρόλο που τα οργανικά επιστρώματα χρησιμοποιούνται για αιώνες για την προστασία από την ατμοσφαιρική διάβρωση, οι μηχανισμοί προστασίας τους δεν έχουν ακόμα πλήρως αποσαφηνισθεί και αποτελούν για πολλά χρόνια αντικείμενο αμφισβήτησης. Η αντιδιαβρωτική προστασία που προσφέρουν έχει περιγραφεί πρόσφατα ως συνδυασμός ενός φυσικού φράγματος, ενός χημικού αναστολέα και μιας ηλεκτρικής αντίστασης.

Γενικά οι μηχανισμοί με τους οποίους τα οργανικά επιστρώματα προστατεύουν το μεταλλικό υπόστρωμα από την διάβρωση είναι οι εξής :

- Προστασία με δράση φράγματος σε διαβρωτικούς παράγοντες (νερό, οξυγόνο, ιόντα χλωρίου)
- Προστασία ως φορείς αναστολέων διάβρωσης
- Προστασία ως θυσιαζόμενα επιστρώματα.

3.1.7.1. Προστασία με δράση φράγματος

Η προστασία του μεταλλικού υποστρώματος με δράση φράγματος συντίθεται από δύο δράσεις:

- Παρεμπόδιση της διείσδυσης διαβρωτικών παραγόντων του περιβάλλοντος (π.χ. νερό, οξυγόνο) μέσω της μάζας της επικάλυψης
- Παρεμπόδιση ροής ηλεκτρονίων λόγω υψηλής ηλεκτρικής αντίστασης.

Η παρεμπόδιση διείσδυσης διαβρωτικών παραγόντων δεν διασφαλίζει μόνη της την καλή προστασία του μεταλλικού υποστρώματος. Ο ρυθμός διείσδυσης του νερού σε μια μεμβράνη είναι 100 φορές μεγαλύτερος από τον ελάχιστο ρυθμό που απαιτείται για τη διάβρωση του υποστρώματος. Ο ρυθμός κατανάλωσης οξυγόνου σε μια μεταλλική επιφάνεια βρίσκεται στα ίδια επίπεδα με το ρυθμό διείσδυσης του οξυγόνου. Στην προστατευτική ικανότητα της επικάλυψης συνεισφέρει σημαντικά η υψηλή ηλεκτρική αντίσταση της, διότι αποτρέπει το σχηματισμό πλήρους ηλεκτροχημικού κελιού στη διεπιφάνεια μετάλλου-επιστρώματος. Βασική προϋπόθεση για την καλή λειτουργία του φράγματος είναι η καλή πρόσφυση της επικάλυψης στο μεταλλικό υπόστρωμα. Η αντίθετη περίπτωση έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας φάσης νερού πάνω στη διεπιφάνεια, που μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό πλήρους ηλεκτροχημικού κελιού από όπου ξεκινά η διαβρωτική διαδικασία. Η πρόσφυση συντελείται με φυσικό τρόπο (αγκίστρωμα των πολυμερικών αλυσίδων στη μεταλλική επιφάνεια) και με χημικό τρόπο (δημιουργία δεσμών κυρίως ομοιοπολικών μεταξύ της επικάλυψης και του μεταλλικού υποστρώματος).

Τα πιγμέντα με μορφή φυλλιδίων χρησιμοποιούνται στα μεταλλικά χρώματα και προστατεύουν το μεταλλικό υπόστρωμα ως εξής:

Μέσα στο χρώμα τα φυλλίδια προσανατολίζονται σε επίπεδα παράλληλα με αυτό του υποστρώματος που συνήθως αλληλοϋπερκαλύπτονται και μετά την ξήρανση της υγρής επικάλυψης δημιουργείται ένα συμπαγές στρώμα, η προστατευτική δράση του οποίου συνίσταται σε τρία σημεία :

- Το σχηματισμένο φράγμα των παράλληλων σωματιδίων αυξάνει σε μεγάλο βαθμό το μήκος της διαδρομής που θα διανύσουν οι διαβρωτικοί παράγοντες μέσα στον όγκο της επικάλυψης έως τη μεταλλική επιφάνεια.
- Παρέχεται αυξημένη μηχανική αντοχή και μειώνονται σημαντικά οι παραμορφώσεις του επιστρώματος.
- Εμποδίζει τις UV ηλιακές ακτίνες να διεισδύσουν, είτε τις ανακλά.

3.1.7.2. Προστασία με παροχή αναστολέων διάβρωσης

Η δράση των επιστρωμάτων ως φράγμα για τη διάβρωση δεν αρκεί για την επαρκή προστασία του μετάλλου, επειδή λόγω της ανομοιογένειας τους στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχουν περιοχές με κακή πρόσφυση και μεγάλη ιοντική αγωγιμότητα, με αποτέλεσμα την εντοπισμένη διάβρωση. Επομένως είναι σημαντική η δράση των αναστολέων (ανοδικών και καθοδικών) που προστίθενται στο οργανικό επίστρωμα με τη μορφή πιγμένων. Τα αντιδιαβρωτικά πιγμένα που λειτουργούν ως αναστολείς συνήθως χρησιμοποιούνται υπό μορφή στερεών (solid particulate materials) που διασπείρονται σε όλη την έκταση του φιλμ του χρώματος. Σε αυτή την περίπτωση οι ανοδικές ή καθοδικές ή και οι δύο μαζί αντιδράσεις καταστέλλονται για όσο χρονικό διάστημα το αντιδιαβρωτικό πιγμένο είναι παρόν (ή ενεργό). Τα πιγμένα αναστολείς απελευθερώνουν κάποια διαλυτή ένωση που στη συνέχεια σχηματίζει ένα μη αγωγίμο στρώμα στην επιφάνεια του μετάλλου που διαβρώνεται. Με αυτό τον τρόπο τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από την ανοδική δράση δεν καταναλώνονται, ή εναλλακτικά, μονώνεται η μεταλλική επιφάνεια από το περιβάλλον. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα ανόργανα αντιδιαβρωτικά πιγμένα (βορικά, χρωμικά, φωσφορικά και πυριτικά).

Τις τελευταίες δεκαετίες η ανάγκη για την χρήση μη τοξικών επιστρωμάτων ανέδειξε εμπορικά την χρήση αντιδιαβρωτικών χρωμάτων που περιέχουν τους ονομαζόμενους πτητικούς αναστολείς διάβρωσης (Vapour Phase Corrosion Inhibitors, VPCI) στη σύνθεσή τους.

Οι αναστολείς VPCI έχουν την ιδιότητα να δημιουργούν ένα λεπτό μονομοριακό προστατευτικό στρώμα πάνω στην μεταλλική επιφάνεια παρεμποδίζοντας έτσι την αλληλεπίδραση διαβρωτικών μορίων με την επιφάνεια του μετάλλου. Το μοριακό αυτό στρώμα σχηματίζεται τόσο στις ανοδικές όσο και στις καθοδικές περιοχές του μετάλλου εμποδίζοντας τη διάβρωση του και αποκαθίσταται ή αυτο-αναπληρώνεται με περαιτέρω συμπύκνωση των ατμών.

3.1.7.3. Προστασία με θυσιαζόμενα επιστρώματα

Τα πιγμένα ανάλογα με τον τρόπο που προστατεύουν διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες όπως: πιγμένα παθητικοποίησης, πιγμένα αποκλεισμού ή πιγμένα ιονεναλλαγής. Εκτός από αυτά όμως, υπάρχουν και τα θυσιαζόμενα μεταλλικά πιγμένα που προστατεύουν με ανοδική αναστολή. Πρόκειται για μεταλλικές σκόνες που προστίθενται στο επίστρωμα. Πρέπει αφενός το μέταλλο προέλευσης τους να είναι πιο ανοδικό από το μέταλλο του υποστρώματος και αφετέρου τα σωματίδια της σκόνης να διατηρούν ηλεκτρονική επαφή μεταξύ τους και με το υπόστρωμα. Ο μηχανισμός δράσης τους είναι παρόμοιος με αυτόν της καθοδικής προστασίας. Στο πρώτο στάδιο παρέχουν καθοδική προστασία μέσω των ενεργών πιγμένων που

περιέχουν (π.χ ψευδάργυρος σε ηλεκτρική επαφή με το χάλυβα) και στο δεύτερο στάδιο κλείνουν με τα προϊόντα του πρώτου σταδίου τους πόρους (επίστρωμα φράγμα). Σε ένα βαθμό, η αποτελεσματικότητα του πιγμέντου εξαρτάται από το πάχος της θυσιαζόμενης επικάλυψης.

3.1.8. Χρήση επιστρωμάτων

Η χρήση επιστρωμάτων αποτελεί την πιο κοινή μέθοδο αντιδιαβρωτικής προστασίας. Είναι η μέθοδος που έχουμε χρησιμοποιήσει στην εργασία μας και αναφέρεται εκτενώς στη επόμενη παράγραφο (3.2.).

3.2. Επικαλύψεις σκυροδέματος (7)

Η κάλυψη του σκυροδέματος (οπλισμένου ή μη) με διάφορα υλικά, είναι συνηθισμένη τακτική, ιδιαίτερα όταν το σκυρόδεμα είναι εκτεθειμένο σε διαβρωτικό περιβάλλον. Η επιφανειακή προστασία του σκυροδέματος μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους. Οι μέθοδοι αυτές, που μπορούν να προστατεύσουν τόσο τον οπλισμό όσο και το σκυρόδεμα, είναι οι εξής:

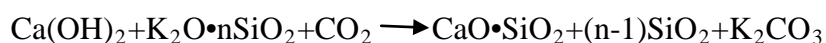
1. **Διαποτισμός.** Είναι η δημιουργία ενός λεπτού στρώματος στην επιφάνεια του σκυροδέματος χωρίς την κάλυψη των πόρων του σκυροδέματος.
2. **Σφράγιση.** Είναι η δημιουργία ενός λεπτού στρώματος στην επιφάνεια του σκυροδέματος, πάχους 300μm, με μερική ή ολική κάλυψη των πόρων του σκυροδέματος
3. **Επικάλυψη.** Είναι ο σχηματισμός ενός ομοιόμορφου στρώματος στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Η επικάλυψη μπορεί επιμέρους να διακριθεί σε:
 - ο Λεπτή επικάλυψη με πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 0,3~1,0 mm
 - ο Χονδρή επικάλυψη με πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 1,0~5,0 mm
 - ο Επικάλυψη με κονιάματα με πάχος που είναι μεγαλύτερο από 5,0 mm

Στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούμε στην επιφανειακή προστασία του σκυροδέματος με ανόργανες και οργανικές επικαλύψεις, δηλαδή τα χρώματα. Με δεδομένο επίσης ότι το πάχος του χρώματος (συνολικά), δεν υπερβαίνει τα 300μm, η επικάλυψη του σκυροδέματος με αυτή τη μέθοδο ανήκει στην κατηγορία του σφραγίσματος. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι τα χρώματα εκτός από την προστασία από τη φθορά, προσφέρουν και αξιόλογα αισθητικά αποτελέσματα σε μια κατασκευή από σκυρόδεμα, χωρίς να αυξάνουν το βάρος της.

3.2.1. Ανόργανα χρώματα

Τα ανόργανα χρώματα έχουν σαν συνδετικό μέσο την υδρύαλο (πυριτικό κάλιο) και ως χρωστικές ανόργανα πιγμέντα. Υδρύαλος, είναι η συνήθης ονομασία των πυριτικών αλάτων των αλκαλίων με γενικό τύπο $Me_2O_x \cdot nSiO_2$, όπου το Me είναι K ή Na και σπάνια Li, που άλλωστε είναι τα μόνα υδατοδιαλυτά (κολλοειδή) πυριτικά άλατα με υψηλό pH μεταξύ 11-13. Η υδρύαλος δεν έχει καθορισμένο χημικό τύπο και η αναλογία του SiO_2 , είναι κυμαινόμενη μεταξύ 2 και 4. Όσο μεγαλύτερο είναι το “n” τόσο πιο δυσδιάλυτη στο νερό είναι η υδρύαλος.

Η συγκράτηση της υδρύαλου με το υπόστρωμα (σκυροδέμα, λίθος ή σοβάς) και η σκλήρυνση του χρώματος πραγματοποιούνται με τον ακόλουθο τρόπο:



Δηλαδή η υδρύαλος, η οποία έρχεται σε επαφή λόγω διάχυσης με ιόντα ασβεστίου, και με την ενεργό συμμετοχή του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας μεταβάλλεται σε πυριτικό ασβέστιο και ανθρακικό κάλιο. Τα ανόργανα πιγμέντα που περιέχονται στην υδρύαλο συγκρατούνται στο σχηματιζόμενο πλέγμα από την προαναφερθείσα αντίδραση.

3.2.2. Οργανικά χρώματα

Τα οργανικά χρώματα που χρησιμοποιούνται στην προστασία του σκυροδέματος, είναι χρώματα σιλικόνης, σιλοξάνης, υδατικών διασπορών κυρίως ακρυλικών, πολυμερών ρητινών, χλωριωμένου καουτσούκ καθώς και χρώματα δύο συστατικών. Η εφαρμογή όλων αυτών των χρωμάτων ακολουθεί την ίδια διαδικασία:

- Προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος με απομάκρυνση όλων των ξένων σωμάτων καθώς και των σαθρών τμημάτων σκυροδέματος
- Ένα χέρι υπόστρωμα (αστάρι), με το ίδιο συνδετικό μέσο με το χρώμα που θα επικαλυφθεί
- Δύο χέρια χρώματος

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα υποστρώματα (αστάρια), έχουν την ίδια περίπου χημική σύσταση με το χρώμα που θα ακολουθήσει, αλλά περιέχουν μεγαλύτερο ποσοστό διαλυτών, πράγμα που διευκολύνει τη διείσδυση του χρώματος στους πόρους του σκυροδέματος. Η σωστή εφαρμογή του υποστρώματος είναι μεγάλης σημασίας για τη διάρκεια ζωής του χρώματος.

Τα χρώματα σιλικόνης έχουν σαν συνδετικό μέσο μία υδατική διασπορά ρητίνης σιλικόνης. Τα χρώματα αυτά έχουν μεγάλη διαπερατότητα σε ατμό και μικρή διαπερατότητα σε νερό. Βασική προϋπόθεση της εφαρμογής τους είναι η εφαρμογή

ενός υδρόφοβου ασταριού σιλικόνης. Συνήθως χρησιμοποιούνται στην προστασία του σκυροδέματος αλλά και στην προστασία μνημείων.

Τα χρώματα των υδατικών διασπορών είναι τα πλέον συνηθισμένα στην προστασία του σκυροδέματος. Στην αγορά διατίθεται μεγάλη γκάμα χρωμάτων της κατηγορίας αυτής σε διάφορους χρωματισμούς. Οι ακρυλικές διασπορές είναι οι πλέον γνωστές. Η προσεκτική εφαρμογή του κατάλληλου ασταριού δίνει μεγάλες τιμές συνάφειας. Τα χρώματα της κατηγορίας αυτής εμφανίζουν μεγάλη διαπερατότητα σε υδρατμούς, πολύ μικρή διαπερατότητα σε CO₂ και SO₂, αλλά συνήθως εμφανίζουν μεγαλύτερη διαπερατότητα σε νερό από τις επόμενες κατηγορίες χρωμάτων. Νεότερες εξελίξεις στα χρώματα της κατηγορίας αυτής έχουν δώσει προϊόντα που μπορούν να εφαρμοστούν στην επιφάνεια του σκυροδέματος αμέσως μετά το ξεκαλούπωμα. Επίσης διατίθενται προϊόντα που σχηματίζουν ελαστικό στρώμα επικάλυψης ικανό για την κάλυψη των ρωγμών.

Ρητίνες από ακρυλικά και μεθακρυλικά συμπολυμερή παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παραγωγή προστατευτικών χρωμάτων στο σκυρόδεμα. Τα χρώματα της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν πολύ καλή διαπερατότητα σε νερό και διοξείδιο του άνθρακα καθώς και καλή αντοχή στην ακτινοβολία UV. Επίσης παρουσιάζουν πολύ καλή διεισδυτικότητα στους πόρους του σκυροδέματος και καλή συνάφεια.

Χρώματα δύο συστατικών με βάση τις εποξικές και πολυουρεθανικές ρητίνες έχουν χρησιμοποιηθεί για την προστασία του σκυροδέματος. Η σκλήρυνσή τους γίνεται με την αρχή της πολυπροσθήκης. Τα δύο συστατικά, ρητίνη και σκληρυντής, αναμιγνύονται λίγο πριν την εφαρμογή και αντιδρούν σχηματίζοντας ένα υψηλού μοριακού βάρους πολυμερές. Ακόμη ακόρεστοι πολυεστέρες και μεθακρυλικές ρητίνες που σκληρύνονται με την αρχή του πολυμερισμού βρίσκουν εφαρμογή στην προστασία του σκυροδέματος. Τα χρώματα της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν πολύ καλή αντοχή σε αλκαλικά και όξινα διαλύματα, διαλύτες οργανικούς αλλά και πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Η χρήση τους σε γκαράζ, βιομηχανικές κατασκευές, στα τούνελ κ.λ.π. είναι ιδιαίτερα συνηθισμένη. Η χρήση πολυουρεθανικών ρητινών σε συνδυασμό με πίσσα για την προστασία του σκυροδέματος σε ισχυρά διαβρωτικά περιβάλλοντα, αποτελεί μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εφαρμογή. Μία νεότερη εξέλιξη στα χρώματα της κατηγορίας αυτής είναι η χρήση ακόρεστων πολυεστερικών ρητινών σε συνδυασμό με ίνες για την κάλυψη δεξαμενών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Θα μιλήσουμε αναλυτικότερα για τα οργανικά χρώματα στην επόμενη παράγραφο (3.3).

3.2.3. Διαφορές ανόργανων και οργανικών χρωμάτων

Όπως αναφέραμε στις προηγούμενες παραγράφους, τα ανόργανα χρώματα έχουν σαν βάση την υδρύαλο και ως χρωστικές ανόργανα πιγμέντα, ενώ τα οργανικά χρώματα, είναι χρώματα σιλκόνης, σιλοξάνης, υδατικών ακρυλικών διασπορών, πολυμερών ρητινών, ακρυλικού καουτσούκ καθώς και δύο (2) συστατικών.

Στον παρακάτω Πίνακα (3.1), παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ ανόργανων και οργανικών χρωμάτων.

Πίνακας 3.1. Διαφορές ανόργανων και οργανικών χρωμάτων

| | |
|---|--|
| 1. Έχουν σαν βάση την υδρύαλο | 1.Είναι διαφόρων ειδών |
| 2. Έχουν χαμηλή διαπερατότητα σε διοξείδιο του θείου (SO ₂), σε διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂) και νερό | 2. Έχουν υψηλή διαπερατότητα σε διοξείδιο του θείου (SO ₂), σε διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂) και νερό |
| 3. Διαλύονται από το νερό και άρα δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον | 3.Περιέχουν οργανικό φορέα και διαλύτες |
| 4. Δεν αλλοιώνονται εύκολα υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και του νερού | 4.Αλλοιώνονται πιο εύκολα υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολία και του νερού |
| 5. Δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη μικροοργανισμών | 5.Είναι πιο ευάλωτα στους μικροοργανισμούς |
| 6. Είναι διαπερατές από αέρια και υγρασία | 6.Έχουν χαμηλή διαπερατότητα από αέρια και υγρασία |
| 7. Προσφέρουν χαμηλό βαθμό προστασίας | 7.Προσφέρουν υψηλό βαθμό προστασίας |
| 8. Η πρόσφυση επιτυγχάνεται με χημική αντίδραση μεταξύ του χρώματος και της προς βαφή επιφάνειας | 8.Η πρόσφυση επιτυγχάνεται με σχηματισμό υμένα πάνω από τη προς βαφή επιφάνεια |
| 9. Διεισδύουν ικανοποιητικά στο υπόστρωμα ισχυροποιώντας έτσι πιο καλά την πρόσφυση | 9.Δεν διεισδύουν ικανοποιητικά στο υπόστρωμα |
| 10. Δεν φορτίζονται ηλεκτροστατικά, δεν έχουν κολλώδη επιφάνεια, δεν επικολλάται η σκόνη πάνω στη βαμμένη επιφάνεια | 10.Φορτίζονται ηλεκτροστατικά, έχουν κολλώδη επιφάνεια, επικολλάται η σκόνη πάνω στη βαμμένη επιφάνεια |
| 11. Η επιφάνεια που σχηματίζουν δεν χαράσσεται εύκολα | 11.Η επιφάνεια που σχηματίζουν χαράσσεται εύκολα |

| | |
|---|--|
| 12. Έχουν ίδιο συντελεστή επιφανειακής διαστολής με τα δομικά υλικά | 12. Έχουν διαφορετικό συντελεστή επιφανειακής διαστολής με τα δομικά υλικά |
| 13. Απαιτούν μικρότερο χρόνο επαναβαφής και καθαρίζονται πιο εύκολα | 13. Απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο επαναβαφής και καθαρίζονται πιο δύσκολα |
| 14. Προσφέρονται σε μικρή ποικιλία αποχρώσεων | 14. Προσφέρονται σε μεγάλη ποικιλία αποχρώσεων |
| 15. Παρέχουν μικρότερη προστασία στη διάβρωση σε σχέση με τα οργανικά | 15. Παρέχουν ικανοποιητική προστασία στη διάβρωση |

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, για να χρησιμοποιηθεί ένα χρώμα σαν επικάλυψη (οργανική ή ανόργανη), θα πρέπει να πληρεί τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- ❖ Να αποτρέπει τη διείσδυση του νερού στο σκυρόδεμα
- ❖ Να αποτρέπει τη διείσδυση του διοξειδίου του θείου (SO₂), και του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στο σκυρόδεμα
- ❖ Να αποτρέπει την είσοδο χλωριόντων στο σκυρόδεμα
- ❖ Να επιτρέπει τη διείσδυση των υδρατμών
- ❖ Να παρουσιάζει υψηλή συνάφεια με το σκυρόδεμα
- ❖ Να έχει αντοχή στα άλατα και στην υψηλή αλκαλικότητα του σκυροδέματος
- ❖ Να είναι ανθεκτικό στην ακτινοβολία του ήλιου
- ❖ Να μπορεί να διεισδύει μέσα στο σκυρόδεμα και
- ❖ Να είναι ελαστικό ώστε να ακολουθεί τις παραμορφώσεις του σκυροδέματος

3.3. Οργανικά επιστρώματα (20,22)

3.3.1. Εισαγωγή

Η επικάλυψη (βαφή) με οργανικές ουσίες (χρώματα) είναι ιστορικά η παλαιότερη μέθοδος προστασίας και διακόσμησης επιφανειών. Ήδη στους προϊστορικούς χρόνους αναφέρεται η χρησιμοποίηση της πίσσας στην κιβωτό του Νώε. Τη ρωμαϊκή εποχή, αναφέρεται από τον Πλίνιο ως υλικό προστασίας του σιδήρου που προσεγγίζει τις σημερινές αντιλήψεις, μίγμα πίσσας, λευκού του μολύβδου και γύψου.

Την τελευταία τριακονταετία, παράλληλα με τις κλασικές οργανικές επικαλύψεις (χρώματα), κερδίζουν έδαφος οι επικαλύψεις με κόνεις πολυμερών (Powder Coatings) που εξαιτίας της απουσίας οργανικών διαλυτών είναι περιβαλλοντικά αβλαβείς. Τέλος, συνεχείς είναι οι βελτιώσεις του τεχνολογικού επιπέδου εφαρμογής των οργανικών επικαλύψεων, ιδίως σε βιομηχανική κλίμακα (αυτοματισμοί).

Η χρήση διαφόρων οργανικών προστατευτικών επικαλύψεων επί του σκυροδέματος (χρώματα, βερνίκια) για την προστασία του οπλισμένου σκυροδέματος είναι πολύ συνηθισμένη μέθοδος προστασίας, κυρίως σε κατασκευές μεγάλης κλίμακας, όπου η μακροχρόνια ανθεκτικότητα της κατασκευής και η καλή λειτουργία της είναι ιδιαίτερα σημαντικοί παράγοντες. Οι επικαλύψεις αυτές προβάλλουν ένα φράγμα μεταξύ του σκυροδέματος και του εξωτερικού περιβάλλοντος, το οποίο περιέχει βλαβερά για το σκυρόδεμα στοιχεία, όπως άλατα χλωρίου, διοξείδιο του θείου και διοξείδιο του άνθρακα. Προκειμένου οι οργανικές επικαλύψεις να μπορούν να προστατεύσουν επιτυχώς το σκυρόδεμα, πρέπει να εκπληρώνουν τις προϋποθέσεις που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο (3.2.3.).

3.3.2. Είδη οργανικών επιστρώματων

Τα οργανικά επιστρώματα διακρίνονται σε:

- Χρώματα : είναι μίγματα του συνδετικού, του πιγμέντου, του διαλύτη και των προσθέτων
- Βερνίκια : είναι μίγματα ελαίου που ξηραίνεται με οξείδωση διαλυμένων ρητινών και ενός πτητικού αραιωτικού
- Λάκες : είναι μίγματα φυσικών ή συνθετικών ρητινών σε πτητικό οργανικό διαλύτη.

3.3.3. Σύνθεση οργανικών επιστρώματων

Τα οργανικά επιστρώματα είναι μίγματα των παρακάτω συστατικών:

- Συνδετικού
- Διαλύτη
- Πιγμέντου
- Πληρωτικών ουσιών
- Προσθέτων

Το ρευστό μίγμα διαλυτών και συνδετικής ουσίας ονομάζεται φορέας (vehicle) ή μέσο (medium) του επιστρώματος.

3.3.3.1. Συνδετικό

Γενικότερα ως συνδετικό ορίζεται το μη πτητικό συστατικό του ρευστού φορέα ενός επιστρώματος. Εξασφαλίζει, τη συνοχή μέσα στο στρώμα του επιστρώματος

συνδέοντας και συγκρατώντας τα διάφορα συστατικά του και την προσκόλλησή του με το υλικό στο οποίο αυτό εφαρμόζεται. Η ικανότητα της συνδετικής ουσίας να σχηματίζει πυκνά και στεγανά φιλμ εξαρτάται από το μοριακό βάρος της και την πολυπλοκότητα του μορίου. Οι συνδετικές ουσίες με μεγάλο μοριακό βάρος είναι αυτές που σχηματίζουν φιλμ μόνο από εξάτμιση του διαλύτη.

Η φύση της συνδετικής ουσίας καθορίζει τον τύπο του επιστρώματος χαρακτηρίζοντάς το (Πίνακας 3.2), όσο και τις ιδιότητές του, τόσο σε υγρή μορφή όσο και ως ξηρός υμένας. Οι ιδιότητες αυτές (π.χ στυλπνότητα, ανθεκτικότητα, ελαστικότητα, σκληρότητα) ορισμένες φορές τροποποιούνται με την προσθήκη πλαστικοποιητών.

Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά σαν συνδετικά των οργανικών επιστρωμάτων είναι συνήθως συνθετικά πολυμερή (όπως αλκυλικές, βινυλικές, εποξειδικές ή αμινορητίνες, εποξειδικές ρητίνες με πίσσα), πολυεστέρες, πολυουρεθάνες υπό τύπο αιωρήματος σε νερό (χρώματα υδατικής διασποράς ή πλαστικά χρώματα), ή σε φυσικά έλαια (π.χ λινέλαιο ή ξυλέλαιο) ή σε οργανικά μέσα (π.χ. αρωματικοί υδρογονάνθρακες, εστέρες, κετόνες) (μη υδατικά χρώματα ή oil paints ή solvent type paints).

Σύμφωνα με τα πρότυπο BS EN ISO 4618-06 (Χρώματα και βερνίκια. Όροι και ορισμοί), οι ρητίνες ορίζονται ως ενώσεις που παρασκευάζονται συνθετικά από μονομερή (φυσικής προέλευσης ή φυσικές ενώσεις χημικά τροποποιημένες) με αντιδράσεις πολυμερισμού προσθήκης, πολυπροσθήκης ή πολυσυμπύκνωσης. Είναι στερεές ενώσεις μη πτητικές, μονοκρυσταλλικές, κυμαίνονται από σκληρές έως ελαστικές και μπορούν να μετατραπούν σε θερμοσκληραινόμενες ή θερμοπλαστικές.

Πίνακας 3.2 Συνδετικές ουσίες για διάφορους τύπους χρωμάτων

| ΤΥΠΟΣ ΧΡΩΜΑΤΟΣ | ΣΥΝΔΕΤΙΚΗ ΟΥΣΙΑ |
|---|-------------------------|
| Ακρυλικά χρώματα (acrylic resin paints) | Ακρυλικές ρητίνες |
| Αλκυδικά χρώματα (alkyd paints) | Αλκυδικές ρητίνες |
| Βινυλικά χρώματα (vinyl resin paints) | Βινυλικές ρητίνες |
| Εποξειδικά χρώματα (epoxy resin paints) | Εποξειδικές ρητίνες |
| Πολυεστερικά χρώματα (polyester resin paints) | Πολυεστερικές ρητίνες |
| Πολυουρεθανικά χρώματα (polyurethane paints) | Πολυουρεθανικές ρητίνες |

| ΤΥΠΟΣ ΧΡΩΜΑΤΟΣ | ΣΥΝΔΕΤΙΚΗ ΟΥΣΙΑ |
|--|--|
| Φαινολικά χρώματα (phenolic resin paints) | Φαινολικές ρητίνες |
| Λαδομπογιές (oil paints) | Λινέλαιο ή μίγμα διαφόρων τύπων ελαίων |
| Χρώματα υδατικής διασποράς (emulsion ή latex paints) | Πολυβινυλική αλκοόλη (PVA), ακρυλικές ρητίνες και συμπολυμερή και ομοπολυμερή τους |
| Χρώματα λιθανθρακοπισσών | Εποξειδικές ρητίνες και μίγμα λιθανθρακοπισσών |

Έτσι ανάλογα με το αν η συνδετική ουσία μεταπηδά από την υγρή στη στερεή φάση μετά από αντιδράσεις φυσικής ξήρανσης ή αντιδράσεις χημικής ανάπτυξης πλέγματος (δημιουργία σταυροδεσμών – crosslinking) τα οργανικά επιστρώματα διακρίνονται σε θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα.

Οι θερμοπλαστικές ρητίνες χαρακτηρίζονται από φυσική ξήρανση μέσω εξάτμισης και απομάκρυνσης των διαλυτών. Η εφαρμογή και οι ιδιότητες ξήρανσης ελέγχονται στο μεγαλύτερο μέρος τους από τις ιδιότητες του διαλύτη όπως και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του πολυμερούς και του διαλύτη. Έτσι η παράμετρος της διαλυτότητας του πολυμερούς στο διαλύτη και ο ρυθμός εξάτμισης του διαλύτη επιλέγονται με προσοχή για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Επίσης μπορούν να επαναδιαλυθούν χρησιμοποιώντας κατάλληλο διαλύτη. Η αντιστρεπτότητα της διαδικασίας στερεοποίησης κατά τη φυσική ξήρανση έχει ως συνέπεια οι επικαλύψεις της μορφής αυτής να παρουσιάζουν χαμηλή ανθεκτικότητα στους εξωτερικούς διαβρωτικούς παράγοντες. Για το λόγο αυτό, μαζί με τη φυσική ξήρανση πραγματοποιούνται ταυτόχρονα διαδικασίες θερμοσκλήρυνσης.

Οι αντιδράσεις θερμοσκλήρυνσης συνίστανται στη χημική αντίδραση μεταξύ των μορίων της συνδετικής ουσίας, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου πλέγματος με αυξημένες ιδιότητες. Οι αντιδράσεις αυτές κανονικά αρχίζουν με το οξυγόνο του αέρα και οδηγούν σε στρώματα μη διαλυτά σε κανένα διαλύτη.

3.3.3.2. Διαλύτες

Οι διαλύτες χρησιμοποιούνται με σκοπό τη μείωση του ιξώδους της συνδετικής ουσίας, όταν η ουσία αυτή είναι υψηλού ιξώδους και έτσι επιτρέπουν την εφαρμογή του χρώματος σε υγρή κατάσταση. Συγχρόνως βοηθούν στη δημιουργία του υμένα του επιστρώματος με την εξάτμισή τους. Τα περισσότερα οργανικά επιστρώματα περιλαμβάνουν μίγμα διαλυτών αντί μόνο ενός διαλύτη. Η επιλογή του διαλύτη

επηρεάζει το ιξώδες, τις ρεολογικές ιδιότητες, την ταχύτητα ξήρανσης και τη στιλπνότητα του επιστρώματος. Δεν υπάρχει ένας ιδανικός διαλύτης για όλα τα οργανικά επιστρώματα αλλά και για κάθε σύστημα ο ιδανικός διαλύτης είναι διαφορετικός. Κακή επιλογή διαλύτη οδηγεί σε μειωμένη πρόσφυση και σε προβληματική σκλήρυνση.

Οι διαλύτες μπορεί να είναι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες (π.χ. νάφθα), αρωματικοί υδρογονάνθρακες (π.χ. τολουόλιο, ξυλόλιο), κετόνες (π.χ. ακετόνη, μεθυλ-αιθυλ-κετόνη, μεθυλ-ισοβουτυλοκετόνη), εστέρες (π.χ. αιθυλεστέρας, οξικός αμυλεστέρας), αλκοόλες (π.χ. μεθανόλη, προπανόλη, ισοπροπανόλη, κυκλοεξανόλη) ή νερό. Η ακετόνη είναι ο διαλύτης που χρησιμοποιείται περισσότερο μόνος του ή σε συνδυασμό με αλκοόλες (ισοβουτυλική αλκόλη), αρωματικούς υδρογονάνθρακες (τολουόλιο, ξυλόλιο) ή εστέρες (n-βουτυλεστέρας).

Συνήθως στο διαλυτικό προστίθεται αραιωτικό (thinners), όπως το νέφτι και η κηροζίνη για να ρυθμιστεί η επιφανειακή τάση του διαλύματος και η διεπιφανειακή τάση μετάλλου-χρώματος ώστε να προκύψουν συνθήκες καλύτερης εξάπλωσης του χρώματος. Τα αραιωτικά πρέπει να είναι αναμίξιμα τόσο με το διαλύτη όσο και με το συνδετικό μέσο και να είναι περισσότερο πτητικά από τον πραγματικό διαλύτη. Διαλύτης και αραιωτικό επιτυγχάνουν ικανοποιητικό βαθμό διασποράς των χρωστικών, πληρωτικών και άλλων μέσων στο συνδετικό υλικό. Συνεπώς επιτυγχάνεται υψηλός βαθμός κατεργασιμότητας (brushability) κατά την εφαρμογή του υγρού χρώματος και ελέγχονται αποτελεσματικά οι διαδικασίες ξήρανσης και θερμοσκλήρυνσης του χρώματος. Σήμερα μεγάλο μέρος των οργανικών επικαλύψεων αποτελούνται από συστήματα υψηλής συγκέντρωσης στερεών και συνήθως επιλέγονται συστήματα που περιέχουν περισσότερο από 0,454 kg πολυμερούς ανά 0,454 kg διαλύτη.

Η έκδοση των οδηγιών (για την ΕΕ η οδηγία 42/2004/EC) με τις οποίες επιβάλλεται η παραγωγή χρωμάτων με χαμηλή περιεκτικότητα σε πτητικές οργανικές ενώσεις (volatile organic compounds, VOCs) δείχνει την τάση αλλά και την ανάγκη για την θέσπιση περιβαλλοντικών στόχων, διότι είναι αρκετές οι χημικές ουσίες οι οποίες είναι επικίνδυνες για το περιβάλλον και όχι μόνο. Ο παρακάτω Πίνακας (3.3), μας πληροφορεί για μερικές από αυτές τις ουσίες.

Πίνακας 3.3 Επικίνδυνες χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία χρωμάτων

| ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ | ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΑΛΛΑ ΥΛΙΚΑ |
|--------------------------|--------------------------------|
| Φθαλικός διβουτυλεστέρας | Αμμωνία |
| Διαθανολαμίνη | Ενώσεις αντιμονίου |
| Διμεθυλοφορμαμίδιο | Ενώσεις καδμίου |
| Φθαλικός διμεθυλαιθέρας | Ενώσεις χρωμίου |
| Αιθυλενογλυκόλη | Ενώσεις κοβαλτίου |
| Φορμαλδεύδη | Ενώσεις μολύβδου |
| Μεθανόλη | Ενώσεις υδραργύρου |
| Γλυκολικοί αιθέρες | |

3.3.3.3. Πιγμέντα

Τα πιγμέντα, ή αλλιώς χρωστικές ουσίες, είναι ξηρές σκόνες, αδιάλυτες στο συνδετικό, δεν επηρεάζονται φυσικά ή χημικά και διασπείρονται σε αυτό με μια τεχνική αλέσματος. Προέρχονται από φυσικά μεταλλεύματα ή από οργανικές ενώσεις, και συνηθέστερα από μεταλλικά οξείδια.

Τα πιγμέντα βρίσκονται συνήθως σε μορφή λεπτής σκόνης (με μέγεθος κόκκων συνήθως από 1-10μm) χωρίς όμως να αποκλείεται και άλλη μορφή όπως φυλλίδια. Υπάρχουν και τα διεσπαρμένα πιγμέντα που μπορεί να είναι ανόργανα ή οργανικά αλλά αντί να είναι μόνα τους σε μορφή σκόνης είναι διεσπαρμένα μέσα σε ένα άλλο υλικό. Χρησιμοποιούνται κυρίως για τη βελτίωση των αντιδιαβρωτικών και των μηχανικών ιδιοτήτων, καθώς και της εμφάνισης του επιστρώματος. Αυτά δίνουν το χρώμα, την καλυπτικότητα και τη γεμιστικότητα (ικανότητα να καλύπτουν κοιλότητες της επιφάνειας που βάφεται). Επίσης αυξάνουν τον χρόνο ζωής του χρώματος. Αυτό οφείλεται στην απορρόφηση ή αντανάκλαση της υπεριώδους ακτινοβολίας και την μετατροπή της σε αβλαβή παράγοντα.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατάταξης των πιγμένων:

- Λευκά πιγμέντα (White pigments)
- Μαύρα πιγμέντα (Black pigments)

- Έγχρωμα οργανικά πιγμέντα (Colored organic pigments)
- Ανόργανα έγχρωμα πιγμέντα (Inorganic Colored pigments)
- Κεραμικά πιγμέντα (Ceramic pigments)
- Πληρωτικά πιγμέντα (Extender pigments)
- Μεταλλικά πιγμέντα (Metallic pigments)
- Πιγμέντα περλέ (Pearlescent pigments)

3.3.3.4. Πληρωτικά υλικά

Οι πληρωτικές ουσίες είναι φθηνές σκόνες που χρησιμοποιούνται για την ελάττωση του συνολικού κόστους παραγωγής του χρώματος συνεισφέροντας ταυτόχρονα στη σταθερότητά του κατά την αποθήκευση του, στον έλεγχο ροής, στη μείωση της υδατοπερατότητας και στις μηχανικές του αντοχές.

3.3.3.5. Πρόσθετα

Τα πρόσθετα είναι βοηθητικές ουσίες, οι οποίες προστίθενται σε μικρές ποσότητες στα επιστρώματα, έτσι ώστε να δώσουν ορισμένες επιθυμητές ιδιότητες στο επίστρωμα. Χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν τη σταθερότητα των οργανικών επιστρωμάτων στα δοχεία, να αποτρέψουν την ίζηματοποίηση των πιγμένων, να επιταχύνουν την ξήρανση, να εμποδίσουν την ανάπτυξη μυκήτων στο οργανικό επίστρωμα, να εξασφαλίσουν και να βελτιώσουν την πρόσφυση και την συνοχή μετά την εφαρμογή του οργανικού επιστρώματος, να σταθεροποιήσουν το ιξώδες και να προβάλλουν εμπόδιο στη δημιουργία κρούστας κατά την αποθήκευση των οργανικών επιστρωμάτων.

Στην περίπτωση των υδατικών χρωμάτων και των χρωμάτων υψηλών στερεών η επίδραση αυτή είναι μεγαλύτερη παρά στα κλασσικά χρώματα. Ο λόγος είναι ότι σε αυτά τα είδη χρωμάτων, τα πρόσθετα συχνά παίζουν ένα ρόλο διορθωτικό και βοηθούν να γίνει δυνατή η επίτευξη των ιδιοτήτων αυτών.

Διακρίνονται σε:

- Ξηραντικά πρόσθετα : Ρυθμίζουν το χρόνο στερεοποίησης μετά την εφαρμογή. Συνήθως είναι οργανικά άλατα κοβαλτίου, μαγγανίου ή μολύβδου.
- Αντιοξειδωτικά πρόσθετα : Χρησιμοποιούνται για την αποφυγή σχηματισμού πηγματος στα τοιχώματα των δοχείων φύλαξης και για να ελαττώσουν την οξείδωση της περισσειας του χρώματος που στραγγίζει από τα αντικείμενα και ανακυκλώνεται.

- Επιφανειακά ενεργά πρόσθετα : Διευκολύνουν και διατηρούν την διασπορά των στερεών κατά την αποθήκευση, καθώς και την ομοιογένεια του μίγματος κατά την ξήρανση του χρώματος.
- Παχυντές και παράγοντες αντικαθίζησης: Επηρεάζουν τη ροή και ελαττώνουν την προς τα κάτω ροή του χρώματος αμέσως μετά την επικάλυψη, αποτρέποντας την ανομοιόμορφη κάλυψη του κάτω άκρου του αντικειμένου.
- Διαμορφωτές επιστρώματος: Επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της ροής προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κατάλληλη μέθοδος επίχρισης.

3.3.4. Πολυστρωματικά συστήματα

Η αύξηση του πάχους ενός επιστρώματος γενικά αυξάνει και την αντιδιαβρωτική του ικανότητα. Πολλές φορές όμως, η δράση μιας επικάλυψης δεν είναι ικανή να ανταπεξέλθει σε όλους τους διαβρωτικούς παράγοντες προστατεύοντας το υπόστρωμα. Επίσης, σε επικαλύψεις ενός στρώματος με μεγάλο πάχος εμφανίζονται αρκετές φορές φαινόμενα όπως ρωγμές λόγω εσωτερικών μηχανικών τάσεων.

Καλύτερη αντιδιαβρωτική προστασία επιτυγχάνεται με χρήση συστημάτων πολλαπλών επικαλύψεων.

Ένα πολυστρωματικό σύστημα επικάλυψης γενικά περιλαμβάνει τα εξής στρώματα:

- ο Το Αστάρι (primer): Εξασφαλίζει καλή πρόσφυση με τη μεταλλική επιφάνεια και επιπλέον παρέχει αντιδιαβρωτική προστασία μέσω των επιλεγέντων ανά περίπτωση αντιδιαβρωτικών πιγμέντων.
- ο Το Ενδιάμεσο στρώμα (intermediate coat): εφαρμόζεται μετά το αστάρι, απομονώνει το σύστημα υπόστρωμα-αστάρι από το περιβάλλον και χρησιμοποιείται κυρίως για κάλυψη ατελειών της επιφάνειας επικάλυψης όταν απαιτούνται λείες και ομοιόμορφες επιφάνειες.
- ο Το τελικό στρώμα (top coat): Προστατεύει τα προηγούμενα στρώματα από τους διαβρωτικούς παράγοντες του περιβάλλοντος π.χ. υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία κ.λ.π. Ελέγχει ιδιότητες της επιφάνειας του χρώματος, όπως είναι η απόχρωση και η στιλπνότητα.

3.3.5. Κριτήρια επιλογής ενός συστήματος επικάλυψης

Τα κριτήρια με τα οποία επιλέγεται ένα σύστημα επικάλυψης έχουν να κάνουν με τους παρακάτω παράγοντες:

- i. Τα χαρακτηριστικά του επιστρώματος (π.χ. αντίσταση σε τριβή, σε δόννηση, σε πρόσκρουση, ευκαμψία, απόχρωση του χρώματος και στιλπνότητα, χρόνος

ξήρανσης του, αντίσταση στη μούχλα, αντίσταση στο νερό ή στα καύσιμα, διαβρεξιμότητα κ.α.)

ii. Τη φύση του υποστρώματος στο οποίο επικαλύπτεται το επίστρωμα (Ξύλο, σίδηρο, παλιό επίστρωμα κ.λ.π)

iii. Τους περιβαλλοντικούς παράγοντες (Θερμοκρασία, υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, βιολογικά προβλήματα, αντίσταση σε χημικά σε π.χ. οξέα, διαλύτες, άλατα, αλκάλια, κ.λ.π.)

iv. Το κόστος κύκλου ζωής του συστήματος επικάλυψης

v. Το κόστος εργασίας για την προκατεργασία της επιφάνειας, την εφαρμογή και την επιδιόρθωση του επιστρώματος

3.3.6. Οργανικές επικαλύψεις, Υγεία και Περιβάλλον

3.3.6.1. Εισαγωγή

Οι οργανικές επικαλύψεις, δηλαδή τα χρώματα, βερνίκια και παρεμφερή υλικά προστατεύουν και καλλωπίζουν τις επιφάνειες των πάσης φύσεως υλικών που χρησιμοποιούνται στην πράξη (πχ. σίδηρος, χάλυβας, αλουμίνιο, σκυρόδεμα, ξύλο).

Εμμεσα η προστασία των υλικών συμβάλλει στη συντήρηση των γήινων αποθεμάτων σε πρώτες ύλες (πχ. ξύλο, ορυκτά) και περιορίζει την κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή νέων. Παράλληλα το κύκλωμα “οργανικές επικαλύψεις” (πρώτες ύλες, βιομηχανική παραγωγή, μηχανολογικός εξοπλισμός, εφαρμογή, διάθεση) αποτελεί σημαντική οικονομική δραστηριότητα. Με την αυξανόμενη ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης σε θέματα υγείας και περιβάλλοντος αναπτύσσεται διεθνώς έντονος προβληματισμός για τις επιπτώσεις των προϊόντων της βιομηχανίας χρωμάτων, στην υγεία των εργαζομένων, των χρηστών και γενικότερα στο περιβάλλον.

Ο προβληματισμός είναι εύλογος δεδομένου ότι σε μεγάλες μονάδες παραγωγής εκτιμάται ότι χρησιμοποιούνται ή κατεργάζονται 2000-3000 πρώτες ύλες, ενώ η παγκόσμια αγορά πρώτων υλών για τη βιομηχανία οργανικών επικαλύψεων διαθέτει 25000 πρώτες ύλες.

Στο τεράστιο αυτό αριθμό υπάρχουν αρκετές πρώτες ύλες που δεν μπορούν να θεωρηθούν ως αδρανείς για τον ανθρώπινο οργανισμό αλλά και το περιβάλλον. Η αντικειμενική αξιολόγηση όλων αυτών των υλικών ως προς την τοξικότητά τους και

τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον είναι πολύπλοκη και χρονοβόρος.

3.3.6.2. Κίνδυνοι της υγείας των εργαζομένων

Οι εργαζόμενοι στη βιομηχανία παραγωγής ή εφαρμογής οργανικών επικαλύψεων εκτίθενται σε κινδύνους της υγείας τους εξαιτίας κυρίως της εισπνοής ή επαφής τους με πρώτες ύλες.

Ο βαθμός κινδύνου των εργαζομένων εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως συνθήκες εργασίας, μέτρα προστασίας, (πχ. αερισμός), χρήση ατομικών μέσων προστασίας (πχ. μάσκες, γάντια). Για πολλές ουσίες που εκπέμπονται στον εργασιακό χώρο έχουν καταρτιστεί πίνακες τιμών των μεγίστων συγκεντρώσεων τους. Ως μέγιστη συγκέντρωση στον εργασιακό χώρο θεωρείται η μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση μιας ουσίας, υπό μορφή αερίου, ατμού ή αιωρούμενου σωματιδίου, η οποία δεν επηρεάζει την υγεία του εργαζομένου ή δεν τον παρενοχλεί. Οι τιμές αυτές υπολογίζονται με βάση την οκτάωρη εργασία (40 ώρες εβδομαδιαίως) και αφορούν την επανειλημμένη και μακροπρόθεσμη έκθεση.

Με μετρήσεις των συγκεντρώσεων στον εργασιακό χώρο και συσχέτιση των μεγίστων συγκεντρώσεων, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα ως προς τις συνθήκες καταλληλότητας των εργασιακών χώρων και να ληφθούν μέτρα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο δέρμα των χεριών, όταν χρησιμοποιούνται διαλύτες οι οποίοι αφαιρούν το λίπος της επιδερμίδας. Επίσης βαρύτητα πρέπει να δοθεί στους προληπτικούς ιατρικούς ελέγχους των εργαζομένων από εξειδικευμένους γιατρούς.

Ανάλογες τιμές, προς τις μέγιστες συγκεντρώσεις στον εργασιακό χώρο, έχουν καθοριστεί για την βιολογική ανοχή των ουσιών στον ανθρώπινο οργανισμό. Ως τιμή βιολογικής ανοχής μιας ουσίας ορίζεται η μέγιστη επιτρεπτή ποσότητα της ουσίας η οποία προκαλεί απόκλιση ενός βιολογικού δείκτη από την προτυποποιημένη του τιμή σε βαθμό όμως τέτοιο που δεν επηρεάζει γενικά την υγεία του οργανισμού.

Οι τιμές βιολογικής ανοχής υπολογίζονται κατά κανόνα για οκτάωρη έκθεση ημερησίων ή 40 ωρών εβδομαδιαίως και αναφέρονται στη δράση ουσιών στο αίμα ή και στα ούρα (ως συγκεντρώσεις ή ως ρυθμοί σχηματισμού ή αποβολής).

Ο συνδυασμός μετρήσεων των τιμών των μεγίστων συγκεντρώσεων και των τιμών βιολογικής ανοχής των ουσιών επιτρέπει την ασφαλέστερη αξιολόγηση των συνθηκών του εργασιακού χώρου.

3.3.6.3. Οι περιβαλλοντικές συνέπειες των οργανικών επικαλύψεων

Εξαρτώνται άμεσα από τη σύστασή τους (φορέας -ρητίνη, διαλύτες, πιγμέντα, πρόσθετα), από το μηχανισμό δημιουργίας του υμένα (φυσική ξήρανση, έψηση, πολυμερισμός με καταλύτη, ακτινοβολία, κ.λπ) και τον τρόπο εφαρμογής (βαφή με πινέλο, ή ρολό, ψεκασμός με ή χωρίς αέρα, ηλεκτροφόρηση, ηλεκτροστατική βαφή,

κ.λπ). Το σημαντικότερο πρόβλημα από περιβαλλοντική άποψη αφορά τους οργανικούς διαλύτες (όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη παράγραφο) και γενικότερα, την εκπομπή πτητικών οργανικών ενώσεων στην ατμόσφαιρα.

3.3.7. Διεθνείς τάσεις στη βιομηχανία παραγωγής και εφαρμογής οργανικών επικαλύψεων

Η βιομηχανία υπό την πίεση των συνεχώς αυξανόμενων περιβαλλοντικών προβλημάτων στρέφεται προς τις φιλικότερες στο περιβάλλον επικαλύψεις και τεχνολογίες εφαρμογής. Από τα στατιστικά στοιχεία προκύπτει ότι διεθνώς:

- Αυξάνεται η παραγωγή των υδατικών συστημάτων, δηλαδή χρωμάτων με βάση ρητίνες που αραιώνονται με νερό, με ετήσιο ρυθμό 15-20%.
- Υποκαθίστανται διαλύτες των κλασικών οργανικών επικαλύψεων με άλλους λιγότερο επιβλαβείς.
- Αυξάνεται η παραγωγή χρωμάτων με υψηλή περιεκτικότητα στερεών (High Solids, ποσοστό πτητικών οργανικών ενώσεων μικρότερο του 30%) με ετήσιο ρυθμό 18-23%.
- Αυξάνεται η παραγωγή χρωμάτων κόνεων πολυμερών (powder coating) με ετήσιο ρυθμό 15-17%. Τα χρώματα αυτά με σχεδόν μηδενική αποβολή πτητικών καταναλώνονται κυρίως στη βιομηχανία οικιακών συσκευών, μεταλλικών επίπλων, προφίλ αλουμινίου με την τεχνική της ηλεκτροστατικής βαφής. Ας σημειωθεί μονάδες παραγωγής κόνεων πολυμερών λειτουργούν στην Ελλάδα.
- Μειώνεται, υποκαθίσταται ή καταργείται η χρήση πιγμέντων με βάση ενώσεις του μολύβδου και χρωμικά.
- Αυξάνεται η παραγωγή οργανικών επικαλύψεων που ξηραίνονται με ακτινοβολίες (πχ. UV, δέσμη ηλεκτρονίων electron beam).

3.3.8. Συμπεράσματα – Προτάσεις

Η μέθοδος των οργανικών επικαλύψεων (χρωμάτων) είναι μια απλή και φθηνή λύση. Απαραίτητη προϋπόθεση για την σωστή εφαρμογή της είναι η χρήση του κατάλληλου υποστρώματος (αστάρι) πριν την εφαρμογή της επικάλυψης. Η παράλειψη της χρήσης υποστρώματος (αστάρι) θα οδηγήσει στην αποκόλληση του

χρώματος από την επιφάνεια του σκυροδέματος και αστοχία της επικάλυψης. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι όλες οι οργανικές επικαλύψεις προσβάλλονται από την υπεριώδη ακτινοβολία που περιέχεται στο ηλιακό φως. Επομένως η επαναβαφή τμημάτων της κατασκευής τα οποία «βλέπει» ο ήλιος είναι πιθανή για την σωστή προστασία της κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Όσον αφορά τώρα τις οργανικές επικαλύψεις σε σχέση με το περιβάλλον και την υγεία, πρέπει όλοι να καταλάβουμε ότι αυτά τα δύο (υγεία και περιβάλλον), είναι άρρηκτα συνδεδεμένα μεταξύ τους και αποτελούν τις κύριες συνιστώσες της ποιότητας ζωής. Στην προστασία τους δεν πρέπει να πρυτανεύουν τεχνικές και οικονομικές σκοπιμότητες.

Υπό την προϋπόθεση ότι με αυστηρώς θεμελιωμένα επιστημονικά κριτήρια τεκμηριώνεται η βλαπτικότητα μιας ουσίας πρέπει να αντικαθίσταται με άλλη αβλαβή χωρίς την ελάττωση ποιοτικών χαρακτηριστικών του προϊόντος. Στο θέμα περιβάλλον και υγεία δεν αρμόζει ούτε πανικός αλλά ούτε και εφησυχασμός. Μια συνεπής και αποτελεσματική πολιτική προστασίας της υγείας και του περιβάλλοντος πρέπει να χαράσσεται στις εξής κατευθύνσεις:

- Συστηματική και αντικειμενική πληροφόρηση εργαζομένων και χρηστών
- Προληπτικός ιατρικός έλεγχος των ομάδων εργαζομένων που εκτίθενται μονίμως στις εκπομπές των οργανικών επικαλύψεων κατά την παραγωγή ή την εφαρμογή τους (πχ. βαφών)
 - Ενίσχυση διεπιστημονικών προγραμμάτων έρευνας όπως επιδημιολογικών ερευνών, πειραματικών ελέγχων για την βιολογική επίδραση των πρώτων υλών στον άνθρωπο και το περιβάλλον (πχ. επίδραση οργανικών εκπομπών στη χλωροφύλλη των φυτών)
 - Συστηματική συνεργασία βιομηχανίας και ερευνητών για τον έλεγχο υπόπτων ουσιών, έγκαιρη επισήμανση και αντιμετώπιση επικίνδυνων ουσιών μέσω εναλλακτικών τεχνολογιών
 - Ανάπτυξη και εφαρμογή στη βιομηχανία αντιρρυπαντικών τεχνολογιών για τις εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων στην ατμόσφαιρα (πχ. ανακύκλωση διαλυτών, καταλυτική καύση οργανικών εκπομπών, απορρόφηση)
 - Ενίσχυση της τυποποίησης στην περιοχή των οργανικών επικαλύψεων και περαιτέρω διάδοσή της
 - Παρέμβαση των κρατικών φορέων μέσω κωδικοποιημένου νομικού πλαισίου προστασίας της υγείας και του περιβάλλοντος
 - Ενίσχυση της κρατικής υποδομής ελέγχου που απορρέει από τη νομοθεσία προστασίας της υγείας και του περιβάλλοντος (πχ. δυνατότητα μετρήσεων των μεγίστων συγκεντρώσεων οργανικών εκπομπών στους χώρους εργασίας)

- Κρατική παρέμβαση εφαρμογής της περιβαλλοντικής πολιτικής συναινετικού χαρακτήρα και με προσφορά κινήτρων

Ειδικότερα στον Ελληνικό χώρο τα τελευταία χρόνια εμφανίζεται όξυνση των περιβαλλοντολογικών προβλημάτων. Η βιομηχανία παραγωγής και εφαρμογής οργανικών επικαλύψεων πρέπει να εντείνει τις προσπάθειες απάλειψης τους στο βαθμό που η ίδια συμβάλλει.

Δυσκολίες προκύπτουν από την ύπαρξη πολλών μικρών μονάδων βιοτεχνικού χαρακτήρα σε υποβαθμισμένους εργασιακούς χώρους και στοιχειώδη υποδομή ποιοτικού ελέγχου.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι στις περισσότερες δυτικοευρωπαϊκές χώρες υπάρχουν εθνικά κέντρα ή ινστιτούτα συνδεδεμένα με τα ΑΕΙ και τη βιομηχανία που ασχολούνται με την έρευνα και τον έλεγχο των οργανικών επικαλύψεων, είτε αποκλειστικά είτε στα πλαίσια γενικότερα της αντιδιαβρωτικής προστασίας των υλικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1. Υλικά – Όργανα

4.1.1. Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των δοκιμών της εργασίας είναι τα ακόλουθα:

i. Σιδηροπλισμοί

Ράβδοι χάλυβα B500C

Μήκος L = 10 cm , Διάμετρος : Φ12 mm

Οι χάλυβες κατηγορίας B500C φέρουν στην επιφάνειά τους τουλάχιστον δύο σειρές πλάγιων διαδοχικών νευρώσεων αντίθετης κλίσης.

Χημική σύσταση (%)

| Ανθρακας | Φώσφορος | Θείο | Άζωτο | Χαλκός | Ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα C _{eq} |
|----------|----------|-------|-------|--------|---|
| C | P | S | N | Cu | |
| 0,24 | 0,055 | 0,055 | 0,013 | 0,85 | 0,52 |

ii. Τσιμέντο CEM II 32,5

Χημική σύσταση (%)

| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | SO ₃ | L.O.I. |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-------------------|-----------------|--------|
| 26.23 | 6.47 | 3.96 | 52.67 | 3.14 | 0.91 | 0.41 | 3.02 | 5.97 |

iii. Άμμος λατομείου μέγιστου κόκκου 4 mm

- iv. Νερό από το δίκτυο ύδρευσης του Τ.Ε.Ι. Πειραιά
- v. Λοιπά υλικά : Εποξειδική κόλλα δύο συστατικών, αλκοόλη, ακετόνη, απιονισμένο νερό, λεκάνες, διάλυμα 3,5% κ.β. χλωριούχου νατρίου

4.1.2. Όργανα

- i. Πηγή DC POWER SUPPLY GP-305
- ii. Πολύμετρο MASTECH M840D
- iii. Ηλεκτρόδιο καλομέλινα (Saturated Calomel Electrode, SCE) Thermo Electron Corporation (Russell) Type No CR5
- iv. Ζυγός ακριβείας SHIMADZU AUX 220 (Max: 220g, Min: 10mg, e: 1mg, d: 0,1mg)
- v. Θερμόμετρο υδραργύρου
- vi. Ηλεκτρόδιο γραφίτη διαστάσεων 80x120x20 mm.

4.1.3. Βοηθητικά υλικά συναρμολόγησης, επεξεργασίας

- 1) Καλούπια (πλαστικοί σωλήνες PVC Φ50, μήκος: 10cm)
- 2) Καλώδια χαλκού (τηλεφωνικό καλώδιο εσωτερικών εγκαταστάσεων με μόνωση PVC (2 X 0,8 mm)
- 3) Διάφορα εργαλεία και υλικά: Κροκοδειλάκια, σφυρί, καλέμι, κατσαβίδια, χαρτοταινία, ταινία, σπάτουλα
- 4) Χημικά
 - Διάλυμα 3.5% κ.β. NaCl

- Αδρανοποιημένο οξύ για καθαρισμό του οπλισμού από τα οξείδια, χωρίς καταστροφή του.
- Ακρυλικά χρώματα (2 ειδών), αστάρι, διαλυτικό, τα οποία και θα αναλύσουμε (τα γενικά και τεχνικά τους χαρακτηριστικά) στην επόμενη παράγραφο (4.2.).

4.2. Χρώματα

4.2.1.Ελαστικό και μονωτικό χρώμα καθέτων επιφανειών (Χρώμα Α)

4.2.1.1. Γενικά χαρακτηριστικά

Ελαστομερές στεγανωτικό χρώμα εξωτερικών καθέτων επιφανειών με βάση ειδικές 100% ακρυλικές UV – αλληλοδικτυούμενες ρητίνες. Εφαρμόζεται σε νέες και παλαιές επιφάνειες από σοβά, μπετό, τούβλα κ.λ.π. προσφέρει άψογη τελική επιφάνεια, εξαιρετική αντοχή σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, στην ατμοσφαιρική ρύπανση και το παραθαλάσσιο περιβάλλον, χωρίς να απαιτεί επαναβαφή με ακρυλικό χρώμα. Καλύπτει πλήρως μικρές ρωγμές της επιφάνειας και παρακολουθεί τις συστολές και τις διαστολές παραμένοντας ελαστικό σε θερμοκρασίες από -25° C έως +110° C, χαρίζοντας της παράλληλα στεγανωτικές και θερμομονωτικές ιδιότητες. Η τελική επιφάνεια και οι αποχρώσεις παραμένουν αμετάβλητες για χρόνια, χωρίς σημάδια από ίχνη βροχής (snake trails). Είναι A.P.E.O. free.

Προεργασία: Καινούργιες ή παλαιές υδροχρωματισμένες επιφάνειες που έχουν καθαριστεί και επισκευαστεί βάφονται πρώτα με αστάρι D (διάφανο αστάρι διαλύτη) αραιωμένο έως 100% με Διαλυτικό T αραιωμένο 50 – 100% με νερό. Στη συνέχεια εφαρμόζουμε 1 – 2 χέρια Α ελαστικό χρώμα και μονωτικό καθέτων επιφανειών.

Στέγνωμα: Στην αφή σε 2 – 3 ώρες, ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες

Επαναβαφή: Επαναβάφεται μετά από 6 – 8 ώρες, ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες

Απόδοση: 10-12 m²/L για κάθε επίστρωση σε κατάλληλα προετοιμασμένες επιφάνειες

Αραίωση: 10% με νερό

ΠΟΕ (Πτητικές Οργανικές Ενώσεις): Οριακή τιμή, μέγιστης περιεκτικότητας σε ΠΟΕ, της ΕΕ (Οδηγία 2004/42/ΕΚ) για το συγκεκριμένο προϊόν (κατηγορία Α/γ “Εξωτερικών τοίχων ορυκτών υποστρωμάτων”, Τύπος Υ): 75 g/l (2007), 40 g/l (2010). Το προϊόν περιέχει κατά μέγιστο 23 g/l ΠΟΕ (έτοιμο προς χρήση)

4.2.1.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Ιξώδες: 110 ± 10 K.U. (STORMER, 25° C).
- Πυκνότητα : $1,50 \pm 0,02$ kg/L.
- Στερεά (% κ.β.) : ~ 67,5 (ΕΛΟΤ 1028)
- Δείκτης λευκότητας : ~ 89 (ASTM E313-98)
- Δείκτης κιτρινίσματος : ~ 0,5 (ASTM E313-98)
- Φωτεινότητα : L ~ 96,5 (CIE L*a*b).
- pH : 8 – 9
- Στιλπνότητα : < 5 μονάδες στις 60° (ΕΛΟΤ EN ISO 2813).
- Επαναβασιμότητα : άριστη (ΕΛΟΤ 788)
- Τεστ αντοχής σε αλκάλια : καμία μεταβολή (ΕΛΟΤ 788)
- Τεστ αντοχής στο νερό : δεν αλλοιώνεται ή επαναγαλακτώνεται (ΕΛΟΤ 788)
- Αντοχή στην επίδραση καιρικών συνθηκών και περιβάλλοντος : Άριστη. Δεν παρατηρούνται οποιουδήποτε είδους αλλοιώσεις του επιχρίσματος (φούσκωμα, σκάσιμο, ξεφλούδισμα, κιμωλίαση κ.λ.π.). Δεν παρατηρούνται μεταβολές απόχρωσης και στιλπνότητας του επιχρίσματος (ΕΛΟΤ EN ISO 2810).
- Ελάχιστη θερμοκρασία εφαρμογής : 0° C (ΕΛΟΤ 788)
- Λόγος καλυπτικής αντίθεσης ($16 \text{ m}^2/\text{L}$) : 0,93 (ΕΛΟΤ 721 – Το πρότυπο ισχύει για το λευκό και τις ανοιχτόχρωμες αποχρώσεις)
- Ελαστικότητα : επιμήκυνση > 350% (ASTM D2370 – 98).

4.2.2. Ελαστομερές στεγανωτικό για ταράτσες (Χρώμα V)

4.2.2.1. Γενικά χαρακτηριστικά

Εξαιρετικό στεγανωτικό υλικό, ακρυλικής βάσεως, μεγάλης ελαστικότητας για ταράτσες. Έχει καλή πρόσφυση σε κάθε δομική επιφάνεια (μπετόν, προϊόντα αμιαντοτσιμέντου, τούβλο, ξύλο, μέταλλο κ.λ.π.). Παρουσιάζει εξαιρετική αντοχή

στις δυσμενείς καιρικές συνθήκες, την υπεριώδη ακτινοβολία και τις μεταβολές της θερμοκρασίας παραμένοντας ελαστικό από -30°C έως 100°C.

Προεργασία: Η επιφάνεια πρέπει να είναι καθαρή από σκόνες, λάδια, σαθρά υλικά «πρασινάδες» κ.λ.π. Τυχόν κενά στο μπετόν πρέπει να γεμίζονται. Η επιφάνεια αρχικά ασταρώνεται με αστάρι D (διάφανο αστάρι διαλύτη) αραιωμένο 50 - 60 % με διαλυτικό T ή με V ταρατσών αραιωμένο 50% με νερό. Στη συνέχεια εφαρμόζουμε δύο στρώσεις V ταρατσών (χωρίς αραίωση) σταυρωτά, με διαφορά 24 ωρών μεταξύ τους.

Στέγνωμα : Στην αφή σε 2-3 ώρες, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες.

Επαναβαφή: Τα δεύτερο χέρι εφαρμόζεται μετά από 24-48 ώρες, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες.

Απόδοση: 3 m²/L για κάθε επίστρωση σε κατάλληλα προετοιμασμένες επιφάνειες.

Αραίωση : 5-10% με νερό για την πρώτη επίστρωση. Η δεύτερη επίστρωση χωρίς αραίωση.

ΠΟΕ (πηκτικές οργανικές ενώσεις): Οριακή τιμή, μέγιστης περιεκτικότητας σε ΠΟΕ, της ΕΕ (Οδηγία 2004/42/ΕΚ) για το συγκεκριμένο προϊόν (κατηγορία Α/γ "Εξωτερικών τοίχων ορυκτών υποστρωμάτων", Τύπου Υ): 40g/l (2010). Το προϊόν περιέχει κατά μέγιστο 15g/l ΠΟΕ (έτοιμο προς χρήση).

4.2.2.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Ιξώδες: 130 ± 10 K.U. (STORMER, 25°C)
- Πυκνότητα: 1,30 ± 0,03 kg/L
- Στερεά (%κ.β.): ~68 για το λευκό (ΕΛΟΤ 1028)
- pH: 8-9
- Στιλπνότητα: 10 ± 3 μονάδες στις 60°(ΕΛΟΤ EN ISO2813)
- Επαναβασιμότητα: Άριστη (ΕΛΟΤ 788)
- Τεστ αντοχής σε αλκάλια: Καμία μεταβολή (ΕΛΟΤ 788)
- Τεστ αντοχής στο νερό: Δεν αλλοιώνεται ή επαναγαλακτώνεται (ΕΛΟΤ 788)
- Αντοχή στην επίδραση καιρικών συνθηκών και περιβάλλοντος: Άριστη. Δεν παρατηρούνται οποιουδήποτε είδους αλλοιώσεις του επιχρίσματος (φούσκωμα,

σκάσιμο, ξεφλούδισμα, κιμωλίαση κ.λπ.). Δεν παρατηρούνται μεταβολές απόχρωσης και στιλπνότητας του επιχρίσματος (ΕΛΟΤ ENISO 2810)

- Ελάχιστη θερμοκρασία εφαρμογής: 3°C (ΕΛΟΤ 788)
- Ελαστικότητα: Επιμήκυνση > 450% (ASTM D2370 - 98).
- Υδατοστεγανότητα: 5 Atm. (DIN 1048)

4.2.3. Αστάρι διαλύτη (D)

4.2.3.1. Γενικά χαρακτηριστικά

Το D είναι διαφανές ακρυλικό υπόστρωμα διαλύτη, που αδιαβροχοποιεί και επιτρέπει στις επιφάνειες να «αναπνέουν». Παρουσιάζει ισχυρή πρόσφυση και διεισδύει σε πορώδεις επιφάνειες, όπως σοβάς, εμφανές μπετόν, τούβλα, γυψοσανίδες, κ.λπ., καθώς επίσης και σε επιφάνειες βαμμένες με ασβέστη ή κόλλα. Εμφανίζει μεγάλη αντοχή στην υγρασία και είναι ιδανικό για επιφάνειες που πρόκειται να βαφούν με υδροδιαλυτά χρώματα (πλαστικά, ακρυλικά, μονωτικά relief, κ.λπ.).

Προεργασία: Οι επιφάνειες πρέπει να είναι καθαρές, στεγνές και λείες, χωρίς σκόνη, λάδια ή τυχόν σαθρά υλικά.

Στέγνωμα: Στην αφή σε περίπου 60 λεπτά, ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Επαναβαφή: Επαναβάφεται μετά από 2 – 3 ώρες, ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Απόδοση: 14 – 16 m²/L για κάθε επίστρωση σε κατάλληλα προετοιμασμένες επιφάνειες (τοίχους).

Αραίωση: Για τοίχους, αραιώνεται έως 100% με Διαλυτικό Πινέλου T και για ταρατσες έως 30%.

ΠΟΕ (Πτητικές Οργανικές Ενώσεις): Οριακή τιμή, μέγιστης περιεκτικότητας σε ΠΟΕ, της ΕΕ (Οδηγία 2004/42/ΕΚ) για το συγκεκριμένο προϊόν (κατηγορία Α/η “Συνδεδετικά Αστάρια, Τύπος Δ): 750 g/l. Το προϊόν περιέχει κατά μέγιστο 730 g/l ΠΟΕ (έτοιμο προς χρήση)

4.2.3.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Ιξώδες: 45 ± 5 sec. (FORD CUP # 2,25⁰ C).
- Πυκνότητα: $0,83 \pm 0,05$ kg / L.
- Στερεά (% κ.β.): $24,5 \pm 0,5$ (ΕΛΟΤ 1028).
- Επαναβαψιμότητα : άριστη (ΕΛΟΤ 788)
- Τεστ αντοχής στο νερό: δεν παρατηρήθηκαν ίχνη προσβολής κατά τη σύγκριση μεταξύ του εμβαπτισμένου τμήματος του δοκιμίου και αυτού που δεν έχει εμβαπτισθεί (ΕΛΟΤ ISO 2812-02)
- Αντοχή στην επίδραση καιρικών συνθηκών και περιβάλλοντος: άριστη (ΕΛΟΤ EN ISO 2810)
- Πρόσφυση: άριστη. Δεν παρουσιάζει καμία αποκόλληση σε δομικές επιφάνειες (ΕΛΟΤ EN ISO 2409)

4.2.4. Διαλυτικό πινέλου (T)

4.2.4.1. Γενικά χαρακτηριστικά

Το διαλυτικό πινέλου T είναι ένα άχρωμο, διαυγές, αδιάλυτο στο νερό μίγμα οργανικών διαλυτών και αρωματικών υδρογονανθράκων, ιδανικό για την αραίωση χρωμάτων και υποστρωμάτων διαλύτη που πρόκειται να εφαρμοστούν με πινέλο ή ρολό.

Χρώμα: Άχρωμο

Τρόπος εφαρμογής: Ανάμειξη της προτεινόμενης ποσότητας διαλυτικού με το χρώμα διαλύτη που θέλουμε να εφαρμόσουμε. Ως καθαριστικό για μεταλλικές επιφάνειες εφαρμόζεται απευθείας πάνω στην επιφάνεια.

4.2.4.2. Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Πυκνότητα: $0,84 \pm 0,10$ kg/L

4.3. Διαδικασία παρασκευής των προς μέτρηση δοκιμίων

4.3.1. Καλούπια

- i. Κόβουμε τον πλαστικό σωλήνα ανά 10 cm προκειμένου να κατασκευάσουμε τα καλούπια που θα χρησιμοποιήσουμε.
- ii. Έπειτα τους κάνουμε μια τομή κατά μήκος, έτσι ώστε να μπορούμε να τα ανοίξουμε για να ξεκαλουπώσουμε τα δοκίμια όταν είναι έτοιμα.

- iii. Στη συνέχεια τα καλούπια στεγανοποιούνται εξωτερικά με ταινία για την αποφυγή διαρροής σκυροδέματος.

4.3.2. Οπλισμός (19)

Τα χαλύβδινα δοκίμια καθαρίζονται σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8407:2009 «Corrosion of metals and alloys – Removal of corrosion products from corrosion test specimens», από τυχόν ρύπους, λάδια και οξείδια.

Η απομάκρυνση των ρύπων και λαδιών γίνεται με φυσικά ή χημικά μέσα, ανάλογα με το είδος τους. Συνήθως χρησιμοποιούνται διάφοροι οργανικοί διαλύτες ή μίγματα αυτών. Ο καθαρισμός των δοκιμίων χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν έγινε βάζοντας τους αρχικά σε αδρανοποιημένο οξύ για χρονικό διάστημα $t=5\text{min}$.

Ακολούθησε ξέπλυμα με πόσιμο νερό, για την πλήρη απομάκρυνση των οξέων και με απιονισμένο νερό για την απομάκρυνση των αλάτων του πόσιμου νερού και στη συνέχεια άμεση εμβάπτιση τους σε καθαρή αλκοόλη για την αντικατάσταση του υμένα του νερού. Έπειτα, εμβαπτίστηκαν σε ακετόνη που έχει πλήρη αναμιξιμότητα με την αλκοόλη για ταχύτερο στέγνωμα των δοκιμίων. Τέλος, τα τρίβουμε με ειδικό χαρτί για την απομάκρυνση τυχόν επιφανειακής υγρασίας.

Τα δοκίμια ζυγίστηκαν σε αναλυτικό ζυγό ακρίβειας τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων και ταξινομήθηκαν – κωδικοποιήθηκαν.

Στον οπλισμό τοποθετείται χάλκινο καλώδιο για τη σύνδεση του οπλισμού με το πολύμετρο και την πραγματοποίηση των μετρήσεων δυναμικού διάβρωσης και έντασης ρεύματος διάβρωσης υπό ανοδική φόρτιση.

4.3.3. Σκυρόδεμα

- i. Ζυγίζουμε τα υλικά (τσιμέντο, άμμο και νερό), σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα αναλογιών (4.1.):

Πίνακας 4.1. Αναλογίες υλικών για την παρασκευή σκυροδέματος (% κ.β.) / ποσότητες σε g για κατασκευή 8 δοκιμίων

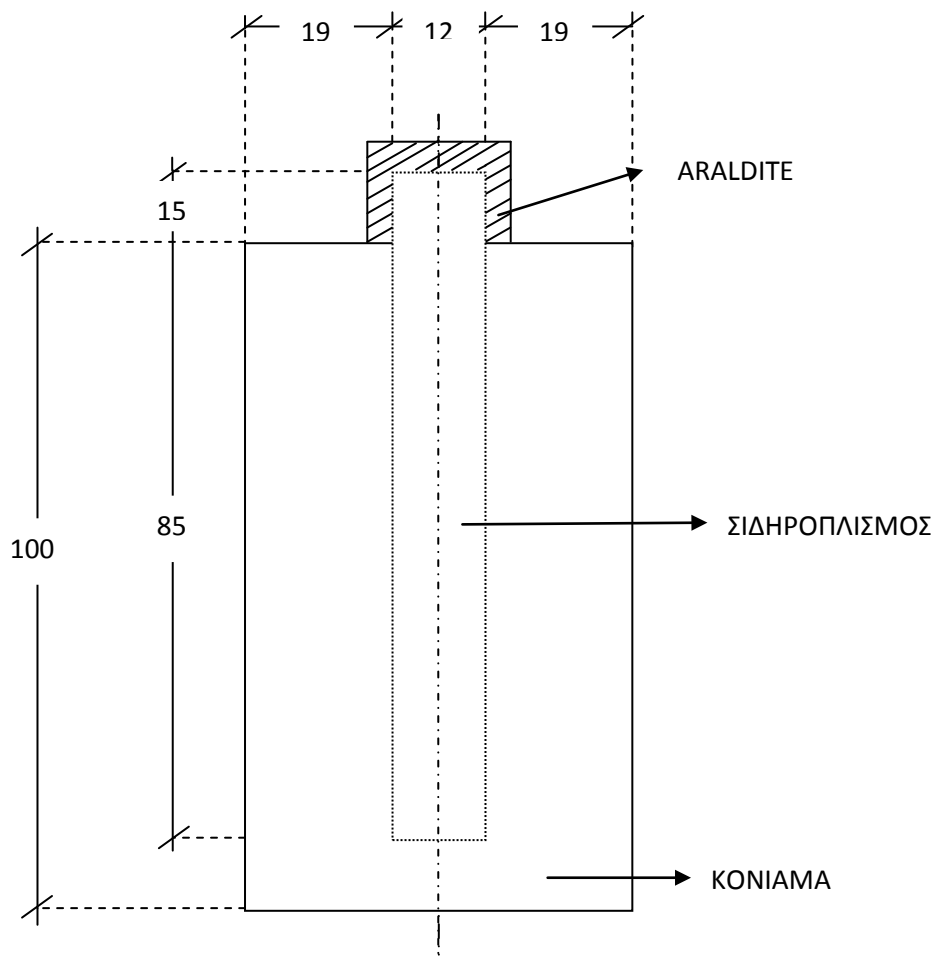
| Τσιμέντο | Άμμος | Νερό |
|----------|-------|------|
| 1 | 3 | 0,5 |
| 660 | 1980 | 330 |

- ii. Γίνεται ανάμιξη των υλικών (για τη παρασκευή του σκυροδέματος) για αρκετά λεπτά (10-15) για πλήρη ομογενοποίηση αυτών.

4.3.4. Παρασκευή δοκιμίων

- i. Ρίχνουμε σκυρόδεμα μέχρι το 1/3 του ύψους του καλουπιού, και χτυπάμε 25 φορές με μία ράβδο κυκλικά (από έξω προς τα μέσα).
- ii. Στη συνέχεια ρίχνουμε άλλο τόσο σκυρόδεμα, μέχρι δηλαδή να φτάσει στα 2/3 του ύψους του καλουπιού και ξαναχτυπάμε.
- iii. Έπειτα τοποθετούμε τον οπλισμό στο κέντρο και τον πιέζουμε προκειμένου να εισχωρήσει στο σκυρόδεμα. Ξαναχτυπάμε το σκυρόδεμα.
- iv. Στη συνέχεια γεμίζουμε μέχρι πάνω το καλούπι και ξαναχτυπάμε. Επίσης χτυπάμε το καλούπι εξωτερικά με ένα σφυρί προκειμένου να καλυφθούν τα κενά του σκυροδέματος.
- v. Έπειτα το γεμίζουμε τελείως με σκυρόδεμα και το στρώνουμε με μία σπάτουλα ώστε να μην υπάρχουν κενά στο επάνω μέρος, προσέχοντας παράλληλα να μην καλυφθεί με σκυρόδεμα το καλώδιο.
- vi. Αφού ελεγχθεί λοιπόν η σωστή πάκτωση και τοποθέτηση των γεμάτων καλουπιών φυλάσσονται για 24 ώρες σε ξηρό και δροσερό περιβάλλον.
- vii. Στη συνέχεια, αφαιρούνται οι ταινίες που συγκρατούν το καλούπι και αποκαλύπτεται το δοκίμιο του κονιάματος.
- viii. Έπειτα, τοποθετούνται τα δοκίμια σε νερό επί 7 ημέρες για ωρίμανση.
- ix. Τα δοκίμια αφήνονται για 24 ώρες να στεγνώσουν.
- x. Στη συνέχεια, καλύπτουμε το μέρος του οπλισμού που εξέρχει με ένα πλαστικό περίβλημα, το οποίο και γεμίζουμε με εποξειδική κόλλα δύο συστατικών προκειμένου να μην είναι εκτεθειμένος ο οπλισμός (για προστασία από τη διάβρωση).
- xi. Τα δοκίμια αφήνονται για 24 ώρες να στεγνώσουν.
- xii. Αφού έχουν περάσει 7 ημέρες από την στιγμή που βγάλαμε από το νερό τα δοκίμια αρχίζουμε να τα βάφουμε, περνώντας τα πρώτα ένα χέρι αστάρι και μετά από 4 περίπου ώρες το πρώτο χέρι χρώματος.
- xiii. Την επόμενη ημέρα περνάμε το δεύτερο χέρι χρώματος στα δοκίμια.
- xiv. Τα αφήνουμε 7 μέρες να στεγνώσουν.
- xv. Τέλος, οκτώ δοκίμια από κάθε ομάδα εμβαπτίζονται (4 cm από το κάτω μέρος) σε δοχείο με διάλυμα 3.5% κ.β. NaCl και δύο δοκίμια από κάθε ομάδα υποβάλλονται σε ανοδική φόρτιση σε δοχείο με διάλυμα 3.5% κ.β. NaCl.
- xvi. Οι μετρήσεις καταχωρούνται σε ειδικό τυποποιημένο πίνακα με ημερομηνία.

- xvii. Σε καθορισμένους χρόνους, στα δοκίμια γίνονται μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης, της θερμοκρασίας του διαλύματος και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου.
- xviii. Στα δοκίμια γίνεται και οπτικός έλεγχος για τυχόν ρωγμές ή διαρροές σκουριάς και φωτογράφιση.
- xix. Μετά το πέρας του καθορισμένου χρόνου έκθεσης, τα δοκίμια βγαίνουν από το διάλυμα 3.5% κ.β. NaCl και σπάζονται με σφυρί και καλέμι, με τέτοιο τρόπο ώστε να μην πειραχθεί ο οπλισμός.
- xx. Σε κάθετη διατομή του πρόσφατα θραυσμένου σκυροδέματος γίνεται μέτρηση του βάθους εναθράκωσης με επάλειψη του άχρωμου διαλύματος δείκτη φαινολοφθαλείνης. Ο βαθμός εναθράκωσης προσδιορίζεται από την αλλαγή του χρώματος της φαινολοφθαλείνης.
- xxi. Πραγματοποιήθηκε καθαρισμός της χαλύβδινης ράβδου, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8407:2009, εμβάπτιση της σε αδρανοποιημένο υδροχλωρικό οξύ για 10 min, έκπλυση με νερό, αλκοόλη και ακετόνη και ζύγιση στη ζυγαριά ακριβείας.



Σχήμα 4.1. Σκαρίφημα δοκιμίου (διαστάσεις σε mm)

Στη συνέχεια παρατίθεται Πίνακας (4.2.), με λεπτομερή καταγραφή όλων των παραπάνω διαδικασιών.

Πίνακας 4.2. Καταγραφή όλων των διαδικασιών (Χρόνος σε ημέρες)

| Δοκίμια | Κατασκευάστηκαν | Μπήκαν στο νερό | Βγήκαν από το νερό | Αστάρι+1^ο χέρι (όσα βάφτηκαν) | 2^ο χέρι (όσα βάφτηκαν) |
|----------------|------------------------|------------------------|---------------------------|---|--|
| Π1 –Π8 | 0 | 1 | 8 | 15 | 16 |
| Π9 –Π20 | 8 | 9 | 16 | 23 | 24 |
| Π21 – Π31 | 15 | 16 | 23 | 30 | 31 |
| Π32 - Π40 | 16 | 17 | 24 | 31 | 32 |

4.4. Μεθοδολογία

Προκειμένου να εκτιμηθεί η ανθεκτικότητα στη διάβρωση και η αποτελεσματικότητα των οργανικών επικαλύψεων που χρησιμοποιήσαμε, εφαρμόστηκε η ακόλουθη μεθοδολογία ελέγχου:

- Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης
- Μέτρηση της έντασης ρεύματος υπό ανοδική φόρτιση
- Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας των οπλισμών, σε δύο (2) χρόνους.
- Μέτρηση βάθους εναθράκωσης

4.4.1. Δυναμικό διάβρωσης (4,19)

Οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι βασίζονται στην ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης και μετρούν τις ηλεκτρικές ιδιότητες της ηλεκτρισμένης διπλοστοιβάδας (δηλαδή της

διεπιφάνειας μετάλλου – διαλύματος), τόσο για τη διερεύνηση του μηχανισμού διάβρωσης όσο και για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του στην πράξη.

Το δυναμικό διάβρωσης προσδιορίζεται από το άθροισμα των συνολικών ηλεκτροχημικών δράσεων οξειδωσης και αναγωγής σαν αποτέλεσμα της διαδικασίας της διάβρωσης. Είναι μία ποιοτική μέθοδος, μη καταστροφική που δείχνει την προδιάθεση για διάβρωση, όχι όμως και την ταχύτητά της.

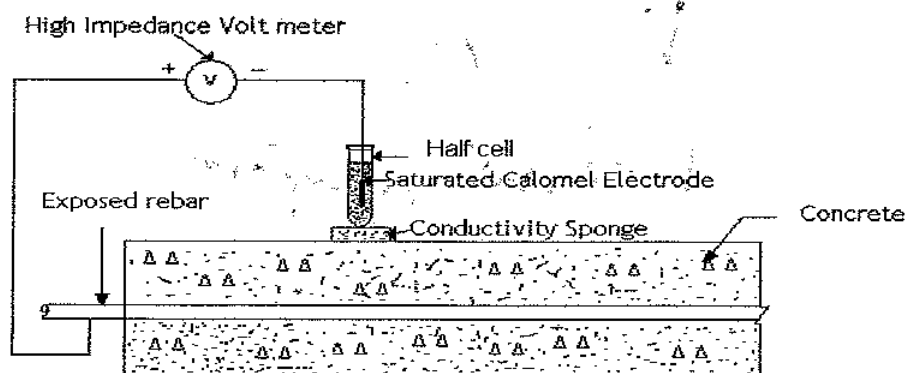
Για τον προσδιορισμό του μετράται η διαφορά δυναμικού του μετάλλου ως προς ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς (κορεσμένου καλομέλανα, Ag/AgCl), με απλό ή ψηφιακό βολτόμετρο. Η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης παρέχει διάφορες πληροφορίες, όπως για το ποιο μέταλλο θα είναι ανοδικό στην περίπτωση γαλβανικής σύνδεσης, ή για την επίδραση μικροσκοπικών ετερογενειών στο μέταλλο (μέτρηση E_{corr} σε ορισμένες περιοχές της μεταλλικής επιφάνειας με μικροηλεκτρόδια), ή για τις πιθανές θέσεις των ανοδικών περιοχών σε ένα θαμμένο σωλήνα. Το δυναμικό διάβρωσης εξαρτάται από τον τύπο του μετάλλου, τις συνθήκες περιβάλλοντος έκθεσης (υγρασία, pH, συγκέντρωση αλάτων), τη διαθεσιμότητα σε οξυγόνο, τα επαγόμενα ρεύματα και τη θερμοκρασία.

Η χρονική εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα ως προς κάποιο ηλεκτρόδιο αναφοράς προσφέρει πληροφορίες για την πιθανότητα διάβρωσης του χάλυβα. Η μέθοδος αυτή είναι απλή στην εφαρμογή της και γρήγορη, για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται ευρέως. Η χρονική εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης για μακρές περιόδους, είναι αυτή που δίνει πιο αξιόπιστα στοιχεία για την προδιάθεση μετάλλων σε διάβρωση.

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

Όπως αναφέρεται στο πρότυπο ASTM C876-91 (Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete) , από τις τιμές του μετρούμενου δυναμικού διάβρωσης, προκύπτουν οι ενδείξεις για την προδιάθεση του σιδηροπλισμού για διάβρωση και διακρίνονται τα εξής ενδεχόμενα:

- Όταν $E_{corr} > -200 \text{ mV}_{cse}$, κατά πιθανότητα 90% δεν συμβαίνει διάβρωση
- Όταν $E_{corr} < -350 \text{ mV}_{cse}$, κατά πιθανότητα 90% συμβαίνει διάβρωση
- Όταν $-200 \text{ mV}_{cse} > E_{corr} > -350 \text{ mV}_{cse}$, δεν είναι βέβαιο αν συμβαίνει ή όχι διάβρωση



Σχήμα 4.2. Σχηματική απεικόνιση του ανοιχτού κυκλώματος μέτρησης διάβρωσης (22)

4.4.2. Ένταση ρεύματος υπό ανοδική φόρτιση (4)

Προκειμένου να επιταχύνουμε τη διαδικασία διάβρωσης του χάλυβα των εμβαπτισμένων στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl δοκιμίων εφαρμόστηκε σταθερή ανοδική φόρτιση 1000 mV με τη βοήθεια ειδικής πηγής DC.

Το δυναμικό ανοδικής φόρτισης, στο εμβαπτισμένο σε διάλυμα 3,5% NaCl δοκίμιο, εφαρμόζεται μεταξύ του ηλεκτροδίου εργασίας, δηλαδή του χαλύβδινου οπλισμού του δοκιμίου και ηλεκτροδίου αναφοράς καλομέλανα (SCE). Ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται γραφίτης διαστάσεων 80x120x20 mm.

Κατά τη διάρκεια της ανοδικής φόρτισης έγινε μέτρηση με αμπερόμετρο και καταγραφή της έντασης του διερχόμενου ρεύματος μεταξύ του ηλεκτροδίου εργασίας και του βοηθητικού ηλεκτροδίου γραφίτη.

Και τα δύο ηλεκτρόδια (μέταλλο και βοηθητικό) τοποθετούνται στο διαβρωτικό περιβάλλον, που εξετάζεται. Αν συνδυαστεί η τιμή της έντασης διάβρωσης με την τιμή του δυναμικού διάβρωσης οδηγεί σε βεβαιότερη πρόβλεψη για τη συμπεριφορά στη διάβρωση των συγκρινόμενων μετάλλων, συγκριτικά με αυτήν που προκύπτει από την τιμή μόνο του δυναμικού διάβρωσης.

Όπως στην περίπτωση του δυναμικού διάβρωσης, έτσι και στην περίπτωση της έντασης διάβρωσης, παρακολουθείται η τιμή της έντασης του ρεύματος διάβρωσης σε συναρτήσε με το χρόνο, για διάστημα ημερών. Μεγαλύτερη αντοχή έχει εκείνο το μέταλλο, που η τιμή της έντασης διάβρωσης μένει σταθερότερη για σταθερές συνθήκες. Γρήγορη πτώση της έντασης διάβρωσης, δείχνει γρήγορο σχηματισμό προϊόντος διάβρωσης. Την πτώση αυτή ακολουθεί, συνήθως, στη συνέχεια απότομη αύξηση της έντασης διάβρωσης, εξαιτίας ρήξης του στρώματος του προϊόντος διάβρωσης.

4.4.3. Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας των οπλισμών (19)

Για τους υπολογισμούς της απώλειας μάζας των δοκιμίων ως αρχική μάζα λαμβάνεται η μάζα του δοκιμίου πριν την έκθεσή του στο διαβρωτικό περιβάλλον και ως τελική μάζα λαμβάνεται η μάζα του μετά την έκθεσή του στο διαβρωτικό περιβάλλον, αφού πρώτα έχει πραγματοποιηθεί καθαρισμός της επιφάνεια σύμφωνα με τα πρότυπα για κάθε είδος δοκιμίου (ISO 8407).

Η απώλεια μάζας προκύπτει από τη διαφορά της αρχικής μείον την τελική τιμή μάζας του δοκιμίου. Η εκτίμηση της διάβρωσης γίνεται με τον υπολογισμό του ποσοστού επί τοις εκατό της μεταβολής κατά βάρος. Το ποσοστό επί τοις εκατό μεταβολής κατά βάρος των οπλισμών δίνεται από τη σχέση :

$$\Delta m(\%) = [(m_{\text{αρχ}} - m_{\text{τελ}}) / m_{\text{αρχ}}] \times 100$$

Όπου:

$m_{\text{αρχ}}$: η αρχική μάζα του δοκιμίου πριν την έκθεσή του στο διαβρωτικό περιβάλλον

$m_{\text{τελ}}$: η τελική μάζα του δοκιμίου μετά την έκθεσή του και τον καθαρισμό του

4.4.4. Βάθος ενανθράκωσης (15)

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε το βάθος ενανθράκωσης πραγματοποιούμε το τεστ φαινολοφθαλείνης. Στην κάθετη διατομή του πρόσφατα θραυσμένου σκυροδέματος, γίνεται επάλειψη του άχρωμου διαλύματος δείκτη φαινολοφθαλείνης. Ο βαθμός ενανθράκωσης προσδιορίζεται από την αλλαγή του χρώματος της φαινολοφθαλείνης. Το σκυρόδεμα με $\text{pH} > 9$, προσδίδει χρώμα κόκκινο, ενώ το ενανθρακωμένο με $\text{pH} < 9$, δεν επιφέρει χρωματισμό.

4.4.5. Δοκίμια

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν ήταν μήκους 10cm και διαμέτρου 50mm, με οπλισμό μιας ράβδου χάλυβα μήκους 10cm και διαμέτρου 12mm, όπως αναφέραμε και προηγουμένως.

Συνολικά παρασκευάστηκαν σαράντα δοκίμια για την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας. Από αυτά χρησιμοποιήθηκαν τελικά τα τριάντα, τα οποία και χωρίστηκαν

σε τρεις κατηγορίες για τις ηλεκτροχημικές μετρήσεις. Οι 3 αυτές κατηγορίες φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.3. μαζί με τις κωδικές ονομασίες των δοκιμίων.

Πίνακας 4.3. Κατηγορίες δοκιμίων

| <u>ΟΜΑΔΑ Α (ΧΡΩΜΑ Α)</u> | <u>ΟΜΑΔΑ Β (ΧΡΩΜΑ V)</u> | <u>ΟΜΑΔΑ Γ (ΑΒΑΦΑ)</u> |
|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| Π9 | Π3 | Π18 |
| Π10 | Π4 | Π20 |
| Π11 | Π15 | Π21 |
| Π12 | Π16 | Π24 |
| Π22 | Π26 | Π25 |
| Π23 | Π27 | Π28 |
| Π31 | Π30 | Π29 |
| Π32 | Π35 | Π36 |
| Π33 | Π39 | Π37 |
| Π34 | Π40 | Π38 |

Από αυτές τις 3 κατηγορίες χρησιμοποιήθηκαν οκτώ δοκίμια από την κάθε μία για τις μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης, και δύο επίσης από την κάθε κατηγορία, για τις μετρήσεις της έντασης ρεύματος υπό ανοδική φόρτιση, όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4. Κατηγορίες δοκιμίων σε σχέση με τις μετρήσεις

| Μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης | | | Μετρήσεις της έντασης ρεύματος υπό ανοδική φόρτιση | | |
|-------------------------------|---------|---------|--|---------|---------|
| Ομάδα Α | Ομάδα Β | Ομάδα Γ | Ομάδα Α | Ομάδα Β | Ομάδα Γ |
| Π9 | Π3 | Π20 | Π22 | Π15 | Π18 |
| Π10 | Π4 | Π21 | Π23 | Π26 | Π29 |
| Π11 | Π16 | Π24 | | | |
| Π12 | Π27 | Π25 | | | |
| Π31 | Π30 | Π28 | | | |
| Π32 | Π35 | Π36 | | | |
| Π33 | Π39 | Π37 | | | |
| Π34 | Π40 | Π38 | | | |

Τα υπόλοιπα δοκίμια φυλάχθηκαν σε ξηρό και δροσερό περιβάλλον σε περίπτωση που χρειαζόταν να χρησιμοποιηθούν.

4.5. Μετρήσεις

4.5.1. Μετρήσεις Δυναμικού Διάβρωσης

Για τις Μετρήσεις Δυναμικού Διάβρωσης μακράς διάρκειας, χρησιμοποιήθηκαν οκτώ δοκίμια από την κάθε κατηγορία, όπως αναφέραμε και παραπάνω.

Αυτά τα δοκίμια βγήκαν από το διάλυμα χλωριούχου νατρίου σε δύο (2) χρόνους:

- Τα τέσσερα από κάθε κατηγορία στον Α' Χρόνο (5 μήνες)
- Και τα υπόλοιπα τέσσερα στον Β' Χρόνο (6 μήνες)

Ο επόμενος Πίνακας 4.5., δείχνει αναλυτικά ποια από τα δοκίμια ανήκουν στην κάθε κατηγορία.

Πίνακας 4.5. Εξαγωγή των δοκιμίων σε δύο (2) χρόνους

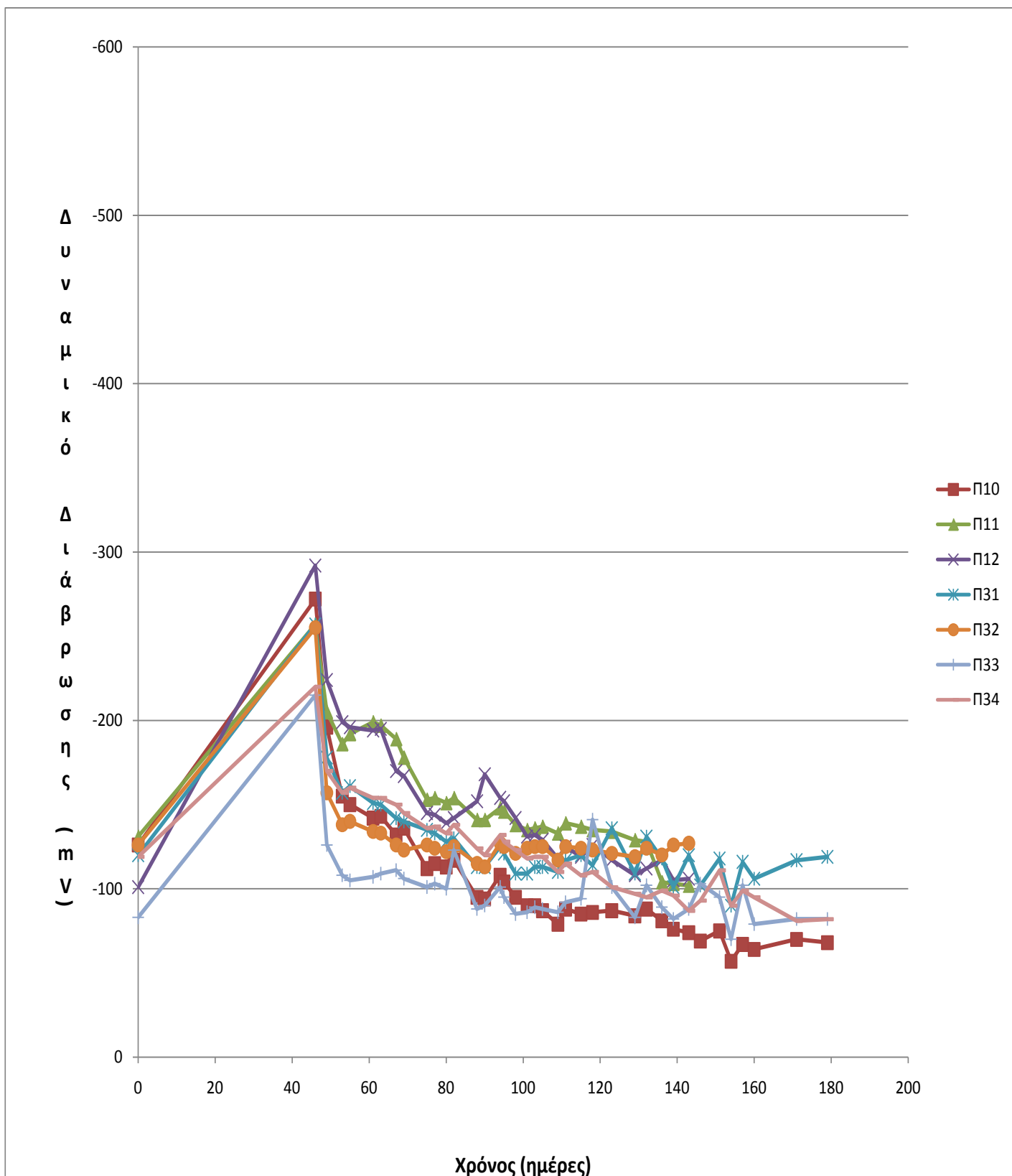
| A' ΧΡΟΝΟΣ (5 μήνες) | | | B' ΧΡΟΝΟΣ (6 μήνες) | | |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------------------|----------------|----------------|
| Ομάδα Α | Ομάδα Β | Ομάδα Γ | Ομάδα Α | Ομάδα Β | Ομάδα Γ |
| Π9 | Π4 | Π20 | Π10 | Π3 | Π21 |
| Π11 | Π27 | Π28 | Π31 | Π16 | Π24 |
| Π12 | Π39 | Π36 | Π33 | Π30 | Π25 |
| Π32 | Π40 | Π37 | Π34 | Π35 | Π38 |

Σε όλα αυτά τα δοκίμια πραγματοποιήθηκαν ηλεκτροχημικές μετρήσεις σε τακτά χρονικά διαστήματα (~ 2 φορές την εβδομάδα), προκειμένου να παρατηρήσουμε τη διαφορά δυναμικού κάθε δοκιμίου, την τάση δηλαδή που έχει το καθένα από αυτά να διαβρωθεί.

Παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικοί Πίνακες (4.6, 4.7, 4.8), με όλες τις μετρήσεις όλων των δοκιμίων, καθώς επίσης και τα διαγράμματα του δυναμικού διάβρωσης κάθε ομάδας συναρτήσει του χρόνου.

Πίνακας 4.6. Δυναμικό διάβρωσης επικαλυμμένων δοκιμίων με χρώμα Α

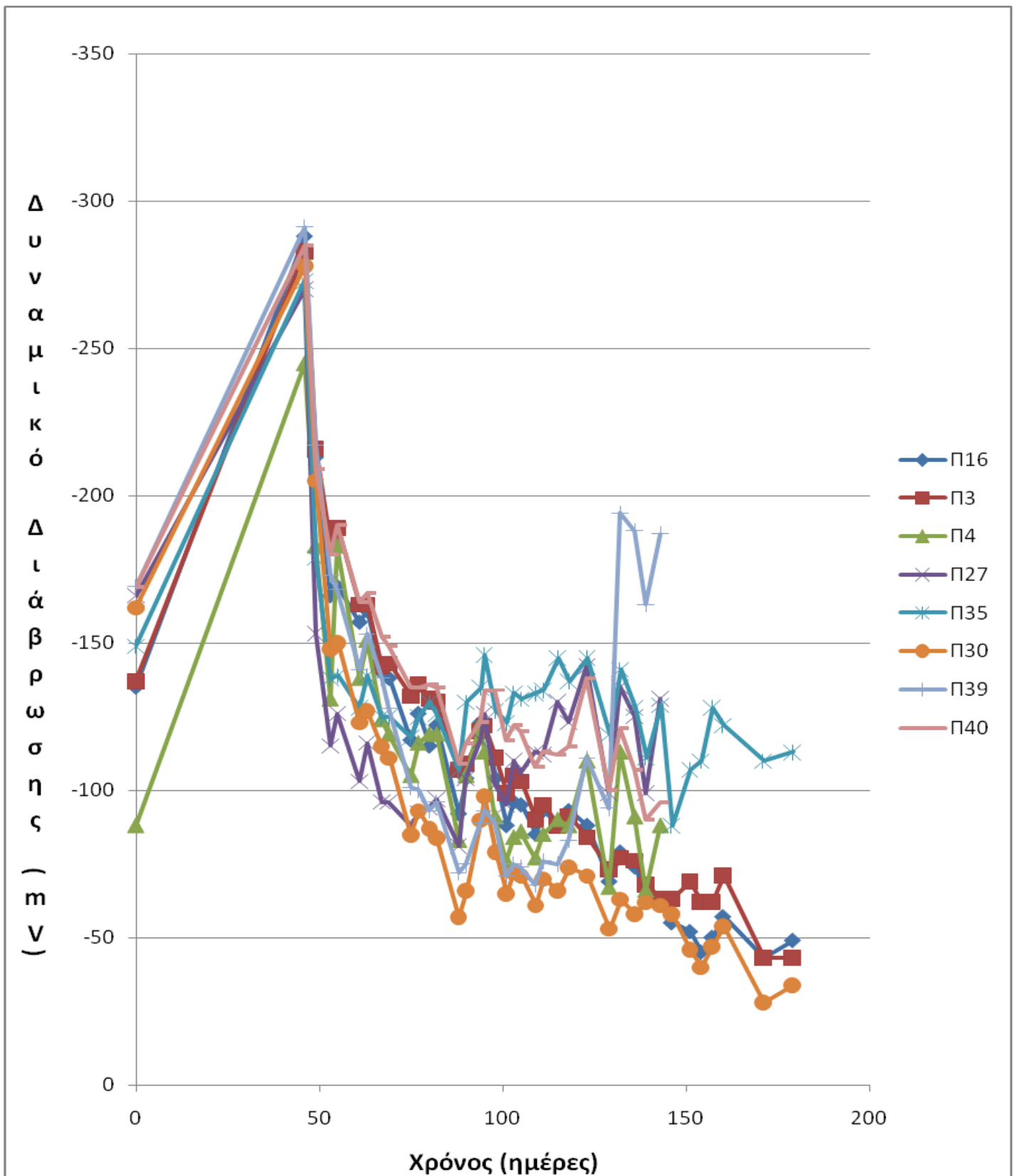
| Α/Α (Μέτρησης) | ΧΡΟΝΟΣ (Ημέρες) | ΔΥΝΑΜΙΚΟ (mV) | | | | | | | |
|-------------------|--------------------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | ΟΜΑΔΑ Α (ΧΡΩΜΑ Α) | | | | | | | |
| | | <u>Π9</u> | <u>Π10</u> | <u>Π11</u> | <u>Π12</u> | <u>Π31</u> | <u>Π32</u> | <u>Π33</u> | <u>Π34</u> |
| 1 ⁿ | 0 | -108 | -126 | -131 | -101 | -120 | -126 | -83 | -119 |
| 2 ⁿ | 46 | -380 | -272 | -257 | -292 | -257 | -255 | -215 | -220 |
| 3 ⁿ | 49 | -273 | -196 | -205 | -224 | -178 | -157 | -126 | -170 |
| 4 ⁿ | 53 | -260 | -155 | -186 | -199 | -157 | -138 | -108 | -157 |
| 5 ⁿ | 55 | -261 | -150 | -192 | -196 | -161 | -140 | -105 | -160 |
| 6 ⁿ | 61 | -254 | -142 | -199 | -194 | -151 | -134 | -107 | -154 |
| 7 ⁿ | 63 | -253 | -143 | -197 | -195 | -150 | -133 | -109 | -154 |
| 8 ⁿ | 67 | -245 | -132 | -189 | -170 | -142 | -126 | -111 | -150 |
| 9 ⁿ | 69 | -230 | -136 | -178 | -167 | -140 | -123 | -106 | -145 |
| 10 ⁿ | 75 | -230 | -112 | -153 | -145 | -135 | -126 | -101 | -136 |
| 11 ⁿ | 77 | -223 | -115 | -154 | -144 | -133 | -124 | -103 | -137 |
| 12 ⁿ | 80 | -209 | -113 | -151 | -139 | -128 | -122 | -100 | -133 |
| 13 ⁿ | 82 | -217 | -117 | -154 | -142 | -130 | -125 | -123 | -138 |
| 14 ⁿ | 88 | -199 | -95 | -141 | -152 | -113 | -115 | -88 | -124 |
| 15 ⁿ | 90 | -198 | -94 | -141 | -168 | -113 | -113 | -90 | -120 |
| 16 ⁿ | 94 | -229 | -108 | -148 | -154 | -125 | -127 | -101 | -132 |
| 17 ⁿ | 95 | -226 | -104 | -146 | -152 | -121 | -125 | -95 | -128 |
| 18 ⁿ | 98 | -228 | -95 | -138 | -142 | -109 | -121 | -85 | -123 |
| 19 ⁿ | 101 | -220 | -90 | -135 | -131 | -109 | -124 | -86 | -118 |
| 20 ⁿ | 103 | -218 | -90 | -136 | -132 | -113 | -125 | -89 | -119 |
| 21 ⁿ | 105 | -216 | -87 | -137 | -129 | -113 | -125 | -88 | -119 |
| 22 ⁿ | 109 | -177 | -79 | -133 | -118 | -110 | -117 | -86 | -110 |
| 23 ⁿ | 111 | -198 | -88 | -139 | -125 | -117 | -125 | -92 | -115 |
| 24 ⁿ | 115 | -194 | -85 | -137 | -119 | -120 | -124 | -94 | -108 |
| 25 ⁿ | 118 | -342 | -86 | -135 | -126 | -114 | -123 | -141 | -110 |
| 26 ⁿ | 123 | -443 | -87 | -134 | -117 | -136 | -121 | -101 | -101 |
| 27 ⁿ | 129 | -454 | -84 | -129 | -108 | -109 | -119 | -83 | -97 |
| 28 ⁿ | 132 | -492 | -88 | -128 | -112 | -131 | -124 | -102 | -95 |
| 29 ⁿ | 136 | -530 | -81 | -104 | -117 | -118 | -120 | -89 | -99 |
| 30 ⁿ | 139 | -515 | -76 | -103 | -105 | -101 | -126 | -82 | -96 |
| 31 ⁿ | 143 | -527 | -74 | -102 | -106 | -120 | -127 | -88 | -87 |
| 32 ⁿ | 146 | ΕΚΤΟΣ | -69 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | -102 | ΕΚΤΟΣ | -103 | -93 |
| 33 ⁿ | 151 | ΕΚΤΟΣ | -75 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | -118 | ΕΚΤΟΣ | -95 | -111 |
| 34 ⁿ | 154 | ΕΚΤΟΣ | -57 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | -90 | ΕΚΤΟΣ | -70 | -90 |
| 35 ⁿ | 157 | ΕΚΤΟΣ | -67 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | -116 | ΕΚΤΟΣ | -102 | -99 |
| 36 ⁿ | 160 | ΕΚΤΟΣ | -64 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | -106 | ΕΚΤΟΣ | -79 | -95 |
| 37 ⁿ | 171 | ΕΚΤΟΣ | -70 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | -117 | ΕΚΤΟΣ | -82 | -81 |
| 38 ⁿ | 179 | ΕΚΤΟΣ | -68 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | -119 | ΕΚΤΟΣ | -82 | -82 |



Σχήμα 4.3. Δυναμικό διάβρωσης επικαλυμμένων δοκιμίων με χρώμα Α ως προς χρόνο έκθεσης στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl

Πίνακας 4.7. Δυναμικό διάβρωσης επικαλυμμένων δοκιμίων με χρώμα V

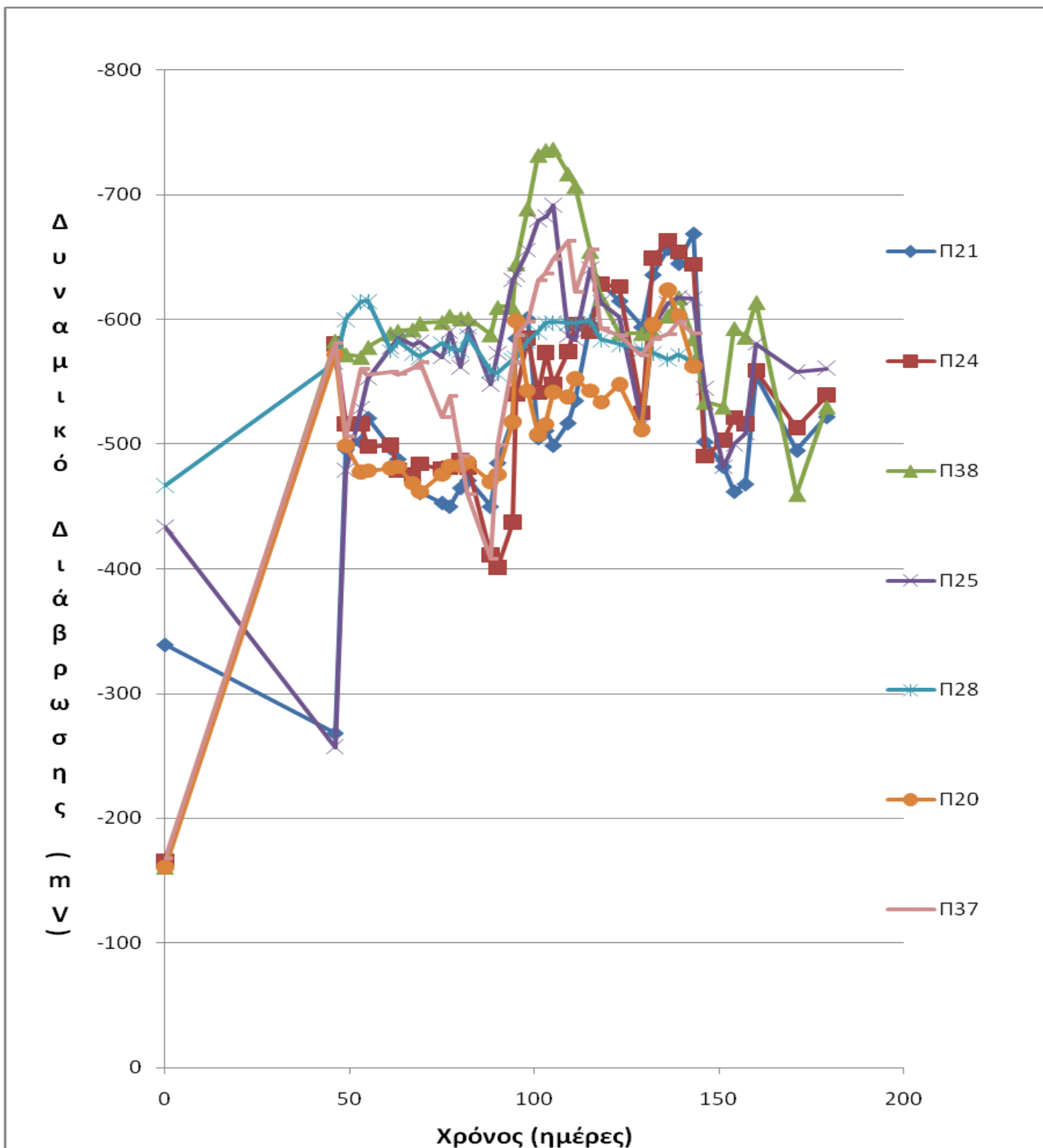
| Α/Α (Μέτρησης) | ΧΡΟΝΟΣ (Ημέρες) | ΔΥΝΑΜΙΚΟ (mV) | | | | | | | |
|-------------------|--------------------|-------------------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| | | ΟΜΑΔΑ Β (ΧΡΩΜΑ V) | | | | | | | |
| | | Π16 | Π3 | Π4 | Π27 | Π35 | Π30 | Π39 | Π40 |
| 1 ^η | 0 | -135 | -137 | -88 | -166 | -149 | -162 | -169 | -169 |
| 2 ^η | 46 | -288 | -283 | -245 | -270 | -273 | -278 | -291 | -285 |
| 3 ^η | 49 | -213 | -216 | -183 | -153 | -179 | -205 | -217 | -209 |
| 4 ^η | 53 | -166 | -184 | -131 | -115 | -138 | -148 | -173 | -180 |
| 5 ^η | 55 | -169 | -189 | -183 | -126 | -139 | -150 | -168 | -190 |
| 6 ^η | 61 | -157 | -163 | -138 | -103 | -128 | -123 | -141 | -164 |
| 7 ^η | 63 | -161 | -163 | -151 | -116 | -139 | -127 | -153 | -167 |
| 8 ^η | 67 | -140 | -142 | -124 | -96 | -125 | -115 | -138 | -152 |
| 9 ^η | 69 | -138 | -143 | -119 | -96 | -125 | -111 | -128 | -149 |
| 10 ^η | 75 | -117 | -132 | -105 | -88 | -118 | -85 | -101 | -135 |
| 11 ^η | 77 | -126 | -136 | -116 | -92 | -125 | -93 | -100 | -135 |
| 12 ^η | 80 | -115 | -131 | -119 | -94 | -130 | -87 | -93 | -136 |
| 13 ^η | 82 | -122 | -130 | -119 | -97 | -126 | -84 | -96 | -135 |
| 14 ^η | 88 | -92 | -107 | -83 | -81 | -107 | -57 | -72 | -109 |
| 15 ^η | 90 | -104 | -109 | -105 | -104 | -130 | -66 | -75 | -116 |
| 16 ^η | 94 | -123 | -120 | -123 | -117 | -135 | -90 | -89 | -123 |
| 17 ^η | 95 | -122 | -122 | -113 | -126 | -146 | -98 | -93 | -134 |
| 18 ^η | 98 | -104 | -111 | -91 | -102 | -127 | -79 | -89 | -134 |
| 19 ^η | 101 | -88 | -99 | -76 | -95 | -123 | -65 | -71 | -117 |
| 20 ^η | 103 | -96 | -105 | -84 | -110 | -133 | -72 | -75 | -122 |
| 21 ^η | 105 | -95 | -103 | -86 | -106 | -131 | -71 | -74 | -120 |
| 22 ^η | 109 | -85 | -90 | -77 | -113 | -133 | -61 | -68 | -108 |
| 23 ^η | 111 | -93 | -95 | -85 | -112 | -134 | -70 | -76 | -113 |
| 24 ^η | 115 | -88 | -88 | -90 | -130 | -145 | -66 | -75 | -112 |
| 25 ^η | 118 | -93 | -91 | -88 | -123 | -137 | -74 | -83 | -115 |
| 26 ^η | 123 | -88 | -84 | -110 | -142 | -145 | -71 | -111 | -138 |
| 27 ^η | 129 | -69 | -73 | -67 | -99 | -119 | -53 | -94 | -100 |
| 28 ^η | 132 | -79 | -77 | -113 | -135 | -141 | -63 | -194 | -121 |
| 29 ^η | 136 | -74 | -76 | -91 | -125 | -128 | -58 | -188 | -107 |
| 30 ^η | 139 | -62 | -68 | -66 | -99 | -111 | -62 | -163 | -90 |
| 31 ^η | 143 | -63 | -63 | -88 | -131 | -129 | -61 | -187 | -96 |
| 32 ^η | 146 | -55 | -63 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | -88 | -58 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ |
| 33 ^η | 151 | -52 | -69 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | -107 | -46 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ |
| 34 ^η | 154 | -45 | -62 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | -110 | -40 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ |
| 35 ^η | 157 | -50 | -62 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | -128 | -47 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ |
| 36 ^η | 160 | -57 | -71 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | -122 | -54 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ |
| 37 ^η | 171 | -43 | -43 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | -110 | -28 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ |
| 38 ^η | 179 | -49 | -43 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | -113 | -34 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ |



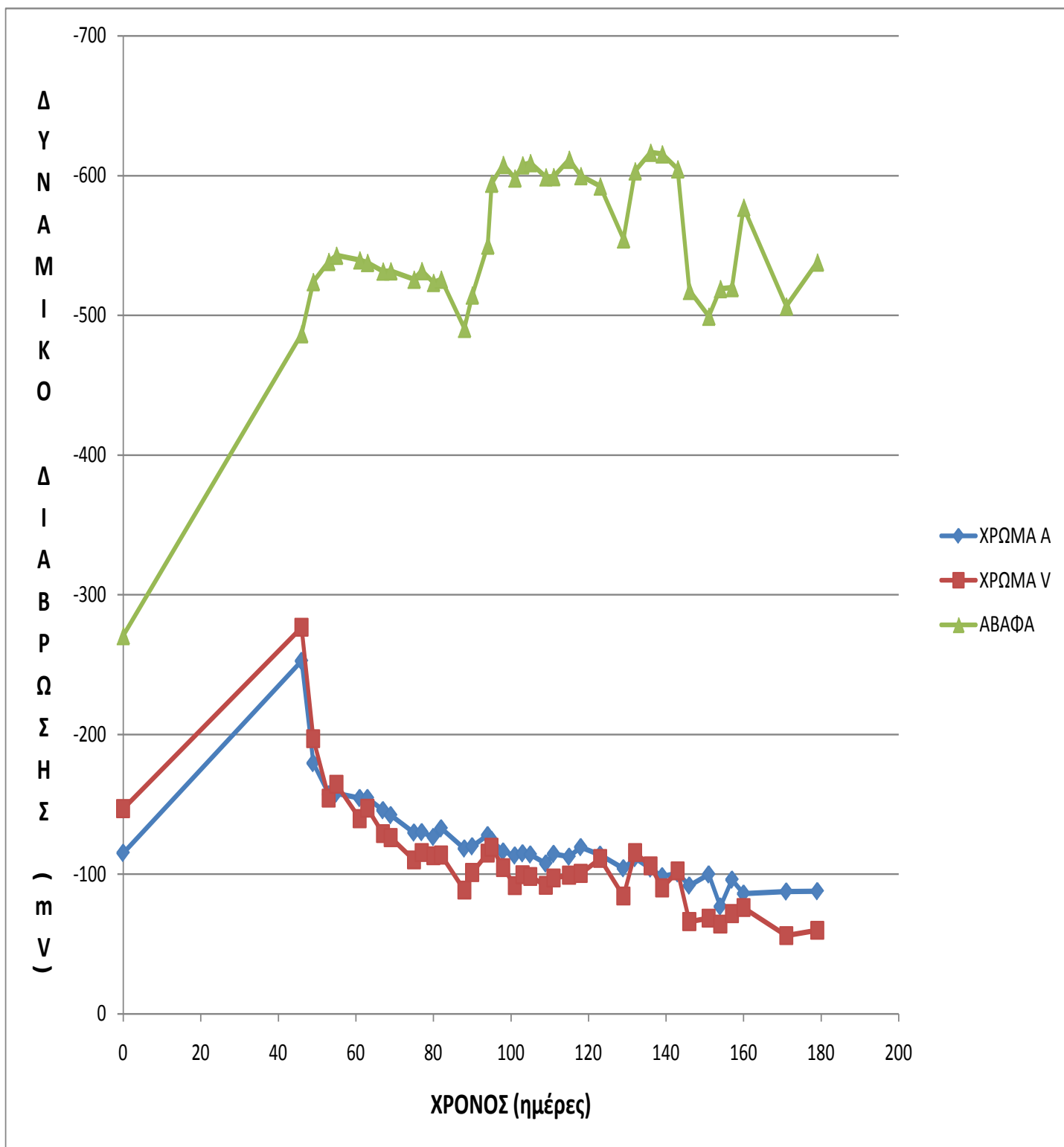
Σχήμα 4.4. Δυναμικό διάβρωσης επικαλυμμένων δοκιμίων με χρώμα V ως προς χρόνο έκθεσης στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl

Πίνακας 4.8. Δυναμικό διάβρωσης μη επικαλυμμένων δοκιμίων

| Α/Α (Μέτρησης) | ΧΡΟΝΟΣ (Ημέρες) | ΔΥΝΑΜΙΚΟ (mV) | | | | | | | |
|-------------------|--------------------|-----------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | | ΟΜΑΔΑ Γ (ΑΒΑΦΑ) | | | | | | | |
| | | Π21 | Π24 | Π38 | Π25 | Π28 | Π20 | Π36 | Π37 |
| 1 ^η | 0 | -339 | -165 | -161 | -434 | -467 | -161 | -152 | -168 |
| 2 ^η | 46 | -268 | -580 | -583 | -257 | -566 | -572 | -304 | -581 |
| 3 ^η | 49 | -496 | -516 | -572 | -479 | -600 | -499 | -116 | -506 |
| 4 ^η | 53 | -502 | -516 | -570 | -529 | -614 | -478 | -113 | -560 |
| 5 ^η | 55 | -521 | -498 | -578 | -553 | -615 | -479 | -116 | -556 |
| 6 ^η | 61 | -497 | -499 | -589 | -578 | -575 | -481 | -147 | -558 |
| 7 ^η | 63 | -488 | -479 | -591 | -585 | -583 | -482 | -174 | -556 |
| 8 ^η | 67 | -471 | -475 | -592 | -580 | -573 | -469 | -164 | -561 |
| 9 ^η | 69 | -461 | -484 | -597 | -582 | -570 | -462 | -154 | -566 |
| 10 ^η | 75 | -453 | -480 | -598 | -570 | -581 | -476 | -167 | -522 |
| 11 ^η | 77 | -450 | -481 | -603 | -590 | -577 | -483 | -163 | -539 |
| 12 ^η | 80 | -465 | -487 | -601 | -562 | -575 | -483 | -186 | -491 |
| 13 ^η | 82 | -471 | -481 | -601 | -594 | -587 | -486 | -159 | -460 |
| 14 ^η | 88 | -450 | -411 | -588 | -548 | -559 | -470 | -144 | -408 |
| 15 ^η | 90 | -485 | -401 | -610 | -573 | -557 | -476 | -155 | -499 |
| 16 ^η | 94 | -520 | -437 | -610 | -632 | -568 | -518 | -150 | -566 |
| 17 ^η | 95 | -585 | -540 | -645 | -636 | -569 | -599 | -135 | -587 |
| 18 ^η | 98 | -601 | -585 | -689 | -656 | -583 | -543 | -425 | -598 |
| 19 ^η | 101 | -505 | -541 | -732 | -680 | -590 | -508 | -473 | -631 |
| 20 ^η | 103 | -511 | -573 | -736 | -683 | -597 | -516 | -462 | -637 |
| 21 ^η | 105 | -499 | -548 | -737 | -692 | -598 | -542 | -480 | -648 |
| 22 ^η | 109 | -517 | -574 | -717 | -587 | -597 | -538 | -475 | -663 |
| 23 ^η | 111 | -535 | -596 | -707 | -584 | -597 | -553 | -475 | -622 |
| 24 ^η | 115 | -597 | -590 | -655 | -641 | -599 | -543 | -473 | -656 |
| 25 ^η | 118 | -629 | -628 | -617 | -614 | -584 | -534 | -491 | -593 |
| 26 ^η | 123 | -615 | -626 | -589 | -602 | -580 | -548 | -492 | -587 |
| 27 ^η | 129 | -594 | -525 | -589 | -515 | -576 | -512 | -456 | -571 |
| 28 ^η | 132 | -636 | -649 | -590 | -595 | -573 | -596 | -511 | -584 |
| 29 ^η | 136 | -657 | -663 | -603 | -613 | -568 | -624 | -534 | -588 |
| 30 ^η | 139 | -645 | -654 | -618 | -618 | -572 | -603 | -520 | -598 |
| 31 ^η | 143 | -669 | -644 | -585 | -617 | -566 | -563 | -514 | -589 |
| 32 ^η | 146 | -502 | -490 | -534 | -545 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ |
| 33 ^η | 151 | -482 | -503 | -530 | -482 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ |
| 34 ^η | 154 | -462 | -521 | -593 | -500 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ |
| 35 ^η | 157 | -468 | -516 | -586 | -509 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ |
| 36 ^η | 160 | -555 | -559 | -614 | -581 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ |
| 37 ^η | 171 | -495 | -513 | -460 | -558 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ |
| 38 ^η | 179 | -522 | -539 | -530 | -561 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ |



Σχήμα 4.5. Δυναμικό διάβρωσης δοκιμίων χωρίς επικάλυψη ως προς χρόνο έκθεσης στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl



Σχήμα 4.6. Μέσοι Όροι του δυναμικού διάβρωσης δοκιμίων ως προς χρόνο έκθεσης στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl

4.5.1.1. Συμπεράσματα

Παρατηρώντας το διάγραμμα των μέσων όρων του δυναμικού διάβρωσης δοκιμίων ως προς χρόνο έκθεσης στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl (Σχήμα 4.6.), διαπιστώνουμε τα εξής:

1. Το δυναμικό διάβρωσης των επικαλυμμένων δοκιμίων με χρώμα A ξεκινάει από τα -110 mV. Στη συνέχεια, αφού μειωθεί φτάνοντας στα -270 mV, ακολουθεί μια συνεχόμενη αύξηση, φτάνοντας τελικά στα -90 mV.
2. Στα επικαλυμμένα δοκίμια με χρώμα V, παρατηρούμε ότι το δυναμικό διάβρωσης ακολουθεί αντίστοιχη πορεία με αυτή του δυναμικού διάβρωσης των δοκιμίων που είναι επικαλυμμένα με το χρώμα A. Ξεκινάει δηλαδή από τα -150 mV και αφού μειωθεί στην αρχή φτάνοντας στα -280 mV, στη συνέχεια ακολουθεί μια συνεχόμενη αύξηση, φτάνοντας τελικά στα -60 mV.
3. Τέλος, στο δυναμικό διάβρωσης των δοκιμίων χωρίς επικάλυψη παρατηρείται τελείως αντίθετη πορεία από αυτή του δυναμικού διάβρωσης των δοκιμίων των άλλων δύο κατηγοριών. Σε αυτή την κατηγορία το δυναμικό διάβρωσης ξεκινάει από τα -250 mV και ακολουθεί (έχοντας βέβαια αρκετές αυξομειώσεις), μια συνεχή μείωση φτάνοντας τελικά στα -540 mV.

Από όλα τα παραπάνω, και σύμφωνα με τον ASTM C876-91, συμπεραίνουμε, ότι τα επικαλυμμένα δοκίμια με χρώμα A και με χρώμα V, κατά πιθανότητα 90% δεν έχουν υποστεί διάβρωση, σε αντίθεση με εκείνα χωρίς επικάλυψη στα οποία κατά πιθανότητα 90% συμβαίνει διάβρωση.

4.5.2. Μέτρηση έντασης ρεύματος υπό ανοδική φόρτιση

Για τις μετρήσεις έντασης ρεύματος υπό ανοδική φόρτιση, χρησιμοποιήθηκαν δύο δοκίμια από την κάθε κατηγορία, όπως αναφέραμε και παραπάνω. Σε αυτά τα δοκίμια έγινε μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl και ακολούθως εφαρμόστηκε σταθερή ανοδική φόρτιση 1000 mV με τη βοήθεια ειδικής πηγής DC.

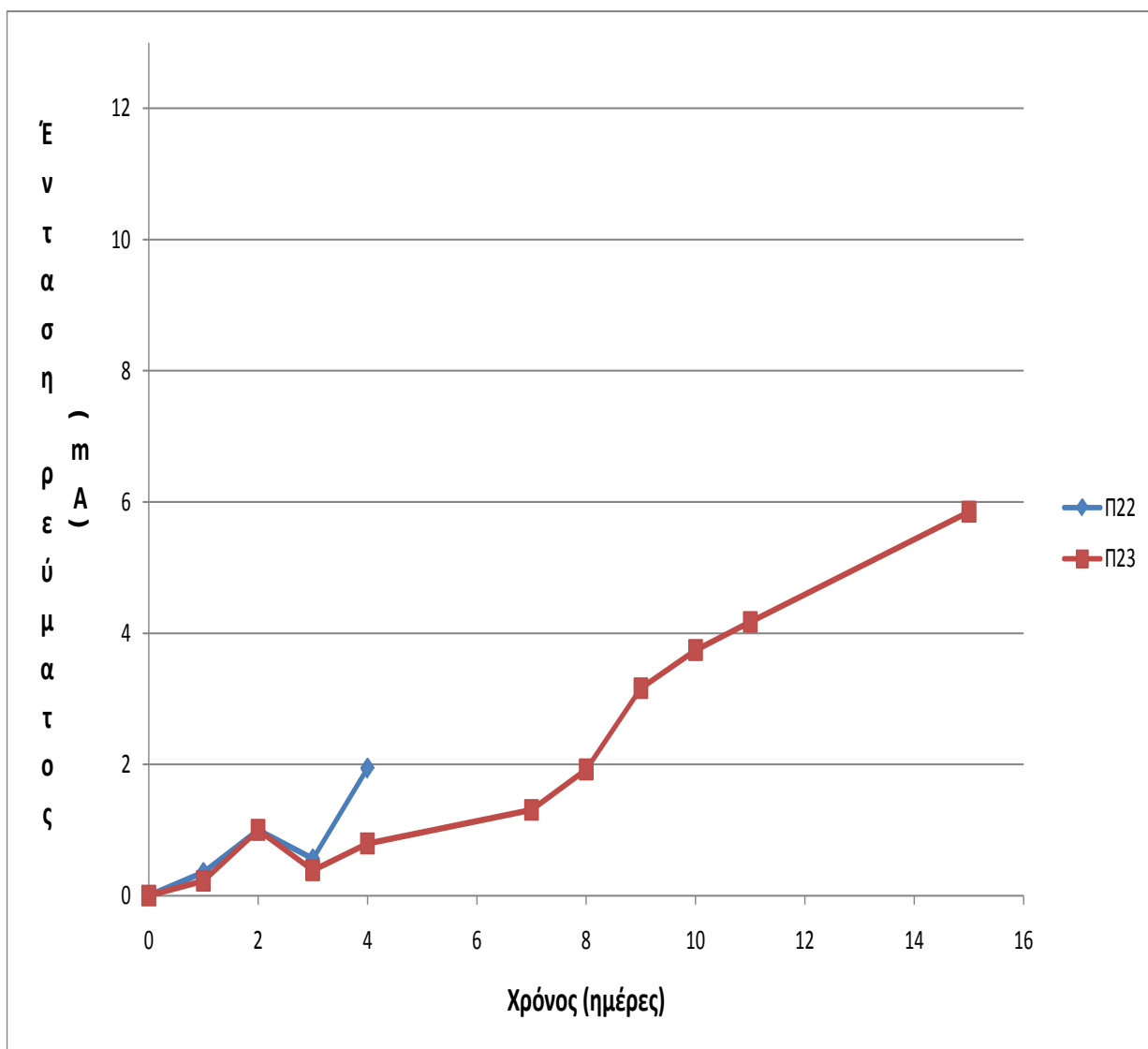
Το δυναμικό ανοδικής φόρτισης, στο εμβαπτισμένο δοκίμιο, εφαρμόζεται μεταξύ του χαλύβδινου οπλισμού του δοκιμίου και του ηλεκτροδίου αναφοράς καλομέλανα (SCE). Ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται γραφίτης ο οποίος είναι και αυτός μέσα στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl.

Σε αυτά τα δοκίμια πραγματοποιήθηκε μέτρηση του ρεύματος διάβρωσης σε καθημερινή βάση, διότι λόγω της ανοδικής φόρτισης διαβρώνονται πολύ γρήγορα.

Στον επόμενος Πίνακες (4.9, 4.10, 4.11), φαίνονται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις που έγιναν με τη συγκεκριμένη μέθοδο.

Πίνακας 4.9. Μέτρηση έντασης ρεύματος διάβρωσης στα επικαλυμμένα με χρώμα Α δοκίμια

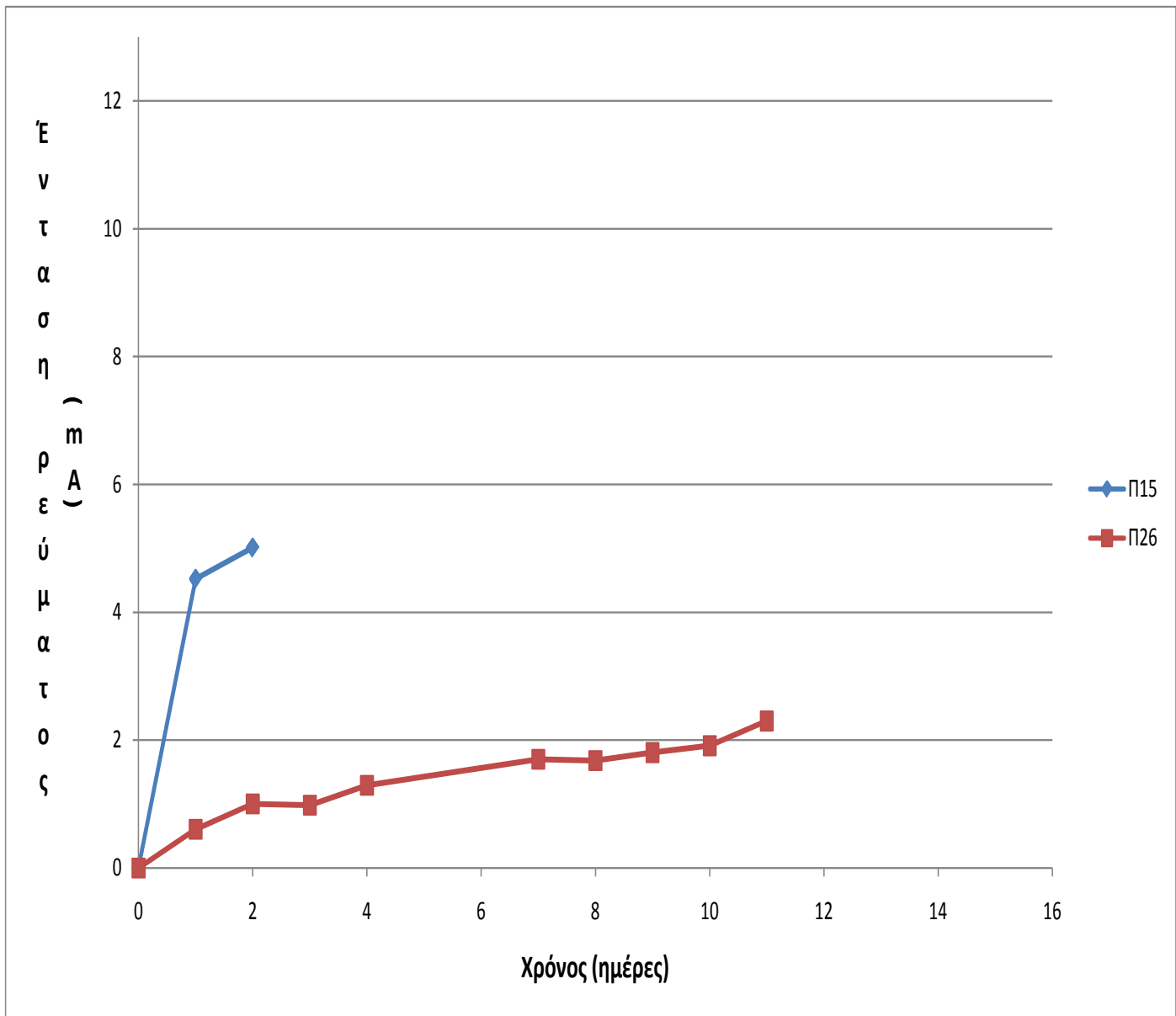
| Α/Α (Μέτρησης) | ΧΡΟΝΟΣ (Ημέρες) | ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (mA) | | ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(°C) | |
|-------------------|--------------------|-------------------------|------------|----------------------------|-------------------------|
| | | Ομάδα Α | | T _{περιβάλλοντος} | T _{διαλύματος} |
| | | <u>Π22</u> | <u>Π23</u> | | |
| 1 ^η | 0 | 0 | 0 | 19 | 23 |
| 2 ^η | 1 | 0,353 | 0,225 | 25 | 23 |
| 3 ^η | 2 | 1,003 | 1,001 | 24 | 24 |
| 4 ^η | 3 | 0,560 | 0,385 | 21 | 23 |
| 5 ^η | 4 | 1,940 | 0,793 | 21 | 22 |
| 6 ^η | 7 | ΑΦΑΙΡΕΘΗΚΕ | 1,306 | 22 | 22 |
| 7 ^η | 8 | ΕΚΤΟΣ | 1,921 | 23 | 22 |
| 8 ^η | 9 | ΕΚΤΟΣ | 3,160 | 22 | 21 |
| 9 ^η | 10 | ΕΚΤΟΣ | 3,740 | 26 | 21 |
| 10 ^η | 11 | ΕΚΤΟΣ | 4,170 | 24 | 21 |
| 11 ^η | 15 | ΕΚΤΟΣ | 5,850 | 25 | 21 |
| 12 ^η | 16 | ΕΚΤΟΣ | ΑΦΑΙΡΕΘΗΚΕ | 24 | 21 |



Σχήμα 4.7. Ένταση ρεύματος επικαλυμμένων δοκιμίων με χρώμα Α ως προς χρόνο έκθεσης στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl

Πίνακας 4.10. Μέτρηση έντασης ρεύματος διάβρωσης στα επικαλυμμένα με χρώμα
V δοκίμια

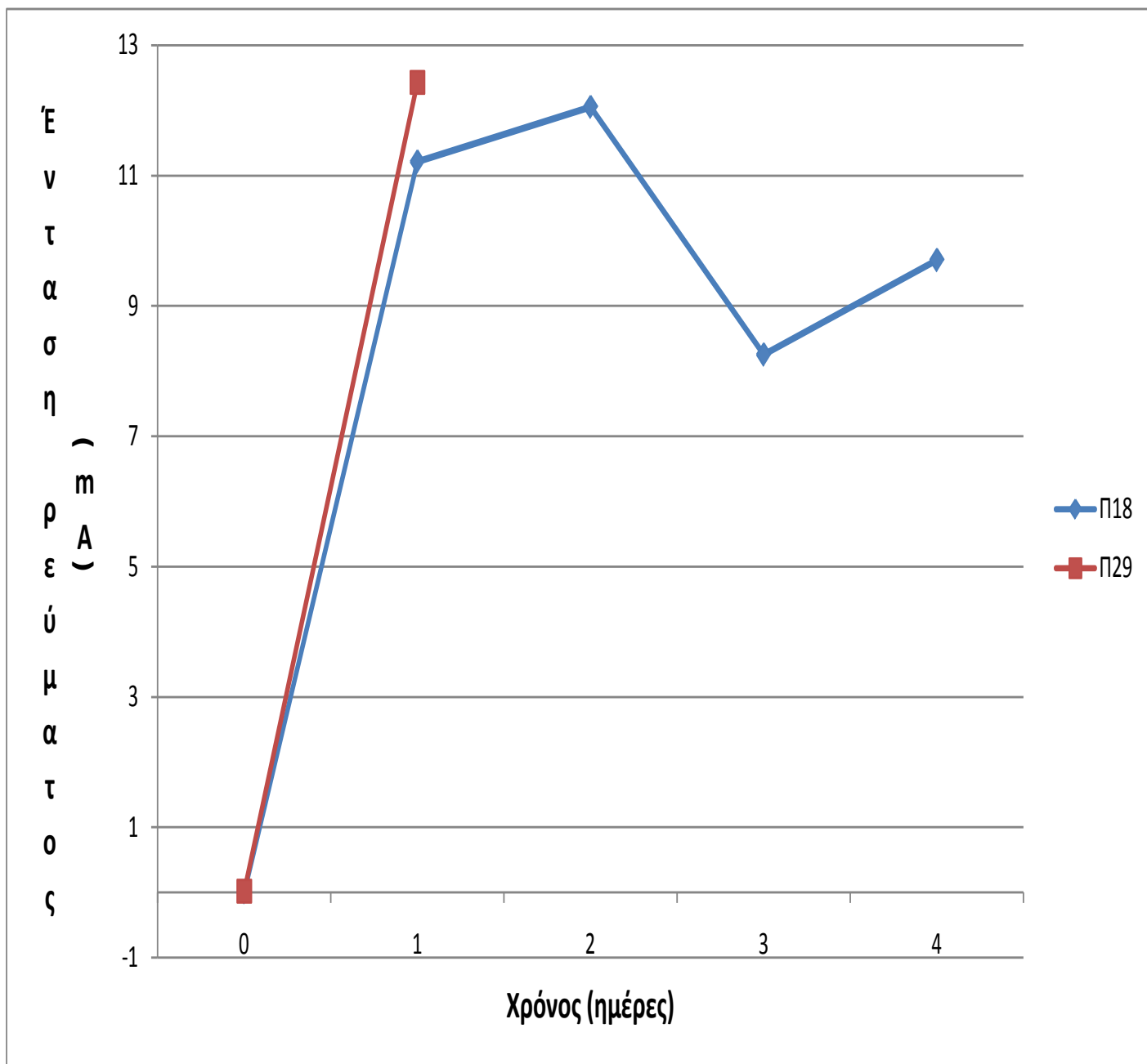
| Α/Α (Μέτρησης) | ΧΡΟΝΟΣ (Ημέρες) | ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (mA) | | ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(° C) | |
|-------------------|--------------------|-------------------------|------------|----------------------------|-------------------------|
| | | Ομάδα Β | | T _{περιβάλλοντος} | T _{διαλύματος} |
| | | <u>Π15</u> | <u>Π26</u> | | |
| 1 ^η | 0 | 0 | 0 | 19 | 23 |
| 2 ^η | 1 | 4,520 | 0,605 | 25 | 23 |
| 3 ^η | 2 | 5,013 | 1,002 | 24 | 24 |
| 4 ^η | 3 | ΑΦΑΙΡΕΘΗΚΕ | 0,984 | 21 | 23 |
| 5 ^η | 4 | ΕΚΤΟΣ | 1,294 | 21 | 22 |
| 6 ^η | 7 | ΕΚΤΟΣ | 1,700 | 22 | 22 |
| 7 ^η | 8 | ΕΚΤΟΣ | 1,680 | 23 | 22 |
| 8 ^η | 9 | ΕΚΤΟΣ | 1,805 | 22 | 21 |
| 9 ^η | 10 | ΕΚΤΟΣ | 1,912 | 26 | 21 |
| 10 ^η | 11 | ΕΚΤΟΣ | 2,300 | 24 | 21 |
| 11 ^η | 15 | ΕΚΤΟΣ | 2,400 | 25 | 21 |
| 12 ^η | 16 | ΕΚΤΟΣ | ΑΦΑΙΡΕΘΗΚΕ | 24 | 21 |



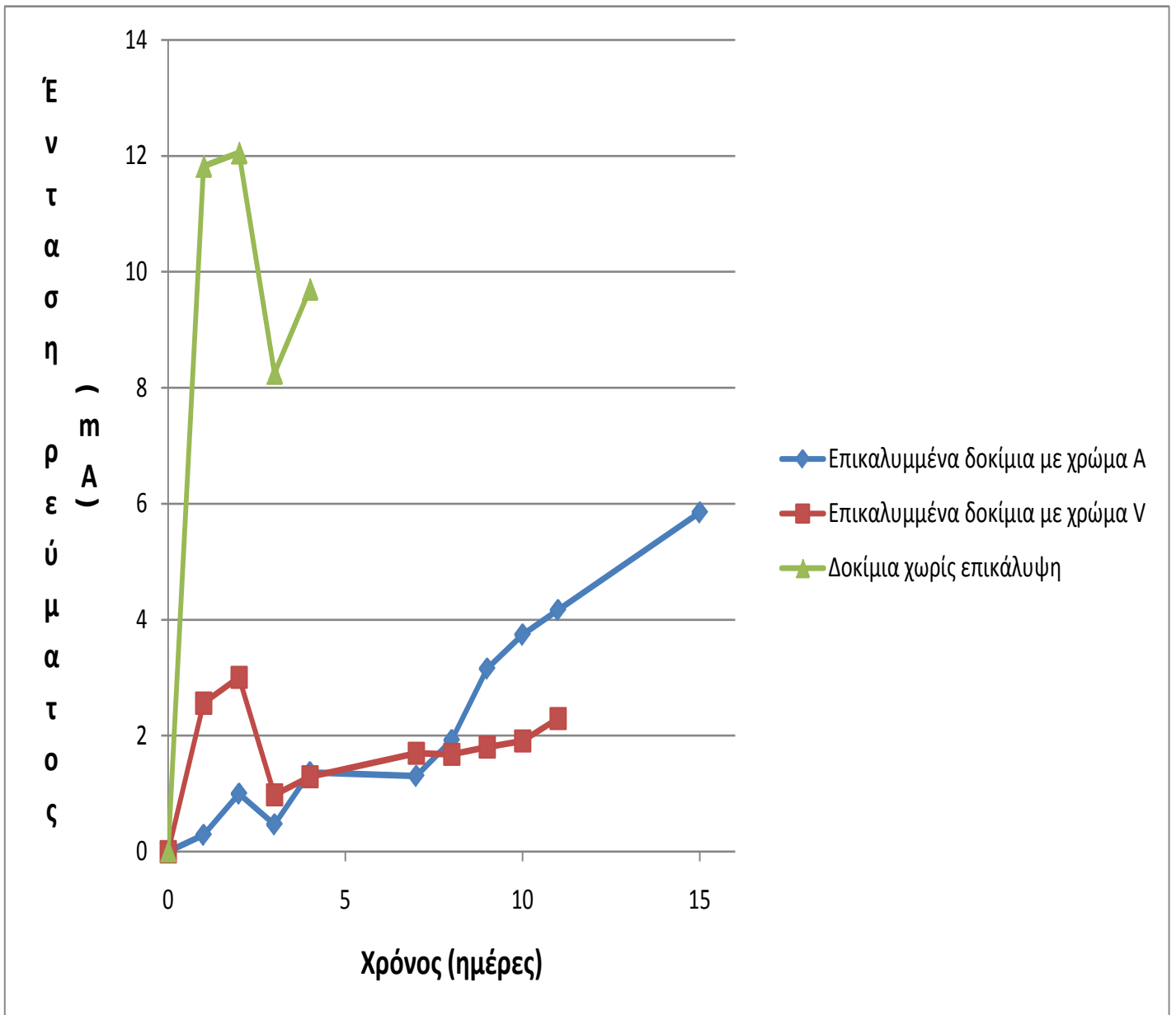
Σχήμα 4.8. Ένταση ρεύματος επικαλυμμένων δοκιμίων με χρώμα V ως προς χρόνο έκθεσης στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl

Πίνακας 4.11. Μέτρηση έντασης ρεύματος διάβρωσης στα μη επικαλυμμένα δοκίμια

| Α/Α (Μέτρησης) | ΧΡΟΝΟΣ (Ημέρες) | ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (mA) | | ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(° C) | |
|-------------------|--------------------|-------------------------|------------|----------------------------|-------------------------|
| | | Ομάδα Γ | | T _{περιβάλλοντος} | T _{διαλύματος} |
| | | <u>Π18</u> | <u>Π29</u> | | |
| 1 ^η | 0 | 0,004 | 0,021 | 19 | 23 |
| 2 ^η | 1 | 11,210 | 12,430 | 25 | 23 |
| 3 ^η | 2 | 12,050 | ΑΦΑΙΡΕΘΗΚΕ | 24 | 24 |
| 4 ^η | 3 | 8,250 | ΕΚΤΟΣ | 21 | 23 |
| 5 ^η | 4 | 9,700 | ΕΚΤΟΣ | 21 | 22 |
| 6 ^η | 7 | ΑΦΑΙΡΕΘΗΚΕ | ΕΚΤΟΣ | 22 | 22 |
| 7 ^η | 8 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | 23 | 22 |
| 8 ^η | 9 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | 22 | 21 |
| 9 ^η | 10 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | 26 | 21 |
| 10 ^η | 11 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | 24 | 21 |
| 11 ^η | 15 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | 25 | 21 |
| 12 ^η | 16 | ΕΚΤΟΣ | ΕΚΤΟΣ | 24 | 21 |



Σχήμα 4.9. Ένταση ρεύματος δοκιμίων χωρίς επικάλυψη ως προς χρόνο έκθεσης στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl



Σχήμα 4.10. Μέσοι Όροι της έντασης ρεύματος δοκιμίων ως προς χρόνο έκθεσης στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl

4.5.2.1. Συμπεράσματα

Παρατηρώντας το διάγραμμα των μέσων όρων της έντασης ρεύματος των δοκιμίων ως προς το χρόνο έκθεσης στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl (Σχήμα 4.10.), βλέπουμε τα εξής:

1. Η ένταση ρεύματος των επικαλυμμένων δοκιμίων με χρώμα A, ξεκινάει από πολύ χαμηλά μόλις στα 0.290 mA. Στη συνέχεια ακολουθεί μια συνεχή αύξηση φτάνοντας τελικά στην τελευταία μέτρηση μετά από 15 ημέρες στα 5.85 mA.
2. Στα επικαλυμμένα δοκίμια με χρώμα V, παρατηρούμε ότι η ένταση ρεύματος ακολουθεί αντίστοιχη πορεία με αυτή της έντασης ρεύματος των δοκιμίων που είναι επικαλυμμένα με το χρώμα A. Αν και ξεκινάει από αρκετά ψηλότερα, στα 2.55 mA, στη συνέχεια ακολουθεί την ίδια συνεχώς αυξανόμενη πορεία των επικαλυμμένων δοκιμίων με χρώμα A, φτάνοντας τελικά μετά από 11 ημέρες μετρήσεων στα 2.30 mA.
3. Τέλος, η ένταση του ρεύματος στα δοκίμια χωρίς καμία επικάλυψη, παρουσιάζει και σε αυτή την περίπτωση αντίστοιχη πορεία με των δύο προηγούμενων ομάδων, σε πολύ υψηλότερο βαθμό φυσικά, αφού φτάνει ακόμα και στα 12 mA, καταλήγοντας όμως, μετά από μόλις 4 ημέρες, με τις διάφορες αυξομειώσεις στα 9.7 mA.

Έτσι, από όλα τα παραπάνω βλέπουμε ότι τα πρώτα δοκίμια που έσπασαν ήταν αυτά χωρίς επικάλυψη σε μόλις 4 ημέρες. Στη συνέχεια έσπασαν τα επικαλυμμένα δοκίμια με χρώμα V μετά από 11 ημέρες και τελευταία εκείνα τα δοκίμια τα οποία ήταν επικαλυμμένα με χρώμα A μετά από 15 ημέρες.

Τέλος, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι λόγω ατελούς συμπίκνωσης κατά τη διάρκεια κατασκευής των δοκιμίων και της παρουσίας μεγαλύτερου πορώδους του σκυροδέματος, διευκολύνθηκε η διόδος διαβρωτικών ουσιών από το περιβάλλον με συνέπεια την πρόωμη θραύση. Για στατιστικούς λόγους θα έπρεπε να υπάρχει μεγαλύτερος αριθμός δοκιμίων για να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη μέθοδος, κάτι το οποίο δεν ήταν εφικτό με τις υπάρχουσες υποδομές του εργαστηρίου.

4.5.3. Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας των οπλισμών

Ο σταθμικός προσδιορισμός απώλειας μάζας οπλισμού μετά την διάβρωση γίνεται για να προκύψει η πραγματική εικόνα της διάβρωσης. Στο τέλος της δοκιμασίας κάθε δοκιμίου ακολουθούσε θραύση, καθαρισμός της χαλύβδινης ράβδου, εμβάπτιση της σε αδρανποιημένο υδροχλωρικό οξύ για 10 min, έκπλυση με νερό, αλκοόλη και

ακετόνη, όπως αναφέραμε και πιο πάνω, και ζύγιση για τη μέτρηση των απωλειών μάζας σιδήρου.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, η έξοδος των δοκιμίων στις μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης, έγινε σε δύο χρόνους. Επομένως και ο σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας των οπλισμών θα γίνει σε δύο χρόνους. Οι χρόνοι αυτοί έχουν αναφερθεί σε παραπάνω παράγραφο (4.5.1.).

Για να προσδιορίσουμε την απώλεια της μάζας των οπλισμών αρκεί να γνωρίζουμε την αρχική τους μάζα (πριν την εισχώρηση των οπλισμών στα δοκίμια και την εμφάνιση αυτών σε χλωριούχο νάτριο) και την τελική τους (μετά το σπάσιμο των δοκιμίων). Έτσι, από τη διαφορά αυτή φαίνεται η απώλεια μάζας που έχει υποστεί ο οπλισμός εξαιτίας της διάβρωσης.

4.5.3.1. Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας των οπλισμών μετά από τις μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης

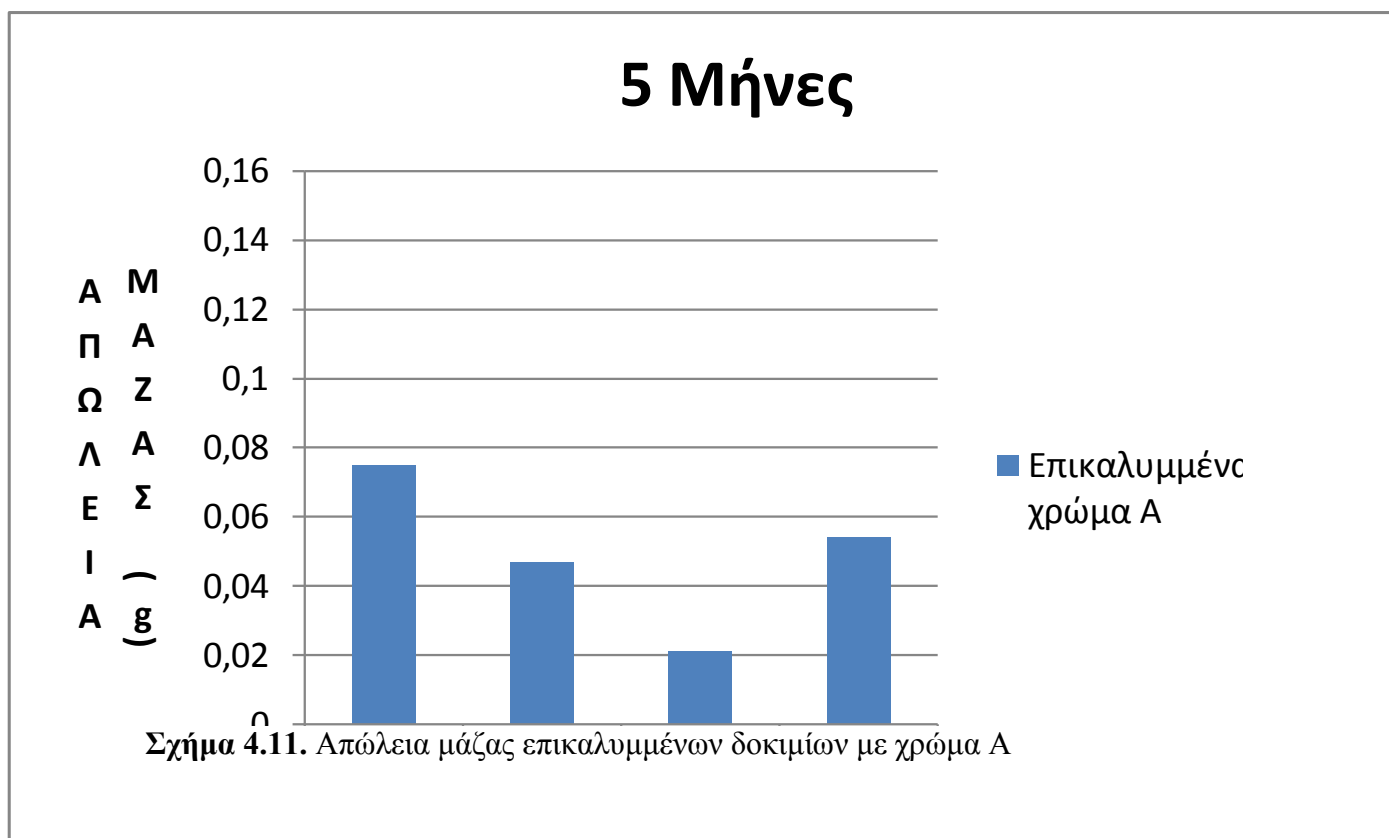
Στους επόμενους Πίνακες (4.12., 4.13.) φαίνονται αναλυτικά όλες οι μάζες (αρχικές και τελικές), καθώς και η διαφορά όλων των δοκιμίων, από τις μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης που πραγματοποιήθηκαν.

Ο πρώτος Πίνακας 4.12. αφορά τα δοκίμια τα οποία αφαιρέσαμε από το διάλυμα χλωριούχου νατρίου στον **A' χρόνο** (5μήνες), ενώ ο δεύτερος Πίνακας 4.13 εκείνα που βγήκαν στον **B' χρόνο** (6 μήνες).

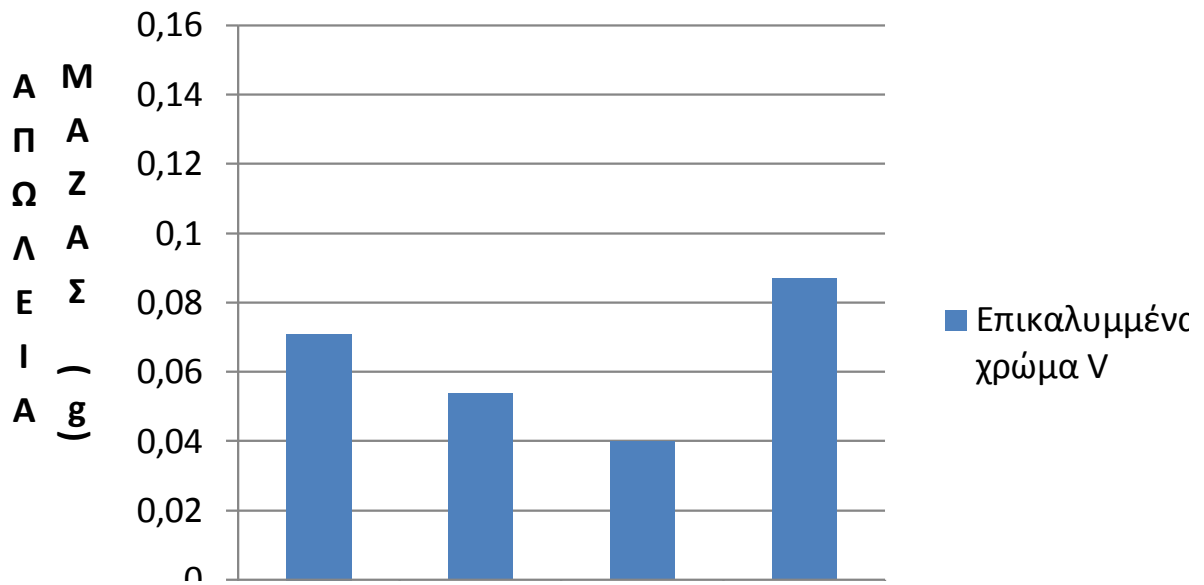
Πίνακας 4.12. Μάζες δοκιμίων (αρχικές, τελικές, διαφορές) όλων των ομάδων στον A' χρόνο εξόδου (5 μήνες).

| Ομάδες | Δοκίμια | Αρχική Μάζα (g) | Τελική Μάζα(g) | Απώλεια Μάζας (g) |
|---------------|----------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Ομάδα Α | Π9 | 84,9849 | 84,9099 | 0,0750 |
| | Π11 | 87,2679 | 87,2209 | 0,0470 |
| | Π12 | 89,9163 | 89,8951 | 0,0212 |
| | Π32 | 85,2979 | 85,2438 | 0,0541 |

| Ομάδες | Δοκίμια | Αρχική Μάζα (g) | Τελική Μάζα(g) | Απώλεια Μάζας (g) |
|---------|---------|-----------------|----------------|-------------------|
| Ομάδα Β | Π4 | 85,7044 | 85,6334 | 0,0710 |
| | Π27 | 86,7703 | 86,7165 | 0,0538 |
| | Π39 | 87,2358 | 87,1957 | 0,0401 |
| | Π40 | 88,3892 | 88,3023 | 0,0869 |
| Ομάδα Γ | Π20 | 85,8137 | 85,7395 | 0,0742 |
| | Π28 | 88,0218 | 87,8881 | 0,1337 |
| | Π36 | 90,8214 | 90,7054 | 0,1160 |
| | Π37 | 90,3776 | 90,3157 | 0,0619 |

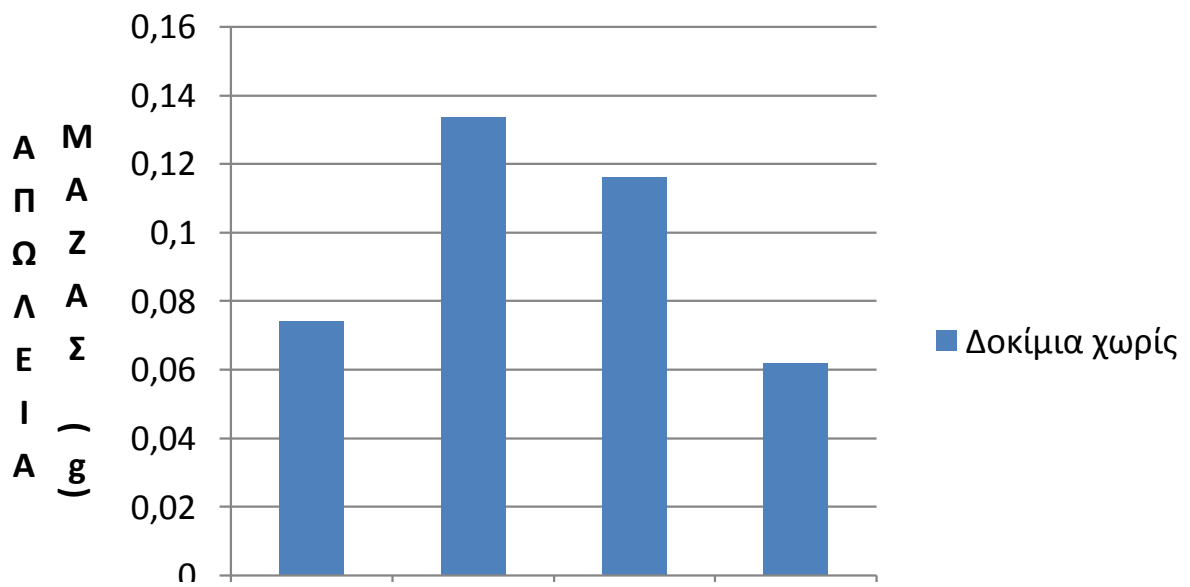


5 Μήνες



Σχήμα 4.12. Απώλεια μάζας επικαλυμμένων δοκιμίων με χρώμα V

5 Μήνες

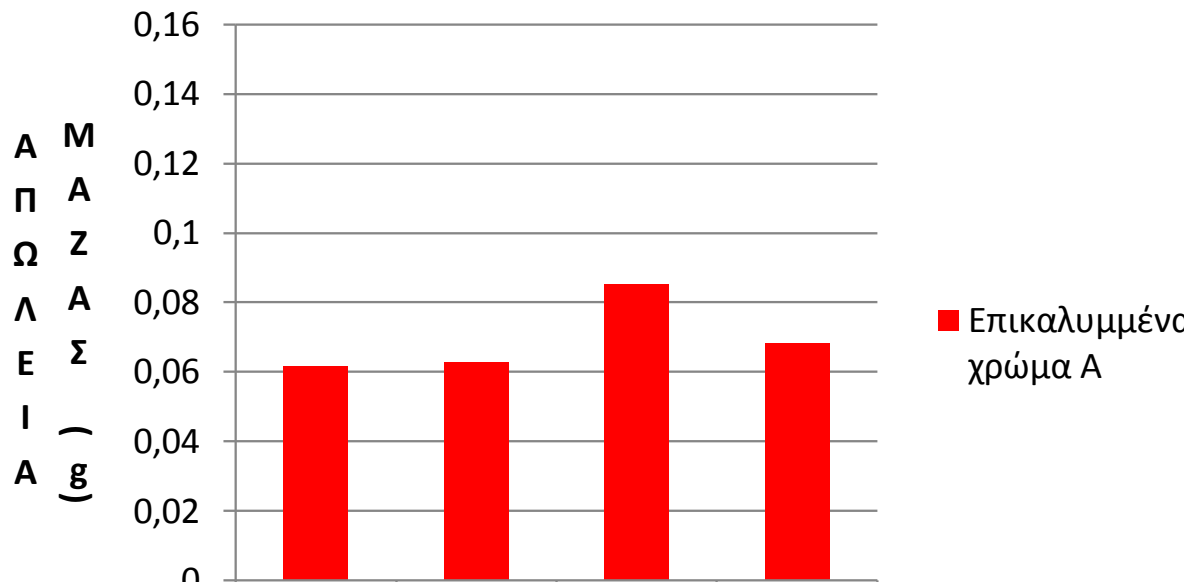


Σχήμα 4.13. Απώλεια μάζας δοκιμίων χωρίς επικάλυψη

Πίνακας 4.13. Μάζες δοκιμίων (αρχικές, τελικές, διαφορές) όλων των ομάδων στον Β' χρόνο εξόδου (6 μήνες).

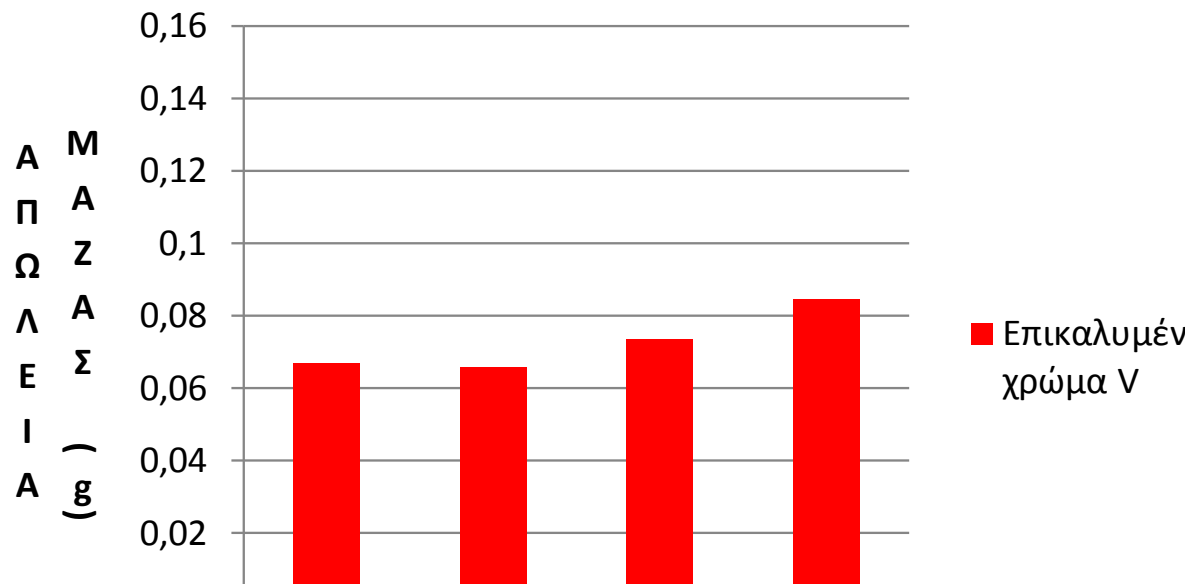
| Ομάδες | Δοκίμια | Αρχική Μάζα (g) | Τελική Μάζα(g) | Απώλεια Μάζας (g) |
|---------------|----------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Ομάδα Α | Π10 | 86,2494 | 86,1877 | 0,0617 |
| | Π31 | 85,2307 | 85,1677 | 0,0630 |
| | Π33 | 83,7688 | 83,6835 | 0,0853 |
| | Π34 | 85,2676 | 85,1992 | 0,0684 |
| | | | | |
| Ομάδα Β | Π3 | 86,2006 | 86,1338 | 0,0668 |
| | Π16 | 85,9341 | 85,8685 | 0,0656 |
| | Π30 | 88,0428 | 87,9685 | 0,0735 |
| | Π35 | 88,3897 | 88,3054 | 0,0843 |
| | | | | |
| Ομάδα Γ | Π21 | 86,5688 | 86,4433 | 0,1255 |
| | Π24 | 81,0052 | 80,8597 | 0,1455 |
| | Π25 | 87,4572 | 87,3803 | 0,0769 |
| | Π38 | 87,1533 | 87,0398 | 0,1135 |

6 Μήνες

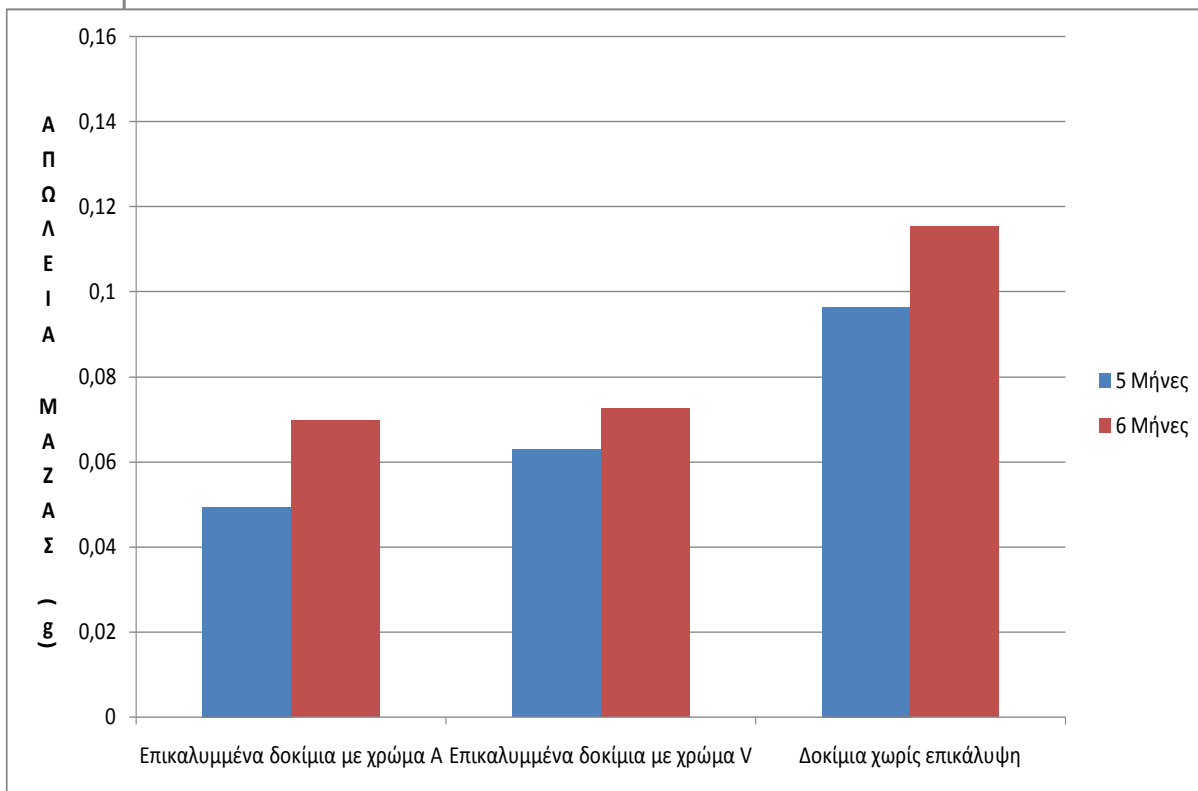
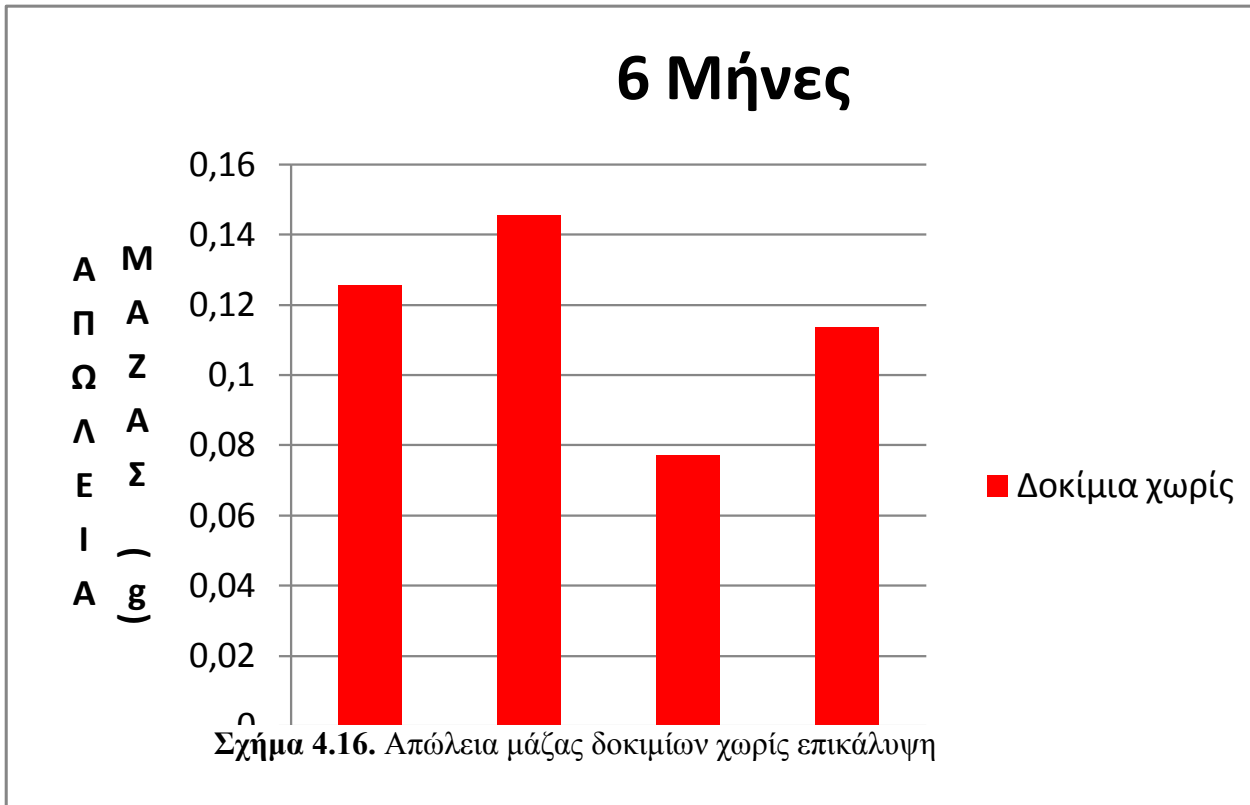


Σχήμα 4.14. Απώλεια μάζας επικαλυμμένων δοκιμίων με χρώμα Α

6 Μήνες



Σχήμα 4.15. Απώλεια μάζας επικαλυμμένων δοκιμίων με χρώμα V



Σχήμα 4.17. Μέσοι όροι της απώλειας μάζας των δοκιμίων όλων των ομάδων και στους δύο χρόνους

4.5.3.1.1. Συμπεράσματα

Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα των μέσων όρων της απώλειας μάζας των δοκιμίων όλων των ομάδων και στους δύο χρόνους, τα δοκίμια που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απώλεια μάζας ήταν εκείνα χωρίς επικάλυψη, και μάλιστα με αρκετά μεγάλη διαφορά από τα δοκίμια των άλλων δύο ομάδων.

Τα επικαλυμμένα δοκίμια με χρώμα V όπως βλέπουμε παρουσιάζουν λίγο μεγαλύτερη απώλεια μάζας από τα επικαλυμμένα δοκίμια με χρώμα A.

Μπορούμε να υπολογίσουμε την επι τοις εκατό (%) προστασία που μας παρείχε το κάθε χρώμα, από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Προστασία} = (\text{M.O.}_{(A)} - \text{M.O.}_{(E)}) / \text{M.O.}_{(A)} \times 100$$

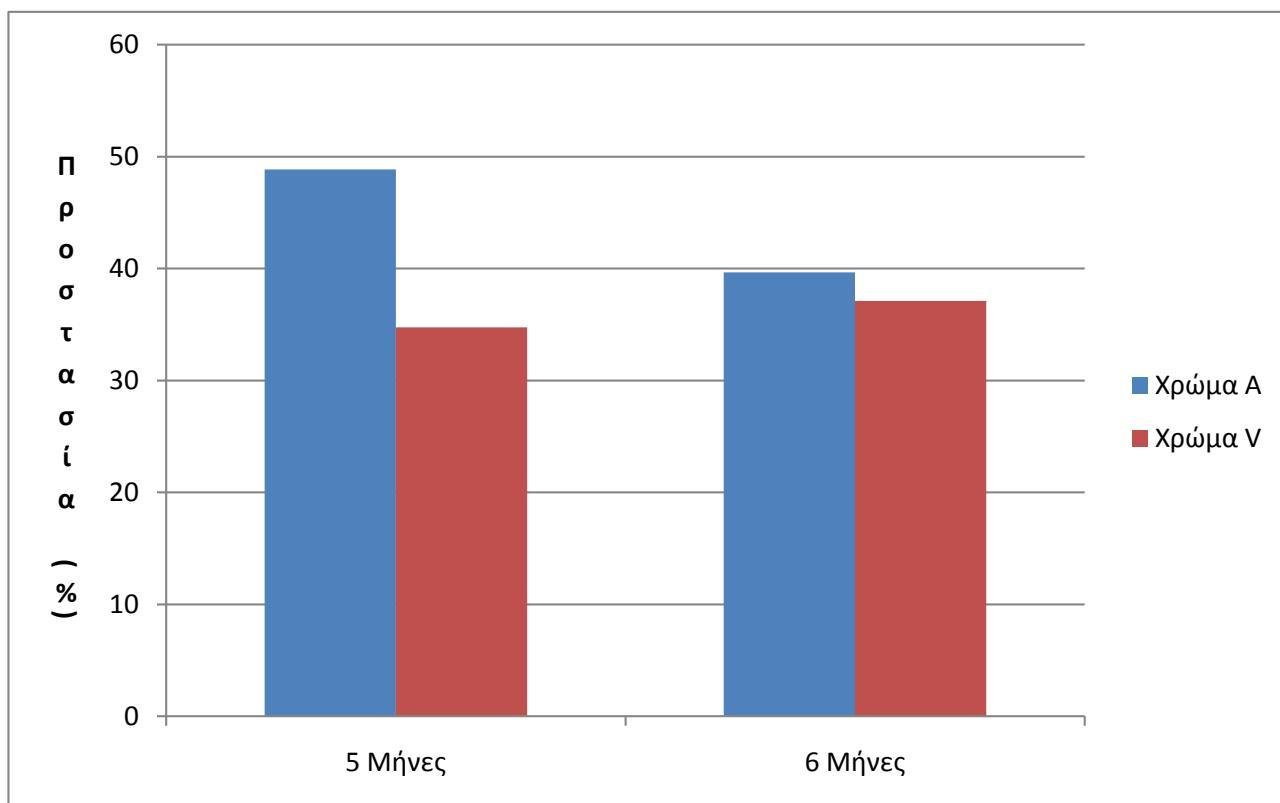
Όπου:

- $\text{M.O.}_{(A)}$: ο μέσος όρος της απώλειας μάζας των δοκιμίων χωρίς επικάλυψη
- $\text{M.O.}_{(E)}$: ο μέσος όρος της απώλειας μάζας των επικαλυμμένων δοκιμίων

Κάνοντας τους υπολογισμούς, προκύπτουν τα παρακάτω στοιχεία όπως παραθέτονται στον παρακάτω Πίνακα (4.14.)

Πίνακας 4.14. Προστασία (%) που παρείχαν οι δύο επικαλύψεις και στους δύο χρόνους παραμονής των δοκιμίων στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl

| | 5 Μήνες | 6 Μήνες |
|---------|----------------|----------------|
| Χρώμα A | 48,86% | 39,66% |
| Χρώμα V | 34,73% | 37,10% |



Σχήμα 4.18. Προστασία (%) που παρείχαν οι δύο επικαλύψεις και στους δύο χρόνους παραμονής των δοκιμίων στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl

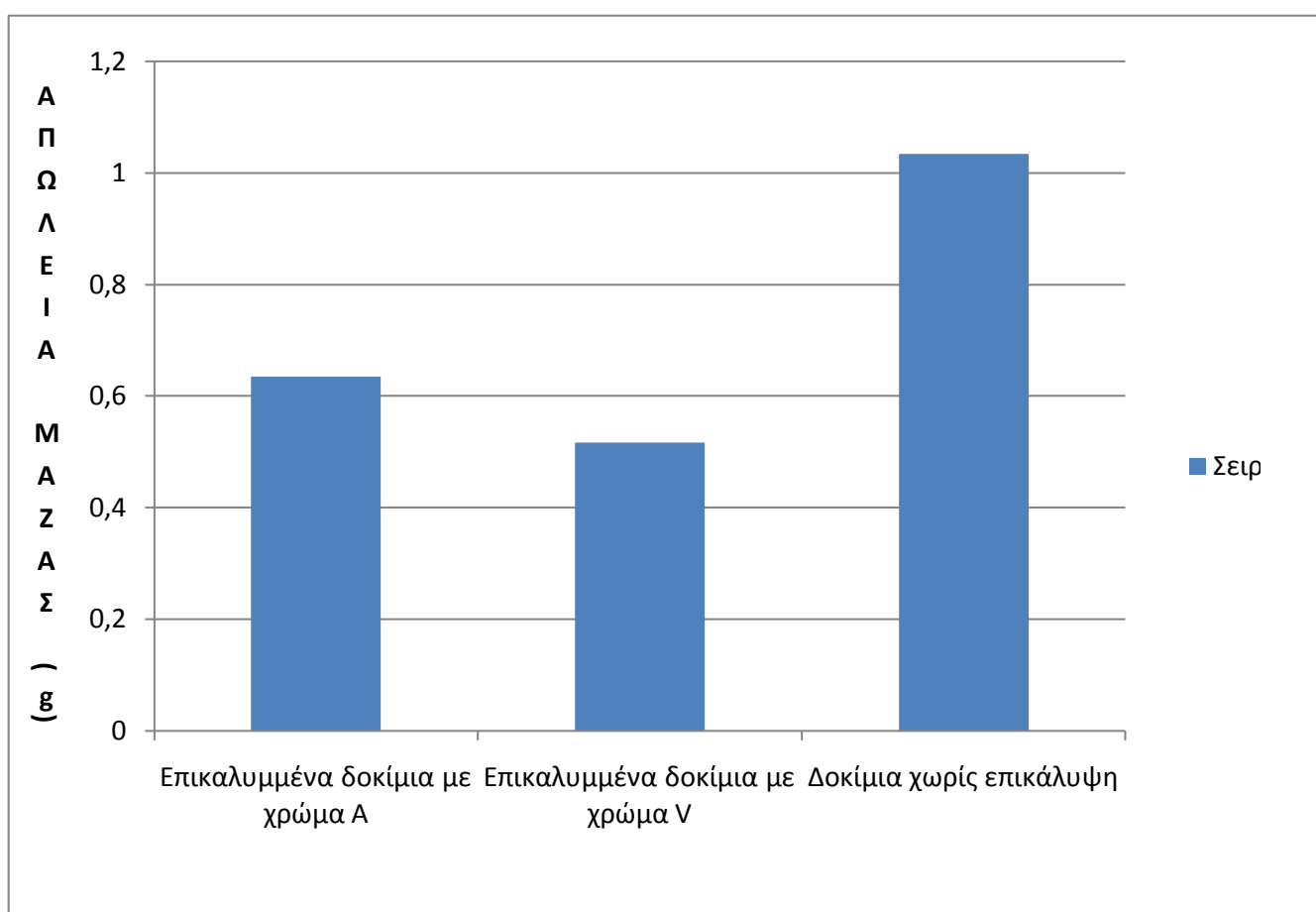
4.5.3.2. Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας των οπλισμών μετά από τις μετρήσεις της έντασης του ρεύματος υπό ανοδική φόρτιση

Στον επόμενο Πίνακα 4.15. φαίνονται αναλυτικά όλες οι μάζες (αρχικές και τελικές), καθώς και η διαφορά όλων των δοκιμίων, από τις μετρήσεις της έντασης του ρεύματος υπό ανοδική φόρτιση που πραγματοποιήθηκαν.

Πίνακας 4.15. Μάζες δοκιμίων (αρχικές, τελικές, διαφορές) όλων των ομάδων.

| Ομάδες | Δοκίμια | Αρχική Μάζα (g) | Τελική Μάζα(g) | Απώλεια Μάζας (g) |
|---------|---------|-----------------|----------------|-------------------|
| Ομάδα Α | Π22 | 88,5604 | 88,2367 | 0,3237 |
| | Π23 | 86,4772 | 85,5316 | 0,9456 |

| Ομάδες | Δοκίμια | Αρχική Μάζα (g) | Τελική Μάζα(g) | Απώλεια Μάζας (g) |
|---------|---------|-----------------|----------------|-------------------|
| Ομάδα Β | Π15 | 89,2833 | 88,9091 | 0,3742 |
| | Π26 | 85,9406 | 85,2810 | 0,6596 |
| | | | | |
| Ομάδα Γ | Π18 | 87,5963 | 86,0531 | 1,5432 |
| | Π29 | 88,7656 | 88,2407 | 0,5249 |



Σχήμα 4.19. Μέσοι όροι της απώλειας μάζας των δοκιμίων όλων των ομάδων με την ανοδική φόρτιση

4.5.3.2.1. Συμπεράσματα

Όπως βλέπουμε στο διάγραμμα μέσω των όρων της απώλειας μάζας των δοκιμίων όλων των ομάδων με την ανοδική φόρτιση, και σε αυτήν την περίπτωση τα δοκίμια χωρίς επικάλυψη παρουσιάζουν την μεγαλύτερη απώλεια στη μάζα τους.

Τα επικαλυμμένα δοκίμια με χρώμα Α παρουσιάζουν λίγο μεγαλύτερη απώλεια μάζας σε σχέση με εκείνα τα οποία ήταν επικαλυμμένα με χρώμα V, χωρίς όμως να έχουν καμία μεγάλη διαφορά μεταξύ τους.

Αν συσχετιστεί η απώλεια μάζας με το χρόνο στον οποίο έμειναν τα δοκίμια όλων των ομάδων στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl υπό ανοδική φόρτιση, παρατηρούμε ότι παρά το ότι υπάρχουν μεγάλες διαφορές στην απώλεια μάζας δοκιμίων της ίδιας κατηγορίας, αυτό είναι εντελώς λογικό μιας και τα δοκίμια που έχουν υποστεί την μικρότερη απώλεια μάζας είναι και αυτά τα οποία εξήλθαν νωρίτερα από το διάλυμα.

4.5.4. Βάθος ενανθράκωσης

Μετά από την πραγματοποίηση του τεστ φαινολοφθαλεΐνης, με τον τρόπο που αναφέραμε παραπάνω, παρατηρούμε ότι τα δοκίμια όλων των κατηγοριών έχουν υποστεί ελάχιστη έως μηδενική ενανθράκωση.

4.6. Γενικά Συμπεράσματα

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, εξετάστηκε η διάβρωση των μετάλλων στο οπλισμένο σκυρόδεμα καθώς επίσης και οι μέθοδοι προστασίας από τη διάβρωση, επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον μας στη μέθοδο των επικαλύψεων και στο κατά πόσο η εφαρμογή τους στο σκυρόδεμα προσφέρει πράγματι προστασία στον οπλισμό, αλλά και το σκυρόδεμα.

Προκειμένου να έχουμε γρήγορα αποτελέσματα, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον (μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.) και μάλιστα κάποια δοκίμια υπεβλήθησαν σε ανοδική φόρτιση για ακόμη ταχύτερη διάβρωση.

Από τη μεθοδολογία ελέγχου που εφαρμόσαμε, δηλαδή τις μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης, τις μετρήσεις έντασης του ρεύματος υπό ανοδική φόρτιση, το σταθμικό προσδιορισμό της απώλειας μάζας των οπλισμών σε δύο χρόνους και το βάθος ενανθράκωσης, συμπεραίνουμε ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων βρίσκονται σε

πλήρη συμφωνία. Πιο συγκεκριμένα, τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε είναι τα εξής:

- Τα επικαλυμμένα δοκίμια με χρώμα Α και με χρώμα V, στο χρόνο που διήρκεσε η μελέτη, κατά πιθανότητα 90% δεν έχουν υποστεί διάβρωση, όπως φαίνεται από τις τιμές τους, σε αντίθεση με εκείνα χωρίς επικάλυψη στα οποία κατά πιθανότητα 90% συμβαίνει διάβρωση, όπως φαίνεται από τις πολύ χαμηλότερες τιμές του δυναμικού διάβρωσης.
- Υπό ανοδική φόρτιση, τα δοκίμια χωρίς επικάλυψη έσπασαν πολύ γρηγορότερα σε σχέση με τα δοκίμια των άλλων δύο κατηγοριών. Τα επικαλυμμένα δοκίμια με χρώμα Α και με χρώμα V έσπασαν σχεδόν στον ίδιο χρόνο, με αυτά του χρώματος V να σπάνε πρώτα.
- Τα δοκίμια που υπέστησαν την μεγαλύτερη απώλεια μάζας ήταν εκείνα χωρίς επικάλυψη. Τα επικαλυμμένα δοκίμια με χρώμα V, παρουσίασαν λίγο μεγαλύτερη απώλεια μάζας από τα επικαλυμμένα δοκίμια με χρώμα Α. Επίσης, όπως είναι λογικό η απώλεια μάζας όλων των κατηγοριών των δοκιμίων στον Β' χρόνο είναι φανερά μεγαλύτερη από αυτή στον Α' χρόνο.
- Και στις δύο κατηγορίες των επικαλυμμένων δοκιμίων, η προστασία που παρείχαν στα δοκίμια οι επικαλύψεις τους στο διάλυμα 3,5%κ.β. NaCl, είναι αρκετά ικανοποιητική αφού φτάνει κοντά στο 40%, με τα δοκίμια τα οποία ήταν επικαλυμμένα με το χρώμα Α, να παρουσιάζουν μία ελαφρώς μεγαλύτερη προστασία από εκείνα που ήταν επικαλυμμένα με το χρώμα V.
- Τέλος, τα δοκίμια και των τριών κατηγοριών έχουν υποστεί ελάχιστη έως μηδενική ενανθράκωση.

Εν κατακλείδι, όπως βλέπουμε από όλα τα παραπάνω, μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι τα δοκίμια χωρίς επικάλυψη ήταν εκείνα τα οποία υπέστησαν την μεγαλύτερη διάβρωση. Είναι επίσης σίγουρο, ότι η χρήση οργανικών επικαλύψεων στην επιφάνεια του σκυροδέματος προστατεύει σε πολύ μεγάλο βαθμό τον οπλισμό του σκυροδέματος έναντι της διάβρωσης του σε περιβάλλον διαλύματος χλωριούχου νατρίου.

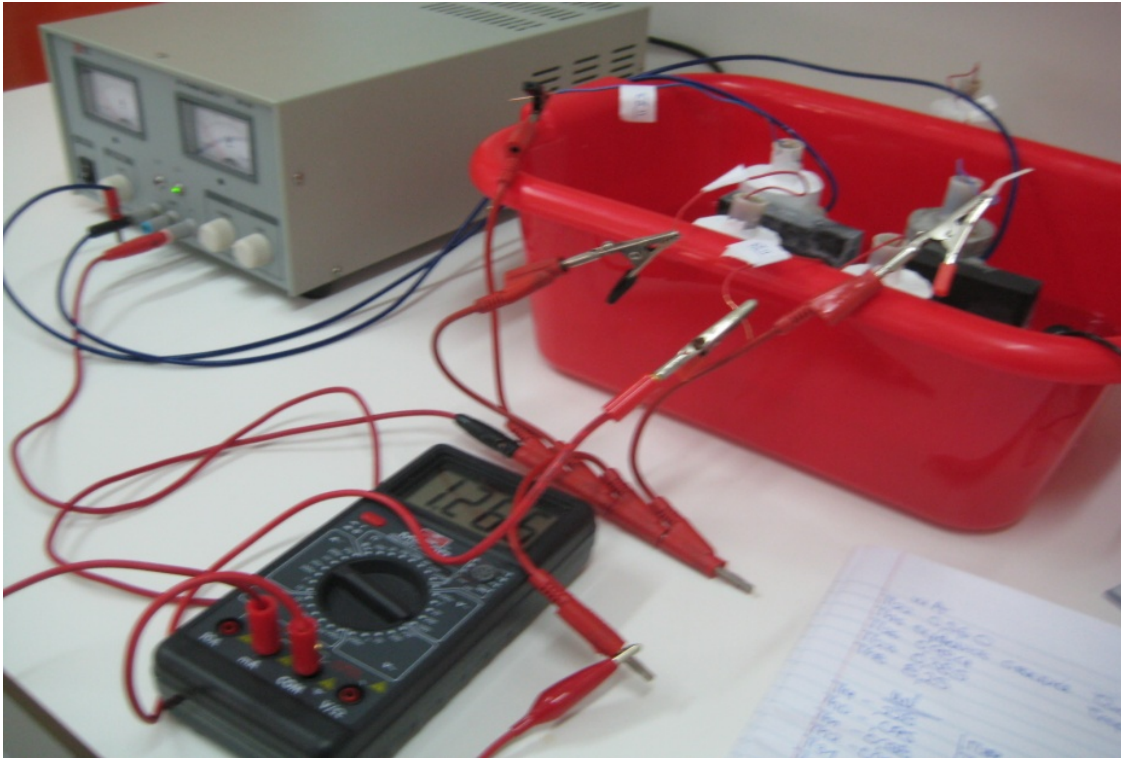
4.7. Φωτογραφικό υλικό



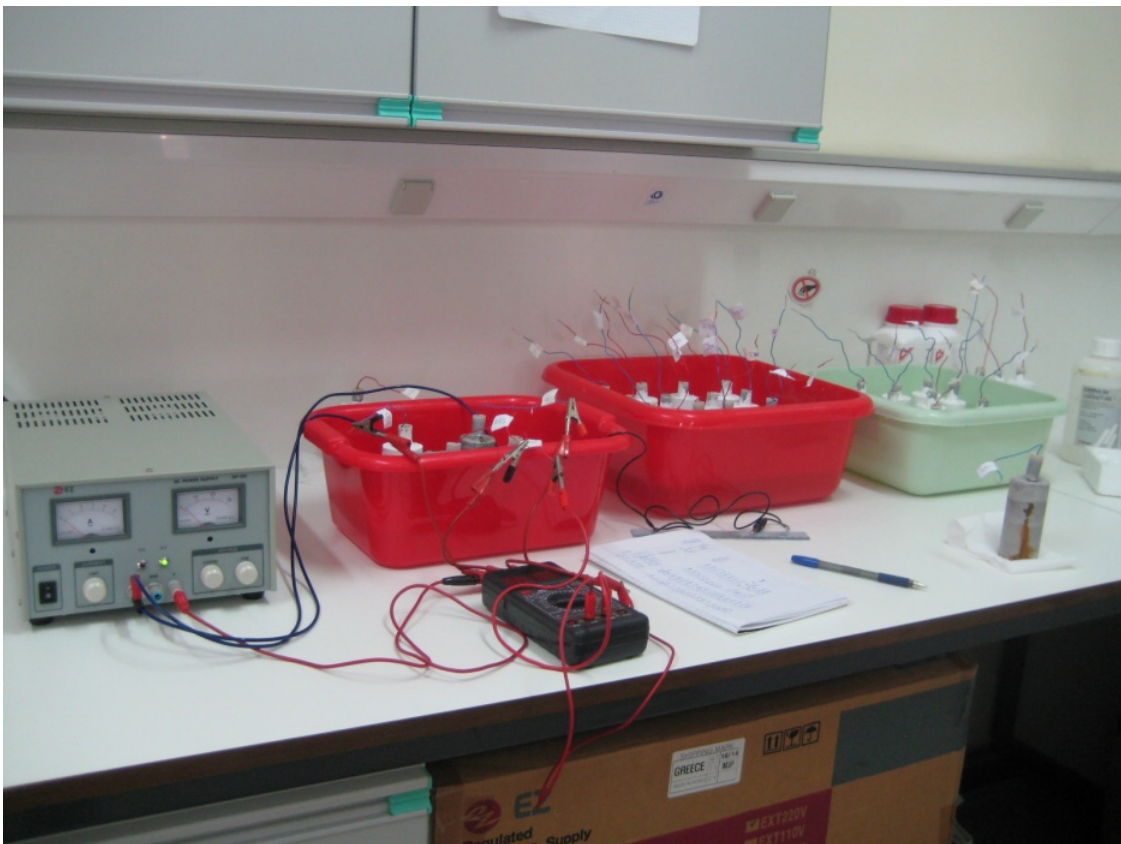
Φωτογραφία 1. Δοκίμια πριν την εμβάπτιση τους στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl



Φωτογραφία 2. Δοκίμια κατά τη διάρκεια της εμβάπτισης τους στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl



Φωτογραφία 3. Μετρήσεις έντασης του ρεύματος διάβρωσης υπό ανοδική φόρτιση



Φωτογραφία 4. Μετρήσεις έντασης του ρεύματος διάβρωσης υπό ανοδική φόρτιση



Φωτογραφία 5. Δοκίμιο με επικάλυψη, μετά το πέρας των μετρήσεων της έντασης ρεύματος διάβρωσης υπό ανοδική φόρτιση



Φωτογραφίες 6,7. Δοκίμια χωρίς επικάλυψη, μετά το πέρας των μετρήσεων της έντασης ρεύματος διάβρωσης υπό ανοδική φόρτιση



Φωτογραφίες 8,9. Οι σπλισμοί σκυροδέματος πριν τον καθαρισμό τους



Φωτογραφίες 10,11. Οι οπλισμοί σκυροδέματος μετά τον καθαρισμό τους

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Μ.Κωτσοβός, Οπλισμένο σκυρόδεμα, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2010
- 2) Σταμ. Τσίμας – Σωτ. Τσιβιλής, Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου, Παν. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2010
- 3) Κοσμάς Κ. Σιδέρης, Ανθεκτικότητα Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εκδόσεις Σέλκα – 4Μ, 2010
- 4) Α.Τ.Ρούτουλας, Έλεγχος Ποιότητας και Τεχνολογία Δομήσιμων Υλικών (Σημειώσεις Μαθήματος), Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Αθήνα 2010
- 5) Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, Δομικά Υλικά, Πάτρα 2008 – 8^η έκδοση
- 6) Γαλανού Μαρία, Προστασία του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος από την ατμοσφαιρική διάβρωση με χρήση αναστολέων διάβρωσης, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2009
- 7) Διερεύνηση της χρήσης ειδικών προσθέτων για την προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα, Ελένη Ζαχαρίου-Ρακαντά, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2010
- 8) <http://www.lafarge.gr/>
- 9) <http://web.tee.gr/>
- 10) Τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα Τσιμέντου ΕΛΟΤ EN 197, Δ.Τσαματσούλης, Ημερίδα με τίτλο «Θέματα Τεχνολογίας Σκυροδέματος και Δομικών Χαλύβων με τα Νέα Ευρωπαϊκά Πρότυπα ΕΛΟΤ EN», Θεσσαλονίκη 2004
- 11) Παναγιώτης Α. Μιχάλης, Σωτήρης Χ. Δημητρίου, Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος, Θεσσαλονίκη, 2007
- 12) Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος ΚΤΧ 2008 (ΦΕΚ 1416/Β/17-07-2008 και ΦΕΚ 2113/Β/13-10-2008) , Αθήνα 2008

- 13) Προστασία χάλυβα από διάβρωση. Διδακτορική διατριβή, Σωτήρης Π. Βλάχος, Μηχανικός μεταλλείων – Μεταλλουργός μηχανικός Ε.Μ. Πολυτεχνείου, Αθήνα 1991
- 14) Διάβρωση και Προστασία υλικών , Θ. Σκουλικίδης, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2007
- 15) Εργαστηριακές ασκήσεις χημικής και περιβαλλοντικής τεχνολογίας, Ευάγγελος Φουντουκίδης, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Πουκαμισάς, Αθήνα 2009
- 16) Σημειώσεις εργαστηρίου Ηλεκτροχημείας, Σ. Καλογεροπούλου, Καθηγήτρια, ΤΕΙ Πειραιά, Σεπτέμβριος 2012
- 17) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Διδακτορική Διατριβή « Έρευνα και ανάπτυξη ωπλισμένης οπτοπλινθοδομής για την κατασκευή κτιρίων σε σεισμογενείς περιοχές», Αλέξανδρος Σταθάτος, Αθήνα 2011
- 18) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Τομέας Χημικών Επιστημών, Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Διδακτορική Διατριβή «Διερεύνηση και ερμηνεία της συμπεριφοράς ασβεστολιθικών τσιμέντων σε συνδυασμένο περιβάλλον χλωριόντων και θεικών ιόντων», Κωνσταντίνος Χ. Σωτηριάδης, Αθήνα 2011
- 19) Ανθεκτικότητα οργανικών επικαλύψεων που περιέχουν αναστολείς διάβρωσης, Ελένη Ντάφλου, Διπλωματούχος Χημικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2012
- 20) Διάβρωση και προστασία, Δ.Κ. Υφαντής, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1995
- 21) Χρήση νέων υλικών για την αύξηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών , Γ. Μπατής, εισήγηση στην ημερίδα του ΤΕΕ Ενίσχυση κτιρίων με σύγχρονα υλικά , Νοέμβριος 2007
- 22) International Journal of Electrochemical Science , Volume 2, 2007