



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ  
ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΪΟΝΤΑ  
ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΘΕΟΔΟΣΙΑ Β. ΖΑΦΕΙΡΟΠΟΥΛΟΥ  
ΠΤΥΧΙΟΥΧΟΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΠΑΤΡΩΝ**

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

**Γ. ΜΠΑΤΗΣ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π**

**ΑΘΗΝΑ**

**2014**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ**  
**ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΪΟΝΤΑ**  
**ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΘΕΟΔΟΣΙΑ Β. ΖΑΦΕΙΡΟΠΟΥΛΟΥ**

**Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή**

**Γ. Μπατής, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Επιβλέπων**

**Α. Μοροπούλου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.**

**Χ. Καραγιάννη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.**

**Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή**

**Γ. Μπατής, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Επιβλέπων**

**Α. Μοροπούλου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.**

**Χ. Καραγιάννη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.**

**Α. Μουτσάτσου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.**

**Ε. Μπαδογιάννης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.**

**Κ. Σίδερης, Επίκουρος Δ.Π.Θ**

**Σ. Τσιβιλής, Καθηγητής Ε.Μ.Π**





*Στους γονείς μου  
Βασίλη και Τερέζα  
και στα αδέρφια μου  
Νατάσα, Τζώνυ, Νάντια*

---

*«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.  
(Ν.5343/1932, Άρθρο 202)*

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε, στον Τομέα III Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. με επιβλέποντα τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Γεώργιο Μπατή.

Αντικείμενο της διατριβής είναι η διερεύνηση της προστασίας που προσφέρουν διάφορα είδη οργανικών επικαλύψεων στο οπλισμένο σκυρόδεμα όσον αφορά τη διάβρωση του οπλισμού από  $\text{Cl}^-$  και από  $\text{CO}_2$ . Για το λόγω αυτό μελετήθηκαν και αποτιμήθηκαν οι ιδιότητες –φυσικοχημικές και μηχανικές– συμβατικών, βιομηχανικών και χρωμάτων νανοτεχνολογίας και εκτιμήθηκε και η προσφερόμενη προστασία τους έναντι διάβρωσης.

Η διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής περιλαμβάνει:

Το **θεωρητικό μέρος**, όπου γίνεται εκτενής ανάλυση αναφορικά με τη διάβρωση των μεταλλικών υλικών γενικότερα και τη διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος ειδικότερα. Στη συνέχεια περιγράφονται οι συνηθέστερες μέθοδοι προστασίας του Ο.Σ. δίνοντας έμφαση στις οργανικές επικαλύψεις όπου αναλύονται όλα τα συμβατικά αλλά και νέα συστήματα εφαρμογής.

Το **πειραματικό μέρος**, όπου παρουσιάζονται τα υλικά, οι μέθοδοι εκτίμησης των ιδιοτήτων των χρωμάτων, η μέθοδοι εκτίμησης της διάβρωσης καθώς και οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν. Επίσης παρατίθενται αναλυτικοί πίνακες και διαγράμματα με τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών.

Τη **συζήτηση αποτελεσμάτων**, όπου αναλύονται τα δύο κυρίως στάδια του πειραματικού μέρους της διδακτορικής διατριβής και γίνεται συνολική αποτίμηση των αποτελεσμάτων του πειραματικού μέρους.

Τις **προτάσεις συνέχισης της έρευνας**, όπου παρουσιάζονται προτάσεις συνέχισης της έρευνας όσον αφορά την προστασία από τη διάβρωση του Χ.Ο.Σ. με τη χρήση συστημάτων επικάλυψης.

Η διεκπεραίωση της διδακτορικής διατριβής ήταν αποτέλεσμα συνεργασίας πλήθος ατόμων τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω και ονομαστικά:

Αρχικά τον Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της εργασίας αυτής κ. Γεώργιο Μπατή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα καθώς και για τη πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής. Η συμμετοχή μου ως μέλος της ερευνητικής του ομάδας μου προσέφερε εμπειρία και σημαντικές επιστημονικές και τεχνικές γνώσεις γύρω από τον τομέα της διάβρωσης και της επιστήμης των υλικών.

Την Αντιπρύτανη Ε.Μ.Π. και Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών κ. Αντωνία Μοροπούλου μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής για την επιστημονική καθοδήγησή της και για τις σημαντικές της επιστημονικές επί του κειμένου της διατριβής.

Την Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. κ Χάιδω-Στεφανία Καραγιάννη μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής για τη συζήτηση και τις επιστημονικές τις διορθώσεις επί του κειμένου της διατριβής.

Τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, την Καθηγήτρια κα. Α. Μουτσάτσου, τον Λέκτορα Ε.Μ.Π. κ. Ε. Μπαδογιάννη, τον Επίκουρο Καθηγητή Δ.Π.Θ κ. Κ. Σίδερη και τον Καθηγητή Ε.Μ.Π κ. Σ. Τσιβιλή.

Την Δρ. Χημικό Μηχανικό Ελένη Ρακαντά για την βοήθεια, τη συμπαράσταση και την καθοδήγησή της όλα τα χρόνια της συνεργασίας μας καθώς και για την επιστημονική της στήριξη κατά την συγγραφή και διεκπεραίωση της διατριβής.

Το Εργαστήριο «Φυσικοχημείας και Εφαρμοσμένης Ηλεκτροχημείας» του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και ειδικότερα τον Λέκτορα Ε.Μ.Π κ. Α. Καραντώνη, για την άριστη συνεργασία μας κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των ηλεκτροχημικών μετρήσεων.

Το Εργαστήριο «Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών» της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π και ιδιαίτερα την Δρ. Χημικό Α. Δελέγκου και την Δρ. Χημικό Μηχανικό Ε. Ντάφλου για την άριστη συνεργασία και την πολύτιμη επιστημονική βοήθεια τους στα πλαίσια της αποτίμησης με μη καταστροφικούς ελέγχους της διάβρωσης δομικών στοιχείων Ο.Σ. και για την διεξαγωγή των πειραμάτων των ιδιοτήτων των οργανικών επικαλύψεων.

Το Εργαστήριο «Οπλισμένου Σκυροδέματος» του Τομέα Δομοστατικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και ειδικότερα τον Λέκτορα Ε.Μ.Π. κ. Ε. Μπαδογιάννη για την βοήθειά του κατά την θραύση των δοκιμίων σκυροδέματος και την απόσπαση των χαλύβων.

Το Εργαστήριο «Δομικών Υλικών» της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής Δ.Π.Θ και ιδιαίτερα τον Επίκουρο Καθηγητή Δ.Π.Θ κ. Κ. Σίδερη, για την πολύτιμη επιστημονική συνεργασία κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων ενανθράκωσης.

Τη Διεύθυνση Έρευνας και Ποιότητας της βιομηχανίας τσιμέντου TITAN Α.Ε και ιδιαίτερα τον Δ/ντή του Εργαστηρίου Σκυροδέματος κ. Χρ. Λεπτοκαρίδη για την παροχή του τεχνικού εξοπλισμού, των υλικών, την επιστημονική και τεχνική τους βοήθεια καθώς επίσης και την άριστη συνεργασία τους.

Τη χαλυβουργική βιομηχανία SIDENOR Α.Ε και τις εταιρίες χρωμάτων Stancolac και ΧΡΩΤΕΧ για την υλικοτεχνική υποστήριξη τους.

Τις συναδέλφους κ. Α. Ζαχαροπούλου και κ. Ε. Ζαχαροπούλου, Υ.Δ. Ε.Μ.Π. για το πολύτιμο κλίμα συνεννόησης, συνεργασίας, φιλίας και ενίσχυσης της προσπάθειας μου καθ' όλη τη διάρκεια της διδακτορικής διατριβής.

Το Ειδικό Εκπαιδευτικό Διδακτικό Προσωπικό του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών τον κ. Χ. Τσιάκαλο, κ. Π. Αστερίδη κ. Μ. Στεφανοπούλου, για την άριστη συνεργασία τους κατά την εκπόνηση του πειραματικού μέρους της παρούσας διατριβής.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι πολύ ανθεκτικές στη φθορά, η αλληλεπίδρασή τους όμως με κάποιο διαβρωτικό περιβάλλον δύναται να προκαλέσει διάβρωση του σκυροδέματος ή του οπλισμού. Στην πραγματικότητα τα δύο αυτά είδη διάβρωσης είναι αλληλένδετα εφόσον το ένα προκαλεί αργά ή γρήγορα την εμφάνιση του άλλου.

Η υποβάθμιση της ποιότητας του σκυροδέματος μπορεί να προκληθεί από διάφορα αίτια, όπως από φυσικούς παράγοντες που περιλαμβάνουν συνεχείς κύκλους ψύξης θέρμανσης, από χημικούς παράγοντες όπως ιόντα μαγνησίου ή καθαρό νερό, από βιολογικούς και μηχανικούς παράγοντες. Όλες αυτές οι δράσεις μπορούν να συμβούν ταυτόχρονα αλλά και να έχουν συνεργιστική δράση.

Σε χώρες που περιβάλλονται από θάλασσα και με ζεστό κλίμα όπως η Ελλάδα η επίδραση της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, των χλωριόντων, του διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αέριων ρύπων όπως το διοξείδιο του θείου και τα οξείδια του αζώτου, NO<sub>x</sub>, είναι παράγοντες θεμελιώδους σημασίας για τη φθορά και κατά συνέπεια τη μείωση του χρόνου ζωής κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, η οποία προκαλείται κατά κύριο λόγο από την ενανθράκωση του σκυροδέματος και τη διάβρωση του οπλισμού. Σύμφωνα με τα νέα Ευρωπαϊκά πρότυπα και συγκεκριμένα τον “ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 2”<sup>1</sup> ο οποίος είναι πλέον σε ισχύ, ο χρόνος ζωής στις συνήθεις κατασκευές από σκυρόδεμα είναι 50 χρόνια ενώ για τις γέφυρες εκτείνεται στα 120 χρόνια. Παρόλα αυτά, για κατασκευές μείζονος σημασίας ο χρόνος αυτός μπορεί να ποικίλει και να ανέλθει σημαντικά.

Η διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα αναγνωρίστηκε σαν μεγάλο πρόβλημα και σε μη παράκτιες περιοχές περίπου από τα τέλη της δεκαετίας του 1960. Έκτοτε, έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι με σκοπό την αντιμετώπιση της διάβρωσης, οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα για το αν πρόκειται για καινούριες ή για υφιστάμενες κατασκευές:

- A. Στις συνθήκες που πρέπει να επικρατήσουν κατά την κατασκευαστική φάση μιας δομής όπου ουσιαστικά πρόκειται για μέτρα πρόληψης.
- B. Στις επεμβάσεις που πραγματοποιούνται σε προϋπάρχουσες δομές όταν είναι αναγκαία η λήψη μέτρων έναντι της διάβρωσης.

Οι οργανικές επικαλύψεις είναι ιστορικά η παλαιότερη μέθοδος προστασίας και διακόσμησης επιφανειών και αποτελεί τη μέθοδο με τα περισσότερα τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα για την προστασία των μεταλλικών υλικών από τη διάβρωση. Υπολογίζεται ότι σήμερα επικαλύπτεται περίπου το 85% των μεταλλικών κατασκευών που εκτίθενται σε διάφορα διαβρωτικά μέσα και ότι το κόστος τους αντιστοιχεί στο μισό περίπου των εξόδων που γίνονται κατά την αποκατάστασή τους.

Στο οπλισμένο σκυρόδεμα η χρήση των οργανικών επικαλύψεων είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη διότι εκτός από τον αξιόλογο βαθμό προστασίας που προσφέρουν στην κατασκευή, διακοσμούν την επιφάνεια του σκυροδέματος χωρίς να αυξάνουν το βάρος της

συνολικής δομής. Τα οικοδομικά/ αρχιτεκτονικά χρώματα καταλαμβάνουν σήμερα το 60% της παγκόσμιας παραγωγής χρωμάτων γεγονός που αποδεικνύει την ευρεία χρήση τους.

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας διαφόρων ειδών οργανικών επικαλύψεων στη διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος που εκτίθεται σε περιβάλλον υψηλής συγκέντρωσης χλωριόντων και CO<sub>2</sub>.

Για το λόγω αυτό εξετάστηκαν οργανικές επικαλύψεις που προορίζονται για εφαρμογή στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος και ανήκουν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η **πρώτη κατηγορία** περιλαμβάνει συμβατικά χρώματα στα οποία συγκαταλέγονται αφενός παραδοσιακά συστήματα επικαλύψεων (ακρυλικές διασπορές, ελαστομερή χρώματα, σύνθετα ακρυλικά χρώματα) αλλά και τα χρώματα νέας γενιάς με προϊόντα νανοτεχνολογίας. Τα “νανοχρώματα” είναι οργανικές επικαλύψεις στην Παρασκευή των οποίων χρησιμοποιήθηκαν προϊόντα νανοτεχνολογίας. Η προσθήκη νανοσωματιδίων στα χρώματα μπορεί να αναβαθμίσει τις ιδιότητες της επικάλυψης επιτρέποντας της να λειτουργεί σαν μια πολλαπλή επίστρωση συνδυάζοντας πολλές ιδιότητες οι οποίες δεν θα ήταν δυνατόν να επιτευχθούν με παραδοσιακά συστήματα, χωρίς το κόστος να είναι απαγορευτικό. Έτσι παράγονται επικαλύψεις οι οποίες συνδυάζουν όλα τα πλεονεκτήματα των συμβατικών χρωμάτων με ταυτόχρονη όμως μείωση του πορώδους καθώς η διασπειρόμενη φάση (κλίμακα 10<sup>-9</sup>) μπλοκάρει τους πόρους του σκυροδέματος δημιουργώντας μια πιο συμπαγή δομή. Η **δεύτερη κατηγορία** χρωμάτων που εξετάστηκε περιλαμβάνει χρώματα ειδικών εφαρμογών και βιομηχανικών χρήσεων, όπως σε δεξαμενές νερού, γέφυρες και πισίνες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν καουτσουκικά και εποξειδικά χρώματα διαλύτου με πολυουρεθανικό φινίρισμα.

Αναλυτικότερα, ο σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας περιλαμβάνει δύο ενότητες.

Στην **πρώτη ενότητα** της διδακτορικής διατριβής εξετάζονται βασικές φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες όλων των κατηγοριών των επικαλύψεων οι οποίες σχετίζονται έμμεσα με τη διάβρωση του οπλισμού. Συγκεκριμένα εξετάστηκε η υδατοπερατότητα των οργανικών επικαλύψεων η οποία αποτελεί βασική παράμετρο μιας επικάλυψης καθώς το νερό δύναται να μεταφέρει διαβρωτικούς παράγοντες, όπως τα χλωριόντα. Μετρήθηκε επίσης η υδρατμοπερατότητα η οποία αποτελεί πολύ σημαντική φυσικοχημική ιδιότητα για μια οργανική επικάλυψη εφόσον ένα υδρατμοπερατό χρώμα δίνει τη δυνατότητα στο σκυρόδεμα να «αναπνέει» με αποτέλεσμα οι υδρατμοί να εξατμίζονται και να μην υγροποιούνται απειλώντας τον οπλισμό του σκυροδέματος. Τη βέλτιστη συμπεριφορά έναντι υδατοπερατότητας την επέδειξαν τα βιομηχανικά χρώματα με εποξειδικές και ρητίνες πολυουρεθάνης καθώς είναι χρώματα χημικής αντίδρασης τα οποία δημιουργούν ένα αδιαπέραστο υδατοαπωθητικό φιλμ. Δεδομένου αυτού η διαπερατότητα των υδρατμών αυτών των επικαλύψεων ήταν πολύ μικρή με αποτέλεσμα να θεωρούνται χρώματα μετρίως υδρατμοπερατά. Τα χρώματα νανοτεχνολογίας έδειξαν τη βέλτιστη συνδυαστική συμπεριφορά ανάμεσα στις δύο αυτές ιδιότητες, ενώ τα παραδοσιακά χρώματα είχαν μέτρια επίδοση. Ο ρυθμός διάχυσης των Cl<sup>-</sup> ήταν επίσης καλύτερος για τις βιομηχανικές επικαλύψεις, ενώ και πάλι η επικαλύψεις νανοτεχνολογίας υπερέιχαν συγκριτικά με τα συμβατικά χρώματα. Σχετικά με τη διάχυση του CO<sub>2</sub> παρατηρήθηκε υπεροχή των παραδοσιακών ακρυλικών χρωμάτων εις βάρος των συμβατικών ελαστομερών αλλά των

χρωμάτων νανοτεχνολογίας γεγονός που οφείλεται στην υψηλή αντίσταση των ακρυλικών ρητινών στην αποικοδόμηση από CO<sub>2</sub>. Εκτός από τις φυσικοχημικές παραμέτρους, οι μηχανικές ιδιότητες ενός χρώματος επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα μιας επικάλυψης σε ένα επιθετικό περιβάλλον και στην παρούσα διατριβή εξετάστηκαν η αντοχή σε συνάφεια αλλά και η αντοχή των επικαλύψεων σε θάλαμο αλατονέφωσης. Και στις δύο περιπτώσεις τα χρώματα νανοτεχνολογίας υπερέχουν των συμβατικών.

Στην **δεύτερη ενότητα** της διδακτορικής διατριβής εξετάζεται η συμπεριφορά των επικαλύψεων έναντι διάβρωσης και ενανθράκωσης. Οι μέθοδοι αποτίμησης της διάβρωσης από χλωρίοντα περιελάμβαναν ηλεκτροχημικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό του δυναμικού και του ρεύματος διάβρωσης, της αντίστασης πόλωσης και του ρυθμού διάβρωσης. Μετά το τέλος των πειραμάτων μετρήθηκε και η απώλεια μάζας των εγκιβωτισμένων οπλισμών και πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος των εγκιβωτισμένων χαλύβων.

Για την μελέτη της διάβρωσης του οπλισμού από ιόντα χλωρίου οι συνθήκες έκθεσης ήταν σε τρία διαφορετικά περιβάλλοντα. Αρχικά εκτιμήθηκε η συμπεριφορά έναντι διάβρωσης μακράς διάρκειας η οποία επετεύχθη με μερική εμβάπτιση των δοκιμίων σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 1600 ημερών για τα σκυροδέματα και 600 ημερών για τα τσιμεντοκονιάματα. Το παραπάνω περιβάλλον προσομοιάζει τη διάβρωση σε παράκτιες και παραθαλάσσιες περιοχές ή σε περιοχές όπου υπάρχει μεταφορά ιόντων χλωρίου. Στις συνθήκες ήταν σαφής η υπεροχή των ελαστομερικών συστημάτων και του τσιμεντοχρώματος διαλύτη έναντι των ακρυλικών, αναφορικά με τα σκυροδέματα και όσων αφορά τα τσιμεντοκονιάματα τα βιομηχανικά χρώματα παρέμειναν παθητικοποιημένα όλη την περίοδο έκθεσης. Παρατηρήθηκε πολύ ικανοποιητική συμπεριφορά των χρωμάτων νανοτεχνολογίας όπου η μεμβράνη της επικάλυψης σφράγισε τους πόρους του υποστρώματος οδηγώντας τους χάλυβες σε μικρότερους ρυθμούς διάβρωσης συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα. Το δεύτερο περιβάλλον έκθεσης ήταν σε θάλαμο αλατονέφωσης όπου μελετήθηκε η συμπεριφορά των επικαλύψεων κάτω από επιταχυνόμενες συνθήκες διάβρωσης. Στο ακραίο αυτό περιβάλλον παρατηρήθηκαν υψηλοί ρυθμοί διάβρωσης αλλά και πάλι ο βαθμός προστασίας των συστημάτων με προϊόντα νανοτεχνολογίας υπερέχει αυτό των συμβατικών επικαλύψεων. Τέλος εκτιμήθηκε η προστασία των επικαλύψεων σε εναλλασσόμενες συνθήκες διάβρωσης η οποία παρατηρείται σε μέρη κατασκευών που εκτίθενται στο φαινόμενο παλίρροιας-άμπωτης. Για το σκοπό αυτό τα δοκίμια εκτέθηκαν σε συνεχής κύκλους ύγρυνσης -ξηράνσης για διάστημα 6 μηνών σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl, όπου παρέμεναν διαδοχικά εντός και εκτός του διαλύματος. Οι ρυθμοί διάβρωσης σε αυτό το περιβάλλον ήταν αρκετά υψηλή δεδομένου του μικρού σχετικά διαστήματος διάρκειας του πειράματος με πολύ καλή απόδοση των χρωμάτων νανοτεχνολογίας σε σχέση με τα παραδοσιακά χρώματα.

Για την εκτίμηση της προστασίας που προσφέρουν οι επικαλύψεις έναντι ενανθράκωσης δοκίμια τσιμεντοκονιάματος και σκυροδέματος εκτέθηκαν σε φυσικές αλλά και επιταχυνόμενες συνθήκες. Μετά το τέλος των πειραμάτων μετρήθηκε το βάθος ενανθράκωσης που παρουσίασαν τα δοκίμια. Για τα βιομηχανικά χρώματα παρατηρήθηκε βάθος ενανθράκωσης μόνο μετά από 8 εβδομάδες κάτω από επιταχυνόμενες συνθήκες ενώ οι υπόλοιπες επικαλύψεις παρουσίασαν μέτριες προς υψηλές τιμές.





## ABSTRACT

---

Reinforced concrete structures can be generally characterized as durable but their interaction with a corrosive environment can cause corrosion either to the concrete or to the reinforcement. These two types of corrosion are highly associated since the occurrence of the one inevitably leads to the other.

The deterioration of concrete's quality can be caused by various reasons, such as physical factors which include continuous freeze-thaw cycles, chemical agents such as magnesium ions, or water, biological and mechanical factors. All these actions can occur simultaneously and have a synergistic effect.

In coastal countries with warm climate, like Greece, the main factors for the reduction of service life of reinforced concrete structures are the temperature, the RH, the chloride ions, the CO<sub>2</sub> and the nitrogen oxides NO<sub>x</sub>, which lead to carbonation of concrete and/or corrosion of the reinforcement. According to the new European standards that are now in force, "Eurocode 2", the lifetime of usual concrete structures is 50 years while for bridges is spanning to 120 years. However, for mega structures this time may vary and can reach up to 200 years.

Reinforcement corrosion has been identified as a problem of major importance to non-coastal areas in the late 1960's. Since then a number of methods have been developed in order to protect reinforced concrete from corrosion which can be divided into two broad categories depending on whether they are applied on new or on existing structures:

- A. Precautionary methods which are applied during the construction phase.
- B. Procedures performed in existing structures when necessary measures must be taken against corrosion.

Organic coatings are historically the oldest method of protection and decoration of metal surfaces. It also consists of the method with the most technical and economic advantages. It is estimated that today over the 85% of metal structures exposed to various corrosive environment are coated and their cost corresponds to the half of the expenses incurred during the restoration procedure.

In reinforced concrete structures organic coatings are widely used since they are a cost-effective solution to corrosion problems and in addition they decorate the surface of the structure without increasing the overall weight. Architectural coatings currently occupy the 60% of world production of paints which demonstrates their widespread use.

The subject of this thesis is the protection level that organic coatings offer to the reinforcement when concrete structures are exposed to highly corrosive environments under the presence of chlorides and CO<sub>2</sub>.

For that reason two major categories of organic coatings that are applied to the surface of the concrete were investigated. The **first category** consists of conventional paints which include traditional systems (acrylic dispersion, elastomeric coatings, etc.) and also nanotechnology modified coatings. Nano-coatings are materials that are produced by contraction in the molecular level in order to create a very dense structure. The addition of nanoparticles in

paints can enhance the properties of the coatings allowing them to function as multi-layers combining a number of properties which would not be achieved with traditional systems. Thus are produced coatings which combine all the advantages of conventional systems and at the same time are able to reduce the porosity as the dispersed phase (range  $10^{-9}$ ) is blocking the pores of the concrete, creating a more compact structure.

The **second category** that was examined includes industrial coatings for high performance applications such as water tanks, bridges and pools. This category includes chlorinated rubber, epoxy and polyurethane paints.

The experimental procedure of the thesis was divided into two sections.

In the **first section**, basic physicochemical and mechanical properties of the coatings that are related to corrosion protection were examined. Firstly, water permeability of all coatings was determined which is a key parameter of a coating as the water may transfer corrosive agents such as chlorides. Water vapor transmission rate was also measured since it comprises of a very important property for a coating. Paints with high water vapor transmission rate creating a film which is breathable permitting the vapor to evaporate through it without threatening the reinforcement.

Optimal water permeability behavior was shown by industrial coatings with epoxy and polyurethane resins as they are chemical reaction paints which create an impermeable water-repellent film. Given that the water vapor permeability of these coatings was very reduced thus are considered are moderately permeable towards water vapor. Nanotechnology paints showed the best balanced behavior between these two properties, while traditional colors had moderate performance.

Chlorides diffusion rate was also better for industrial coatings and in this case as well nanotechnology coatings excelled the conventional ones. Regarding  $\text{CO}_2$  diffusion rate, traditional acrylic paints presented better values than conventional elastomeric and nanotechnology coatings due to the high resistance of the acrylic resins to degradation by  $\text{CO}_2$ . Except the physicochemical parameters, basic mechanical properties were also examined. The adhesion of the coating membrane to the surface and also the salt chamber resistance were evaluated and in both cases nanotechnology coatings outweighed the conventional systems.

In the **second section** of the doctoral thesis the behavior of the coatings against corrosion and carbonation is examined. The corrosion evaluation methods included electrochemical measurements in order to determine the corrosion potential, the corrosion current density and the corrosion rate. After the end of the experiments the mass loss of the embedded rebars was measured and visual observation was performed with a fiber optical microscope. The diffused chloride concentration was achieved by Method Mohr.

For corrosion evaluation by chloride ions the cement mortar and concrete specimens were exposed in three different environments:

- i. **Long-term Corrosion:** cement mortar specimens and concrete specimens were partially immersed in 3.5 w.t% NaCl for 600 and 1600 days respectively. The above environment simulates corrosion that takes place in coastal and offshore areas or in areas where chloride ions can be transferred. On the aforementioned conditions the

solvent based and the elastomeric coatings offered the higher protection to the concrete specimens and the industrial coatings remained in passive conditions for the cement mortar specimens. Regarding the nanotechnology paints their behavior was effective since the film coating sealed the porosity of the substrate leading to lower corrosion rates compared to conventional systems.

- ii. Accelerated Corrosion: The second environment that cement mortars were exposed was in salt-spray chamber where the behavior of coatings under accelerated corrosion conditions was examined. In this extreme environmental conditions high corrosion rates were observed but the protection level offered from the nanocoatings was higher compared to the traditional paints.
- iii. Wet –dry cycles: The final environment that the specimens were exposed was in wet-dry cycles, conditions that are observed in bridges or tidal areas. For this purpose the specimens were exposed to continuous wetting-drying cycles for 6 months. For 24hrs the specimens were fully immersed in 3.5 wt% NaCl and then for 24hrs were left to dry in laboratory environment. Corrosion rates were quite high given the relatively short time duration of the experiment and the nanotechnology paints were more effective than the traditional coatings.

In order to evaluate the protection level of the coating against carbonation concrete specimens and cement mortars were exposed to natural carbonation as well as to accelerated condition in a chamber. From the results it is shown that the industrial paints and the acrylic dispersion exhibited the best behavior.



## Contents

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	4
ABSTRACT.....	8
1. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	18
1.1 Ορισμός Διάβρωσης.....	18
1.2 Επιπτώσεις Διάβρωσης .....	19
1.3 Θερμοδυναμική της Διάβρωσης .....	20
1.3.1 Διάβρωση και Ελεύθερη Ενθαλπία .....	20
1.3.2 Είδη και Μηχανισμοί Διάβρωσης.....	21
1.3.3 Διαγράμματα Pourbaix.....	23
1.4 Κινητική της Διάβρωσης.....	24
1.4.1 Ηλεκτροχημική ή Υγρή διάβρωση .....	24
1.4.2 Ξηρή Διάβρωση .....	26
1.5 Ταχύτητα Διάβρωσης.....	27
1.6 Διαβρωτικά Περιβάλλοντα και Μηχανισμός.....	31
1.6.1 Διάβρωση Μετάλλων στην Ατμόσφαιρα.....	31
1.6.2 Διάβρωση Μετάλλων στο Έδαφος .....	36
1.6.3 Διάβρωση μετάλλων στο νερό .....	39
1.7 Μορφές διάβρωσης.....	41
1.7.1 Ομοιόμορφη ή Γενική Διάβρωση (Uniform or General Corrosion) .....	43
1.7.2 Διάβρωση με Βελονισμούς (Pitting Corrosion).....	44
1.7.3 Διάβρωση Σχισμών (Crevice Corrosion) .....	45
1.7.4 Γαλβανική Διάβρωση (Galvanic Corrosion) .....	45
1.7.5 Ρευστομηχανική Διάβρωση ή Διάβρωση Εκτριβής (Erosion corrosion) .....	46
1.7.6 Σπηλαιώδης Διάβρωση ή Διάβρωση Εσοχών (Cavitation Corrosion) .....	47
1.7.7 Διάβρωση λόγω Τριβής (Fretting Corrosion).....	47
1.7.8 Περικρυσταλλική Διάβρωση (Intergranular Corrosion).....	48
1.7.9 Εκλεκτική Προσβολή (De-alloying Corrosion).....	49
1.7.10 Διάβρωση με Μηχανική Καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking) .....	49
1.7.11 Διάβρωση λόγω Κόπωσης (Fatigue Corrosion).....	50
1.7.12 Διάβρωση Απολέπισης (Exfoliation Corrosion) .....	51
1.7.13 Βλάβη από Υδρογόνο (Hydrogen Damage) .....	51

1.7.14	Θερμογαλβανική Διάβρωση (Thermo-galvanic Corrosion) .....	52
1.7.15	Μικροβιολογική Διάβρωση (Microbiologically Influenced Corrosion) .....	52
1.7.16	Διάβρωση από Ρεύματα Διαφυγής (Stray Current Corrosion) .....	53
2.	ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....	54
2.1	Συμπεριφορά Χάλυβα εντός Σκυροδέματος .....	54
2.2	Στάδια Διάβρωσης Σκυροδέματος .....	55
2.3	Αποτελέσματα Διάβρωσης Σκυροδέματος.....	57
2.4	Ενανθράκωση Σκυροδέματος.....	58
2.4.1	Διάχυση Διοξειδίου του Άνθρακα στο Σκυρόδεμα.....	59
2.4.2	Μηχανισμός Διάβρωσης με Ενανθράκωση .....	60
2.4.3	Παράγοντες που Επιδρούν στην Ενανθράκωση .....	61
2.4.4	Τρόποι Προσδιορισμού του Βάθους Ενανθράκωσης .....	62
2.5	Διάβρωση Σκυροδέματος με Χλωριόντα.....	63
2.5.1	Κρίσιμη Συγκέντρωση Χλωριόντων .....	65
2.5.2	Διάχυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα .....	66
2.5.3	Μηχανισμός Διάβρωσης σε Σκυρόδεμα με Χλωριόντα.....	67
2.5.4	Διάβρωση σε Θαλασσινό Νερό .....	70
2.5.5	Ενανθρακωμένο Σκυρόδεμα με Χλωριόντα .....	72
2.6	Διάβρωση Σκυροδέματος με Ρωγμές .....	73
2.7	Διάβρωση Σκυροδέματος από Ρεύματα Διαφυγής.....	74
2.8	Βιολογική Διάβρωση Σκυροδέματος .....	75
2.9	Διάβρωση Σκυροδέματος από Θειικά Άλατα .....	76
2.10	Κατηγορίες έκθεσης σκυροδέματος σχετικές με τις περιβαλλοντικές δράσεις .....	77
3.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ Ο.Σ. ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	80
3.1	Ποιότητα Σκυροδέματος .....	81
3.1.1	Πάχος επικάλυψης .....	81
3.1.2	Λόγος νερού/τσιμέντο.....	82
3.1.3	Ορυκτά πρόσθετα σκυροδέματος .....	82
3.2	Εναλλακτικοί Οπλισμοί .....	83
3.2.1	Χάλυβας με εποξειδική επικάλυψη.....	83
3.2.2	Χαλύβδινος οπλισμός με μεταλλικές επικαλύψεις και εναλλακτικές ράβδοι .	84
	Πλαστικός οπλισμός ενισχυμένος με ίνες .....	87
3.3	Αναστολείς Διάβρωσης .....	88
3.3.1	Κατηγορίες αναστολέων διάβρωσης.....	88

3.3.2	Μηχανισμός δράσης αναστολέων διάβρωσης.....	89
3.3.3	Μηχανισμός προστασίας μέσω αναστολέων διάβρωσης .....	92
3.4	Ηλεκτροχημικές Μέθοδοι .....	93
3.4.1	Καθοδική Προστασία (Cathodic Protection, CP).....	93
3.4.2	Ηλεκτροχημική Εξαγωγή Χλωριόντων (Electrochemical Desalination).....	96
3.4.3	Ηλεκτροχημική Επανακαλοποίηση (Electrochemical Realkalization, RE) .....	98
3.5	Επικαλύψεις Σκυροδέματος .....	100
3.5.1	Διαποτισμός .....	100
3.5.2	Επικάλυψη.....	101
3.5.3	Επίστρωση .....	101
3.6	Επισκευή και Αποκατάσταση Δομικών Στοιχείων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα .....	103
4.	ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ .....	104
4.1	Βασικοί Ορισμοί .....	104
4.2	Συστατικά Χρωμάτων .....	104
4.2.1	Συνδετικά Μέσα ή Φορείς (binders).....	105
4.2.1.1	Ακρυλικές Ρητίνες.....	106
4.2.1.2	Βινυλικές Ρητίνες.....	109
4.2.1.3	Ρητίνες Σιλικόνης.....	109
4.2.1.4	Εποξειδικές Ρητίνες .....	110
4.2.1.5	Πολυουρεθάνες.....	111
4.2.1.6	Χλωριωμένο φυσικό-συνθετικό καουτσούκ.....	111
4.2.1.7	Πολυεστέρες.....	112
4.2.2	Πιγμέντα (pigments).....	113
4.2.3	Διαλύτες .....	115
4.2.4	Πληρωτικά Υλικά .....	116
4.2.5	Πρόσθετα Υλικά.....	116
4.3	Οργανικές Επικαλύψεις για Σκυρόδεμα.....	117
4.3.1	Χρώματα Υδατικών Διασπορών .....	117
4.3.1.1	Συμβατικές Επικαλύψεις .....	118
4.3.1.2	Χρώματα με Προϊόντα Νανοτεχνολογίας.....	119
4.3.2	Χρώματα με Οργανικούς Διαλύτες.....	121
4.4	Συστατικά Χρωμάτων και Περιβάλλον .....	123
4.5	Απαιτήσεις Χρωμάτων .....	125
4.6	Κριτήρια Επιλογής Συστήματος Επικάλυψης .....	129

4.7	Διαδικασία Εφαρμογής Πολυστρωματικών Συστημάτων .....	130
4.8	Μηχανισμός Διάβρωσης κάτω από Οργανικά Επιστρώματα .....	131
4.8	Αστοχίες Χρωμάτων και Επιχρισμάτων .....	131
4.8.1	Αστοχίες που σχετίζονται με τον σχηματισμό του υμένα του χρώματος .....	132
4.8.2	Αστοχίες που σχετίζονται με το υπόστρωμα .....	132
4.8.3	Αστοχίες που σχετίζονται με φυσικά ελαττώματα .....	132
5.	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ .....	136
6.	ΥΛΙΚΑ .....	140
6.1	Δοκίμια .....	140
6.1.1	Δοκίμια Σκυροδέματος .....	140
6.1.2	Δοκίμια Τσιμεντοκονιάματος .....	141
6.2	Συστήματα Επικαλύψεων .....	142
6.2.1	Μέθοδος Βαφής .....	142
6.2.2	Οργανικές Επικαλύψεις .....	142
7.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ .....	144
7.1	Φυσικοχημικές Ιδιότητες .....	144
7.1.1	Υδατοπερατότητα .....	144
7.1.2	Υδρατμοπερατότητα .....	145
7.1.3	Διαπερατότητα σε χλωριόντα .....	147
7.1.3.1	Διαπερατότητα Χλωριόντων Συναρτήσεως του Χρόνου .....	147
7.1.3.2	Διαπερατότητα Χλωριόντων Συναρτήσεως του Ηλεκτρικού Φορτίου .....	147
7.1.4	Συντελεστής Διάχυσης CO <sub>2</sub> .....	148
7.2	Μηχανικές Ιδιότητες .....	149
7.2.1	Προσδιορισμός της πρόσφυσης μέσω της ελάχιστης εφελκυστικής τάσης αποκόλλησης (Pull-off test) .....	149
7.2.2	Προσδιορισμός της πρόσφυσης του επιστρώματος με τη δοκιμή της σταυροειδούς χάραξης (Cross Cut Test) .....	150
7.2.3	Αντοχή σε θάλαμο αλατονέφωσης .....	152
8.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ .....	158
8.1	Ηλεκτροχημικές Μετρήσεις Αποτίμησης της Διάβρωσης .....	158
8.1.1	Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης (OCP) .....	158
8.1.2	Τεχνική Γραμμικής Πόλωσης (LPR) .....	160
8.2	Απώλεια Μάζας Χαλύβδινων Οπλισμών .....	165
8.3	Οπτικός Έλεγχος με Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (Fiber Optic Microscopy, FOM) .....	166



8.4	Μέτρηση ιόντων χλωρίου στη μάζα των δοκιμίων .....	167
8.5	Αποτίμησης του Βάθους Ενανθράκωσης .....	168
9.	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ .....	170
9.1	Υλικά και Μέθοδοι Εκτίμησης .....	170
9.2	Μετρήσεις – Αποτελέσματα .....	170
9.2.1	Υδατοπερατότητα .....	170
9.2.2	Υδρατμοπερατότητα .....	173
9.2.3	Διαπερατότητα σε Χλωριόντα .....	178
9.2.3.1	Διαπερατότητα Χλωριόντων Συναρτήσεως του Χρόνου .....	178
9.2.3.2	Διαπερατότητα Χλωριόντων με Μέτρηση του Ηλεκτρικού Φορτίου .....	185
9.2.4	Συντελεστής Διάχυσης CO <sub>2</sub> .....	186
9.2.5	Προσδιορισμός της Πρόσφυσης μέσω της Ελάχιστης Εφελκυστικής Τάσης Αποκόλλησης (Pull-off test) .....	188
9.2.6	Προσδιορισμός της Πρόσφυσης του Επιστρώματος με τη Δοκιμή της Σταυροειδούς Χάραξης (Cross Cut Test) .....	194
9.2.7	Αντοχή σε Θάλαμο Αλατονέφωσης .....	196
10.	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ .....	200
10.1	Διάβρωση Μακράς Διαρκείας .....	200
10.1.1	Δοκίμια Οπλισμένου Σκυροδέματος .....	200
10.1.1.1	Χρονική Εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης των Χαλύβων .....	201
10.1.1.2	Προσδιορισμός Πυκνότητας Ρεύματος Διάβρωσης .....	210
10.1.1.3	Απώλεια Μάζας Χαλύβων .....	221
10.1.1.4	Οπτικές Παρατηρήσεις .....	226
10.1.1.5	Μέτρηση Χλωριόντων με Μέθοδο Mohr .....	232
10.1.2	Δοκίμια Οπλισμένου Τσιμεντοκονιάματος .....	233
10.1.2.1	Χρονική Εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης των Χαλύβων .....	234
10.1.2.2	Προσδιορισμός πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης και της αντίστασης πόλωσης 240	
10.1.2.3	Απώλεια Μάζας Χαλύβων .....	246
10.1.2.4	Οπτική Παρατήρηση με Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών (FOM) .....	250
10.1.2.5	Μέτρηση Χλωριόντων με Μέθοδο Mohr .....	252
10.2	Επιταχυνόμενη Διάβρωση .....	253
10.2.1	Χρονική Εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης των Χαλύβων ... <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
10.2.2	Προσδιορισμός Πυκνότητας Ρεύματος Διάβρωσης .....	257

10.2.3	Απώλεια Μάζας Χαλύβων .....	260
10.2.4	Οπτικές Παρατηρήσεις με Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών .....	264
10.2.5	Μέτρηση Χλωριόντων με Μέθοδο Mohr .....	266
10.3	Εναλλασσόμενοι Κύκλοι Διάβρωσης.....	267
10.3.1	Χρονική Εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης των Χαλύβων .....	267
10.3.2	Προσδιορισμός Πυκνότητας Ρεύματος Διάβρωσης .....	268
10.3.3	Απώλεια Μάζας Χαλύβων .....	270
10.3.4	Οπτική Παρατήρηση με FOM .....	272
10.3.5	Μέτρηση Χλωριόντων με Μέθοδο Mohr .....	274
11.	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ .....	276
11.1	Υλικά και Μέθοδοι .....	276
11.2	Φυσική Ενανθράκωση.....	276
11.3	Επιταχυνόμενη Ενανθράκωση .....	280
12.	ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	282
12.1	Φυσικοχημικές και Μηχανικές Ιδιότητες .....	282
12.2	Βαθμός Προστασία Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης.....	285
12.3	Βαθμός Προστασίας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Ενανθράκωσης .....	293
13.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	296
14.	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΙΖΟΜΕΝΗΣ ΈΡΕΥΝΑΣ .....	300
	<i>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ</i> .....	304

## 1. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

### 1.1 Ορισμός Διάβρωσης

Ο όρος της διάβρωσης μπορεί να αποδοθεί με πολλούς ορισμούς. Μερικοί από αυτούς είναι πολύ στενοί και περιορισμένοι και αναφέρονται σε μια συγκεκριμένη μορφή διάβρωσης, ενώ άλλοι είναι αρκετά διευρυμένοι καλύπτοντας πολλές μορφές της φθοράς. Η λέξη “διάβρωση”, προέρχεται από τη λατινική λέξη “corrodere” που σημαίνει “ροκανίζω σε κομμάτια” και σαν γενικός ορισμός της διάβρωσης μπορεί να θεωρηθεί η διαδικασία κατά την οποία ένα υλικό ανοικοδομείται-σταδιακά ή φθείρεται σαν να έχει ροκανιστεί<sup>2</sup>.

Επίσης, πολλοί ορισμοί σχετικά με το φαινόμενο της διάβρωσης έχουν προταθεί όπως:

- a. **Σύμφωνα με ΕΛΟΤ και κατά ISO 8044 -99<sup>3</sup>:** “Διάβρωση είναι η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργία του μετάλλου, του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος που αποτελούν τμήμα αυτού”.
- b. **Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Διάβρωσης της Διεθνούς Επιτροπής Θαλάσσιας Διάβρωσης και Ρύπανσης των Υφάλων<sup>4</sup>:** “Διάβρωση καλείται 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”.

Ο παραπάνω ορισμός θεωρείται πληρέστερος και είναι ευρέως αποδεκτός αν και θεωρείται αναγκαία η αποσαφήνιση ορισμένων σημαντικών σημείων και όρων του:

- Η αναφορά στον όρο “αυθόρμητη αλλοίωση” συνεπάγεται την έννοια του θερμοδυναμικά αυθόρμητου φαινομένου ακόμα και σε συνηθισμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Ο όρος “εκβιασμένη αλλοίωση” δεν υπονοεί την μη αυθόρμητη θερμοδυναμικά αντίδραση, αλλά το θερμοδυναμικά αυθόρμητο και πάλι φαινόμενο που εκτελείται εκβιαστικά λόγω έντονου τεχνητού διαβρωτικού περιβάλλοντος, όπως υψηλή θερμοκρασία, παρουσία χημικών ουσιών, κ.α.
- Η διάκριση μεταξύ ηλεκτροχημικής και χημικής αλλοίωσης βασίζεται στην αντίστοιχη διάκριση μεταξύ ηλεκτροχημικών και χημικών δράσεων, όπου κατά τις ηλεκτροχημικές δράσεις παράγεται ή καταναλίσκεται ηλεκτρικό έργο, ενώ κατά τις χημικές δράσεις παράγεται ή απορροφάται θερμική ενέργεια<sup>5</sup>.
- Μηχανικής φύσης αλλοίωση νοείται κάθε υποβάθμιση της εξωτερικής επιφάνειας ενός υλικού ως αποτέλεσμα μιας μηχανικής δράσης, όπως κρούση, τριβή, κ.α.
- Στα κράματα και στα μέταλλα η διάβρωση εντοπίζεται στην επιφάνειά τους, όπου σαν επιφάνεια διάβρωσης ορίζεται αυτή στην οποία ανήκουν οι επιφανειακές ανωμαλίες, πόροι, ενεργά κέντρα και οι ενεργοί δρόμοι από αταξίες δομής. Τονίζεται ότι μόνο αυτή η επιφάνεια είναι έδρα των φαινομένων της διάβρωσης και όχι όλη η μάζα του σώματος<sup>6</sup>.
- Η απώλεια υλικού είναι ένα αναπόφευκτο αποτέλεσμα της διαβρωτικής διαδικασίας. Πρέπει να τονιστεί ότι ο όρος αναφέρεται στην αλλαγή της αρχικής μορφής του μετάλλου και όχι στην αναγκαστικά στην μείωση του βάρους του. Η ελάττωση της μάζας είναι

σύνηθες φαινόμενο σε ένα διαβρωμένο μέταλλο αλλά αυτό δεν αποτελεί κανόνα αφού υπάρχουν περιπτώσεις αύξησης της μάζα του οξειδωμένου υλικού λόγω έντονης πρόσφυσης των προϊόντων διάβρωσης<sup>3</sup>.

Ο όρος της διάβρωσης χρησιμοποιήθηκε αρχικά από πολλούς ερευνητές για να αποδώσει τη φθορά που προκαλείται από την επίδραση των καιρικών συνθηκών σε σκυρόδεμα, ξυλεία ή ακόμα και τις ρωγμές σε πλαστικά, δηλαδή σε μη μεταλλικά ανόργανα υλικά. Στη συνέχεια περιορίστηκε η χρήση του για τα μεταλλικά μόνο κράματα, ενώ σήμερα χρησιμοποιείται για την περιγραφή της υποβάθμισης όλων των υλικών με μικρές διαφοροποιήσεις. Η ηλεκτροχημική δράση υπερέχει στα μέταλλα και στα κράματα από τα υπόλοιπα υλικά, όπου η αλλοίωση βιολογικής φύσεως (πέτρα) ή χημικής και φυσικής φύσεως (πολυμερή) μπορεί να παρουσιάζεται περισσότερο έντονη.

## 1.2 Επιπτώσεις Διάβρωσης

Το φαινόμενο της διάβρωσης έχει εξαπλωθεί ιδιαίτερα, έχοντας μεγάλο κοινωνικό και οικονομικό κόστος. Οι λόγοι εξαπλώσης περιλαμβάνουν:

1. Την αύξηση της χρήσης των μεταλλικών κατασκευών και άλλων υλικών ως αποτέλεσμα της επιστημο-τεχνικής επανάστασης και γενικότερα της ανάπτυξης της τεχνολογίας.
2. Η αύξηση σε σημαντικό βαθμό της ρύπανσης της ατμόσφαιρας, των υδάτων και του εδάφους, σαν αποτέλεσμα των ίδιων παραγόντων.

Εκτός όμως από τις εμφανείς οικονομικές συνέπειες η διάβρωση επηρεάζει και πολλούς άλλους τομείς, όπως την ασφάλεια, την υγεία, την τεχνολογία αλλά και την πολιτιστική κληρονομιά.

### *Οικονομικές Επιπτώσεις*

Πολλές έρευνες σε διάφορες χώρες έχουν διεξαχθεί με σκοπό να αποτιμηθεί το εθνικό κόστος της διάβρωσης και η πιο εκτενής από αυτές έλαβε χώρα στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1976<sup>7</sup>. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το ετήσιο κόστος από τη διάβρωση των μεταλλικών υλικών ανήλθε στα 70 εκατομμύρια δολάρια το οποίο αποτελούσε το 4.2% του ακαθάριστου εθνικού προϊόντος. Για λόγους σύγκρισης αναφέρεται πως το 1977 η εισαγωγή αργού πετρελαίου κόστιζε 45 εκατομμύρια δολάρια. Σε άλλη έρευνα<sup>8</sup> που διεξήχθη το 1995, αναφέρεται πως μόνο για τις Η.Π.Α. το ετήσιο κόστος της διάβρωσης ανέρχεται μεταξύ 8-126 εκατομμυρίων δολαρίων. Τέλος, σε μια πιο πρόσφατη εργασία<sup>9</sup> που έλαβε χώρα στο νησί του Μαυρικού, αναφέρεται πως μόνο το κόστος της ατμοσφαιρικής διάβρωσης αντιστοιχεί στο 0.38% του ακαθάριστου εθνικού προϊόντος.

### *Επιπτώσεις στην Υγεία*

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια αυξανόμενη χρήση των μεταλλικών προσθετικών συσκευών στο σώμα, όπως πλάκες, αρθρώσεις του ισχίου, βηματοδότες και άλλα εμφυτεύματα. Νέα κράματα και καλύτερες τεχνικές εμφύτευσης έχουν αναπτυχθεί, αλλά η διάβρωση συνεχίζει να δημιουργεί προβλήματα. Από τη σκοπιά της αντοχής στη φθορά τα εμφυτευμένα στον οργανισμό πολυμερή π.χ. τεφλόν, νάυλον, πολυμερή σιλικόνης, ακρυλικά, πολυπροπυλένιο κ.α. ή και τα κεραμικά υλικά π.χ. πορσελάνη φθείρονται δηλαδή υφίστανται γήρανση μετά από μακρό χρόνο σε μικρό σχετικά βαθμό αλλά όχι αμελητέο. Τα μεταλλικά βιοϋλικά διαβρώνονται με αποτέλεσμα μέσω των προϊόντων της διάβρωσής τους

να προκαλούνται δυνητικά τοπικές αλλοιώσεις στους ιστούς, χωρίς να αποκλείονται και γενικότερες βλάβες του οργανισμού εξαιτίας της διάχυσής τους<sup>[10]</sup>.

### **Επιπτώσεις στην Ασφάλεια**

Ένα ακόμη πιο σημαντικό πρόβλημα είναι η διάβρωση των κατασκευών, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρούς τραυματισμούς ή ακόμη και σε απώλεια της ζωής. Η ασφάλεια τίθεται σε κίνδυνο από τη διάβρωση όταν αυτή συμβάλλει στην αστοχία γεφυρών, αεροσκαφών, αυτοκινήτων, αγωγών αερίου, δηλαδή το σύνολο των μεταλλικών κατασκευών και των συσκευών που συνθέτουν το σύγχρονο κόσμο<sup>11</sup>.

### **Τεχνολογικές Επιπτώσεις**

Οι οικονομικές συνέπειες της διάβρωσης έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην τεχνολογία. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας πολλές φορές περιορίζεται λόγω προβλημάτων διάβρωσης επειδή τα υλικά απαιτείται να αντέχουν ταυτόχρονα σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις και σε ακόμα πιο διαβρωτικά περιβάλλοντα. Προβλήματα διάβρωσης επηρεάζουν συστήματα ηλιακής ενέργειας τα οποία απαιτούν κράματα ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα και γεωθερμικά συστήματα τα οποία απαιτούν υλικά να αντέχουν σε πολύ πυκνά διαλύματα διαβρωτικών αλάτων σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η άντληση πετρελαίου στη θάλασσα και στην ξηρά κατά την οποία εμπλέκονται πολλά είδη διάβρωσης, όπως διάβρωση με μηχανική καταπόνηση παρουσία σουλφιδίων, βιολογική διάβρωση καθώς και το ευρύ φάσμα των δυσκολιών που εμπλέκονται στο εξαιρετικά διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον. Σε πολλές από αυτές τις περιπτώσεις η διάβρωση είναι ένας περιοριστικός παράγοντας που αποτρέπει την ανάπτυξη οικονομικά ή ακόμη και τεχνολογικά λειτουργικών συστημάτων.

### **Πολιτιστικές Επιπτώσεις**

Το διεθνές ενδιαφέρον εντάθηκε όταν αποκαλύφθηκε η σοβαρή φθορά την οποία έχουν υποστεί επιχρυσωμένα χάλκινα αγάλματα στη Βενετία. Λόγω του πολύ μολυσμένου περιβάλλοντος που επικρατεί στις περισσότερες χώρες του κόσμου, η διαβρωτική διαδικασία θα επιταχύνει την επιδείνωση των πολύτιμων αντικειμένων και της πολιτιστικής κληρονομιάς.

## **1.3 Θερμοδυναμική της Διάβρωσης**

### **1.3.1 Διάβρωση και Ελεύθερη Ενθαλπία**

Τα μέταλλα απαντώνται στη φύση με τη μορφή αλάτων, οξειδίων, σουλφιδίων ή άλλων ενώσεων και σπανίως βρίσκονται στη καθαρή μεταλλική τους κατάσταση όπως ο χρυσός, ο λευκόχρυσος και ο υδράργυρος. Τα ορυκτά/μεταλλεύματα αυτά μετατρέπονται σε καθαρά μεταλλικά υλικά και τεχνολογικά εκμεταλλεύσιμα κράματα μετά από κατάλληλες αναγωγικές διεργασίες, όπου καταναλώνεται μεγάλο ποσό ενέργειας. Ένα μέρος της ενέργειας αυτής με τη μορφή εντροπίας ( $\Delta S$ ) και ελεύθερης ενέργειας ( $A$ , κατά Helmholtz), παραμένει στα παρασκευαζόμενα μεταλλικά υλικά και κράματα αυξάνοντας την εσωτερικής τους ενέργεια. Η αύξηση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα να παρουσιάζονται τα υλικά αυτά ενεργειακά αναβαθμισμένα και κατά συνέπεια, σύμφωνα με τον 2<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό νόμο, υπάρχει η προδιάθεση για μείωση της εσωτερικής τους ενέργειας, είτε με μείωση της ελεύθερης ενέργειας ( $A$ ) ή της ενθαλπίας ( $G$ ) ή του χημικού δυναμικού του ( $\mu_i$ ) είτε με αύξηση της εντροπίας ( $S$ ). Η οξείδωση η οποία λαμβάνει χώρα με την έκθεση των υλικών

αυτών στο εξωτερικό περιβάλλον είναι αυθόρμητη αντίδραση ( $\Delta G^0_{ολ} < 0$ ), συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας και στοχεύει στο να επανέλθουν στην αρχική κατάσταση ισορροπίας τους τα ενεργειακά αυτά αναβαθμισμένα υλικά. Η τάση αυτή των μετάλλων για μετάπτωση σε σταθερότερες καταστάσεις εξαρτάται από τη φύση των μετάλλων και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Συνεπώς, όλα τα μεταλλικά υλικά ανεξάρτητα από τη χημική τους σύσταση, τη δομή, την κατεργασία που έχουν υποστεί και το περιβάλλον στο οποίο εκτίθενται, υπόκεινται σε φθορά και υποβάθμιση με το πέρασμα του χρόνου.

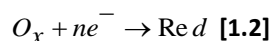
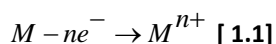
Οι τιμές της μεταβολής της ελεύθερης ενθαλπίας για το σχηματισμό ορισμένων κοινών ουσιών ανάμεσα τους και κάποιων μεταλλικών οξειδίων παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1.1**.

**Πίνακας 1.1:** Πρότυπη ελεύθερη ενθαλπία διαφόρων ουσιών και οξειδίων<sup>12</sup>

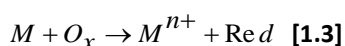
Πρότυπη ελεύθερη ενθαλπία σχηματισμού ( $\Delta G^0$ ) στους 298K			
$H_2O$	54,64 kcal/mol	$Cu_2O$	-145 kJ/mol
$CO$	-32,81 kcal/mol	$Ag_2O$	-10,8 kJ/mol
$CO_2$	-94,26 kcal/mol	$PbO$	-188 kJ/mol
$CaO$	-144,4 kcal/mol	$NiO$	-215 kJ/mol
$Fe_2O_3$	-177,1 kcal/mol	$FeO$	-255 kJ/mol
$Al_2O_3$	-376,8 kcal/mol	$ZnO$	-319 kJ/mol
$SiO_2$	-192,4 kcal/mol	$MgO$	-570 kJ/mol
$Ca(OH)_2$	-214,3	$Cr_2O_3$	-824 kJ/mol

### 1.3.2 Είδη και Μηχανισμοί Διάβρωσης

Οι αντιδράσεις που εμφανίζονται κατά τη διάβρωση είναι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, δηλαδή εμπεριέχουν μεταφορά φορτίου στη διεπιφάνεια μεταξύ ενός ηλεκτρονικού αγωγού (μέταλλο) και ενός ιοντικού (στερεός ή υγρός ηλεκτρολύτης) και έχουν ως αποτέλεσμα την οξείδωση του μετάλλου (M) και την αναγωγή ενός οξειδωτικού  $O_x$  σύμφωνα με τα ακόλουθα:

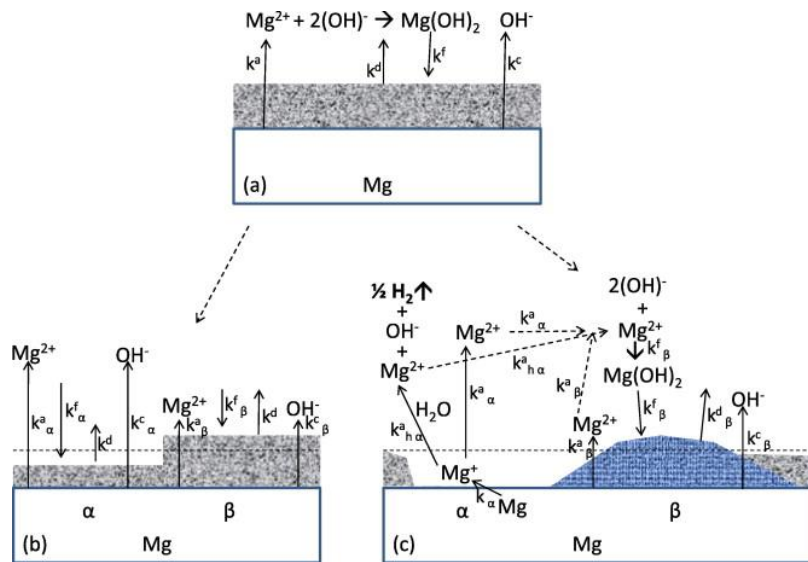


Συνολικά η αντίδραση περιγράφεται από την εξίσωση:



Γενικά η διάβρωση των μετάλλων σε υγρό περιβάλλον είναι ηλεκτροχημικό φαινόμενο και εκδηλώνεται με την εμφάνιση κελιών διάβρωσης που δημιουργούνται είτε από επαφή διαφορετικών μεταλλικών επιφανειών, είτε από επαφή δύο τμημάτων της ίδιας επιφάνειας που είναι σε ηλεκτρική ή ηλεκτρολυτική επαφή, αλλά το δυναμικό του καθενός απουσία σύνδεσης είναι διαφορετικό. Η προσβολή μιας μεταλλικής επιφάνειας λόγω διάβρωσης διακρίνεται σε ομοιόμορφη και εντοπισμένη, ανάλογα με την σχετική μεταξύ τους θέση των ανοδικών και καθοδικών περιοχών<sup>4,13</sup>.

Η ομοιόμορφη διάβρωση (μοντέλο υπομακροκελιών) εμφανίζεται σε καθαρά μέταλλα και αμαγάλματα όταν οι ταυτόχρονα εμφανιζόμενες ανοδικές και καθοδικές δράσεις κατανέμονται κατά τυχαίο και όχι μεταξύ τους σαφώς διαφοροποιούμενο τρόπο πάνω στο σύνολο της μεταλλικής επιφάνειας κατά το φαινόμενο της διάβρωσης, οπότε οι ανοδικές και οι καθοδικές επιφάνειες είναι ίσες (**Σχήμα 1.1**).



**Σχήμα 1.1:** Τύποι διάβρωσης, (α) Ιδανική περίπτωση ομοιόμορφης διάβρωσης, (β) Ομοιόμορφη διάβρωση ελαφρά αποκλίνουσα από την σταθερή κατάσταση (γ) Εντοπισμένη διάβρωση<sup>14</sup>

**Η εντοπισμένη διάβρωση** (μοντέλο μικρο και μακρο κελιών) εμφανίζεται σε μέταλλα τεχνικής καθαρότητας (άρα και χαμηλότερης σταθερότητας έναντι άλλων μετάλλων που περιέχουν προσμίξεις, ακαθαρσίες, ετερογένειες) όταν οι εμφανιζόμενες ανοδικές και καθοδικές περιοχές είναι διαχωρισμένες τοπικά (**Σχήμα 1.1(c)**).

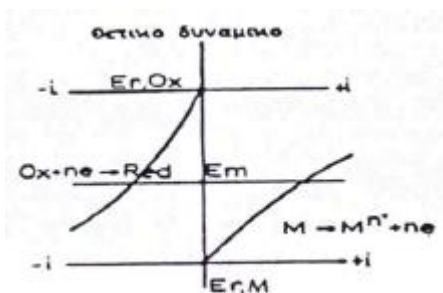
Οι προϋποθέσεις για την πραγματοποίηση μιας διαβρωτικής δράσης βασίζονται στη θεωρία της εντοπισμένης διάβρωσης και στην θεωρία των μικτών δυναμικών<sup>4,7</sup>:

- **Θεωρία της εντοπισμένης διάβρωσης** (ή θεωρία των τοπικών γαλβανικών στοιχείων): Όταν ένα μέταλλο στο οποίο μπορεί να εμφανίζονται περιοχές διαφορετικής κατάστασης ως συνέπεια πιθανών προσμίξεων, ακαθαρσιών και ετερογενειών, βυθιστεί σε έναν ηλεκτρολύτη οποιασδήποτε φύσης δημιουργούνται εσωτερικά (μέσα από τη μάζα του μετάλλου) βραχυκυκλωμένα γαλβανικά μικρο-ή μακροστοιχεία τα οποία αποτελούν την αιτία εμφάνισης της διάβρωσης. Αν οι προσμίξεις έχουν πρότυπο δυναμικό καθοδικότερο από το κυρίως μέταλλο, για παράδειγμα Cu πάνω σε Fe, θα αποτελέσουν τον θετικό πόλο του γαλβανικού στοιχείου όπου θα συμβεί αναγωγή, ενώ το κυρίως μέταλλο θα διαβρωθεί τοπικά. Στην εντοπισμένη διάβρωση οι ταυτόχρονες ηλεκτροχημικές δράσεις (που συμβαίνουν στο ίδιο ηλεκτρόδιο) είναι ανταγωνιστικές και αυτό συνεπάγεται ότι για τις μερικές πυκνότητες ρεύματος ισχύει:

$$i = i_1 \cdot S_1 / S + i_2 \cdot S_2 / S \quad [1.4]$$

- **Θεωρία των μικτών δυναμικών:** Αναγκαία και ικανή συνθήκη για την εμφάνιση της διάβρωσης είναι το να συμβαίνουν ταυτόχρονα στην διεπιφάνεια μετάλλου-περιβάλλοντος δύο διαφορετικές ηλεκτροδιακές δράσεις μεταφοράς φορτίου αντίθετης πολικότητας. Για να συμβούν ταυτόχρονα οι δύο αυτές δράσεις πρέπει απαραίτητα να εμφανίζεται διαφορά δυναμικού κατά μήκος της διεπιφάνειας (η οποία περιλαμβάνει λήπτες ηλεκτρονίων που περιέχονται στο διάλυμα),  $E_m$ , σχετικά πιο θετική από το δυναμικό ισορροπίας της δράσης της οξείδωσης και σχετικά πιο αρνητική από το δυναμικό ισορροπίας της δράσης της αναγωγής (**Σχήμα 1.2**).



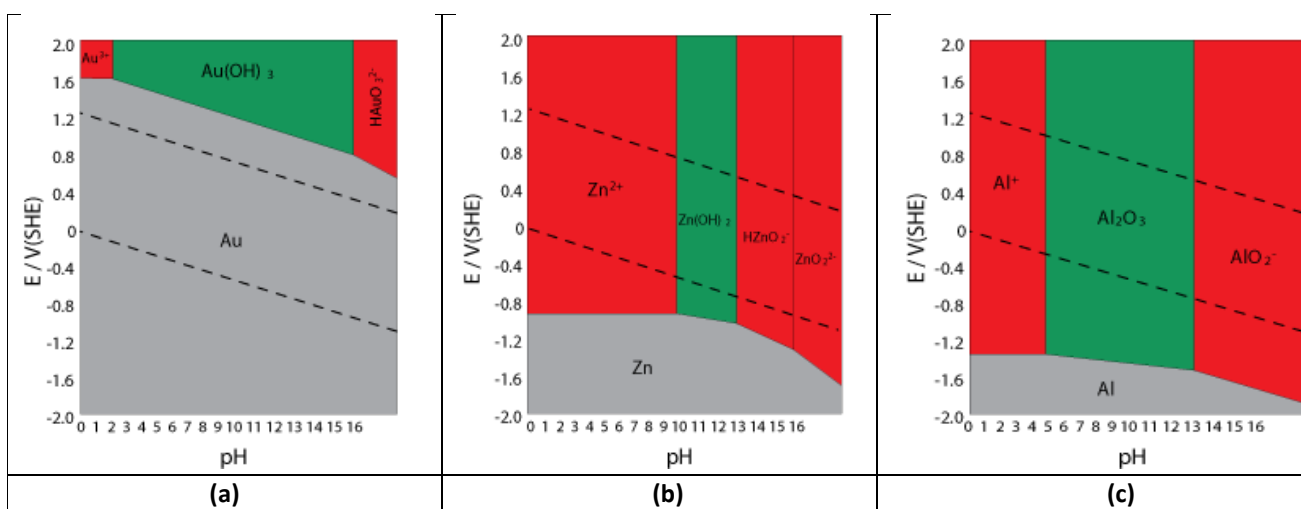


Σχήμα 1.2: Σχετική θέση ηλεκτροδιακών δυναμικών ισορροπίας σε συνθήκες διάβρωσης<sup>4</sup>

### 1.3.3 Διαγράμματα Pourbaix

Ο Marcel Pourbaix ανέπτυξε μια μοναδική αλλά και ακριβή μέθοδο για να συνοψίσει τις πληροφορίες της θερμοδυναμικής της διάβρωσης για ένα δεδομένο μέταλλο σε ένα πολύ χρήσιμο διάγραμμα δυναμικού-pH. Τα διαγράμματα αυτά υποδεικνύουν συγκεκριμένες περιοχές δυναμικού και pH κάτω από τις οποίες το μέταλλο θα διαβρωθεί και άλλες περιοχές δυναμικού και pH όπου αυτό προστατεύεται από τη διάβρωση. Τα διαγράμματα του δυναμικού σε συνάρτηση με το pH ονομάζονται συνήθως διαγράμματα Pourbaix ή και διαγράμματα ισορροπίας γιατί παρουσιάζουν τις περιοχές όπου το μέταλλο βρίσκεται σε ισορροπία με το περιβάλλον του. Διαγράμματα Pourbaix διατίθενται για πάνω από 70 διαφορετικά μέταλλα<sup>15</sup>. Στο Σχήμα 1.3 φαίνονται τα διαγράμματα Pourbaix για το χρυσό, τον ψευδάργυρο και το αλουμίνιο.

Η κύρια χρησιμότητα αυτών των διαγραμμάτων είναι να προβλέπεται η αυθόρμητη κατεύθυνση των αντιδράσεων, να υπολογίζεται η σύνθεση των προϊόντων διαβρώσεως και να προβλέπεται και να δείχνεται σε ποιες συνθήκες δυναμικού και pH το μέταλλο διαβρώνεται ή δεν διαβρώνεται και δημιουργούνται στην επιφάνεια του συγκεκριμένα οξείδια. Το κύριο μειονέκτημα αυτών των διαγραμμάτων είναι ότι αναφέρονται σε καταστάσεις ισορροπίας και έτσι δεν είναι δυνατόν να δώσουν πληροφορίες για την ταχύτητα των αντιδράσεων<sup>12</sup>.



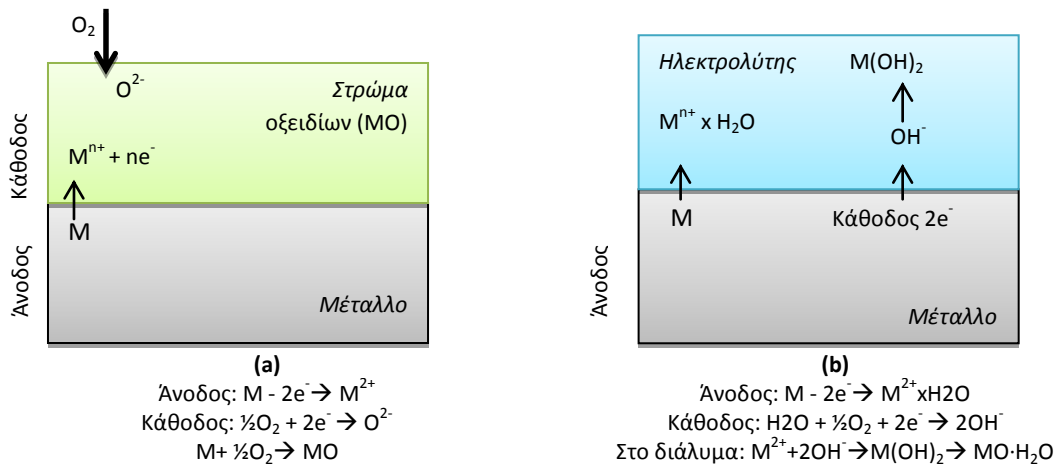
Σχήμα 1.3: Διαγράμματα Pourbaix για: (a) το χρυσό, (b) τον ψευδάργυρο, (c) το αλουμίνιο<sup>16</sup>. Οι γκρι περιοχές δηλώνουν την σταθερή περιοχή του μετάλλου, οι κόκκινες την περιοχή όπου λαμβάνει χώρα η διάβρωση και οι πράσινες ζώνες την παθητική περιοχή



### 1.4 Κινητική της Διάβρωσης

Ανάλογα με το διαβρωτικό περιβάλλον, η διάβρωση διακρίνεται σε:

- **Ξηρή ή χημική διάβρωση**, κατά την οποία το υλικό εκτίθεται, απουσία νερού ή υδατικού περιβάλλοντος, σε οξειδωτικό αέριο (πχ. οξυγόνο, αλογόνα, ατμοί θείου κ.λπ.) σε θερμοκρασία δωματίου ή συνηθέστερα σε υψηλότερες θερμοκρασίες (Σχήμα 1.4(a)).
- **Υγρή ή ηλεκτροχημική διάβρωση**, κατά την οποία το υλικό εκτίθεται σε υγρό περιβάλλον (π.χ. υγρασία, υδατικά διαλύματα, κ.λπ.) (Σχήμα 1.4(b))



Σχήμα 1.4: Σχηματική απεικόνιση διαδικασιών (α) ξηρής διάβρωσης, (β) υγρής διάβρωσης ενός μετάλλου

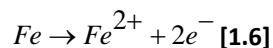
#### 1.4.1 Ηλεκτροχημική ή Υγρή διάβρωση

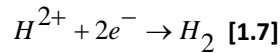
Ο όρος «υγρή» περιλαμβάνει όλες τις δράσεις στο μηχανισμό των οποίων υπεισέρχεται υγρό περιβάλλον (π.χ. υγρασία, υδατικά διαλύματα, έδαφος). Τα φαινόμενα υπέρτασης συνδέονται με συστήματα όπου δύο ή περισσότερες ηλεκτροχημικές δράσεις συμβαίνουν ταυτόχρονα στο ίδιο ηλεκτρόδιο. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά σαν διπλά ή πολλαπλά ή μικτά ηλεκτρόδια. Στην απλούστερη περίπτωση οι ηλεκτροχημικές δράσεις (ανοδική-οξείδωση και καθοδική-αναγωγή) είναι μη ανταγωνιστικές, δηλαδή μπορούν να συμβούν ταυτόχρονα και ανεξάρτητα η μία από την άλλη σε όλα τα σημεία της επιφάνειας του ηλεκτροδίου. Τότε, η συνολική πυκνότητα ρεύματος  $i$ , που διατρέχει το ηλεκτρόδιο ισούται με το άθροισμα των μερικών πυκνοτήτων ρεύματος  $i_{ox}$  και  $i_{red}$  που αντιστοιχούν στην ανοδική και καθοδική δράση αντίστοιχα.

$$i = i_{ox} + i_{red} \quad [1.5]$$

Αν το σύστημα δεν διαρρέεται από ρεύμα αποκτά το **δυναμικό ανοικτού κυκλώματος ή δυναμικό διάβρωσης**  $E_{corr}$  και είναι το δυναμικό που το μέταλλο αποκτά αυθόρμητα όταν εκτεθεί στο διαβρωτικό περιβάλλον. Το δυναμικό αυτό προσδιορίζεται από την συνθήκη ότι το ανοδικό ρεύμα,  $i_{ox}$ , και το καθοδικό ρεύμα,  $i_{red}$ , είναι ίσα και αντίθετα (ομοιόμορφη διάβρωση), δηλαδή  $i_{ox} = -i_{red}$ .

Για τον προσδιορισμό του δυναμικού και ρεύματος διάβρωσης θα εξεταστεί ως παράδειγμα η συμπεριφορά του σιδήρου σε ένα διάλυμα αραιού υδροχλωρικού οξέος. Σύμφωνα με την θεωρία των μικτών δυναμικών θα λάβουν χώρα οι δράσεις:





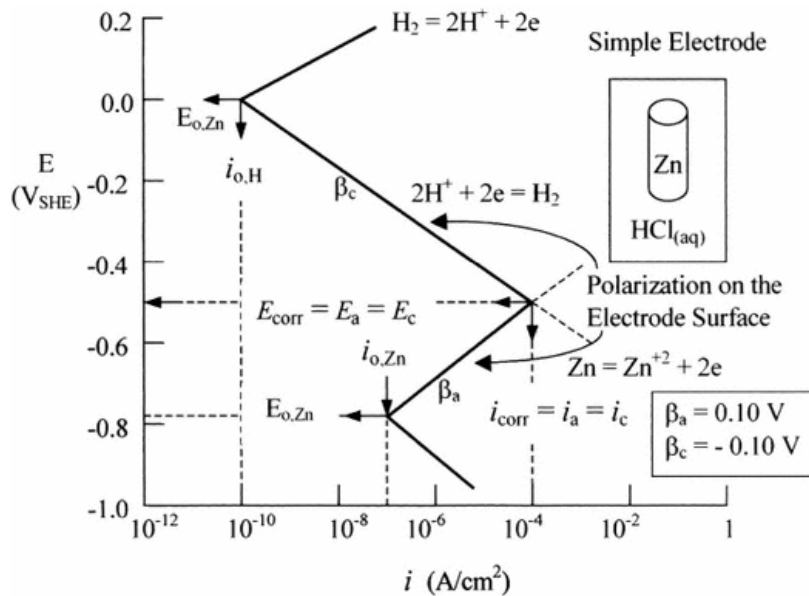
Κάνουμε την παραδοχή ότι οι δύο δράσεις δεν είναι ανταγωνιστικές και ότι η ταχύτητα τους ελέγχεται από μεταφορά φορτίου. Τότε ισχύει η εξίσωση Butler-Volmer για κάθε μια από τις δύο δράσεις:

$$i_{Fe} = i_{0,Fe} \exp\left(\frac{n_{Fe}}{\beta_{a,Fe}}\right) - i_{0,Fe} \exp\left(-\frac{n_{Fe}}{\beta_{c,Fe}}\right) = i_{a,Fe} + i_{c,Fe} \quad [1.8]$$

$$i_H = i_{0,H} \exp\left(\frac{n_H}{\beta_{a,H}}\right) - i_{0,H} \exp\left(-\frac{n_H}{\beta_{c,H}}\right) = i_{a,H} + i_{c,H} \quad [1.9]$$

**Όπου:**  $i_{0,Fe}$ ,  $i_{0,H}$  οι πυκνότητες ρεύματος ανταλλαγής για τις παραπάνω δράσεις αντίστοιχα,  $(1/\beta_a) = \alpha n F / RT$  και  $(1/\beta_c) = \beta n RT$  με  $\alpha, \beta$  συντελεστές μεταφοράς και  $\eta_{Fe} = E - E_{r,Fe}$ ,  $\eta_H = E - E_{r,H}$ .

Οι καμπύλες πυκνότητας ρεύματος-δυναμικού για κάθε μια από τις παραπάνω δράσεις παρουσιάζονται στο **Σχήμα 1.5** για την περίπτωση του ψευδαργύρου. Τα διαγράμματα αυτού του τύπου ονομάζονται «**διαγράμματα διάβρωσης**» ή «**διαγράμματα Evans**». Κάθε δράση έχει ένα δυναμικό ισορροπίας ( $E_{Zn/Zn^{+2}}$  και  $E_{H_2/H^+}$ ) και ένα αντίστοιχο ρεύμα ισορροπίας ( $i_{0,Zn/Zn^{+2}}$  και  $i_{0,H_2/H^+}$ ). Όταν το μέταλλο βυθιστεί στο διάλυμα θα αποκτήσει αυθόρμητα δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος ή δυναμικό διάβρωσης  $E_{corr}$  ή μικτό δυναμικό. Το δυναμικό αυτό διάβρωσης διαφέρει από το δυναμικό ισορροπίας του μετάλλου αφού πρόκειται για κινητική και όχι για θερμοδυναμική ποσότητα. Το σημείο τομής της ανοδικής καμπύλης με την καθοδική μας δίνει το  $E_{corr}$ . Το σημείο αυτό είναι το μόνο σημείο του συστήματος που η συνολική ταχύτητα οξειδωσης είναι ίση με τη συνολική ταχύτητα αναγωγής<sup>17</sup>.



**Σχήμα 1.5:** Σχηματική παράσταση της ηλεκτροδιακής κινητικής συμπεριφοράς Zn σε διάλυμα HCl<sup>18</sup>

Από τα παραπάνω, για το παράδειγμα του σιδήρου, φαίνεται ότι όταν το δυναμικό του συστήματος ισούται με το δυναμικό διάβρωσης, για το εξωτερικό ρεύμα ισχύει η σχέση:

$$i = i_{Fe} + i_H = 0 \quad [1.10]$$

Θεωρώντας ότι μπορούμε να αγνοήσουμε το ανοδικό ρεύμα της αναγωγής του υδρογόνου και το καθοδικό ρεύμα της οξειδωσης του σιδήρου, τότε έχουμε:

$$i = i_{a,Fe} + i_{c,H} = 0 \quad [1.11]$$

και για  $E = E_{corr}$  έχουμε:

$$i_{a,Fe} + i_{c,H} = 0 \quad [1.12]$$

$$i_{a,Fe} = -i_{c,H} = i_{corr} \quad [1.13]$$

Συνεπώς στο δυναμικό διάβρωσης αντιστοιχεί η πυκνότητα ρεύματος  $i_{corr}$  που ονομάζεται πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης, η οποία δίνει την ταχύτητα διάλυσης ενός μετάλλου και εξαρτάται από κινητικές παραμέτρους. Από τις σχέσεις (1.1,1.2,1.6) προκύπτει η σχέση:

$$i_{corr} = i_{0,Fe} \exp\left(\frac{E_{corr} - E_{r,Fe}}{\beta_{a,Fe}}\right) = i_{0,H} \exp\left(-\frac{E_{corr} - E_{r,H}}{\beta_{c,H}}\right) \quad [1.14]$$

Και από τις [1.8, 1.9, 1.14] προκύπτει η σχέση:

$$i = i_{0,Fe} \exp\left(\frac{E - E_{r,Fe}}{\beta_{a,Fe}}\right) = i_{0,H} \exp\left(-\frac{E - E_{r,H}}{\beta_{c,H}}\right) \quad [1.15]$$

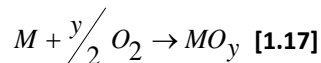
Και από τις [1.13, 1.14, 1.15] προκύπτει τελικά ότι:

$$i = i_{corr} \exp\left(\frac{\xi}{\beta_{a,Fe}}\right) = i_{corr} \exp\left(-\frac{\xi}{\beta_{c,H}}\right) \quad [1.16]$$

Η σχέση αυτή είναι γνωστή και ως **εξίσωση Butler-Volmer για μικτό ηλεκτρόδιο**, όπου το  $E - E_{corr} = \xi$  αναφέρεται ως «πόλωση» στην περίπτωση της διάβρωσης.

#### 1.4.2 Ξηρή Διάβρωση

Η ξηρή διάβρωση συμβαίνει απουσία υδατικού περιβάλλοντος και αναφέρεται στην περίπτωση έκθεσης ενός μετάλλου σε ένα οξειδωτικό αέριο σε θερμοκρασία δωματίου ή σε υψηλές θερμοκρασίες, που μπορεί να οδηγήσει σε σχηματισμό μεταλλικών οξειδίων σύμφωνα με τις δράσεις:



Το στρώμα του οξειδίου μπορεί να είναι προστατευτικό ή μη. Στα περισσότερα συστήματα τα στερεά προϊόντα διάβρωσης (π.χ. μεταλλικά οξείδια) φτιάχνουν είτε ένα λεπτό στρώμα (φιλμ), είτε ένα φλοιό ή απλώς μια επιφανειακή αμαύρωση. Αν το στρώμα του οξειδίου είναι προστατευτικό, η ταχύτητα διάβρωσης θα ελαττωθεί σε βαθμό που εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα του στρώματος να δρα σαν φράγμα συνέχισης της ανοδικής δράσης. Αυτό συμβαίνει όταν το οξείδιο δεν είναι πορώδες, δεν εμφανίζει ρωγμές ή αποκολλήσεις, έχει καλή συνάφεια με το υπόστρωμα, προστατεύει σε υψηλές θερμοκρασίες, έχει συντελεστή διαστολής παραπλήσιο με αυτόν του μετάλλου, μικρή τάση ατμών και ανάπτυξη μικρών τιμών τάσεων λόγω μεταβολών μεταξύ του όγκου του μετάλλου και του στρώματος. Προστατευτικό είναι το στρώμα οξειδίου που έχει μικρούς συντελεστές διάχυσης ιόντων και ηλεκτρονίων. Κατά την οξείδωση των μετάλλων μεταλλικά ιόντα σχηματίζονται στη διεπιφάνεια μετάλλου-οξειδίου και το οξυγόνο ανάγεται σε ιόντα οξυγόνου στη διεπιφάνεια

οξειδίου-αερίου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη προς την υδατική ηλεκτροχημική διάβρωση<sup>[4,10]</sup>.

### 1.5 Ταχύτητα Διάβρωσης

Η ταχύτητα της διάβρωσης προκύπτει από τη ταχύτητα του βραδύτερου ενδιάμεσου σταδίου του συνολικού μηχανισμού διάβρωσης. Ειδικότερα, η ταχύτητα της επιφανειακής διάβρωσης ενός μεταλλικού αντικειμένου που διαβρώνεται ομοιόμορφα, μπορεί να εκφραστεί με έναν από τους ακόλουθους δύο τρόπους<sup>19</sup>:

- Η ταχύτητα της διάβρωσης  $r_1$  δίνεται από τη μεταβολή του πάχους  $dh$  του διαβρωμένου τμήματος προς το χρόνο στον οποίο αυτή επιτυγχάνεται, δηλαδή

$$r_1 = \frac{dh}{dt} \quad [1.20]$$

- Η ταχύτητα της διάβρωσης  $r_2$  δίνεται από το λόγο της μάζας του διαβρωμένου μεταλλικού αντικειμένου προς το χρονικό διάστημα:  $r_2 = \frac{dm}{dt}$  [1.21]

Για μικρά πάχη ομοιόμορφα διαβρωμένου μεταλλικού αντικειμένου ισχύει κατά προσέγγιση:

$$m = p \cdot S \cdot h \quad [1.22]$$

Όπου  $m$  η μάζα του μεταλλικού αντικειμένου μετάλλου,  $p$  η πυκνότητα,  $S$  η επιφάνεια διάβρωσης και  $h$  το πάχος του διαβρωμένου τμήματος του μετάλλου.

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$r_2 = \frac{dm}{dt} \Rightarrow r_2 = p \cdot S \cdot \frac{dh}{dt} \Rightarrow r_2 = p \cdot S \cdot r_1 \quad [1.23]$$

Έχοντας υπόψη την παραπάνω σχέση η ταχύτητα της διάβρωσης δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{dy}{dt} \quad [1.24]$$

Όπου  $r$  η ταχύτητα διάβρωσης του μεταλλικού αντικειμένου,  $dy$  η μεταβολή της μάζας ή του πάχους του μεταλλικού αντικειμένου και  $dt$  το χρονικό διάστημα.

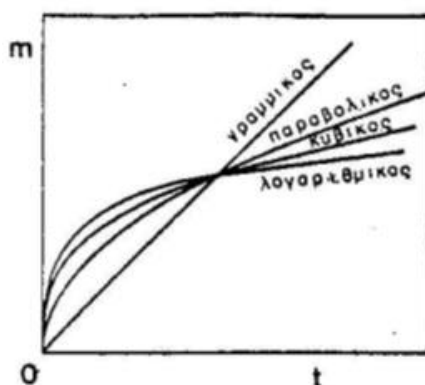
Δεν υπάρχει ένας γενικός νόμος που να δίνει την ταχύτητα της διάβρωσης όλων των μετάλλων συναρτήσει του χρόνου. Σε μερικές περιπτώσεις η ταχύτητα διάβρωσης παραμένει σταθερή ενώ σε άλλες μειώνεται και σε άλλες αυξάνεται συναρτήσει του χρόνου. Εάν είναι γνωστή η ταχύτητα  $r(t)$  της διάβρωσης ενός υλικού συναρτήσει του χρόνου, τότε από την τελευταία σχέση προκύπτει ότι:

$$dy = r(t) \cdot dt \quad [1.25]$$

Η οποία με ολοκλήρωση από 0 έως  $y$  και για χρόνο 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 το χρόνο έναρξης μέχρι τη χρονική στιγμή  $t$ . Αντίστροφα, αν είναι γνωστή η σχέση  $y=y(t)$ , τότε προσδιορίζεται η ταχύτητα της διάβρωσης από τη σχέση [2.24]. Η μορφή του μαθηματικού μοντέλου  $y=y(t)$  εξαρτάται από τη φύση του μετάλλου και από τα χαρακτηριστικά του διαβρωτικού περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται. Οι περισσότεροι γνωστές μορφές του παραπάνω μαθηματικού μοντέλου είναι:

- **Παραβολικό μοντέλο Wagner:** ισχύει σε σημαντικό αριθμό φαινομένων διάβρωσης και έχει τη μορφή  $y^2=kt$ , όπου  $K$  είναι μια εμπειρική σταθερά που προκύπτει από τη σταθερά της ταχύτητας του βραδύτερου σταδίου του συνολικού μηχανισμού διάβρωσης και εξαρτάται από τις διαφορές μεταβλητές του φαινομένου.
- **Γραμμικό μοντέλο:** ισχύει για τη διάβρωση μεταλλικών αντικειμένων με μεγάλη επιφανειακή τάση και έχει τη μορφή:  $y=kt$ .
- **Εκθετικό μοντέλο:** ισχύει σε περιπτώσεις διάβρωσης μεταλλικών αντικειμένων από υγρά (π.χ. διαλύματα οξέων) και περιγράφεται από την εξίσωση της μορφής:  $y=e^{k \cdot t}$

Η ταχύτητα της διαβρωτικής διαδικασίας είναι πολύ σημαντική παράμετρος τεχνολογικά για ένα μεταλλικό υλικό. Στο **Σχήμα 1.6** δίνονται οι 4 νόμοι της ταχύτητας οξείδωσης, δηλαδή (α) ο γραμμικός (β) ο παραβολικός, (γ) ο λογαριθμικός και (δ) ο κυβικός, σε διάγραμμα αύξησης βάρους στη μονάδα της επιφάνειας.



**Σχήμα 1.6:** Οι νόμοι της ταχύτητας οξείδωσης<sup>[4]</sup>

Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι η γραμμική ταχύτητα οξείδωσης είναι η λιγότερο επιθυμητή αφού η μάζα του οξειδίου που σχηματίζεται αυξάνει με σταθερή ταχύτητα με το χρόνο. Οι παραβολικές και λογαριθμικές ταχύτητες οξείδωσης είναι περισσότερο επιθυμητές για κράματα που χρησιμοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες σε οξειδωτικό περιβάλλον. Τα μέταλλα που οξειδώνονται λογαριθμικά (ή σύμφωνα με τον αντίστροφο λογαριθμικό νόμο) φθάνουν σε ένα (φαινομενικό) οριακό πάχος στρώματος (π.χ. αλουμίνιο στη θερμοκρασία περιβάλλοντος) και η ανάπτυξη του στρώματος αυτού σταματάει μετά από σύντομη έκθεση οπότε το υλικό κατέχει αυξημένη αντίσταση σε ατμοσφαιρική οξείδωση<sup>[4]</sup>.

Έχει καθιερωθεί η ταχύτητα διάβρωσης (corrosion rate) να εκφράζεται σε mils/έτος (mpy). Η ταχύτητα διάβρωσης των πιο χρήσιμων στην πράξη υλικών κυμαίνεται από 1 έως και 200mpy (ισχύει ότι 1mpy = 0,0254mm/yr). Ταχύτητες διάβρωσης που έχουν προσδιοριστεί με γραμμική πόλωση και άλλες ηλεκτροχημικές τεχνικές εκφράζονται ως συνάρτηση της πυκνότητας ρεύματος και μπορούν να μετατραπούν σε ταχύτητες διείδυσης με την εξής σχέση που βασίζεται στο νόμο του Faraday:

$$\text{Ταχύτητα διείδυσης από διάβρωση} = \frac{K \cdot AB \cdot i}{N \cdot d} \quad [1.26]$$

Όπου:  $AB$  το ατομικό βάρος του μετάλλου,  $i$  η πυκνότητα ρεύματος [ $\mu \text{ A/cm}^2$ ],  $n$  ο αριθμός των ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων,  $D$  η πυκνότητα [ $\text{gr/cm}^3$ ],  $K$  σταθερά (0,129 για εκφράσεις σε mpy).

Ο **Πίνακας 1.2** που δείχνει τη σύγκριση των τιμών mpy με αντίστοιχες στο μετρικό σύστημα, έχει βασιστεί σε τυπικά σιδηρονικελιούχα κράματα. Για πιο ακριβά κράματα, ταχύτητες μεγαλύτερες από 5-20 mpy θεωρούνται συνήθως υπερβολικές. Για φτηνά υλικά με μεγάλες διατομές (π.χ. σώμα αντλίας από χυτοσίδηρο) ορισμένες φορές είναι αποδεκτές και ταχύτητες μεγαλύτερες από 200 mpy.

**Πίνακας 1.2:** Σύγκριση mpy με αντίστοιχες μετρικές εκφράσεις<sup>4</sup>

Σχετική αντίσταση στη διάβρωση	mpy	mm/y
Εξαιρετική	<1	<0,02
Άριστη	1-5	0,02-0,10
Καλή	5-20	0,10-0,50
Αρκετά καλή	20-50	0,50-1
Ασήμαντη	50-200	1-5
Ανεπιθύμητη	>200	>5

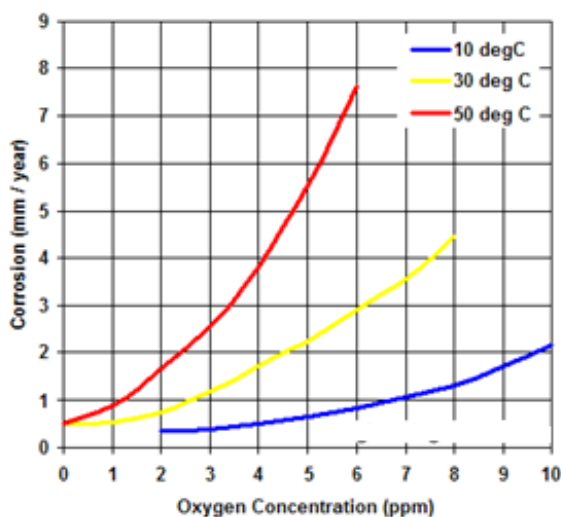
Οι σημαντικότεροι από τους παράγοντες του περιβάλλοντος που επηρεάζουν την ταχύτητα διάβρωσης είναι οι παρακάτω<sup>[10, 20]</sup>:

- **Θερμοκρασία:** Η ταχύτητα διάβρωσης αυξάνει γενικά με την θερμοκρασία σύμφωνα με

την εξίσωση Arrhenius:  $K = A \exp\left(\frac{-\Delta G^\#}{RT}\right)$  [1.27]

**Όπου:**  $\Delta G^\#$  ενέργεια ενεργοποίησης,  $A$  παράγοντας συχνότητας,  $R$  σταθερά αερίων,  $T$  θερμοκρασία

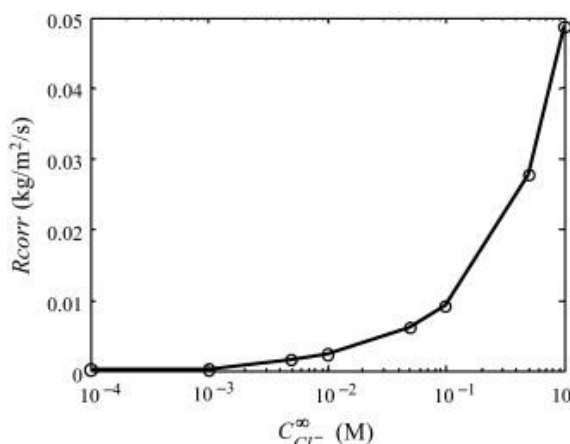
Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ταχύτητα της διάβρωσης εξαρτάται από την επίδραση της στους παράγοντες που επηρεάζουν την διαβρωτική δράση (**Σχήμα 1.7**).



**Σχήμα 1.7:** Επίδραση θερμοκρασίας και περιεκτικότητας σε οξυγόνο στην ταχύτητα διάβρωσης χαλύβων χαμηλής κράματοποίησης μετά από ατμοσφαιρική έκθεση<sup>21</sup>

- **Ενεργή οξύτητα (pH):** Το pH του περιβάλλοντος επηρεάζει την ταχύτητα διάβρωσης γιατί μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά της καθοδικής δράσης (δυναμικό ισορροπίας, πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής) είτε γιατί μεταβάλλει τη διαλυτότητα των μετάλλων ή των προστατευτικών οξειδίων. Γενικά, όσο το pH απομακρύνεται από το ουδέτερο σημείο, αυξάνεται η αγωγιμότητα του διαλύματος που ασκεί αυξητική επίδραση στην ταχύτητα διάβρωσης.

- **Συγκέντρωση:** Η επίδραση της συγκέντρωσης του διαβρωτικού συστατικού εξαρτάται από τον συνδυασμό μετάλλου-περιβάλλοντος. Αν η καθοδική δράση ελέγχεται από τη διάχυση του οξυγόνου, το ρεύμα διάβρωσης ταυτίζεται με το οριακό ρεύμα διάχυσης το οποίο αυξάνεται με την συγκέντρωση του διαβρωτικού περιβάλλοντος (Σχήμα 2.8). Ελάχιστη επίδραση έχει η συγκέντρωση σε υλικά που εμφανίζουν παθητικότητα. Η συγκέντρωση χλωριόντων επιδρά στο ρυθμό διάβρωσης όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.8**.



**Σχήμα 1.8:** Επίδραση της συγκέντρωσης χλωριόντων στο ρυθμό διάβρωσης σε κράμα αλουμινίου μετά από εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl και κάτω από σταθερό δυναμικό  $-550mV^{22}$

- **Ταχύτητα κίνησης του διαβρωτικού περιβάλλοντος:** Η ταχύτητα του διαλύματος αυξάνει την ταχύτητα διάβρωσης μόνο αν το σύστημα ελέγχεται από τη διάχυση, ενώ την αφήνει ανεπηρέαστη αν το σύστημα ελέγχεται από υπέρταση φορτίου. Μπορεί όμως να προκαλέσει διάβρωση εκτριβής λόγω μηχανικής δράσης. Επίσης, ανάλογα με την τιμή της ταχύτητας κίνησης πρέπει να εκτιμάται η αύξηση της παροχής αναστολέων στη μεταλλική επιφάνεια ή η απομάκρυνση συσσωρευμένων ακαθαρσιών.
- **Πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος:** Η πραγματοποίηση πολλών ταυτόχρονων ηλεκτροχημικών δράσεων μπορεί να αυξήσει το ρεύμα διάβρωσης, χωρίς να αποκλείεται και το αντίθετο ανάλογα με το εξεταζόμενο μέταλλο.
- **Επαφή ανόμοιων μετάλλων:** Η επαφή μεταξύ ανόμοιων μετάλλων συχνά οδηγεί σε πολύ αυξημένες ταχύτητες διάβρωσης που μπορούν να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας τη θεωρία των μικτών δυναμικών. Στο πιο ηλεκτραρνητικό από τα δύο μέταλλα αυξάνεται η ταχύτητα διάβρωσης, ενώ στο πιο ευγενές μειώνεται.
- **Ραδιενέργεια:** η έκθεση μετάλλου ή κράματος σε ραδιενέργεια συνεπάγεται τη δημιουργία πρόσθετων αταξιών δομής που καθιστούν το μέταλλο πιο ανοδικό και κατά συνέπεια προκαλούν την ταχύτερη διάβρωση του.
- **Ηχητική ενέργεια:** οι μεγάλες εντάσεις αυξάνουν ελάχιστα την ταχύτητα διάβρωσης, πιθανά επειδή διευκολύνεται ο σχηματισμός φυσαλίδων υδρογόνου ή επηρεάζεται η μορφή και δομή των προϊόντων διάβρωσης.
- **Ύπαρξη τριεπιφάνειας:** Η ύπαρξη τριεπιφάνειας συνεπάγεται την εμφάνιση έντονης και εντοπισμένης διάβρωσης, λόγω αύξησης στην τριεπιφάνεια των δυναμικών γραμμών του ηλεκτροστατικού πεδίου που δημιουργείται, με συνέπεια την τοπική αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης.
- **Ανομοιογένεια της επιφάνειας:** Η ανομοιογένεια της επιφάνειας συνεπάγεται αύξηση της διάβρωσης λόγω δημιουργίας τοπικών γαλβανικών στοιχείων.

- **Πλαστικές παραμορφώσεις:** από μηχανικές ή θερμικές κατεργασίες οδηγούν στη δημιουργία, τοπικά, σημείων περισσότερο ανοδικών με αποτέλεσμα την εμφάνιση τοπικών γαλβανικών στοιχείων που επιταχύνουν την διάβρωση.
- **Μηχανικές τάσεις:** επιταχύνουν την διάβρωση και οδηγούν στην ψαθυρή θραύση της κατασκευής.

### 1.6 Διαβρωτικά Περιβάλλοντα και Μηχανισμός

Σύμφωνα με το 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό Νόμο, όλα τα μέταλλα και τα κράματα, ακόμα και τα ευγενή, υπόκεινται σε διαβρωτικές διαδικασίες. Η ταχύτητα της διάβρωσης, η έντασή της αλλά και η εξάπλωσής της ποικίλλουν ανάλογα με τη φύση του μετάλλου ή του κράματος (δομή, σύσταση) και το είδος του διαβρωτικού περιβάλλοντος, δηλαδή από τους διαβρωτικούς παράγοντες που δρουν μέσα σε αυτό. Το σύστημα διάβρωσης αποτελείται από το υλικό και το διαβρωτικό περιβάλλον (μέσο). Πρακτικά κάθε περιβάλλον είναι διαβρωτικό σε κάποιο βαθμό και η επαφή ή έκθεση του υλικού στο περιβάλλον λειτουργίας του είναι και η αρχή της διάβρωσής του.

Σύμφωνα με τον Ε.Κ.Ω.Σ. 2003<sup>23</sup> τα διαβρωτικά περιβάλλοντα χωρίζονται στις παρακάτω 4 κατηγορίες, όπως φαίνεται στον **Πίνακας 1.3** :

**Πίνακας 1.3:** Κατηγορίες και χαρακτηρισμός περιβάλλοντος<sup>20</sup>

Κατηγορία Περιβάλλοντος	Χαρακτηρισμός περιβάλλοντος	Παραδείγματα
1	Ελάχιστα διαβρωτικό περιβάλλον	-Εσωτερικοί χώροι κτηρίων, κατοικιών ή γραφείων -Χώροι όπου η σχετική υγρασία φτάνει σε υψηλή τιμή για ένα μικρό χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του έτος (π.χ. σχετική υγρασία 80%, για χρονικό διάστημα μικρότερο από 3 μήνες το χρόνο).
2	Μετρίως διαβρωτικό περιβάλλον	-Εσωτερικοί χώροι κτηρίων όπου η σχετική υγρασία είναι υψηλή και όπου υπάρχει κίνδυνος πρόσκαιρης παρουσίας διαβρωτικών ουσιών -Φυσικό νερό (σύνθηες) που ρέει με βραδύτητα (ή είναι στάσιμο) -Εξωτερικοί χώροι κτηρίων, κατοικιών ή γραφείων σε αγροτικές ή αστικές περιοχές με ατμόσφαιρα χωρίς υψηλή περιεκτικότητα σε διαβρωτικές ουσίες
3	Παραθαλάσσιο περιβάλλον.	Παραθαλάσσιες περιοχές (απόσταση από την ακτή $\leq 1\text{Km}$ )
4	Πολύ διαβρωτικό περιβάλλον	Βιομηχανικές ζώνες, ζώνες με υψηλή περιεκτικότητα σε χημικά προϊόντα (αέρια, υγρά, στερεά)

#### 1.6.1 Διάβρωση Μετάλλων στην Ατμόσφαιρα

Ο ατμοσφαιρικός αέρας διακρίνεται ανάλογα με τη σύστασή του σε αγροτικό, αστικό, θαλάσσιο και βιομηχανικό. Οι κύριοι παράγοντες της ατμοσφαιρικής διάβρωσης είναι η περιεκτικότητα σε οξυγόνο, η υγρασία που περιέχεται στην ατμόσφαιρα και το διοξείδιο του άνθρακα. Πρέπει να τονιστεί ότι η διαβρωτική δράση εντείνεται με την ύπαρξη ρυπαντικών ουσιών όπως οξειδίων του θείου και του αζώτου ή άλλων προσμίξεων, όπως του χλωριούχου νατρίου<sup>24</sup>. Οι δράσεις που λαμβάνουν χώρα στο φαινόμενο της ατμοσφαιρικής διάβρωσης ενδεχομένως να είναι ανταγωνιστικές, δηλαδή ενώ οι βροχοπτώσεις, αυξάνουν την υγρασία και κατά συνέπεια την ικανότητα διάβρωσης, μπορεί όμως να αποβούν ευεργετικές όταν διαλύουν και απομακρύνουν μολυσμένα συστατικά. Η κίνηση του αέρα είναι επίσης ένας παράγοντας που επηρεάζει την ατμοσφαιρική διάβρωση. Είναι ευεργετική όταν βοηθά την εξάτμιση της υγρασίας από την επιφάνεια των μετάλλων και βλαβερή όταν προκαλεί διασκορπισμό διαβρωτικών ουσιών, όπως ενώσεις θείου και χλωρίου. Η



ατμοσφαιρική διάβρωση εξαρτάται και από τις συνθήκες που επικρατούν και ειδικότερα από τις κλιματολογικές συνθήκες, δηλαδή αν το κλίμα είναι ξηρό, τροπικό ή πολικό<sup>25</sup>.

Ανάλογα με τα διαβρωτικά συστατικά της η ατμόσφαιρα μπορεί να ταξινομηθεί σε<sup>11</sup>:

- **Ατμόσφαιρα αγροτικών περιοχών**, η οποία είναι η λιγότερο βλαβερή και συνήθως δεν περιέχει χημικές ουσίες αλλά περιέχει οργανικά και ανόργανα στοιχεία. Η διαβρωτική της δράση εξαρτάται κυρίως από την υγρασία, το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα αλλά και την κίνηση του αέρα.
- **Ατμόσφαιρα αστικών περιοχών**. Η ατμόσφαιρα των αστικών περιοχών ομοιάζει με αυτή των αγροτικών αφού η βιομηχανική δραστηριότητα είναι περιορισμένη. Πρόσθετοι ρυπαντές στην κατηγορία αυτή είναι  $SO_x$ ,  $NO_x$  τα οποία προέρχονται από τις εξατμίσεις των αυτοκινήτων και από τις εκπομπές καύσιμων των οικιών.
- **Ατμόσφαιρα βιομηχανικών περιοχών**, η οποία χαρακτηρίζεται ως η πιο διαβρωτική και στην οποία τα διαβρωτικά συστατικά είναι κυρίως το  $H_2S$  και το  $SO_2$
- **Ατμόσφαιρα που υπάρχει κοντά σε θάλασσες**, στην οποία υπάρχουν κυρίως χλωριούχα άλατα που προέρχονται από το θαλασσινό νερό. Θεωρείται ιδιαίτερα διαβρωτικός τύπος ατμόσφαιρας όπου η διαβρωτική διαδικασία καθορίζεται από την φορά των ανέμων και από την απόσταση από τη θάλασσα. Η χρήση αποπαγωγικών αλάτων σε περιοχές χαμηλής θερμοκρασίας προσομοιάζει την θαλάσσια ατμόσφαιρα.

Η διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα, σύμφωνα με το πρότυπο DIN EN ISO 12944-2<sup>26</sup>.

Πίνακας 1.4: Διαβρωτικότητα περιβάλλοντος και απώλεια μάζας σημαντικών μετάλλων<sup>22</sup>

Χαρακτηρισμός διάβρωσης	Απώλεια μάζας μετά τον 1 <sup>ο</sup> χρόνο (μm)		Χαρακτηριστικά περιβάλλοντος	
	Χάλυβας	Ψευδάργυρος	Εξωτερικό	Εσωτερικό
<b>C1: ασήμαντη</b>	≤1,3	≤0,1	-	Κτήρια με μόνωση, σχετική υγρασία έως 60%
<b>C2: χαμηλή</b>	>1,3-25	>0,1-0,7	Ελαφρά μολυσμένη ατμόσφαιρα, ξηρό κλίμα (αγροτικές περιοχές)	Μη μονωμένα κτήρια με συμπύκνωση ατμών, π.χ. γυμναστήρια, αποθήκες
<b>C3: μέτρια</b>	>25-50	>0,7-2,1	Ατμόσφαιρα με μέτρια ρύπανση από $SO_2$ ή μετρίως παραλιακό κλίμα	Δωμάτια με υψηλή σχετική υγρασία και ελάχιστη μόλυνση, π.χ. ζυθοποιείες, γαλακτοκομεία, πλυντήρια
<b>C4: έντονη</b>	>50-80	>2,1-4,2	Ατμόσφαιρα με μέτρια περιεκτικότητα σε άλατα	Χώροι που χρησιμοποιούνται χημικά, όπως πισίνες
<b>C5: πολύ έντονη I</b>	>80-200	>4,2-8,4	Ατμόσφαιρα με υψηλή υγρασία και με επιθετικούς διαβρωτικούς παράγοντες	Κτήρια ή χώροι με σχεδόν μόνιμη συμπύκνωση ατμών και έντονη μόλυνση
<b>C5: πολύ έντονη M</b>	>80-200	>4,2-8,4	Παράκτιες και παραλιακές περιοχές με υψηλή συγκέντρωση αλάτων	-

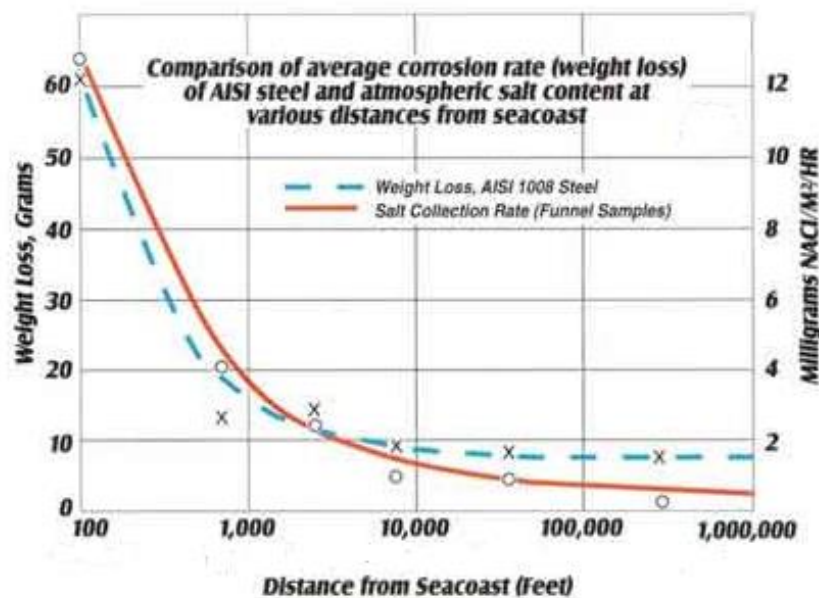
### 1.6.1.1 Μηχανισμός Διάβρωσης στην Ατμόσφαιρα

Σαν ατμοσφαιρική διάβρωση μπορεί να οριστεί η διάβρωση του υλικού όταν αυτή συμβαίνει μετά από έκθεσή του στον ατμοσφαιρικό αέρα και στους ρύπους του και όχι μετά από τη βύθισή του σε ένα υγρό μέσο. Μπορεί να ταξινομηθεί σε: i) υγρή ατμοσφαιρική διάβρωση (wet atmospheric corrosion), ii) ξηρή ατμοσφαιρική διάβρωση (dry atmospheric corrosion)

και iii) ατμοσφαιρική διάβρωση στην οποία απαιτείται παρουσία υδρατμών και ιχών ρύπων (dump atmospheric corrosion)<sup>27</sup>.

Βασικός παράγοντας της ατμοσφαιρικής διάβρωσης είναι η ύπαρξη ενός ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα το ποσοστό της περιεχόμενης σχετικής υγρασίας να είναι αυτό που καθορίζει την έναρξη της διάβρωσης. Για τον χάλυβα το κρίσιμο αυτό ποσοστό ανέρχεται στο 60% - 70% σε ατμόσφαιρα ελεύθερη θεικών, το οποίο ποσοστό όμως ποικίλει ανάλογα με το μέταλλο που διαβρώνεται αλλά και την ύπαρξη ή όχι ρυπαντών στην ατμόσφαιρα<sup>28</sup>.

Έχει βρεθεί ότι παρουσία χλωριόντων στην ατμόσφαιρα η διάβρωση του χάλυβα μπορεί να ξεκινήσει για σχετική υγρασία μικρότερη από 40%<sup>[29]</sup>. Γενικά όταν η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου στην ατμόσφαιρα μειώνεται συναρτήσει της απόστασης από την ακτογραμμή παρατηρείται και μείωση του ρυθμού διάβρωσης του χάλυβα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.9**.

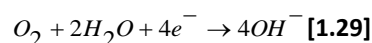
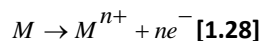


Σχήμα 1.9: Σύγκριση ρυθμού διάβρωσης συναρτήσει της απόστασης από την ακτογραμμή<sup>30</sup>

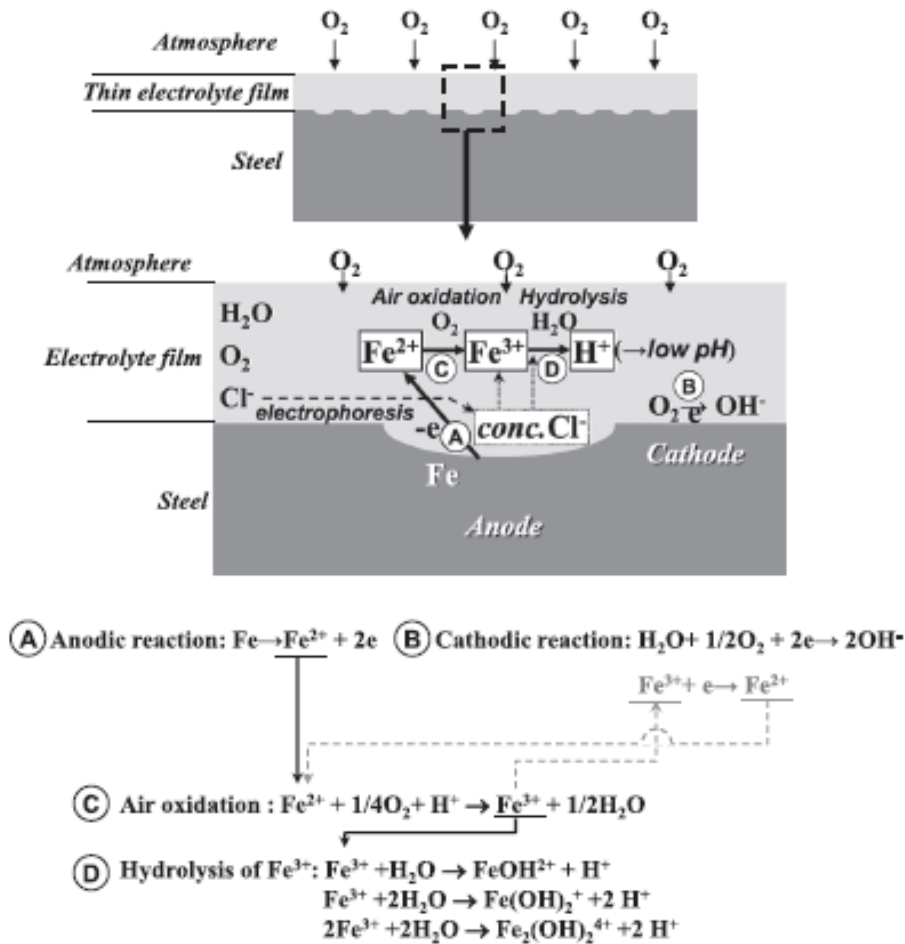
Συνθήκες έκθεσης όπου το σπρέι της θάλασσας διαβρέχει συνεχώς χαλύβδινη επιφάνεια, οδηγούν σε έντονη διάβρωση<sup>25</sup>.

Η ατμοσφαιρική διάβρωση ενός μετάλλου εξελίσσεται μέσω ανοδικών και καθοδικών αντιδράσεων, όπως απεικονίζονται στο **Σχήμα 1.10**. Η άνοδος και η κάθοδος, οι οποίες αποτελούν το κελί της διάβρωσης, διαχωρίζονται από την διαφορά τάσης (*IR drop*) των προϊόντων διάβρωσης.

Η ανοδική και η καθοδική δράση μπορούν αντίστοιχα να περιγραφούν από τις εξισώσεις:



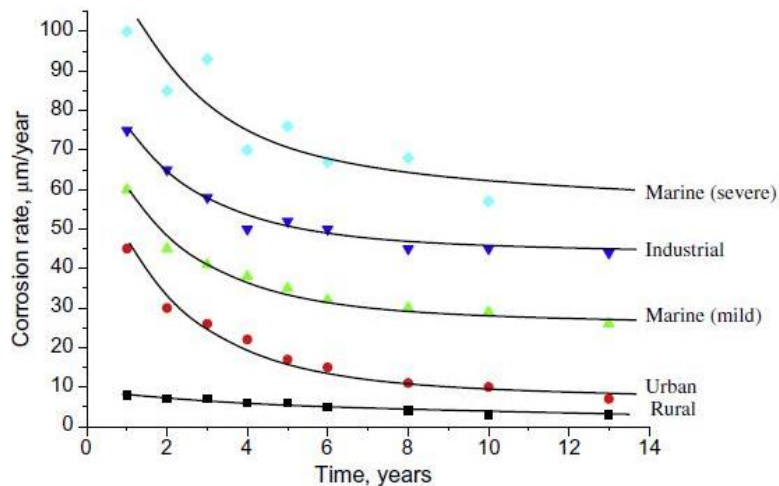
Σε συνθήκες διάβρωσης το οξυγόνο καταναλώνεται μέσω του ηλεκτρολύτη. Το πάχος και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του φιλμ του ηλεκτρολύτη εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το ποσοστό της σχετικής υγρασίας, την ηλιακή ακτινοβολία και τους ατμοσφαιρικούς ρύπους, οι οποίοι ενδέχεται λόγω υγροσκοπικότητας να μειώσουν το ποσοστό υγρασίας της επιφάνειας<sup>31</sup>.



Σχήμα 1.10: Ατμοσφαιρική διάβρωση σιδήρου σε περιβάλλον πλούσιο σε χλωριόντα<sup>32</sup>

### 1.6.1.2 Παράγοντες επίδρασης

Αυτό που ορίζουμε ως ατμόσφαιρα-περιβάλλον ποικίλει σημαντικά ανάλογα με τα ποσοστά υγρασίας, τη θερμοκρασία και τους ρυπαντές με συνέπεια οι ρυθμοί της ατμοσφαιρικής διάβρωσης να ποικίλουν. Στο Σχήμα 1.11 διακρίνεται η επίδραση των ρύπων στην ατμοσφαιρική διάβρωση.



Σχήμα 1.11: Ατμοσφαιρική διάβρωση σε ρυπασμένη και μη ατμόσφαιρα<sup>33</sup>

Αν θεωρηθεί ότι η υγρασία είναι ο ηλεκτρολύτης της ατμοσφαιρικής διάβρωσης λόγω του περιεχόμενου οξυγόνου (περίπου 20%), τότε η θερμοκρασία, ο χρόνος διαβροχής και οι διάφοροι ρυπαντές είναι αυτοί που καθορίζουν τη διαβρωτική δράση.

**a. Θερμοκρασία:** Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ατμοσφαιρική διάβρωση είναι σύνθετο φαινόμενο. Αύξησή της τείνει να διεγείρει την διαβρωτική δράση λόγω αύξηση των διεργασιών διάχυσης και κατά συνέπεια για ένα σταθερό ποσοστό σχετικής υγρασίας η άνοδος της θερμοκρασίας θα οδηγήσει σε ένα αυξημένο ρυθμό διάβρωσης. Ωστόσο, αύξηση της θερμοκρασίας είναι δυνατόν να επιφέρει μείωση της σχετικής υγρασίας και ταχεία εξάτμιση του ηλεκτρολύτη της επιφάνειας και έτσι το ποσοστό της διάβρωσης θα τείνει να μειωθεί, εφόσον ελαττώνεται ο χρόνος διαβροχής.

**b. Χρόνος διαβροχής (TOW):** Ο χρόνος διαβροχής (time of wetness) σε μια επιφάνεια που διαβρώνεται είναι βασική παράμετρος που προσδιορίζει την διάρκεια των ηλεκτροχημικών διαβρωτικών διαδικασιών. Είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη μεταβλητή αφού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλοι οι τρόποι σχηματισμού και εξάτμισης του διαλύματος του επιφανειακού ηλεκτρολύτη. Ο χρόνος διαβροχής αναφέρεται στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο οι ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι ευνοϊκές για το σχηματισμό ενός επιφανειακού στρώματος υγρασίας σε ένα μέταλλο ή κράμα. Αυτό το στρώμα υγρασίας είναι εξαιρετικά σημαντικό για τους χημικούς μηχανισμούς της διάβρωσης. Γενικά έχει χαρακτηριστεί σαν το χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου η σχετική υγρασία είναι πάνω από 80% και η θερμοκρασία είναι πάνω από 0°C. Το μέτρο αυτό μπορεί είτε να καθοριστεί από τα καιρικά δεδομένα είτε να μετρηθεί άμεσα μέσω των διαφόρων μέσων. Ο χρόνος διαβροχής εξαρτάται έντονα από την κρίσιμη σχετική υγρασία. Εκτός από την βασική κρίσιμη υγρασία (που σχετίζεται με καθαρές επιφάνειες), το δευτερογενές ακόμα και το τριτογενές κρίσιμο επίπεδο υγρασίας μπορεί να παρατηρηθεί όπου ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται απότομα. Τα υγροσκοπικά προϊόντα διάβρωσης η τριχοειδής συμπύκνωση της υγρασίας στα προϊόντα διάβρωσης θεωρείται ότι ευθύνονται για αυτά τα αποτελέσματα. Ένας τριχοειδής μηχανισμός συμπύκνωσης μπορεί επίσης να εξηγήσει το σχηματισμό ηλεκτρολυτών στις μικροσκοπικές επιφανειακές ρωγμές και τις συσχετίσεις των μορίων μεταλλικής επιφάνειας και σκόνης. Άλλες πηγές των ηλεκτρολυτών περιλαμβάνουν την χημική συμπύκνωση (από χλωριόντα, θειικά άλατα και ανθρακικά άλατα), τα προσροφημένα μοριακά στρώματα νερού και η άμεση πτώση της υγρασίας (δροσιά, βροχή).

**c. Αερομεταφερόμενα χλωριόντα (airborne chlorides):** Η ατμοσφαιρική αλατότητα αυξάνει ιδιαίτερα τα ποσοστά ατμοσφαιρική διάβρωση. Εκτός από την ενίσχυση του σχηματισμού ηλεκτρολυτών επιφάνειας από την υδρόφιλη δράση, η άμεση συμμετοχή των ιόντων χλωρίου στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις διάβρωσης είναι αρκετά πιθανή. Σε σιδηρούχα κράματα, τα σύμπλοκα χλωριόντων-σιδήρου τείνουν να είναι ασταθή (διαλυτά), με αποτέλεσμα την περαιτέρω διαβρωτική προσβολή. Μέταλλα όπως ο ψευδάργυρος και ο χαλκός, των οποίων τα χλωριούχα άλατα τείνουν να είναι λιγότερο διαλυτά από ό,τι εκείνα του σιδήρου, εμφανίζουν γενικά χαμηλότερες ποσοστά διάβρωσης προκαλούμενα από τα χλωριόντα. Η έναρξη και η διάδοση της τοπικής διάβρωσης υπό την επιρροή των ιόντων χλωρίου είναι ιδιαίτερα σημαντικές, με χαρακτηριστικά παραδείγματα κράματα όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας, κράματα αλουμινίου ή τιτανίου. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 9223:2012<sup>34</sup> τα αερομεταφερόμενα χλωριόντα πρέπει να μετρώνται ως ένας ετήσιος μέσος όρος αφού η ποσότητά τους ποικίλλει ανάλογα με τον καιρό.

**d. Διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ) – όξινη βροχή:** Το διοξείδιο του θείου είναι προϊόν της καύσης του θείου που περιέχουν τα ορυκτά καύσιμα και διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο στην ατμοσφαιρική διάβρωση σε αστικά και βιομηχανικά περιβάλλοντα. Μπορεί να προσρροφηθεί σε μεταλλικές επιφάνειες, έχει υψηλή διαλυτότητα σε νερό και τείνει να σχηματίζει θειικό οξύ (όξινη βροχή) παρουσία των υγρασίας. Τα θειικά ιόντα που σχηματίζονται στο στρώμα της επιφανειακής υγρασίας από την οξείδωση του διοξειδίου του θείου θεωρούνται ότι είναι η κύρια αιτία της επιταχυνόμενης διάβρωσης από το διοξείδιο του θείου. Η αύξηση της οξύτητας του ηλεκτρολύτη θα μπορούσε επίσης να οδηγήσει στην επιταχυνόμενη διάβρωση αλλά αυτή η δράση είναι πιθανό να είναι δευτερεύουσας σημασίας λόγω των ρυθμιστικών ιδιοτήτων των προϊόντων διάβρωσης του υδροξειδίου. Η συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου μπορεί να εκφραστεί είτε ως ποσοστό απόθεσης, είτε ως μια συγκέντρωση ουσίας μεταφερόμενης από τον αέρα. Σε οποιαδήποτε περίπτωση πρέπει να ακολουθηθεί το πρότυπο ISO 9225:2012<sup>35</sup>. Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται για τις κατηγορίες διοξειδίου του θείου στο ISO 9223:2012<sup>[30]</sup>, είναι ως ποσοστό απόθεσης θειικού άλατος επί  $mg\ m^{-2}$  /ημέρα.

**e. Ατμοσφαιρικοί μολυσματικοί παράγοντες:** Ατμοσφαιρικοί μολυσματικοί παράγοντες όπως το υδρόθειο, το υδροχλώριο και το χλώριο όταν βρίσκονται στην ατμόσφαιρα μπορούν να εντείνουν την ατμοσφαιρική διάβρωση αλλά αντιπροσωπεύουν τις ειδικές περιπτώσεις διάβρωσης που απαντώνται σε βιομηχανικές περιοχές συγκεκριμένου κλίματος. Το υδρόθειο θεωρείται ιδιαίτερα διαβρωτικός παράγοντας στα περισσότερα μέταλλα και κράματα και το χλώριο καθώς και το υδροχλώριο παρουσία υγρασίας τείνουν να είναι περισσότερο διαβρωτικά από τα ανιόντα των χλωριούχων αλάτων λόγω του όξινου χαρακτήρα τους. Οι ενώσεις αζώτου της μορφής  $NO_x$  τείνουν επίσης να επιταχύνουν την ατμοσφαιρική διάβρωση αλλά δεδομένου ότι τα μετρούμενα ποσοστά απόθεσής τους είναι γενικά χαμηλότερα από ότι για το  $SO_2$ , δίνεται μικρότερη σημασία στην επίδρασή τους. Η απόθεση στερεού υλικού από την ατμόσφαιρα μπορεί να έχει μια σημαντική επίδραση στα ποσοστά διάβρωσης, ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια. Η υποκίνηση της διάβρωσης μπορεί να οφείλεται σε:

- Μείωση των κρίσιμων επιπέδων υγρασίας από την υδρόφιλη δράση
- Παροχή ανιόντων που προκαλούν τη διάλυση των μετάλλων
- Μικρο-γαλβανικές επιπτώσεις από τις αποθέσεις είναι πιο ευγενείς από το μέταλλο που διαβρώνεται

### 1.6.2 Διάβρωση Μετάλλων στο Έδαφος

Η διάβρωση των μετάλλων στο έδαφος είναι ένα σύνθετο φαινόμενο με πλήθος εμπλεκόμενων μεταβλητών. Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα δεν είναι πλήρως αποσαφηνισμένες και το φαινόμενο της διάβρωσης στο έδαφος δεν έχει κατανοηθεί σε βάθος με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η πρόβλεψη της κάθε περίπτωσης. Κάθε μέταλλο διαβρώνεται με διαφορετικό τρόπο κάτω από το έδαφος και η εξέλιξη του φαινομένου καθορίζεται από τις ιδιότητές του υλικού καθώς και από το περιβάλλον.



Σχήμα 1.12: Υπόγειος μεταλλικός σωλήνας νερού<sup>36</sup>

Η συμπεριφορά του χάλυβα όταν εκτίθεται κάτω από το έδαφος εξαρτάται κυρίως από το είδος του εδάφους αλλά και από άλλους περιβαλλοντολογικούς παράγοντες, όπως η υγρασία και το οξυγόνο. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να οδηγήσουν σε έντονες διακυμάνσεις όσον αναφορά την διαβρωτική δράση. Για παράδειγμα, κάτω από τις χείριστες συνθήκες ένα θαμμένο σκάφος μπορεί να διατηρηθεί σε λιγότερο από ένα έτος, ενώ ανασκαφές σε άγονες περιοχές έχουν αποκαλύψει σιδερένια εργαλεία εκατοντάδων ετών.

Μερικοί γενικοί κανόνες μπορούν να διατυπωθούν για τη διαβρωτική ικανότητα διαφόρων εδαφών. Εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, υψηλή οξύτητα και υψηλή περιεκτικότητα διαλυμένων αλάτων θα είναι πιο διαβρωτικά. Η προσθήκη μικρού ποσοστού άλλων στοιχείων στα κράματα μπορεί να θεωρηθεί ευνοϊκή, π.χ. η προσθήκη 1%Cu και 2,5% Ni, φαίνεται να βοηθά στην αντίσταση της διάβρωσης στο έδαφος δοκιμίων χάλυβα.

#### 1.6.2.1 Παράγοντες επίδρασης

Πλήθος παραγόντων έχει εντοπιστεί ότι επηρεάζει τη διάβρωση των μετάλλων όταν βρίσκονται κάτω από το έδαφος, οι σημαντικότεροι των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω<sup>37</sup>.

**a. Νερό:** Σε υγρή μορφή το νερό αποτελεί τον απαραίτητο ηλεκτρολύτη για την διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων της διάβρωσης. Διάκριση γίνεται ανάμεσα σε κορεσμένο και μη κορεσμένο νερό. Το δεύτερο αντιπροσωπεύει την ροή του νερού από υγρές σε ξηρές περιοχές, ενώ η ροή κορεσμένου νερού εξαρτάται από το μέγεθος και συνεισφορά των πόρων, την υφή, το υλικό και από την ύπαρξη οργανικού υλικού.

**b. Βαθμός αερισμού:** Η περιεκτικότητα σε οξυγόνο μειώνεται με αύξηση του βάθους στο έδαφος. Σε ουδέτερα ή αλκαλικά εδάφη η συγκέντρωση του οξυγόνου επηρεάζει σημαντικά την ταχύτητα διάβρωσης καθώς το οξυγόνο συμμετέχει στην καθοδική αντίδραση. Παρόλα αυτά παρουσία συγκεκριμένων οργανισμών (όπως βακτήρια που καταναλώνουν θειικά) ο ρυθμός διάβρωσης μπορεί να γίνει πολύ υψηλός, ακόμα και απουσία οξυγόνου.

**c. pH:** Η διαβρωτική ικανότητα του εδάφους επηρεάζεται κυρίως από τα συστατικά που περιέχονται σε αυτό και κύριος παράγοντας διάβρωσης είναι η οξύτητά του, η οποία διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του εδάφους. Τα εδάφη συνήθως έχουν pH περίπου 5-8 και σε αυτό το εύρος τιμών το pH δεν θεωρείται ότι είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει τον ρυθμό της διάβρωσης. Η περιεκτικότητα σε οξέα είναι συνήθως αυξημένη όταν το έδαφος είναι υγρό, π.χ. σε βαλτώδεις περιοχές και όταν η οξύτητα είναι μεγάλη, η διάβρωση γίνεται και απουσία O<sub>2</sub>. Αύξηση της οξύτητας αυξάνει την διαβρωτική ικανότητα

του εδάφους και απειλεί δομικά μέταλλα όπως ο χάλυβας, ο σίδηρος και τα επιστρώματα ψευδαργύρου. Η οξύτητα του εδάφους οφείλεται στην έκπλυση των ορυκτών, στην αποσύνθεση όξινων φυτών, στα βιομηχανικά απόβλητα, στην όξινη βροχή και σε συγκεκριμένους τύπους μικροβιολογικών μονάδων. Τα αλκαλικά εδάφη παρουσιάζουν μεγάλη περιεκτικότητα σε νάτριο, κάλιο, μαγνήσιο και ασβέστιο, όπου τα τελευταία δύο στοιχεία τείνουν να σχηματίσουν ασβεστολιθικές αποθέσεις σε θαμμένες δομές με προστατευτικές επικαλύψεις. Το pH μπορεί τέλος να επηρεάσει την διαλυτότητα των προϊόντων διάβρωσης και επίσης τη φύση της μικροβιολογικής δραστηριότητας.

**d. Ειδική αντίσταση:** Η ειδική αντίσταση έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σαν ένδειξη της διαβρωτικής ικανότητας του εδάφους. Δεδομένου ότι η ιοντική ροή του ρεύματος συνδέεται με τη διάβρωση του εδάφους, υψηλή αντίσταση έχει σαν αποτέλεσμα την επιβράδυνση των διαβρωτικών αντιδράσεων. Η αντίσταση του εδάφους μειώνεται γενικά με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό και τη συγκέντρωση των ιοντικών στοιχείων. Παρόλα αυτά η ειδική αντίσταση του εδάφους δεν αποτελεί τη μοναδική παράμετρο που επηρεάζει τον κίνδυνο της διάβρωσης και κατά συνέπεια η υψηλή αντίσταση ενός εδάφους δεν εγγυάται απουσία σοβαρής μορφής διάβρωσης.

**e. Χλωρίοντα:** Τα ιόντα χλωρίου είναι εν γένει επιβλαβή αφού συμμετέχουν άμεσα στην αντίδραση της ανοδικής διάλυσης του μετάλλου και τείνουν να μειώσουν την ειδική αντίσταση του εδάφους. Μπορούν να βρεθούν φυσικά μέσα στα εδάφη σαν αποτέλεσμα των υφάλμυρων υπόγειων υδάτων και των υδάτων που ανέκυψαν κατά την γεώτρηση φρεάτων τα οποία έχουν επίπεδα ιόντων χλωρίου συγκρίσιμα με αυτά του θαλασσινού νερού. Τα χλωρίοντα μπορούν να προέρχονται και από εξωτερικές πηγές όπως από τα άλατα αποπάγωσης που χρησιμοποιούνται σε αυτοκινητοδρόμους. Η συγκέντρωση ιόντων χλωρίου στο διαβρωτικό υδατικό ηλεκτρολύτη του εδάφους δεν είναι σταθερή αλλά ποικίλει καθώς οι συνθήκες του εδάφους εναλλάσσονται μεταξύ υγρής και ξηρής.

**f. Επίπεδο θεικών:** Σε σύγκριση με την διαβρωτική επίδραση των ιόντων χλωρίου, τα θειικά γενικά θεωρούνται ότι είναι λιγότερο επιβλαβή ως προς την διαβρωτική τους δράση προς τα μεταλλικά υλικά. Ωστόσο, το σκυρόδεμα μπορεί να διαβρωθεί εξαιτίας των υψηλών επιπέδων θειικών αλάτων. Τέλος η παρουσία των θεικών θέτει ένα σημαντικό κίνδυνο για τα μεταλλικά υλικά με την έννοια ότι τα θειικά ιόντα μπορούν να μετατραπούν σε εξαιρετικά διαβρωτικά σουλφίδια από αναερόβια βακτήρια, αυξάνοντας έτσι την διαβρωτική ικανότητα του εδάφους.

**g. Δυναμικό οξειδοαναγωγής:** Το δυναμικό οξειδοαναγωγής είναι ένα μέτρο του βαθμού αερισμού των εδαφών και υψηλή τιμή του υποδεικνύει υψηλά επίπεδα οξυγόνου, το ποσοστό του οποίου εξαρτάται επίσης και από τη σύσταση και την υγρασία του εδάφους. Χαμηλή τιμή δυναμικού οξειδοαναγωγής μπορεί να παρέχει ένδειξη ότι οι συνθήκες είναι ευνοϊκές για αναερόβια μικροβιολογική δραστηριότητα

**h. Μικροβιολογική δραστηριότητα:** Η μικροβιολογική δραστηριότητα βακτηρίων, μυκήτων και άλλων μικροοργανισμών επηρεάζει έντονα τη διαβρωτικότητα των εδαφών και εξαρτάται από την παρουσία και το είδος των μικροοργανισμών καθώς και από τα προϊόντα μεταβολισμού τους. Τα βακτήρια που περιέχονται στο έδαφος βοηθούν στην αναγωγή των θειικών ενώσεων σε θειώδεις και αυξάνουν έτσι το βαθμό διάβρωσης. Η βακτηριακή δραστηριότητα είναι έντονη σε βάλτους και εδάφη με χαμηλή περιεκτικότητα σε αέρα.



### 1.6.2.2 Κατάταξη διαβρωτικότητας εδαφών

Για τις ανάγκες σχεδιασμού και την αποτίμηση των κινδύνων της διάβρωσης, είναι σκόπιμο να εκτιμηθεί η διαβρωτική ικανότητα των εδαφών και ένας από τους απλούστερους τρόπους ταξινόμησης περιλαμβάνει την κατάταξή τους με κριτήριο την ειδική αντίσταση του εδάφους. Με βάση λοιπόν την ειδική αντίσταση έχει καταρτιστεί ο Πίνακας 1.5, ο οποίος συνδυάζει την παράμετρο της ειδικής αντίστασης με την διαβρωτικότητα του εδάφους.

Πίνακας 1.5: Διαβρωτικότητα εδαφών με βάση την τιμή της ειδικής αντίστασης<sup>33</sup>

Αντίσταση εδάφους (ohm·cm)	Διαβρωτικότητα
>20000	Μη διαβρωτικό
10000 – 20000	Ελαφρά διαβρωτικό
5000– 10000	Μετρίως διαβρωτικό
3000– 5000	Διαβρωτικό
1000-3000	Έντονα διαβρωτικό
<1000	Εξαιρετικά διαβρωτικό

Αμμώδη εδάφη παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση και συνεπώς θεωρούνται τα λιγότερο διαβρωτικά. Τα αργιλώδη εδάφη, ιδίως αυτά που περιέχουν αλατούχο νερό βρίσκονται στο αντίθετο άκρο του φάσματος. Η παράμετρος της αντίστασης του εδάφους χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη και γενικώς θεωρείται ότι είναι η κύρια μεταβλητή που καθορίζει τη διαβρωτική δράση, απουσία της μικροβιακής δραστηριότητας.

### 1.6.3 Διάβρωση μετάλλων στο νερό

Το νερό έχει πολλές σημαντικές και τεχνολογικά χρήσιμες ιδιότητες και μία από τις σημαντικότερες είναι η ικανότητά του να διαλύει σε κάποιο βαθμό ουσίες που βρίσκονται στο φλοιό της γης ή στην ατμόσφαιρα. Εξαιτίας της ικανότητά του σαν ηλεκτρολύτης συχνά περιέχει πολλές προσμίξεις οι οποίες είναι δυνατόν να προκαλούν προβλήματα μέσω της εναπόθεσής τους σε γραμμές νερού και σε λέβητες αλλά είναι επιβλαβείς και για τα προϊόντα με τα οποία το νερό έρχεται σε επαφή. Μια άλλη σημαντική ιδιότητα του νερού η οποία επηρεάζει αρνητικά της συνθήκες διάβρωσης είναι η ικανότητά του να διεισδύει και να αναρριχάται με βάση το μηχανισμό των τριχοειδών φαινομένων. Στη διαβρωτική δράση του νερού πρέπει να προστεθεί και εκείνη των διαφόρων διαβρωτικών ουσιών των οποίων αποτελεί φυσικό φορέα.

#### 1.6.3.1 Επιβλαβείς προσμίξεις

Το διαλυμένο οξυγόνο που υπάρχει στο νερό είναι υπεύθυνο για τη διαβρωτική προσβολή μετάλλων με τα οποία το νερό έρχεται σε επαφή προκαλώντας δαπανηρές αντικαταστάσεις σωληνώσεων και εξοπλισμού λόγω της διαβρωτικής δράσης. Το νερό προέρχεται από την υγρασία που έχει εξατμιστεί σταδιακά από τις μάζες της γης και των ωκεανών και στη συνέχεια καταβυθίστηκε από την ατμόσφαιρα. Ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες καταβυθίζεται σαν βροχή, χιόνι, χιονόνερο ή χαλάζι. Καθώς πέφτει, διαλύει τα αέρια της ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αιωρούμενα σωματίδια σε μορφή σκόνης, βιομηχανικός καπνός και αναθυμιάσεις λόγω ηφαιστειακής σκόνης και αέριων.

Οι συγκεντρώσεις διαφόρων ουσιών στο νερό σε διαλυμένη, κolloειδή ή αιωρούμενη μορφή είναι συνήθως χαμηλές αλλά παρουσιάζουν πολλές διακυμάνσεις. Συγκέντρωση έως 400ppm ανθρακικού ασβεστίου, για παράδειγμα, είναι μερικές φορές ανεκτή στο δημόσιο



δίκτυο ενώ 1ppm διαλυμένου σιδήρου θα ήταν απαράδεκτα υψηλή συγκέντρωση. Σε κατεργασμένο νερό για λέβητες υψηλής πίεσης ή όταν οι επιδράσεις της ακτινοβολίας είναι σημαντικές, όπως σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, οι προσμίξεις μετρώνται σε ιδιαίτερα μικρές μονάδες όπως μέρη ανά δισεκατομμύριο (ppb). Αναλύσεις νερού ώστε να θεωρηθεί ποιότητας ποσίμου περιλαμβάνουν κυρίως τεστ για βακτήρια και ρυπογόνες ουσίες ενώ η ανάλυση νερού που προορίζεται για βιομηχανική χρήση είναι περισσότερο ενδιαφέρουσα.

Τα σημαντικά συστατικά μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

- **Διαλυμένα αέρια:** οξυγόνο, άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα, αμμωνία, θειούχα αέρια
- **Ορυκτά συστατικά:** άλατα νατρίου (χλωριούχα, θειικά, νιτρικά, όξινα ανθρακικά), άλατα βαρέων μετάλλων και πυριτικά άλατα
- **Οργανική ύλη** είτε ζωικής είτε φυτικής προέλευσης, λάδια, απόβλητα (συμπεριλαμβανομένων των γεωργικών)
- **Μικροβιολογικές μορφές,** περιλαμβανομένων των διαφόρων τύπων των άλγης και βακτηρίων

Το pH των φυσικών υδάτων είναι σπάνια εκτός της περιοχής 4,5-8,5. Υψηλές τιμές, στις οποίες η διάβρωση του χάλυβα μπορεί να κατασταλεί και χαμηλές τιμές στις οποίες έκλυση αερίου υδρογόνου λαμβάνει χώρα, δεν βρίσκονται συχνά σε φυσικά νερά.

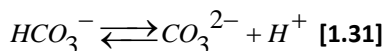
#### 1.6.3.2 Ποιότητα και διαβρωτική ικανότητα νερού

Το υψηλής καθαρότητας νερό είναι ο λιγότερο διαβρωτικός τύπος νερού. Η διαβρωτική ικανότητα του γλυκού νερού (που υπάρχει σε λίμνες, ποτάμια, πηγές κ.α.) εξαρτάται από τη σύσταση του εδάφους όπου η αποσύνθεση ζωικών και φυτικών ουσιών του εδάφους δημιουργεί διαβρωτικά οξέα τα οποία μεταφέρονται στο νερό όταν αυτό βρίσκεται σε επαφή με το όξινο έδαφος. Το νερό που έχει εκτεθεί σε αλκαλικά πετρώματα δεν είναι ιδιαίτερα διαβρωτικό αλλά τα αλκαλικά εδάφη είναι δυνατόν να περιέχουν άλατα και οξειδωτικά μέσα που είναι διαβρωτικά. Ο περισσότερο διαβρωτικός τύπος νερού είναι το νερό της θάλασσας. Στην ανοικτή θάλασσα η περιεκτικότητα του νερού σε άλατα είναι περίπου 3,4% και η περίσσεια βασικών ιόντων αυξάνει το pH σε 8. Το νερό αυτό είναι εξαιρετικός ηλεκτρολύτης και μπορεί να προκαλέσει γαλβανική διάβρωση. Στα λιμάνια το νερό περιέχει επιπλέον ουσίες, όπως βιομηχανικά υπολείμματα, οξέα, οξειδωτικά προϊόντα και οργανικές ουσίες που περιέχουν θείο και είναι περισσότερο διαβρωτικό από το νερό στην ανοικτή θάλασσα. Οι βιολογικοί οργανισμοί, η περιεκτικότητα σε οξυγόνο, η άνοδος της θερμοκρασίας και η αύξηση της ταχύτητας κίνησης του νερού (τρικυμία) αυξάνουν τη διαβρωτική δράση του θαλασσινού νερού.

Η διαβρωτική ικανότητα του νερού μπορεί να εκτιμηθεί με διάφορους δείκτες όπως με τον δείκτη κορεσμού κατά Langelier (LSI) ή με τον δείκτη σταθερότητας κατά Ryznar (RSI).

**a. Δείκτης κορεσμού κατά Langelier (LSI):** Είναι ένα μοντέλο ισορροπίας που προέρχεται από τη θεωρητική έννοια του κορεσμού και παρέχει μια ένδειξη του βαθμού κορεσμού του νερού σε σχέση με το ανθρακικό ασβέστιο. Μπορεί να δειχθεί ότι ο δείκτης κορεσμού Langelier (LSI) προσεγγίζει λογαριθμικά το επίπεδο κορεσμού του ασβεστίτη. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί το pH ως κύρια μεταβλητή και μπορεί να ερμηνευθεί ως η αλλαγή στο pH που απαιτείται για να φέρει το νερό σε κατάσταση ισορροπίας. Νερό με δείκτη κορεσμού κατά Langelier 1.0 είναι μια μονάδα pH πάνω από τον κορεσμό. Μείωση του pH κατά 1

μονάδα θα φέρει το νερό σε ισορροπία. Αυτό συμβαίνει επειδή η συνολική αλκαλικότητα ως  $\text{CO}_3^{2-}$  μειώνεται καθώς το pH αυξάνεται, σύμφωνα με τις σχετικές αντιδράσεις που περιγράφουν τη διάσπαση του ανθρακικού οξέος:



**Πίνακας 1.6:** Τιμή του δείκτη LSI συναρτήσει της διαβρωτικής ικανότητας<sup>5</sup>

Δείκτης κατά Langelier (LSI)	Ιδιότητες νερού
≥2,0	Μέγιστη ικανότητα διάβρωσης
0,5	Ελαφριά ικανότητα διάβρωσης
0,0	Πιθανότητα διάβρωσης με βελονισμούς
-0,5	Ελαφρά διαβρωτικό νερό
≤-2,0	Πολύ διαβρωτικό νερό

**b. Δείκτης σταθερότητας κατά Ryznar (RSI):** Ο δείκτης σταθερότητας κατά Ryznar (RSI), επιχειρεί να συσχετίσει μια εμπειρική βάση δεδομένων της κλίμακας του πάχους που παρατηρείται σε δημοτικά συστήματα νερού με την χημεία του νερού. Όπως και στο LSI, έτσι και στο RSI η βασική ιδέα σχετίζεται με τα επίπεδα κορεσμού. Ο Ryznar προσπάθησε να ποσοτικοποιήσει τις σχέσεις μεταξύ της κατάστασης κορεσμού του ανθρακικού ασβεστίου και το σχηματισμό μιας κλίμακας. Ο δείκτης Ryznar λαμβάνει τη μορφή:

$$RSI = 2 \cdot pH_s - pH \quad [1.32]$$

**Όπου:**  $pH$  το μετρούμενο pH του νερού,  $pH_s$  το pH ανθρακικού ασβεστίου ή ασβεσίτη στην κατάσταση κορεσμού

**Πίνακας 1.7:** Ιδιότητες νερού σε σχέση με τον δείκτη σταθερότητας κατά Ryznar<sup>5</sup>

Δείκτης κατά Ryznar (RSI)	Ιδιότητες νερού
<5,0	Έντονη τάση για παθητικοποίηση
5,0-6,0	Ελαφρά τάση για παθητικοποίηση
6,0-7,5	Σε ισορροπία, πιθανότητα βελονισμών, ελαφρά διαβρωτικό
7,5-9,0	Έντονα διαβρωτικό
>9,0	Πολύ διαβρωτικό

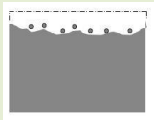

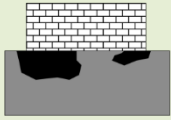

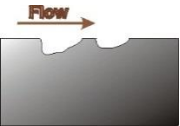
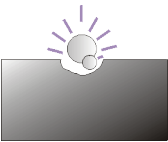
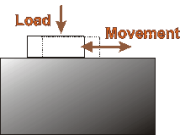



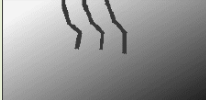

## 1.7 Μορφές διάβρωσης

Με βάση την ευκολία ανίχνευσής τους οι περισσότερες κοινές μορφές διάβρωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής<sup>38</sup>:

- **Κατηγορία 1:** Εύκολα αναγνωρίσιμη με οπτική εξέταση
- **Κατηγορία 2:** Η αναγνώρισή της απαιτεί συμπληρωματικά μέσα ανίχνευσης
- **Κατηγορία 3:** Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων της οπτικής αναγνώρισης απαιτεί μικροσκοπία (οπτική ή ηλεκτρονική)

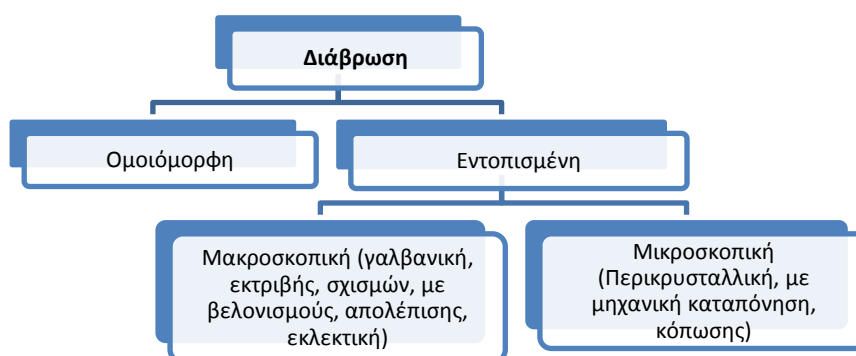
Στη θεωρία οι παραπάνω μορφές της διάβρωσης είναι σαφώς διακριτές αλλά στην πράξη υπάρχουν περιπτώσεις διάβρωσης που ταιριάζουν σε περισσότερες από μία κατηγορίες και άλλες περιπτώσεις όπου δεν φαίνεται να ταιριάζουν σε οποιαδήποτε από τις παραπάνω μορφές. Παρ' όλα αυτά το σύστημα ταξινόμησης του **Πίνακας 1.8** είναι αρκετά χρήσιμο στη μελέτη της διάβρωσης.

Πίνακας 1.8: Μορφές διάβρωσης ανάλογα με τον τρόπο αναγνώρισης<sup>34</sup>

Κατηγορία 1: Εύκολα αναγνωρίσιμη με οπτική εξέταση			
			
Ομοιόμορφη	Με βελονισμούς	Διάβρωση σχισμών	Γαλβανική
Κατηγορία 2: Η αναγνώρισή της απαιτεί συμπληρωματικά μέσα ανίχνευσης			
			
Ρευστομηχανική	Σηλαιώδης	Λόγω τριβής	Περικρυσταλλική
Κατηγορία 3: Για την αναγνώριση απαιτείται μικροσκοπία (οπτική ή ηλεκτρονική)			
			
Εκλεκτική προσβολή	Μηχανικής καταπόνησης	Κόπωσης	Απολέπισης

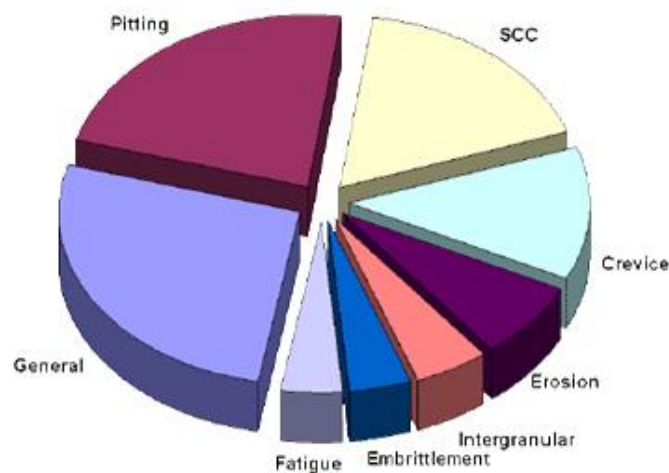
Για την πλήρη κατανόηση των διάφορων μορφών διάβρωσης απαιτείται και η διάκριση ανάμεσα σε μακροσκοπικά εντοπισμένη διάβρωση και μικροσκοπική τοπική επίθεση. Στην τελευταία περίπτωση, η ποσότητα του διαλυμένου μετάλλου είναι ασήμαντη και σημαντική βλάβη μπορεί να συμβεί πριν το πρόβλημα γίνεται ορατό με γυμνό μάτι.

Μακροσκοπικές μορφές διάβρωσης επηρεάζουν μεγαλύτερες περιοχές του διαβρωμένου μετάλλου και είναι γενικά παρατηρήσιμες με γυμνό μάτι ή μπορεί κανείς να τις διακρίνει με τη βοήθεια μιας οπτικής συσκευής χαμηλής ισχύος. Στο **Σχήμα 1.13** κατατάσσονται μακροσκοπικά και μικροσκοπικά οι μορφές της εντοπισμένης διάβρωσης.



Σχήμα 1.13: Μικροσκοπική και μακροσκοπική διάκριση εντοπισμένης διάβρωσης<sup>1</sup>

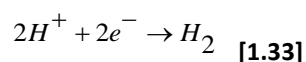
Σχετικά με την συχνότητα εμφάνισης των διάφορων μορφών διάβρωσης έχουν συνταχθεί πολλές αναφορές. Το ακόλουθο σχήμα συνοψίζει τα ευρήματα 363 περιπτώσεων αστοχίας λόγω διάβρωσης τα οποία συλλέχθηκαν από μεγάλες βιομηχανίες. Η διάβρωση με βελονισμούς έρχεται δεύτερη (22%) μετά την ομοιόμορφη διάβρωση και πριν την διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (12%) η οποία συχνά ξεκινά ως διάβρωση με βελονισμούς<sup>35</sup>.



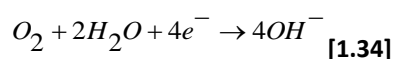
Σχήμα 1.14: Ποσοστά αστοχίας από διάφορες μορφές διάβρωσης σε βιομηχανικό επίπεδο<sup>39</sup>

### 1.7.1 Ομοιόμορφη ή Γενική Διάβρωση (Uniform or General Corrosion)

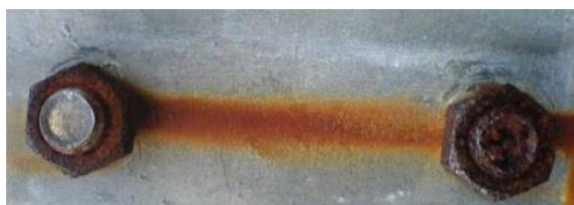
Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση ονομάζεται το είδος της διάβρωσης το οποίο παρατηρείται ομοιόμορφα κατανεμημένο σε όλη την εκτεθειμένη επιφάνεια ενός του μετάλλου. Η ομοιόμορφη διάβρωση αναφέρεται επίσης στην διάβρωση η οποία προχωρά με τον ίδιο περίπου ρυθμό πάνω από την εκτεθειμένη επιφάνεια του μετάλλου. Αποτελεί την πιο κοινή μορφή της διάβρωσης και συνήθως χαρακτηρίζεται από μία χημική αντίδραση ή ηλεκτροχημική οποία προχωράει ομοιόμορφα πάνω από την εκτεθειμένη ή ολόκληρη την επιφάνεια ή σε μια μεγάλη περιοχή του μετάλλου το οποίο γίνεται λεπτότερο και τελικά αστοχεί. Χυτοσίδηροι και χάλυβες διαβρώνονται ομοιόμορφα όταν εκτίθεται στην ατμόσφαιρα, στο έδαφος και στα φυσικά νερά, κατάσταση η οποία οδηγεί στην γνωστή σκουριασμένη εμφάνιση. Σε όξινα περιβάλλοντα ( $pH < 7$ ) η καθοδική αντίδραση είναι κυρίως η μείωση των ιόντων υδρογόνου κατά την αντίδραση:



Σε αλκαλικό ή ουδέτερο περιβάλλον ( $pH = 7$  ή  $pH > 7$ ) η μείωση του διαλυμένου οξυγόνου είναι η κυρίαρχη καθοδική διαδικασία που προκαλεί ομοιόμορφη διάβρωση:



Η διάβρωση αυτής της μορφής μπορεί να προληφθεί ή αντιμετωπιστεί μέσω διαφόρων μεθόδων, όπως<sup>[4, 10]</sup> (a) χρήση παχύτερων υλικών, (b) χρήση χρωμάτων ή μεταλλικών επιστρώσεων, (c) χρήση αναστολέων διάβρωσης, (d) ανοδική ή καθοδική προστασία, (e) καταλληλότερη επιλογή υλικών, (f) τροποποίηση του περιβάλλοντος ή χρήση χημικών αναστολέων για μείωση της ταχύτητας διάβρωσης, (f) αντικατάσταση με υλικό ανθεκτικότερο στη διάβρωση.



Σχήμα 1.15: Πραγματική περίπτωση ομοιόμορφης διάβρωσης<sup>40</sup>

### 1.7.2 Διάβρωση με Βελονισμούς (Pitting Corrosion)

Διάβρωση με βελονισμούς ονομάζεται η εντοπισμένη μορφή διάβρωσης μιας μεταλλικής επιφάνειας η οποία περιορίζεται σε ένα σημείο ή μικρή περιοχή και περιλαμβάνει το σχηματισμό κοιλοτήτων, οι οποίες μπορεί να είναι ευρύς ή ρηχές, στενές ή βαθιές. Είναι ένα από τα πιο βλαβερά είδη διάβρωσης γιατί δεν γίνεται αντιληπτή, προχωρά με μεγάλη ταχύτητα και εμφανίζεται ακόμα και αν το μέταλλο είναι επιστρωμένο με προστατευτικά υλικά. Μπορεί να προκαλέσει καταστροφή των υλικών λόγω διάτρησης ακόμα και για πολύ μικρό ποσοστό απώλειας βάρους της κατασκευής<sup>[7]</sup>. Συχνά είναι δύσκολο να διακρίνουμε τους βελονισμούς είτε γιατί καλύπτονται από προϊόντα διάβρωσης είτε λόγω του μικρού τους μεγέθους.

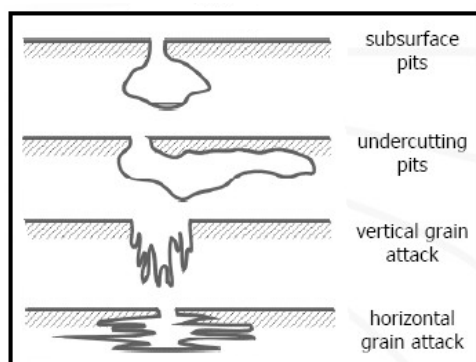


Σχήμα 1.16: Διάβρωση με βελονισμούς σε μεταλλικούς αγωγούς<sup>41</sup>

Διάβρωση με βελονισμούς υφίστανται παθητικά μέταλλα ή κράματα όπως κράματα του αλουμινίου, ο ανοξείδωτος χάλυβας αλλά και άλλα ανοξείδωτα κράματα στα οποία το λεπτό φιλμ οξειδίων (παθητικό στρώμα) έχει διαρρηχτεί είτε μηχανικά είτε χημικά και δεν επαναπαθητικοποιήθηκε άμεσα. Διάβρωση με βελονισμούς παρατηρείται επίσης κάτω από σταγόνες νερού, κάτω από ιζήματα, θαλάσσιες αναπτύξεις, σκωρίες και ετερογένειες του μετάλλου κ.λ.π.

Για ένα κράμα χωρίς ατέλειες διάβρωση με βελονισμούς μπορεί να επέλθει εξαιτίας του περιβάλλοντος το οποίο μπορεί να περιέχει επιθετικά χημικά στοιχεία όπως χλωριόντα τα οποία επιτίθενται στο παθητικό στρώμα οξειδίων και το καταστρέφουν σηματοδοτώντας την αρχή της διάβρωσης.

Η αντίσταση ενός μετάλλου στην διάβρωση με βελονισμούς συνήθως καθορίζεται με βάση την κρίσιμη θερμοκρασία βελονισμών (CPT) σύμφωνα με το πρότυπο ASTM G48-03<sup>42</sup>. Η CPT αποτελεί την ελάχιστη θερμοκρασία που απαιτείται για την εμφάνιση βελονισμών και είναι συνήθως υψηλότερη από την κρίσιμη θερμοκρασία σχισμών (CCT).

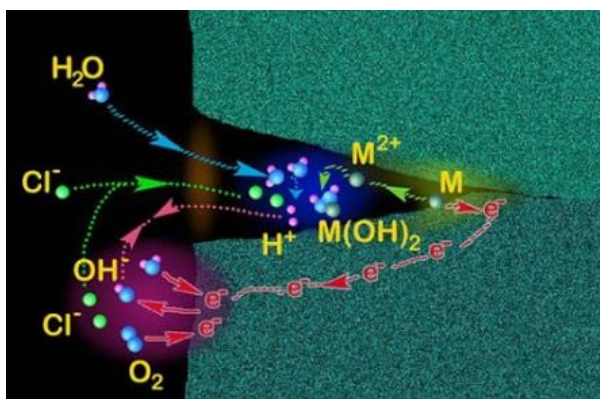


Σχήμα 1.17: Κατάταξη της διάβρωσης από βελονισμούς σύμφωνα με το πρότυπο ASTM G48<sup>[38]</sup>

Η διάβρωση με βελονισμούς μπορεί να αποφευχθεί: (a) με κατάλληλη επιλογή υλικών γνωστής αντίστασης, (b) έλεγχο του pH, της θερμοκρασίας και της περιεκτικότητας σε χλωριόντα, (c) ανοδική - καθοδική προστασία, (d) χρήση καλύτερων κραμάτων σύμφωνα με το πρότυπο ASTM G48-03.

### 1.7.3 Διάβρωση Σχισμών (Crevice Corrosion)

Η διάβρωση σχισμών είναι μια εντοπισμένη μορφή διάβρωσης η οποία συνήθως συνδέεται με διάφορες σχισμές ή προφυλαγμένες περιοχές σε μικρο-περιβαλλοντικό επίπεδο. Συνδυάζεται επίσης με την ύπαρξη μικρών όγκων στάσιμων διαλυμάτων ή στερεών σε οπές, φλάντζες ή παρεμβύσματα, σε σχισμές κάτω από μπουλόνια και πριτσίνια καθώς και κάτω από χρώματα που έχουν υποστεί αποκόλληση.



Σχήμα 1.18: Σχηματική αναπαράσταση διάβρωσης σχισμών<sup>36</sup>

Ο βασικός μηχανισμός αυτού του τύπου διάβρωσης σε παθητικοποιημένα μέταλλα ή κράματα τα οποία είναι εκτεθειμένα σε περιβάλλοντα πλούσια σε οξυγόνο και χλωριόντα περιλαμβάνει την σταδιακή οξίνιση του διαλύματος που βρίσκεται μέσα στην σχισμή<sup>[34]</sup>. Η κατάσταση αυτή οδηγεί σε εξαιρετικά επιθετικές συνθήκες στο περιβάλλον του μετάλλου οι οποίες οδηγούν στη κατάρρευση του παθητικού στρώματος.

Ευπαθή μέταλλα σε αυτό το είδος διάβρωσης είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας, το αλουμίνιο, το τιτάνιο και γενικά όσα μέταλλα σχηματίζουν προστατευτικό φιλμ οξειδίων.

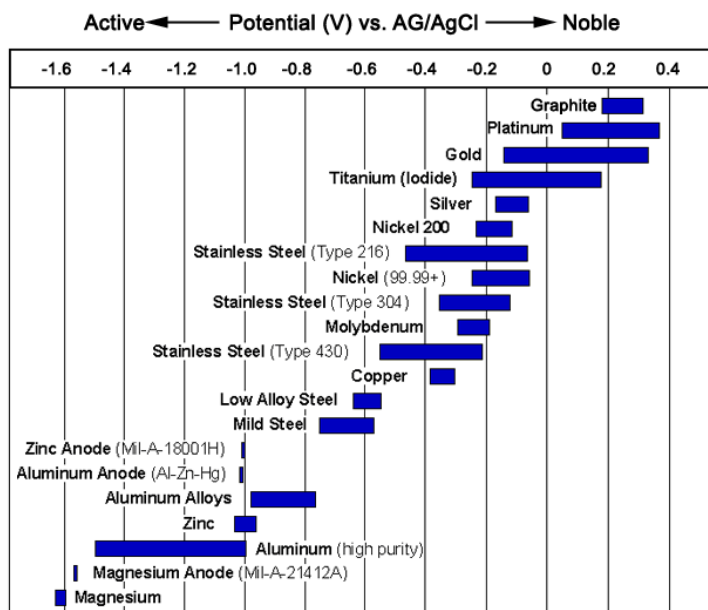
### 1.7.4 Γαλβανική Διάβρωση (Galvanic Corrosion)

Ως γαλβανική διάβρωση ορίζεται η επιταχυνόμενη διάβρωση ενός μετάλλου εξαιτίας της ηλεκτρικής επαφής με ένα ευγενέστερο μέταλλο ή ένα μη μεταλλικό αγωγό (κάθοδος) μέσω ενός διαβρωτικού ηλεκτρολύτη. Το μέταλλο το οποίο έχει μικρότερη αντοχή στη διάβρωση υπόκεινται σε επιταχυνόμενη διαβρωτική δράση (άνοδος) ενώ το μέταλλο με την μεγαλύτερη αντίσταση στη διάβρωση, το περισσότερο ευγενές δηλαδή, προστατεύεται ως καθοδικότερο. Η διαβρωτική δράση είναι μεγαλύτερη στην περιοχή της ένωσης των δύο μετάλλων ενώ σε απομακρυσμένες περιοχές η ταχύτητα της διάβρωσης είναι πολύ μικρότερη.

Ο μηχανισμός της γαλβανικής διάβρωσης βασίζεται στα διαφορετικά ηλεκτροχημικά δυναμικά (ή δυναμικά διάβρωσης) που έχουν τα μέταλλα και τα κράματα στον ίδιο ηλεκτρολύτη<sup>7</sup>. Όταν μετρηθούν οι τιμές του δυναμικού σε έναν κοινό ηλεκτρολύτη (για παράδειγμα σε φυσικό νερό) για διάφορα μεταλλικά υλικά τότε παρατίθενται σε πίνακες και προκύπτουν γαλβανικές σειρές. Παράμετροι όπως θερμοκρασία, pH, ρυθμός ροής κ.α.

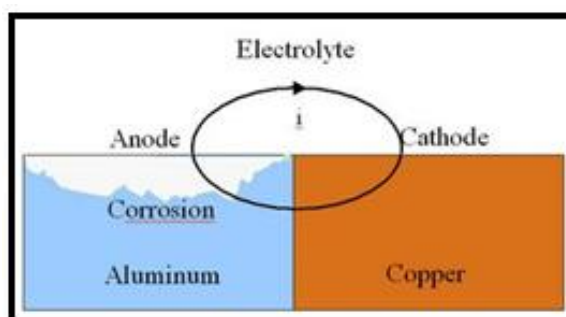


πρέπει να διατηρούνται σταθερές γιατί αλλιώς οι τιμές των δυναμικών δεν θα είναι συγκρίσιμες. Στο **Σχήμα 1.19** παρατίθενται η ηλεκτροχημική σειρά διάφορων κοινών μετάλλων και κραμάτων.



**Σχήμα 1.19:** Ηλεκτροχημική σειρά μετάλλων και κραμάτων. Για την αποφυγή γαλβανικής διάβρωσης τα δύο υλικά πρέπει να είναι απομακρυσμένα<sup>43</sup>

Η διαφορά δυναμικού (η τάση) μεταξύ δύο ανόμοιων μετάλλων είναι η κινητήρια δύναμη για την καταστροφική επίθεση στο ενεργό μέταλλο (άνοδος). Ρεύμα ρέει μέσω του ηλεκτρολύτη στο πιο ευγενές μέταλλο (κάθοδος) και το λιγότερο ευγενές μέταλλο (άνοδος) θα διαβρωθεί. Η αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη επηρεάζει το βαθμό της επίθεσης και ο λόγος της καθοδικής προς την ανοδική περιοχή είναι ευθέως ανάλογος προς την επιτάχυνση. Εάν η ηλεκτρική επαφή μεταξύ των δύο υλικών διακοπεί τότε το φαινόμενο της γαλβανικής διάβρωσης θα αποφευχθεί. Στο **Σχήμα 1.20** παρατηρείται γαλβανική διάβρωση ανάμεσα στον ευγενέστερο χαλκό και στον ανοδικό αλουμίνιο.



**Σχήμα 1.20:** Μηχανισμός γαλβανικής διάβρωσης<sup>44</sup>

### 1.7.5 Ρευστομηχανική Διάβρωση ή Διάβρωση Εκτριβής (Erosion corrosion)

Η ρευστομηχανική διάβρωση περιλαμβάνει την ταχύτατη απώλεια μάζας ενός μεταλλικού υλικού λόγω της σχετικής ροής ενός διαβρωτικού μέσου. Η μηχανική επίδραση της ροής ή της ταχύτητας του υγρού μέσου συνδυασμένη με την διαβρωτική του δράση έχουν σαν αποτέλεσμα την αυξημένη απώλεια μάζας του μετάλλου.



**Σχήμα 1.21:** Ρευστομηχανική διάβρωση εξαιτίας γρήγορης κίνησης υγρού σε βαλβίδα λαδιού<sup>45</sup>

Η μηχανική δράση των αιωρούμενων σωματιδίων που υπάρχουν στο ρευστό είτε του ίδιου του ρευστού έχει σαν συνέπεια την τοπική καταστροφή του επιφανειακού στρώματος και την αύξηση της ταχύτητας διάβρωσης λόγω της δημιουργίας τοπικών γαλβανικών στοιχείων μεταξύ των περιοχών που έχουν υποστεί φθορά από εκτριβή και του υπόλοιπου μετάλλου<sup>14</sup>. Η αντοχή των υλικών σε διάβρωση εκτριβής καθορίζεται από την χημική τους σύσταση, την αντίσταση στην διάβρωση, την σκληρότητά τους και ειδικά του επιφανειακού στρώματος, όπως και τις μεταλλουργικές διεργασίες που έχουν υποστεί.

#### 1.7.6 Σπηλαιώδης Διάβρωση ή Διάβρωση Εσοχών (Cavitation Corrosion)

Η σπηλαιώδης διάβρωση είναι μια μορφή ρευστομηχανικής διάβρωσης και συμβαίνει όταν η πίεση λειτουργίας ενός ρευστού πέσει κάτω από την πίεση των κεκορεσμένων ατμών του δημιουργώντας φυσαλίδες ατμού. Το ρευστό μέσο κινείται με μεγάλη ταχύτητα και όταν πέσει πάνω στην μεταλλική επιφάνεια ή στο προστατευτικό της οξειδίου οι φυσαλίδες σπάνε προκαλώντας καταστροφή της επιφάνειας και επιτάχυνση της διάβρωσης<sup>[7]</sup>.



**Σχήμα 1.22:** Σπηλαιώδης διάβρωση σε μεταλλική φυγοκεντρική αντλία<sup>46</sup>

Αυτή η μορφή διάβρωσης παρατηρείται σε αντλίες υγρών, σε βαλβίδες, υδραυλικές τουρμπίνες, προπέλες πλοίων και γενικά σε επιφάνειες που υφίστανται ταχεία ροή υγρών και μεταβολές πίεσης.

#### 1.7.7 Διάβρωση λόγω Τριβής (Fretting Corrosion)

Διάβρωση λόγω τριβής παρατηρείται όταν υπάρχει ολίσθηση υπό φορτίο ανάμεσα σε δύο επιφάνειες μια τουλάχιστον εκ των οποίων είναι μεταλλική. Η ολίσθηση είναι κυρίως παλμική όπως αυτή που προκαλείται από δόνηση. Εμφανίζεται σε στοιχεία μηχανών, σε



πλάκες με μπουλόνια, σε σιδηροτροχιές των σιδηροδρόμων, σε γρανάζια με σφήνα, σε ηλεκτρικές επαφές κλπ., και έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό σκόνης οξειδίων που δύσκολα απομακρύνεται προκαλώντας βελονισμούς ή αυλακώσεις που περιβάλλονται από προϊόντα διάβρωσης<sup>10</sup>.



**Σχήμα 1.23:** Διάβρωση λόγω τριβής μεταλλικού στύλου και μεταλλικών καλωδίων εκτεθειμένων σε αέρα. Και τα δύο τμήματα έχουν υποστεί διάβρωση λόγω τριβής<sup>47</sup>

Η διάβρωση από τριβή εμφανίζεται κυρίως σε έκθεση στην ατμόσφαιρα παρά σε υδατικά διαλύματα. Η μείωση της θερμοκρασίας, η αύξηση του φορτίου ολίσθησης και η μείωση της σκληρότητας του υλικού επιταχύνουν το φαινόμενο.

#### 1.7.8 Περικρυσταλλική Διάβρωση (Intergranular Corrosion)

Η περικρυσταλλική διάβρωση παρουσιάζεται στα περατωτικά όρια των κόκκων, τα οποία είναι ανοδικότερα του κυρίως μετάλλου λόγω συγκέντρωσης σε αυτά ακαθαρσιών και στοιχείων κραματοποίησης. Η διάβρωση αυτή έχει σαν συνέπεια την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, το οποίο υπό την επίδραση τάσεων υφίσταται περικρυσταλλικές ρηγματώσεις ακόμη και αν το επιβαλλόμενο φορτίο είναι αρκετά μικρότερο από εκείνο της αντοχής του σε εφελκυσμό<sup>48</sup>.



**Σχήμα 1.24:** Μικρό τμήμα μηχανικού εξαρτήματος αυτοκινήτου που έχει υποστεί περικρυσταλλική διάβρωση<sup>49</sup>

Το πιο σύνηθες παράδειγμα περικρυσταλλικής διάβρωσης παρουσιάζεται στους ωστενιτικούς χάλυβες στην περιοχή των συγκολλήσεων, όπου κατακρημνίζονται καρβίδια λόγω της θερμικής κατεργασίας και της χημικής σύστασης των χάλυβων. Αυτές οι κατακρημνίσεις λόγω διαφορετικής σύνθεσης από αυτήν στο εσωτερικό του μετάλλου έχουν διαφορετικό δυναμικό και οδηγούν στην εμφάνιση τοπικών γαλβανικών στοιχείων

### 1.7.9 Εκλεκτική Προσβολή (De-alloying Corrosion)

Η εκλεκτική προσβολή εμφανίζεται μόνο σε κράματα που δύο ή περισσότερα μέταλλα συνθέτουν στερεό διάλυμα και αποτελεί το φαινόμενο κατά το οποίο ένα μόνο μέταλλο απομακρύνεται από το διάλυμα αυτό. Το μέταλλο αυτό είναι το λιγότερο ευγενές, ενώ το υπόλοιπο του κράματος διατηρεί την μεταλλική του μορφή αλλά με υποβάθμιση της μηχανικής του αντοχής<sup>50</sup>.



(α)



(β)

**Σχήμα 1.25:** (α) Αποψευδαργύρωση ορείχαλκου σε βαλβίδα φρένων<sup>51</sup>, (β) εκλεκτική προσβολή φαιού χυτοσιδηρού σωλήνα νερού<sup>52</sup>

Συνηθέστερη περίπτωση εκλεκτικής προσβολής είναι η αποψευδαργύρωση του ορείχαλκου. Εμφανίζεται ως ομοιόμορφη (σε στρώσεις) ή ως εντοπισμένη.

### 1.7.10 Διάβρωση με Μηχανική Καταπόνηση (Stress Corrosion Cracking)

Η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση είναι μια διαβρωτική διαδικασία η οποία απαιτεί την ταυτόχρονη δράση ενός διαβρωτικού μέσου και μιας διατηρούμενης εφελκυστικής τάσης. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία λεπτών ρωγμών που προχωρούν στο εσωτερικό του μετάλλου κάθετα στην διεύθυνση της μηχανικής τάσης, ακολουθώντας περικρυσταλλικό ή ενδοκρυσταλλικό δρόμο. Το φαινόμενο εξελίσσεται σε τρία στάδια: 1) δημιουργία εσοχής, 2) εκκόλαψη και 3) γρήγορη προώθηση της ρωγμής με ταχύτητα που συνήθως είναι ανάλογη του ανοδικού ρεύματος<sup>53</sup>.



**Σχήμα 1.26:** Διάβρωση λόγω μηχανικής καταπόνησης σε υψηλά κραματοποιημένο χάλυβα συγκόλλησης<sup>54</sup>

Η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση απαιτεί την ταυτόχρονη παρουσία (α) ενός ευαίσθητου υλικού, (β) ενός διαβρωτικού περιβάλλοντος και (γ) μιας εφελκυστικής δύναμης είτε εσωτερικής είτε εξωτερικής. Για παράδειγμα ο χαλκός και τα κράματά του είναι ευαίσθητα σε ενώσεις αμμωνίας, οι μαλακοί χάλυβες είναι ευαίσθητοι στα αλκάλια και οι ανοξείδωτοι χάλυβες είναι ευπαθείς σε χλωρίδια.

Ο μηχανισμός αυτού του τύπου διάβρωσης δεν είναι πλήρως αποσαφηνισμένος και τα διάφορα μοντέλα που έχουν προταθεί περιλαμβάνουν τα ακόλουθα<sup>55</sup>.

- **Μοντέλο προσρόφησης:** συγκεκριμένα χημικά διαβρωτικά είδη απορροφώνται στην ρηγματωμένη επιφάνεια και μειώνουν την τάση θραύσης.
- **Μοντέλο ρήξης φιλμ:** η εφαρμοζόμενη τάση καταστρέφει το παθητικό φιλμ του μετάλλου και δημιουργεί ένα ενεργό-παθητικό κελί. Το νέο-σχηματισθέν φιλμ καταστρέφεται και πάλι κάτω από την εφελκυστική τάση και ο κύκλος επαναλαμβάνεται μέχρι αστοχίας.
- **Μοντέλο της προϋπάρχουσας ενεργής διαδρομής:** προϋπάρχουσα διαδρομή αποτελούν τα όρια των κόκκων όπου σχηματίζονται σύμπλοκες και διαμεταλλικές ενώσεις.
- **Μοντέλο ευθραυστότητας:** το υδρογόνο παίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε αυτό το είδος της διάβρωσης ειδικά για τα χάλυβα και για το τιτάνιο. Άτομα υδρογόνου διαχέονται στις ρωγμές και μετατρέπουν το μέταλλο σε πιο ψαθυρό και εύθραυστο.

Για την αποφυγή της διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση πρέπει να χρησιμοποιούνται μέταλλα τα οποία δεν ρηγματώνονται στο δεδομένο περιβάλλον και πρέπει να ελέγχεται η θερμοκρασία και το ηλεκτροχημικό δυναμικό του μετάλλου.

#### 1.7.11 Διάβρωση λόγω Κόπωσης (Fatigue Corrosion)

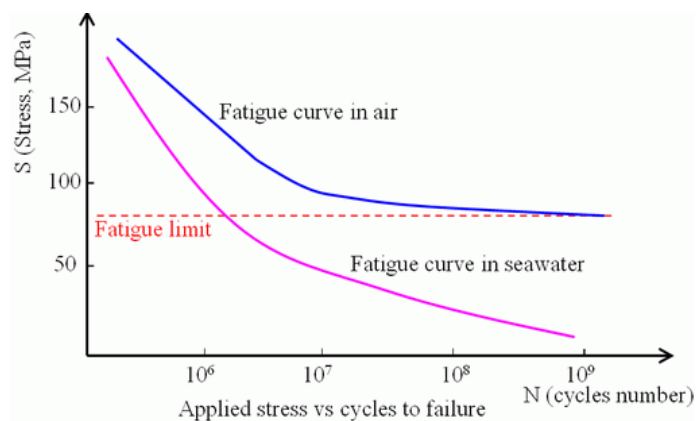
Με τον όρο διάβρωση λόγω κόπωσης χαρακτηρίζεται η διαδικασία κατά την οποία ένα μέταλλο αστοχεί πρόωρα κάτω από ταυτόχρονη έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον και σε επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης. Η αστοχία επέρχεται σε χαμηλότερα τιμές τάσεις ή σε λιγότερους κύκλους φόρτισης από το όριο συνεχούς αντοχής του υλικού<sup>56</sup>.

Η διάβρωση λόγω κόπωσης προκαλείται από ανάπτυξη ρωγμών σε διαβρωτικό περιβάλλον κάτω από την ταυτόχρονη εφαρμογή κύκλων φόρτισης. Η συνήθης περίπτωση περιέχει εφαρμοζόμενες τάσεις αρκετά κάτω από το όριο αντοχής σε εφελκυσμό. Καθώς η τάση αυξάνεται, ο αριθμός των κύκλων που θα οδηγήσουν το υλικό στο όριο κόπωσης μειώνεται.



Σχήμα 1.27: Ρωγμές από διάβρωση λόγω κόπωσης σε ορειχάλκινο σωλήνα συμπίκνωσης νερού<sup>57</sup>

Για ένα δεδομένο υλικό το όριο αντοχής σε κόπωση ή το συμβατικό όριο κόπωσης μειώνονται όταν το υλικό εκτίθεται σε διαβρωτικό περιβάλλον. Για την πλειοψηφία των κραμάτων που χρησιμοποιούνται σε μηχανολογικές και κατασκευαστικές εφαρμογές το όριο κόπωσης αναφέρεται στην τιμή της τάσης κάτω από την οποία το υλικό δεν αστοχεί λόγω κόπωσης για ένα συγκεκριμένο αριθμό κύκλων συνήθως  $10^7$  ή  $10^8$  κύκλους, όπως φαίνεται σε ένα τυπικό διάγραμμα Woehler.



**Σχήμα 1.28:** Συγκριτικό διάγραμμα Wohler κράματος για έκθεση σε αέρα και σε θαλασσινό νερό<sup>58</sup>

Η διάβρωση λόγω κόπωσης μπορεί να αποφευχθεί (α) χρησιμοποιώντας κράματα ανθεκτικά σε διάβρωση λόγω κόπωσης, (β) περιορίζοντας την κόπωση μέσω ελάττωσης των διαφορών πίεσης, (γ) χρησιμοποιώντας κράματα επικαλυμμένα με προστατευτικές επιστρώσεις ώστε να καθυστερήσει η ανάπτυξη των ρωγμών.

### 1.7.12 Διάβρωση Απολέπισης (Exfoliation Corrosion)

Η διάβρωση απολέπισης είναι μια μορφή περικρυσταλλικής διάβρωσης η οποία αναπτύσσεται κατά μήκος των ορίων των κόκκων του μετάλλου σε κάποιο μικρό βάθος κάτω από την επιφάνειά του προκαλώντας αποκόλληση - απολέπιση φυλλιδίων μετάλλου. Συμβαίνει συνήθως στα θερμοσκληρυνόμενα κράματα Al - Mg - Cu και Al - Zn - Mg-Cu. Και συνδέεται άμεσα με την "κατευθυντικότητα" της κοκκομετρίας του κράματος. Όταν εφαρμόζονται διεργασίες παραγωγής που οδηγούν σε ιστροπικό μέταλλο, τότε ο κίνδυνος ανάπτυξης αυτού του είδους της διάβρωσης απομακρύνεται σημαντικά<sup>10</sup>.



(α)



(β)

**Σχήμα 1.29:** Διάβρωση απολέπισης (α) σε αλουμίνιο, (β) σε ανθρακούχο χάλυβα όπου η εκτίναξη του μετάλλου μπορεί να προκαλέσει τάσεις σε συνδέσεις και να οδηγήσει σε αστοχία της κατασκευής<sup>59</sup>

Το όριο κόπωσης του μετάλλου είναι δυνατόν να παρουσιάσει σημαντική πτώση με φαινόμενα διαβρώσεως, γεγονός που πρέπει να προϋπολογίζεται για την περίπτωση κυκλικών (επαναλαμβανομένων) φορτίσεων σε έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα.

### 1.7.13 Βλάβη από Υδρογόνο (Hydrogen Damage)

Η βλάβη από υδρογόνο είναι η ρηγματώση του υλικού από τη ρόφηση υδρογόνου από το μέταλλο χωρίς να υπάρχει δράση διάβρωσης στην επιφάνεια. Σε αντίθεση με την κλασική διάβρωση όπου η αποσάθρωση του υλικού συμβαίνει στην άνοδο, στη βλάβη από υδρογόνο η αποσάθρωση συμβαίνει στην κάθοδο όπου εκλύεται το υδρογόνο. Διακρίνεται σε



ευθραυστοποίηση από υδρογόνο και σε δημιουργία φλυκταινών από υδρογόνο. Η ευθραυστοποίηση προκαλείται από διείσδυση ατομικού υδρογόνου μέσα στο μέταλλο που είτε ροφάτε στις διαταραχές ελαττώνοντας τη δυνατότητα πλαστικής παραμόρφωσης είτε σχηματίζει εύθραυστα υδρίδια<sup>7</sup>.

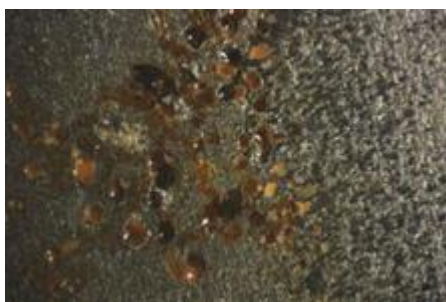


Σχήμα 1.30: Βλάβη από υδρογόνο<sup>60</sup>

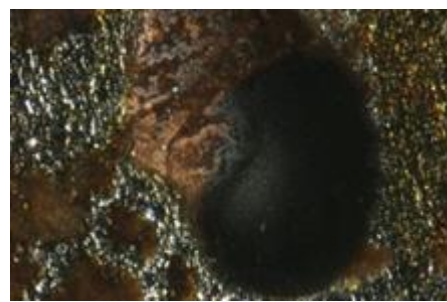
Εάν το μέταλλο έχει κοιλότητες ή κενά ορισμένα άτομα υδρογόνου μπορούν να διαχυθούν μέσα στις ατέλειες αυτές του μετάλλου και να δημιουργήσουν μοριακό υδρογόνο. Επειδή το μοριακό υδρογόνο δεν μπορεί να διαχυθεί αυξάνεται η συγκέντρωση και η πίεση του μέσα στις κοιλότητες προκαλώντας τη δημιουργία φλυκταινών από υδρογόνο και τελικά θραύση<sup>4</sup>.

#### 1.7.14 Θερμογαλβανική Διάβρωση (Thermo-galvanic Corrosion)

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



(α)



(β)

Σχήμα 1.31: Θερμογαλβανική διάβρωση κράματος αλουμινίου στους (α) 25°C και (β) 50°C<sup>61</sup>

Η θερμογαλβανική διάβρωσης όπως και στη γαλβανική διάβρωση, προκαλεί διαφορετική πόλωση στο μέταλλο, οπότε δημιουργούνται ανοδικές και καθοδικές περιοχές που προκαλούν τοπική προσβολή<sup>4</sup>.

#### 1.7.15 Μικροβιολογική Διάβρωση (Microbiologically Influenced Corrosion)

Βιολογική ή μικροβιολογική διάβρωση ορίζεται ή διάβρωση που ξεκινά ή επιταχύνεται από την παρουσία μικροοργανισμών ή μακροοργανισμών. Ποικιλίες αυτών των οργανισμών αναπτύσσονται στο νερό, στο έδαφος, στα φυσικά προϊόντα πετρελαίου και στα διαλύματα πλύσης μεταλλευμάτων.

Τα βακτήρια είναι μονοκύτταροι οργανισμοί που σχηματίζουν αποικίες αφομοιώνουν θρεπτικές ουσίες από το περιβάλλον τους μέσω χημικών αντιδράσεων και αποβάλλουν τα παραπροϊόντα των δράσεων αυτών. Αυτό προκαλεί τοπικές μεταβολές στο σύστημα και επηρεάζει τη διάβρωση είτε με κατευθείαν επίδραση στις ανοδικές και καθοδικές δράσεις

είτε με προσβολή των προστατευτικών επιστρωμάτων ή και των αναστολέων διάβρωσης είτε με παραγωγή διαβρωτικών ουσιών είτε με παραγωγή αποθέσεων με τη μορφή σωρών ή εξογκωμάτων<sup>62,63</sup>.



Σχήμα 1.32: Αποτελέσματα βιολογικής διάβρωσης<sup>64</sup>

#### 1.7.16 Διάβρωση από Ρεύματα Διαφυγής (Stray Current Corrosion)

Ο όρος διάβρωση ή ηλεκτρόλυση από ρεύματα διαφυγής αναφέρεται στη διαβρωτική διαδικασία η οποία προκύπτει από ρεύματα διαφυγής δηλαδή από ρεύματα τα οποία ρέουν σε διαδρομές διαφορετικές από το προβλεπόμενο κύκλωμα. Η φύση αυτής της διαβρωτικής διαδικασίας είναι ηλεκτρολυτική και η έκταση της βλάβης ή η απώλεια του μετάλλου είναι ευθέως ανάλογη του μεγέθους του διαφυγόντος ρεύματος που ρέει μέσα στο κύκλωμα. Υπόγειες σωληνώσεις και αγωγοί, διατάξεις συγκόλλησης, υπόγειες δεξαμενές και σιδηρόδρομοι οι οποίοι δεν προστατεύονται από καθοδική προστασία είναι ιδιαίτερα ευπαθής σε αυτό το είδος διάβρωσης. Η διάβρωση από ρεύματα διαφυγής τείνει να χαρακτηριστεί ως εντοπισμένη φθορά δημιουργώντας κρατήρες στην επιφάνεια του μετάλλου όπου υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν θα παρατηρούνταν<sup>33</sup>.



Σχήμα 1.33: Κομμάτι ατράκτου πλοίου που υπόκειται σε διάβρωση από ρεύματα διαφυγής. Η ομαλή κοίλανση της επιφάνειας και οι μικροσκοπικοί πόροι είναι χαρακτηριστικοί στην διάβρωση από ρεύματα διαφυγής του ανοξειδωτού χάλυβα<sup>65</sup>

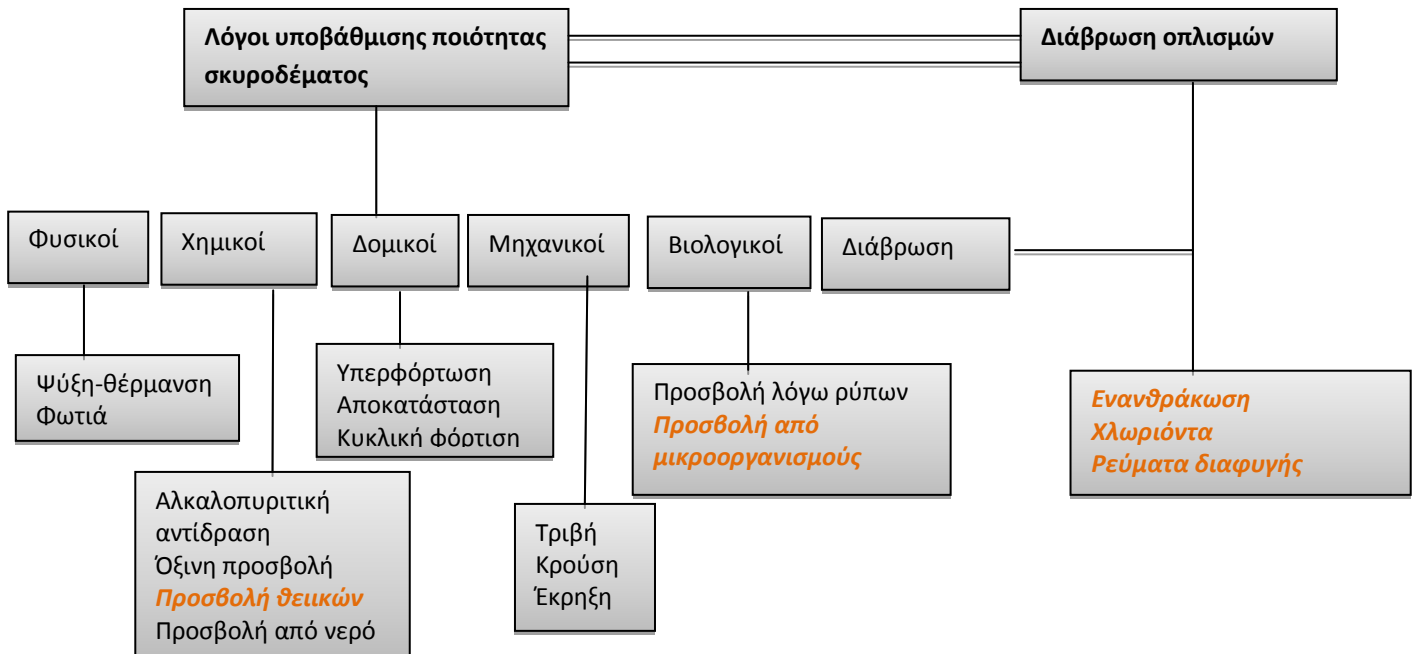
Ο μηχανισμός διάβρωσης από ρεύματα διαφυγής διαφέρει από την φυσική διάβρωση γιατί προκαλείται από ένα εξωτερικά επαγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα και είναι ανεξάρτητος από περιβαλλοντολογικούς παράγοντες όπως από την συγκέντρωση οξυγόνου ή από το pH. Περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορεί να ενισχύσουν άλλους μηχανισμούς διάβρωσης που εμπλέκονται στη συνολική διαδικασία, αλλά το τμήμα του μηχανισμού διάβρωσης από ρεύματα διαφυγής παραμένει ανεπηρέαστο. Τα ρεύματα διαφυγής μπορεί να προέρχονται από συστήματα καθοδικής προστασίας, ηλεκτρικούς σιδηρόδρομους, υπόγειες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, ηλεκτρικές μηχανές συγκόλλησης, κ.α.

## 2. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι πολύ ανθεκτικές στη φθορά, η αλληλεπίδρασή τους όμως με κάποιο διαβρωτικό περιβάλλον δύναται να προκαλέσει διάβρωση του σκυροδέματος ή του οπλισμού. Στην πραγματικότητα τα δύο αυτά είδη διάβρωσης είναι αλληλένδετα εφόσον το ένα προκαλεί αργά ή γρήγορα την εμφάνιση του άλλου.

Η υποβάθμιση της ποιότητας του σκυροδέματος μπορεί να προκληθεί από διάφορα αίτια, όπως από φυσικούς παράγοντες που περιλαμβάνουν συνεχείς κύκλους ψύξης θέρμανσης, από χημικούς παράγοντες όπως ιόντα μαγνησίου ή καθαρό νερό, από βιολογικούς και μηχανικούς παράγοντες. Όλες αυτές οι δράσεις μπορούν να συμβούν ταυτόχρονα αλλά και να έχουν συνεργιστική δράση<sup>66</sup>.

Οι διαδικασίες που οδηγούν στη διάβρωση του σκυροδέματος αλλά και αυτές που υποβαθμίζουν την ποιότητά του είναι άμεσα συνδεδεμένες, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.1**.



Σχήμα 2.1: Αίτια υποβάθμισης σκυροδέματος και αλληλεπίδραση με μηχανισμούς διάβρωσης<sup>67</sup>

### 2.1 Συμπεριφορά Χάλυβα εντός Σκυροδέματος

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

- **Αδρανής συμπεριφορά:** την συναντάμε στα ευγενή μέταλλα (π.χ χρυσός, ασήμι, πλατίνα). Η συμπεριφορά αυτή είναι αποτέλεσμα της θερμοδυναμικής σταθερότητας των μετάλλων σε αυτό το περιβάλλον δηλαδή η αντίδραση της διάβρωσης δεν πραγματοποιείται αυθόρμητα.
- **Ενεργή συμπεριφορά:** το μέταλλο διαβρώνεται. Η συμπεριφορά ενός μετάλλου σε ένα διάλυμα χαρακτηρίζεται ως ενεργή όταν το μέταλλο διαβρώνεται εντός του διαλύματος αυτού, δηλαδή διαλύεται μέσα στο διάλυμα και σχηματίζει διαλυτά μη προστατευτικά

προϊόντα διάβρωσης. Τα προϊόντα αυτά δεν εμποδίζουν την συνέχιση της διάβρωσης και παρατηρείται μεγάλη απώλεια μάζας του υλικού.

- **Παθητική συμπεριφορά:** το μέταλλο διαβρώνεται με τη βύθιση του στο διάλυμα αλλά παράλληλα σχηματίζεται ένα αδιάλυτο προϊόν (ένα λεπτό προστατευτικό φιλμ) που δρα προστατευτικά και επιβραδύνει την αντίδραση της διάβρωσης οδηγώντας την σε χαμηλά επίπεδα. Η αντίσταση στη διάβρωση εξαρτάται από τη σταθερότητα του προστατευτικού στρώματος. Αν το στρώμα διαλυθεί στο διάλυμα ή παρουσιάσει ρωγμές σε κάποια σημεία τότε το μέταλλο μπορεί να αποκτήσει ενεργή συμπεριφορά. Μερικά μέταλλα που εμφανίζουν αυτή τη συμπεριφορά είναι ο σίδηρος, το χρώμιο, το τιτάνιο, το νικέλιο και κράματα τους<sup>68</sup>.

Στην περίπτωση του σκυροδέματος, κατά τη διάρκεια της ενυδάτωσης του τσιμεντοπολτού λαμβάνεται ένα ισχυρά αλκαλικό διάλυμα πόρων με pH μεταξύ 12,5-13,6 το οποίο αποτελείται κυρίως από υδροξείδια ασβεστίου, νατρίου και καλίου. Κάτω από αυτές τις συνθήκες οι θερμοδυναμικά σταθερές ενώσεις του σιδήρου είναι τα οξείδια και τα υδροξείδια του. Σαν αποτέλεσμα για συνήθη χάλυβα οπλισμού ο οποίος είναι ενσωματωμένος σε αλκαλικό σκυρόδεμα, ένα λεπτό προστατευτικό φιλμ οξειδίων (παθητικό στρώμα) σχηματίζεται αυθόρμητα<sup>69, 70,71</sup>. Το παθητικό αυτό φιλμ έχει πάχος μερικά νανόμετρα και αποτελείται από ένυδρα οξείδια και υδροξείδια του σιδήρου με διαφορετικό ποσοστό  $Fe^{2+}$  και  $Fe^{3+}$ <sup>72</sup>. Η προστατευτική δράση του φιλμ συνίσταται στο ότι καθιστά το χάλυβα ανενεργό σε μηχανικές ή διαβρωτικές δράσεις. Παρόλα αυτά το παθητικό φιλμ οξειδίων μπορεί να καταστραφεί είτε λόγω παρουσίας ιόντων χλωρίου είτε με μείωση του pH λόγω ενανθράκωσης<sup>73</sup>, φαινόμενο το οποίο καλείται **αποπαθητικοποίηση**.

## 2.2 Στάδια Διάβρωσης Σκυροδέματος

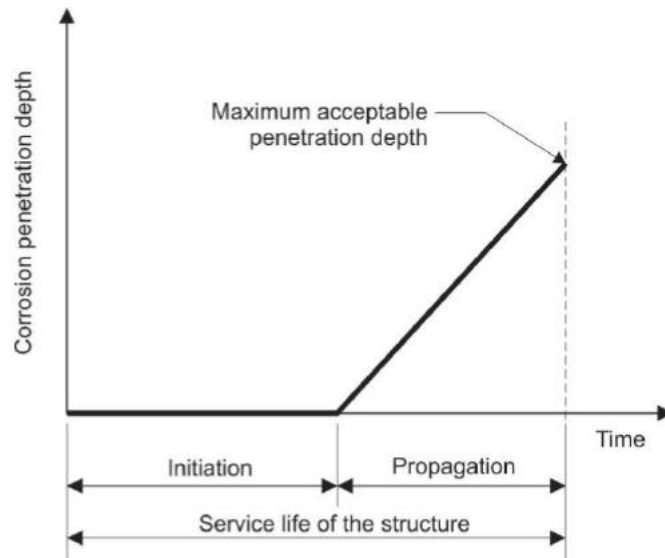
Η διάρκεια ζωής των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να χωριστεί σε δύο διακριτές φάσεις<sup>74,75</sup>. Στην πρώτη φάση ο οπλισμός είναι σε παθητική κατάσταση αλλά λαμβάνουν χώρα φαινόμενα τα οποία μπορεί να οδηγήσουν στην αποπαθητικοποίησή του, όπως ενανθράκωση ή διείσδυση χλωριόντων στη μάζα του σκυροδέματος. Η δεύτερη φάση περιλαμβάνει την διάδοση της διάβρωσης η οποία ξεκινά όταν καταστραφεί το παθητικό στρώμα του οπλισμού και ολοκληρώνεται όταν πλέον οι επιπτώσεις της διάβρωσης γίνονται ορατές και απαιτείται επιδιόρθωση του σκυροδέματος.

**Φάση έναρξης:** Κατά τη διάρκεια της φάσης έναρξης επιθετικές ουσίες ( $CO_2$ , χλωρίδια) που μπορούν να αποπαθητικοποιήσουν το χάλυβα διεισδύουν από την επιφάνεια μέχρι το εσωτερικό του σκυροδέματος. Η διάρκεια της φάσης έναρξης εξαρτάται από το πάχος της επικάλυψης του σκυροδέματος, από ρυθμό διάχυσης των διαβρωτικών ουσιών αλλά και από την συγκέντρωση που απαιτείται ώστε να διαρρήξουν το παθητικό στρώμα. Το μέν πάχος επικάλυψης καθορίζεται από διεθνή πρότυπα ανάλογα με το περιβάλλον έκθεσης και ο δε ρυθμός διάχυσης είναι εξαρτώμενος από την ποιότητα του σκυροδέματος (πορώδες, διαπερατότητα) αλλά και από τις μικροκλιματικές συνθήκες (υγρές-ξηρές) στην επιφάνεια του σκυροδέματος<sup>76</sup>.

**Φάση διάδοσης:** Η διάρρηξη του προστατευτικού στρώματος είναι η απαραίτητη προϋπόθεση για την έναρξη της διάβρωσης. Μόλις ολοκληρωθεί η καταστροφή του

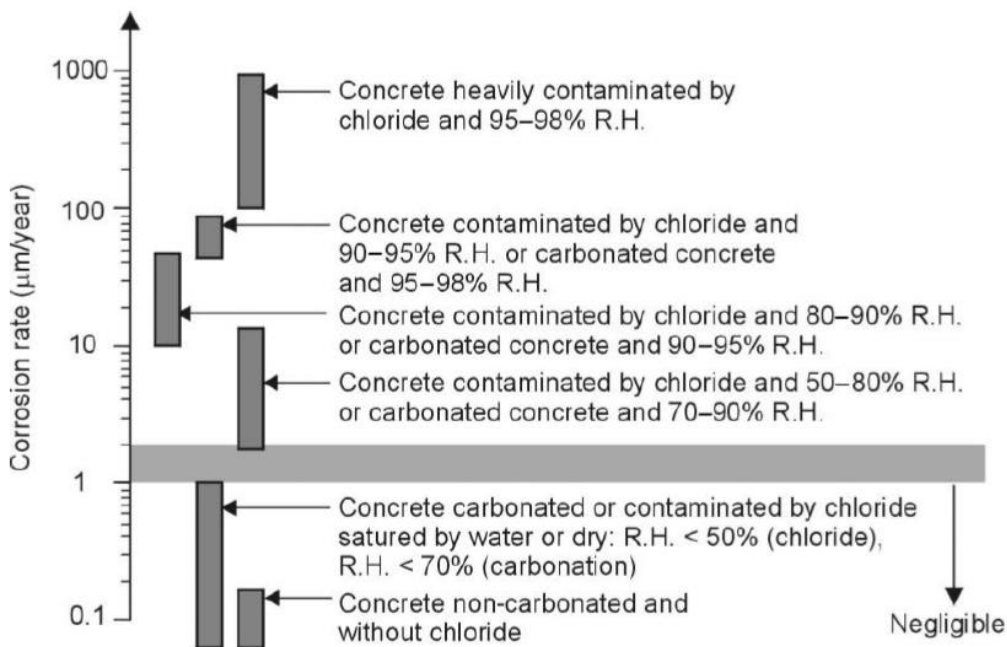


παθητικού φιλμ η διάβρωση θα συμβεί μόνο παρουσία οξυγόνου και υγρασίας στην επιφάνεια του οπλισμού (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Έναρξη και διάδοση διάβρωσης σε οπλισμένο σκυρόδεμα κατά το Μοντέλο Tuutti <sup>75</sup>

**Ρυθμός διάβρωσης:** Στο παραπάνω μοντέλο υπησέρχεται και η έννοια του ρυθμού ή ταχύτητας διάβρωσης και συνήθως εκφράζεται σε  $\mu\text{m}/\text{y}$ . Συχνά ιδιαίτερα σε εργαστηριακές δοκιμές μπορεί να δοθεί και σε ηλεκτροχημικές μονάδες, όπως  $\text{mA}/\text{m}^2$  ή σε  $\text{mA}/\text{cm}^2$ . Στην περίπτωση του χάλυβα,  $1 \text{ mA}/\text{m}^2$  ή  $1000 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  αντιστοιχεί σε ρυθμό απώλειας μάζας ίση με περίπου  $90 \text{ g}/\text{y}\cdot\text{m}^2$  και ρυθμό διάβρωσης περίπου  $11,7 \mu\text{m}/\text{y}$ . Ο ρυθμός διάβρωσης μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος αν είναι κάτω από  $2 \mu\text{m}/\text{y}$ , χαμηλός αν είναι μεταξύ  $2$  και  $5 \mu\text{m}/\text{y}$ , μέτριος μεταξύ  $5$  και  $10 \mu\text{m}/\text{y}$ , ενδιάμεσος μεταξύ  $10$  και  $50 \mu\text{m}/\text{y}$ , υψηλός μεταξύ  $50$  και  $100 \mu\text{m}/\text{y}$  και πολύ υψηλός για τιμές πάνω από  $100 \mu\text{m}/\text{y}$ <sup>63</sup>. Το Σχήμα 2.3 δείχνει τα τυπικά εύρη διακύμανσης του ρυθμού διάβρωσης σε ενανθρακωμένα σκυροδέματα ή σε αυτά που περιέχουν χλωριόντα συνάρτηση της σχετικής υγρασίας (RH) του περιβάλλοντος.



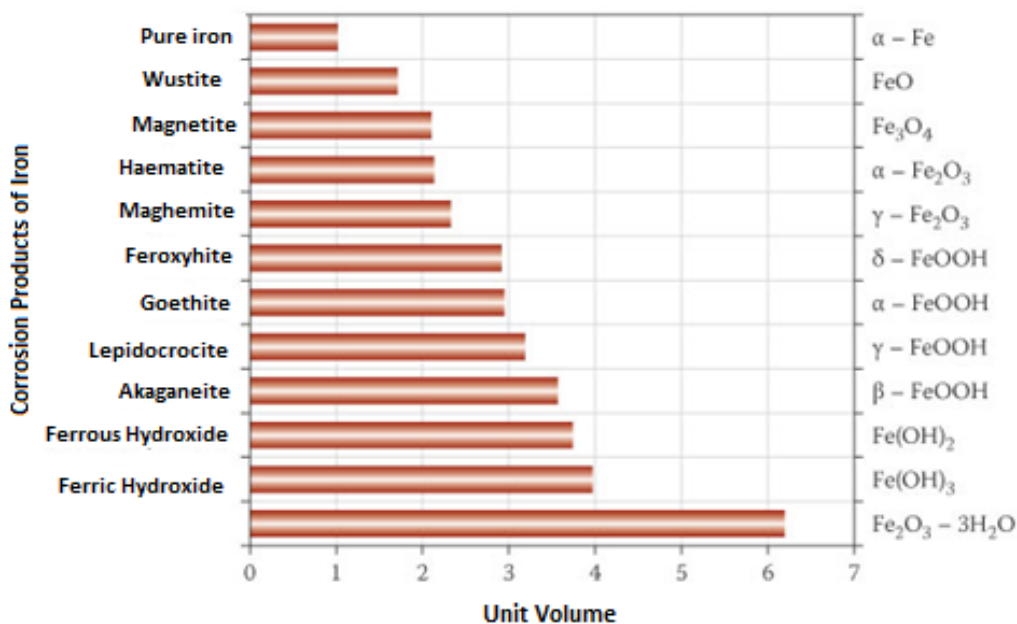
Σχήμα 2.3: Ρυθμός διάβρωσης χάλυβα σε διάφορα σκυροδέματα και συνθήκες περιβάλλοντος<sup>77</sup>

### 2.3 Αποτελέσματα Διάβρωσης Σκυροδέματος

Στις βιομηχανικές ή παραθαλάσσιες περιοχές το φαινόμενο της διάβρωσης σε κατασκευές από σκυρόδεμα εμφανίζεται λόγω αέριων ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ), αερολυμάτων ιόντων ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) και στερεών ρύπων (καπνός). Τα περισσότερα προβλήματα της διάβρωσης δεν εστιάζονται στην απώλεια μάζας (απομείωση διατομής) του οπλισμού στο σκυρόδεμα όσο στην ανάπτυξη των οξειδίων στην επιφάνεια του οπλισμού.

Φθορές από διάβρωση που οδηγούν σε ταχεία κατάρρευση των κατασκευών από σκυρόδεμα είναι πολύ σπάνιες<sup>78</sup>. Σημαντικά προβλήματα όμως δημιουργούνται όταν τα προϊόντα διάβρωσης του χάλυβα οδηγούν σε μείωση της συνάφειας οπλισμού-σκυροδέματος η οποία δεν είναι ορατή αλλά τα αποτελέσματά της εμφανίζονται στον επόμενο σεισμό<sup>79</sup>. Επίσης σε κατασκευές από προεντεταμένο σκυρόδεμα οι τένοντες κλείνονται σε σωλήνες όπου είναι δύσκολο να ανιχνευτεί η διάβρωση. Η αστοχία των τενόντων μπορεί να είναι καταστροφική λόγω του ότι περισσότερο από το 50% των φορτίων κατανέμονται σε αυτούς, οπότε κατά συνεπεία η απομείωση των οπλισμών οδηγεί σε μείωση των στατικών αντοχών με επακόλουθο την κατάρρευση της κατασκευής.

Τα πιο κοινά προβλήματα τα οποία συναντώνται λόγω της διάβρωσης είναι η φθορά, η αποκόλληση, η ρηγμάτωση και η αποτίναξη του σκυροδέματος τα οποία οφείλονται στον μοριακό όγκο των σχηματιζόμενων οξειδίων στην επιφάνεια του χάλυβα (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Σχετικός όγκος οξειδίων<sup>80</sup>

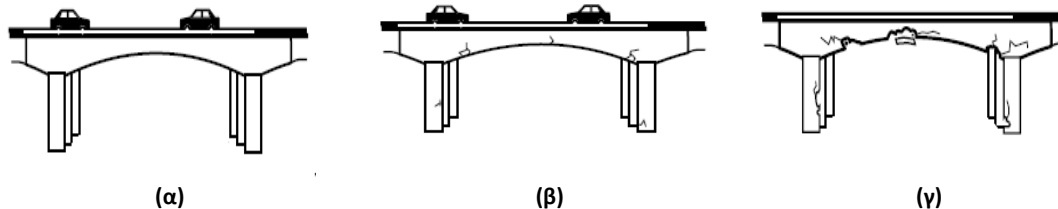
Η πυκνότητα των σχηματιζόμενων οξειδίων σε υψηλές θερμοκρασίες συνήθως έχει διπλάσιο μοριακό όγκο από αυτόν του σιδήρου αλλά μπορεί να φθάσει και στον εξαπλάσιο μοριακό όγκο. Σε υδατικό περιβάλλον ο παραπάνω όγκος των σχηματιζόμενων οξειδίων μετακινείται και εναποτίθεται στην επιφάνεια της κατασκευής, οπότε και γίνεται ορατός.

Για χάλυβα σε σκυρόδεμα δυο παράγοντες είναι αυτοί που παίζουν κυρίαρχο ρόλο. Το κυριότερο πρόβλημα είναι ότι το νερό στους πόρους του σκυροδέματος συνήθως εισέρχεται σε υγρή κατάσταση αλλά απομακρύνεται στην αέριο κατάσταση και επομένως δεν υπάρχει ο μηχανισμός της διάχυσης που οδηγεί τα οξείδια μακριά από την επιφάνεια του χάλυβα.

Αυτό σημαίνει ότι τα σχηματιζόμενα οξείδια εναποτίθενται στη διεπιφάνεια μεταξύ χάλυβα/σκυροδέμα. Ένα άλλο πρόβλημα το οποίο παρουσιάζεται είναι ότι τα σχηματιζόμενα οξείδια πάνω από ένα μικρό πάχος δεν έχουν την επαρκή συνάφεια με την επιφάνεια του σιδήρου, είναι πορώδη και καταλαμβάνουν μεγαλύτερο μοριακό όγκο ίσως και δεκαπλάσιο από αυτόν του σιδήρου που καταναλώνεται.

Από τη θερμοδυναμική της διάβρωσης οι εφελκυστικές τάσεις που ασκούνται από τα σχηματιζόμενα οξείδια οδηγούν σε ρηγμάτωση του σκυροδέματος. Έχει αναφερθεί σε προηγούμενες εργασίες ότι απομείωση της διατομής του χάλυβα μικρότερη ή ίση από 100μm αρκεί για να οδηγήσει σε ρηγμάτωση του σκυροδέματος. Το ακριβές πόσο το οποίο χρειάζεται για τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος εξαρτάται από τη γεωμετρία του πάχους επικάλυψης, η απόσταση των οπλισμών μεταξύ τους, η διάμετρος των οπλισμών και τον ρυθμό διάβρωσης τους.

Οι γωνίες σε μια κατασκευή από σκυροδέμα έχουν την τάση να ρηγματώνονται πρώτες σε μια κατασκευή και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διάχυση του οξυγόνου, των χλωριόντων και του διοξειδίου του άνθρακα γίνεται από δύο μέτωπα προς τον οπλισμό. Στο **Σχήμα 2.5** απεικονίζονται τα κυριότερα στάδια της διάβρωσης γέφυρας από οπλισμένο σκυροδέμα.

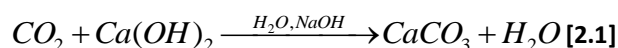


**Σχήμα 2.5:** Στάδια διάβρωσης γέφυρας από Ο.Σ, (α) γέφυρα χωρίς βλάβη, (β) έναρξη και διάδοση διάβρωσης, (γ) ρωγμές, εκτίναξη σκυροδέματος και απώλεια μάζας οπλισμού<sup>34</sup>

#### 2.4 Ενανθράκωση Σκυροδέματος

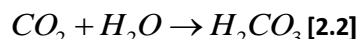
Σε υγρά περιβάλλοντα το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας σχηματίζει όξινα υδατικά διαλύματα με το νερό των πόρων του σκυροδέματος, τα οποία μπορούν να αντιδράσουν με τον ενυδατωμένο τσιμεντοπολτό και τείνουν να εξουδετερώσουν την αλκαλικότητα του σκυροδέματος. Η παραπάνω διαδικασία είναι γνωστή ως *ενανθράκωση*. Άλλα όξινα αέρια τα οποία βρίσκονται στην ατμόσφαιρα όπως το διοξείδιο του θείου μπορούν επίσης να εξουδετερώσουν την αλκαλικότητα του σκυροδέματος αλλά η επίδρασή τους είναι συνήθως περιορισμένη στην επιφάνειά του.

Τα αλκαλικά συστατικά του σκυροδέματος είναι παρόντα στο υγρό των πόρων (με τη μορφή κυρίως υδροξειδίων ασβεστίου ή και του νατρίου και του καλίου) αλλά και στα στερεά προϊόντα ενυδάτωσης, όπως στο υδροξείδιο του ασβεστίου ( $\text{Ca(OH)}_2$  ή C-S-H). Το υδροξείδιο του ασβεστίου είναι το ένυδρο συστατικό του τσιμέντου το οποίο αντιδρά πιο άμεσα με το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας. Η αντίδραση η οποία λαμβάνει χώρα σε υδατικό διάλυμα μπορεί να γραφεί συνολικά ως εξής:

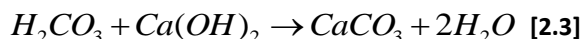


Η αντίδραση της ενανθράκωσης πραγματοποιείται σε τρία στάδια :

- **Το πρώτο στάδιο** περιλαμβάνει τη διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα στους πόρους του σκυροδέματος. Η διάχυση αυτή είναι γρηγορότερη όταν οι πόροι δεν έχουν νερό.
- **Το δεύτερο στάδιο** είναι η αντίδραση του διοξειδίου του άνθρακα με το νερό:



- **Το τρίτο στάδιο** περιλαμβάνει την αντίδραση του υδροξειδίου του ασβεστίου με το διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα:



Η ενανθράκωση δεν προκαλεί καμία επίπτωση στο ίδιο το σκυρόδεμα αν και είναι δυνατόν να μειώσει το πορώδες και να οδηγήσει σε αύξηση της αντοχής του. Ωστόσο η ενανθράκωση έχει σημαντικές συνέπειες στη διάβρωση των χαλύβδινων οπλισμών. Η πρώτη συνέπεια είναι ότι το pH του διαλύματος των πόρων πέφτει από τις φυσιολογικές τιμές του (12,5-13,6) σε τιμές που προσεγγίζουν την ουδετερότητα. Αν δεν υπάρχουν εξαρχής χλωριόντα στο τσιμέντο το διάλυμα των πόρων για την ενανθράκωση αποτελείται από σχεδόν καθαρό νερό. Αυτό σημαίνει ότι ο χάλυβας σε υγρό ενανθρακωμένο σκυρόδεμα διαβρώνεται σαν να ήταν σε επαφή με νερό<sup>81,82</sup>. Μια δεύτερη συνέπεια της ενανθράκωσης είναι ότι τα χλωριόντα, τα οποία έχουν δεσμευθεί υπό τη μορφή ένυδρων ασβεστούχων χλωριδίων του αλουμινίου, μπορούν να ελευθερωθούν καθιστώντας το διάλυμα των πόρων ακόμα πιο επιθετικό<sup>75,78,79</sup>.

#### 2.4.1 Διάχυση Διοξειδίου του Άνθρακα στο Σκυρόδεμα

Η διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα στο σκυρόδεμα ακολουθεί το νόμο του Fick

$$\frac{dx}{dt} = D_0 \frac{1}{x} \text{ [2.4]}$$

**Όπου:**  $x$  η απόσταση,  $t$  ο χρόνος,  $D_0$  ο συντελεστής διάχυσης

Ωστόσο, όσο το μέτωπο της ενανθράκωσης προχωρά μεταβάλλοντας τη σύσταση του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος, ο παραπάνω νόμος ισχύει κατά προσέγγιση. Οι ρωγμές, οι οποίες δημιουργούνται, η αλλαγή της σύνθεσης του σκυροδέματος και τα επίπεδα της υγρασίας συναρτήσκει του βάθους οδηγούν σε αποκλίσεις του παραπάνω νόμου. Από την ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης προκύπτει η ισότητα  $d = A\sqrt{t}$  όπου περιγράφει την κίνηση της ενανθράκωσης. Εμπειρικά υπάρχουν πολλά μοντέλα όπου περιγράφουν τον ρυθμό ενανθράκωσης και εξαρτώνται τόσο από την ποιότητα του σκυροδέματος όσο και από το περιβάλλον έκθεσης. Στον **Πίνακα 2.1** δίνονται εμπειρικές εξισώσεις υπολογισμού του βάθους ενανθράκωσης καθώς επίσης και τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη στον προσδιορισμό του βάθους ενανθράκωσης. Γενικά τα μαθηματικά μοντέλα καταλήγουν σε εξισώσεις συναρτήσκει του χρόνου.

Πίνακας 2.1: Εμπειρικές εξισώσεις υπολογισμού του βάθους ενανθράκωσης<sup>83</sup>

Εξίσωση	Παράμετροι
$d = A t^n$	d: βάθος ενανθράκωσης t: χρόνος σε χρόνια A: συντελεστής διάχυσης n: δείκτης (περίπου ½)
$d = A B C t^{0.5}$	A: 1.0 για εξωτερική έκθεση B: 0.07 – 1.0 εξαρτάται από το τελείωμα της επιφάνειας C=R(wc-0.25)/(0.3(1.15+3wc)) <sup>1/2</sup> για λόγο τσιμέντο / νερό (wc) ≥ 0.6 C=0.37 R(4.6wc-1.7)/(0.3(1.15+3wc)) <sup>1/2</sup> για λόγο τσιμέντο / νερό (wc)< 0.6 R: Δείκτης ουδετεροποίησης, είναι συνάρτηση του μίγματος και των πρόσθετων του σκυροδέματος.
$d = A(Bwc - c)t^{0.5}$	A είναι συνάρτηση του χρόνου συντήρησης B και C είναι συνάρτηση της Ιπτάμενης τέφρας που χρησιμοποιείται
$d=0.43(wc-0.4) (12(t-1))^{0.5}+0.1$	Για σκυρόδεμα 28 ημέρες συντήρησης
$d=0.53(wc-0.3) (12t)^{0.5}+0.2$	Μη συντηρημένο σκυρόδεμα
$d=(2.6(wc-0.3)^2 + 0.16)t^{0.5}$	Σκυρόδεμα σκεπασμένο
$d=(wc-0.3)^2 + 0.07)t^{0.5}$	Μη σκεπασμένο σκυρόδεμα
$d=10.3e^{-0.123t/28}$ για 3 χρόνια	Μη σκεπασμένο σκυρόδεμα fX = θλιπτική αντοχή σκυροδέματος στις X ημέρες
$d=3.4e^{-0.34t/28}$ για 3 χρόνια	Σκεπασμένο σκυρόδεμα
$d=680(f28 + 25)^{-1.5} - 0.6$ για 2 χρόνια	
$d=A+B/f28^{1.5} + c/(CaO - 46)^{0.5}$	CaO περιεκτικότητα αλκαλίων εκφρασμένη ως CaO
$d=(0.508/f35^{1.5} - 0.047)(365t)^{0.5}$	
$d=0.846(10wc/(10f7)^{0.5} - 0.193 - 0.076wc)(12t)^{0.5} - 0.95$	
$d=A(T-t_i)t^{0.75} C_1/C_2)^{0.5}$	t <sub>i</sub> χρόνος εισαγωγής T Θερμοκρασία σε °K C <sub>1</sub> συγκέντρωση CO <sub>2</sub> C <sub>2</sub> Δεσμευμένο CO <sub>2</sub> από το σκυρόδεμα

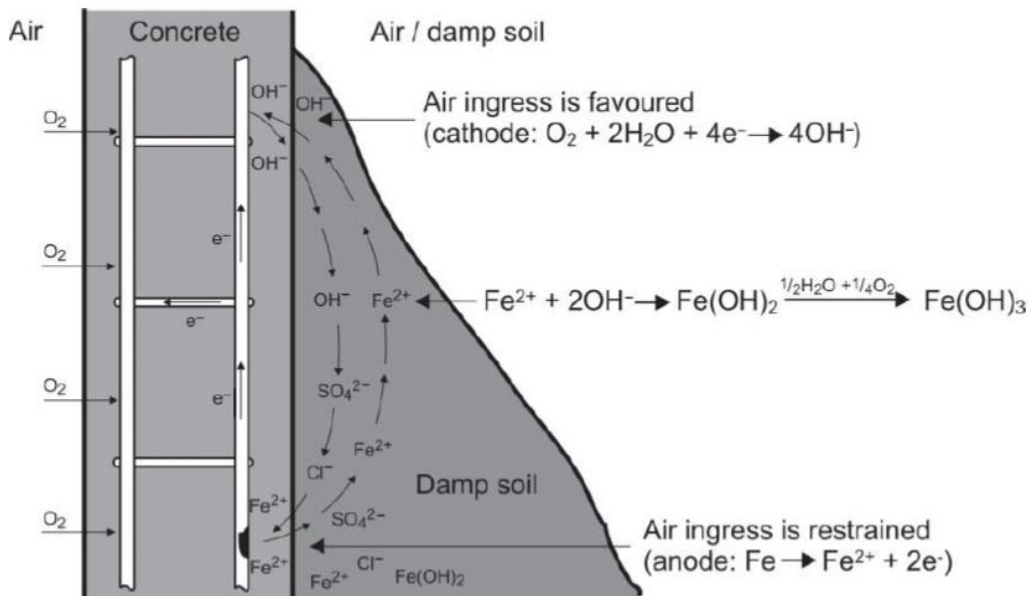
Σύμφωνα με την ισότητα  $d = A\sqrt{t}$  προκύπτει ότι για κακής ποιότητας σκυροδέματος το βάθος ενανθράκωσης μια κατασκευής από σκυρόδεμα θα είναι 16mm μετά από 20 χρόνια, ενώ για καλή ποιότητα σκυροδέματος για το ίδιο χρονικό διάστημα το βάθος ενανθράκωσης δεν ξεπερνά τα 4mm (υποθέτοντας ότι η σταθερά διάχυσης βρίσκεται στην περιοχή από 0,25- 1,0mm γr<sup>-1/2</sup> αντίστοιχα). Σε γέφυρες και σε κατασκευές από προεντεταμένο σκυρόδεμα όπου οι προδιαγραφές της τεχνολογίας σκυροδέματος είναι πολύ πιο αυστηρές συνήθως το βάθος ενανθράκωσης είναι αμελητέο μετά από 20 χρόνια ή και περισσότερα. Ωστόσο υψηλής ανθεκτικότητας σκυρόδεμα δεν ταυτίζεται πάντα με χαμηλή σταθερά διάχυσης. Γι αυτό το λόγο σε μελέτες ανθεκτικότητας κατασκευών υψηλής επικινδυνότητας σε ενανθράκωση θα πρέπει να πραγματοποιούνται και δοκιμές διαπερατότητας σε αέριους ρύπους.

#### 2.4.2 Μηχανισμός Διάβρωσης με Ενανθράκωση

Ανοδικές και καθοδικές διεργασίες μπορούν να λάβουν χώρα κάτω από ορισμένες συνθήκες σε ξεχωριστές περιοχές στην επιφάνεια του οπλισμού που οδηγούν στη δημιουργία γαλβανικών μακροκελιών. Αυτό για παράδειγμα μπορεί να παρατηρηθεί ανάμεσα σε ενεργές και παθητικές περιοχές του ίδιου του οπλισμού. Το ρεύμα το οποίο ρέει ανάμεσα στην ενεργή περιοχή που είναι λιγότερες ευγενής και δρα σαν άνοδος και ανάμεσα στην παθητική περιοχή που είναι περισσότερο ευγενής και δρα σαν κάθοδος επιταχύνει την διαβρωτική διαδικασία στις ενεργές περιοχές ενώ ταυτόχρονα σταθεροποιεί την προστασία

των παθητικών περιοχών. Η ένταση του ρεύματος των μακροκελιών αυξάνεται καθώς η διαφορά καθώς το ελεύθερο δυναμικό ανάμεσα σε παθητικές και ενεργητικές περιοχές αυξάνεται και μειώνεται καθώς η απώλεια του ρεύματος αυξάνει.

Η πιο συχνή μορφή δημιουργίας μακροκελιών διάβρωσης σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος οι οποίες εκτίθενται στην ατμόσφαιρα είναι ανάμεσα σε επιφανειακές ράβδους που έχουν αποπαθητικοποιηθεί λόγω ενανθράκωσης και σε αυτές που βρίσκονται σε παθητική κατάσταση στο εσωτερικό της κατασκευής.

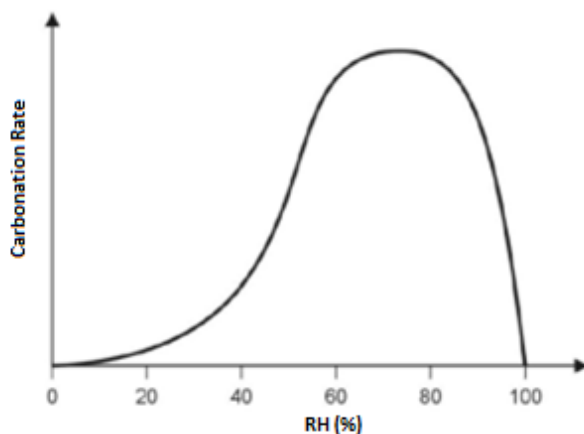


Σχήμα 2.6: Μοντέλο μακροκελιών σε τοίχο αντιστήριξης<sup>63</sup>

### 2.4.3 Παράγοντες που Επιδρούν στην Ενανθράκωση

Ο ρυθμός ενανθράκωσης εξαρτάται από τόσο από περιβαλλοντικούς παράγοντες (υγρασία, θερμοκρασία, συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα) όσο και από παράγοντες που σχετίζονται με το σκυρόδεμα (αλκαλικότητα και διαπερατότητα).

**Υγρασία:** Ο ρυθμός ενανθράκωσης εξαρτάται από την υγρασία για δύο λόγους. Πρώτον, η διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα στο σκυρόδεμα διευκολύνεται διαμέσου των πόρων που περιέχουν αέρα, αλλά είναι πολύ αργή διαμέσου εκείνων που έχουν νερό (η διάχυση του  $CO_2$  στο νερό είναι τέσσερις τάξεις μεγέθους χαμηλότερη από στον αέρα). Ο ρυθμός διάχυσης του  $CO_2$  μειώνεται κατά συνέπεια με αύξηση της υγρασίας του σκυροδέματος μέχρις ότου γίνεται μηδέν σε σκυρόδεμα κορεσμένο με νερό. Από την άλλη πλευρά, η αντίδραση ενανθράκωσης συμβαίνει μόνο παρουσία υγρασίας, και καθίσταται αμελητέα σε ξηρό σκυρόδεμα. Ο ρυθμός ενανθράκωσης αλλάζει από υγρό σε ξηρό κλίμα. Κάτω από συνθήκες ισορροπίας σε περιβάλλον με σταθερή υγρασία, ο ρυθμός ενανθράκωσης σχετίζεται με την υγρασία του περιβάλλοντος σύμφωνα με το Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Ρυθμός ενανθράκωσης συναρτήσει της σχετικής υγρασίας, σε συνθήκες ισορροπίας<sup>75</sup>

**Συγκέντρωση CO<sub>2</sub>:** Η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα μπορεί να ποικίλλει από 0,03% σε αγροτικές περιοχές μέχρι περισσότερο από 0,1% σε αστικά περιβάλλοντα, βιομηχανικά περιβάλλοντα ενώ ιδιαίτερα υψηλές τιμές συναντώνται μέσα σε σήραγγες αυτοκινητοδρόμων. Καθώς η περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> στον αέρα αυξάνει, ο ρυθμός ενανθράκωσης αυξάνεται. Εργαστηριακές δοκιμές έδειξαν ότι μετά από μια βδομάδα έκθεσης σε θάλαμο με 4% CO<sub>2</sub> το βάθος ενανθράκωσης θα είναι το ίδιο όπως μετά από ένα χρόνο έκθεσης σε κανονικές συνθήκες<sup>84</sup>.

**Θερμοκρασία:** Εάν όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες διατηρηθούν σταθεροί, ιδιαίτερα η υγρασία, αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της ταχύτητας ενανθράκωσης.

**Σύνθεση σκυροδέματος:** Η διαπερατότητα του σκυροδέματος επηρεάζει σημαντικά τη διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα και κατά συνέπεια το ρυθμό ενανθράκωσης. Μείωση στο λόγο w/c, προκαλεί μείωση του πορώδους του ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού και συνεπώς μειώνει το ρυθμό ενανθράκωσης. Ο τύπος του τσιμέντου είναι επίσης σημαντικός και η ικανότητα ενός σκυροδέματος να αντιδρά με το CO<sub>2</sub> είναι ανάλογη με την αλκαλικότητά του.

#### 2.4.4 Τρόποι Προσδιορισμού του Βάθους Ενανθράκωσης

Το βάθος ενανθράκωσης μπορεί να προσδιοριστεί με εργαστηριακές ή επί τόπου δοκιμές. Συνήθεις εργαστηριακές μέθοδοι είναι η χρησιμοποίηση ακτινών X ή χημικές αναλύσεις κατάλληλων δειγμάτων από διαφορετικά στοιχεία σκυροδέματος για να εκτιμηθεί η περιεκτικότητά του σε CaCO<sub>3</sub> ή κατάλληλες μέθοδοι μετρήσεως της αλκαλικότητας του σκυροδέματος. Μεγάλης σημασίας είναι οι επί τόπου δοκιμές λόγω του μικρού κόστους αλλά και της ταχύτητας στη διάγνωση της καταστάσεως του στοιχείου. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται κατάλληλα διαλύματα δεικτών οξέων-βάσεων που ψεκάζονται πάνω σε φρέσκο-θραυσμένες επιφάνειες σκυροδέματος. Προσοχή θα πρέπει να δοθεί στο ότι πρέπει οι φρεσκοθραυσμένες επιφάνειες να είναι σχεδόν κάθετες στην εκτεθειμένη επιφάνεια από τα προϊόντα της θραύσεως με πολύ καλή πλύση, διαφορετικά θα αλλοιωθούν τα αποτελέσματα του πειράματος.

Με τους δείκτες χρωματισμού εκτιμούμε ανάλογα με τον χρωματισμό την αλκαλικότητα του σκυροδέματος. Ως δείκτες χρωματισμού χρησιμοποιούνται η θυμολφθαλείνη η αλιζαρίνη πράσινη R και η περισσότερο χρησιμοποιούμενη φαινολοφθαλείνη που από άχρωμη γίνεται



πορφυροκόκκινη σε υψηλά αλκαλικό διάλυμα.



**Σχήμα 2.8:** (α) Δοκίμιο εκτεθειμένο σε ατμόσφαιρα πλούσια σε CO<sub>2</sub>, (β) Εφαρμογή φαινολοφθαλείνης. Οι μη ενανθρακωμένες περιοχές χρωματίζονται<sup>85</sup>

Η ενδειγμένη σύσταση του διαλύματος φαινολοφθαλείνης είναι 19gr φαινολοφθαλείνης (C<sub>20</sub>H<sub>14</sub>O<sub>4</sub>) διαλυμένο σε 50gr οιοπνεύματος και αραιωμένο σε 100ml νερού. Ο δείκτης φαινολοφθαλείνης έχει την ικανότητα να σχηματίζει σταθερή ένωση με τον ασβέστη γιατί με το χρόνο το χρώμα δεν ξεθωριάζει. Παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα ότι είναι ημικαταστρεπτική μέθοδος διότι απαιτεί θραύση της επιφάνειας του σκυροδέματος, γίνεται δε ανακριβής όταν το σκυρόδεμα είναι υγρό.

## 2.5 Διάβρωση Σκυροδέματος με Χλωριόντα

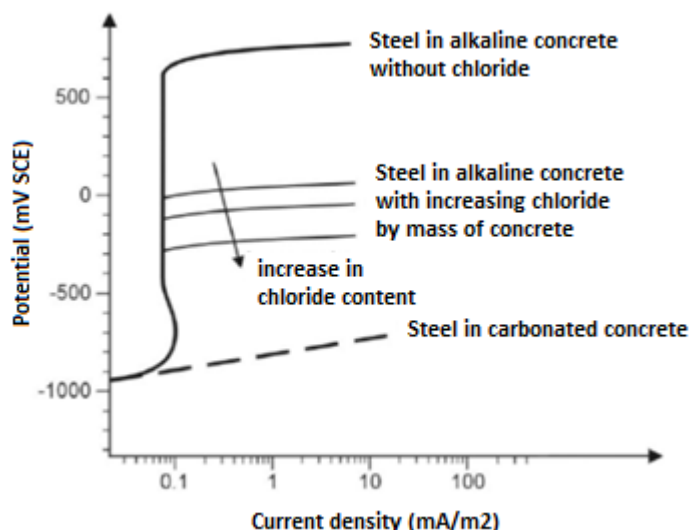
Όταν το διάλυμα περιέχει διαβρωτικά ανιόντα, τότε συνήθως δημιουργείται τοπική καταστροφή του παθητικού φιλμ στην επιφάνεια του μετάλλου με αποτέλεσμα την τοπική διάλυση του μετάλλου στις περιοχές καταστροφής του παθητικού στρώματος. Ο μηχανισμός διάρρηξης του παθητικού στρώματος ακολουθεί τα εξής στάδια<sup>86, 87, 88</sup>:

1. Ρόφηση των διαβρωτικών ιόντων στην επιφάνεια των οξειδίων.
2. Διάχυσης των ανιόντων στη μάζα των οξειδίων.
3. Δημιουργία σύμπλοκων ενώσεων τους.

Η κρίσιμη τιμή του δυναμικού για την έναρξη της διάβρωσης με βελονισμούς είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης των διαβρωτικών ανιόντων και των ιόντων αναστολής. Γενικά, όσο χαμηλότερη η συγκέντρωση των διαβρωτικών ανιόντων (καταλύτες της ανοδικής διάλυσης του μετάλλου) και όσο υψηλότερη των ιόντων αναστολής (αναστολέας διάβρωσης της ανοδικής διάλυσης του μετάλλου), τόσο ηλεκτροθετικότερο το δυναμικό εντοπισμένης διάβρωσης (pitting potential). Κατά συνέπεια υπάρχει μια κρίσιμη τιμή δηλαδή ένα ανώτατο όριο συγκέντρωσης διαβρωτικών ιόντων για δεδομένη συγκέντρωση αναστολέα διάβρωσης, κάτω από το οποίο δεν έχουμε τοπική προσβολή του παθητικού στρώματος των μετάλλων<sup>89</sup>.

Τυπικά τα ιόντα του χλωρίου είναι υπεύθυνα για την τοπική καταστροφή του παθητικού στρώματος των χαλύβων Ο.Σ. εάν η περιεκτικότητα των χλωριόντων στους πόρους του σκυροδέματος στην περιοχή γύρω από την επιφάνεια του χάλυβα υπερβεί την κρίσιμη συγκέντρωση τότε δημιουργείται τοπική καταστροφή του παθητικού στρώματος προστασίας τους από τη διάβρωση. Επίσης τα χλωριόντα προκαλούν αλλαγές στην ανοδική συμπεριφορά του χάλυβα διαφοροποιώντας τις ανοδικές καμπύλες πόλωσης όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.9**.





**Σχήμα 2.9:** Σχηματική απεικόνιση ανοδικών καμπυλών πόλωσης χάλυβα σε σκυρόδεμα με διαφορετικά ποσοστά χλωριόντων<sup>63</sup>

Η κρίσιμη συγκέντρωση των χλωριόντων δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από το pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος και από την περιεκτικότητά του σε οξυγόνο<sup>72</sup>. Η διάβρωση με βελονισμούς συμβαίνει όταν το δυναμικό διάβρωσης  $E_{corr}$  γίνει ηλεκτροθετικότερο από το δυναμικό διάρρηξης,  $E_{pit}$ , δηλαδή όταν  $E_{corr} > E_{pit}$ . Εάν υπάρχει συγκεκριμένη διαθεσιμότητα οξυγόνου, τότε το δυναμικό διάβρωσης εξαρτάται από το pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος.

$$E_{corr} = E - 0.059 \cdot pH \quad [2.5]$$

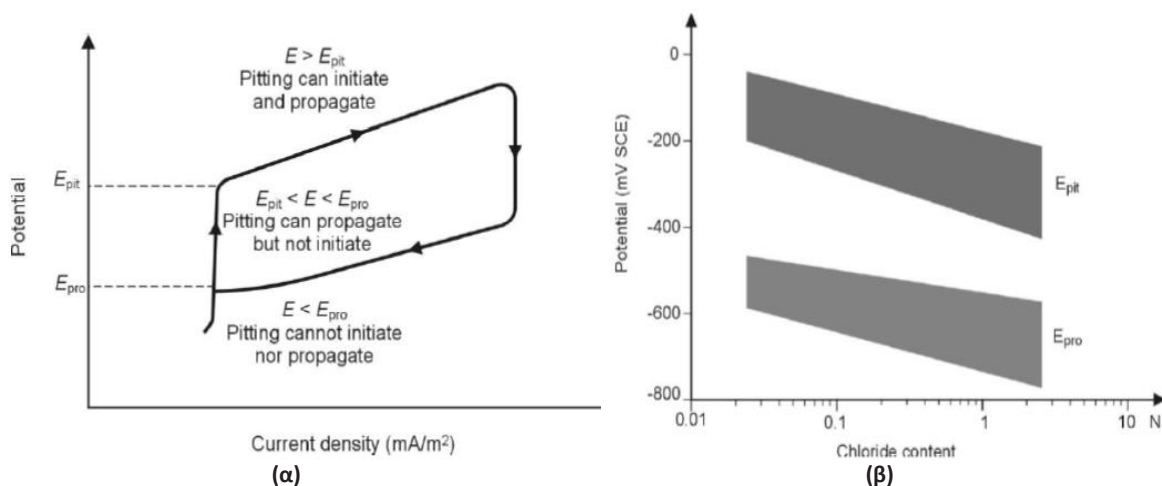
**Όπου:**  $E$  το δυναμικό διάβρωσης για  $pH = 0$

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, το δυναμικό διάβρωσης γίνεται ηλεκτροθετικότερο όσο το pH του διαλύματος μειώνεται. Στην περίπτωση ενός ενανθρακωμένου σκυροδέματος (μειωμένου pH) το δυναμικό διάβρωσης αυξάνεται με αποτέλεσμα και την αύξηση της πιθανότητας για διάβρωση.

Αντίθετα, το δυναμικό διάρρηξης γίνεται ηλεκτροαρνητικότερο αυξανόμενης της συγκέντρωσης των χλωριόντων στο διάλυμα των πόρων.

$$E_{pit} = E^{\circ}_{pit} - b \cdot \log[Cl^{-}] \quad [2.6]$$

Αφότου η διάβρωση με βελονισμούς έχει ξεκινήσει η κυκλοφορία του ρεύματος στις ανοδικές περιοχές προκαλεί και διατηρεί μια αύξηση στην οξύτητα και στην περιεκτικότητα σε χλωριόντα με αποτέλεσμα το φαινόμενο της διάβρωσης να συνεχίζεται ακόμα και εάν το δυναμικό μειωθεί. Η συμπεριφορά αυτή διευκρινίζεται με το **Σχήμα 2.10** όπου φαίνεται η πορεία του ανοδικού ρεύματος κατά τη διάρκεια κυκλικής πόλωσης. Το δυναμικό του χάλυβα ανέρχεται αρχικά πάνω από την τιμή  $E_{pit}$  για την έναρξη της τοπικής επίθεσης και έπειτα μειώνεται μέχρι να επαναπαθητικοποιηθεί το στρώμα του χάλυβα.



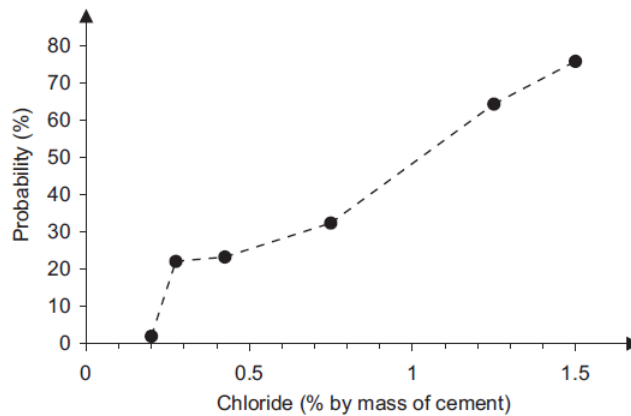
**Σχήμα 2.10:** (α) Ανοδική καμπύλη κυκλικής πόλωσης ενός παθητικού-ενεργού υλικού σε περιβάλλον χλωριόντων όπου διευκρινίζονται οι όροι  $E_{pit}$  και  $E_{pro}$ <sup>64</sup>, (β) Διαφορά  $E_{pit}$  και  $E_{pro}$ <sup>90</sup>

Το δυναμικό προστασίας  $E_{pro}$  είναι η τιμή που πρέπει να επιτευχθεί για να σταματήσει να εξελίσσεται το φαινόμενο η οποία είναι περισσότερο αρνητική από την τιμή  $E_{pit}$ . Αποτελεσματικά η περιοχή ανάμεσα στις τιμές  $E_{pit}$  και  $E_{pro}$  χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι δεν ξεκινά να μεν τη διάβρωση αλλά αν έχει ξεκινήσει επιτρέπει τη συνέχεια του φαινομένου. Η τιμή  $E_{pro}$  εξαρτάται από το ποσοστό των χλωριόντων, το pH και τη θερμοκρασία. Η διαφορά των δυναμικών  $E_{pit}$  και  $E_{pro}$  είναι της τάξης των 300 mV (Σχήμα 2.10).

### 2.5.1 Κρίσιμη Συγκέντρωση Χλωριόντων

Η ύπαρξη χλωριόντων στο σκυρόδεμα είναι συχνά ένας από τους σημαντικότερους λόγους για τη διάβρωση του οπλισμού. Σύγχρονοι κώδικες και πρότυπα που σχετίζονται με το σχεδιασμό κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, επιβάλλουν περιορισμούς σχετικά με την ποσότητα των χλωριόντων που μπορούν να εισαχθούν από πρώτες υλικά. Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206, το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό χλωριόντων είναι 0,4% για οπλισμένο σκυρόδεμα με τσιμέντο CEM I και 0,1-0,2% για προεντεταμένο σκυρόδεμα κατά βάρος τσιμέντου. Οι περιορισμοί αυτοί περιορίζουν τη διάβρωση λόγω χλωριόντων στο φρέσκο σκυρόδεμα. Σε ορισμένες κατασκευές όμως, κυρίως παλαιές, έχουν προστεθεί χλωριόντα είτε σκοπίμως (παγολυσία) είτε εν αγνοία μέσω του νερού μίξης, ή χρησιμοποιώντας άμμο θαλάσσης, ή χρησιμοποιώντας χλωριούχο ασβέστιο ως πρόσμικτο βελτιωτικό το οποίο έχει πλέον απαγορευθεί εφόσον περιεκτικότητα 0,5-2% κατά βάρος τσιμέντου μπορεί να προκαλέσει έντονη ενανθράκωση ακόμα και σε αλκαλικές συνθήκες<sup>91,92</sup>.

Η άλλη κύρια πηγή χλωριόντων στο σκυρόδεμα είναι η διείσδυση από το περιβάλλον, φαινόμενο το οποίο συμβαίνει σε παραθαλάσσιες περιοχές ή σε οδικά δίκτυα και σε περιοχές όπου χρησιμοποιούνται άλατα παγολυσίας κατά τη χειμερινή περίοδο. Η διάβρωση του οπλισμού σε μη ενανθρακωμένα σκυροδέματα μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο εάν η περιεκτικότητα σε χλωριόντα φτάσει μια οριακή τιμή, η οποία εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, αλλά το ηλεκτροχημικό δυναμικό του χάλυβα, το οποίο σχετίζεται με την ποσότητα του οξυγόνου της επιφάνειας του οπλισμού, έχει σημαντική επιρροή.



**Σχήμα 2.11:** Συσχετισμός περιεκτικότητας χλωριόντων σε κατάστρωμα γέφυρας και ποσοστού διαβρωμένου οπλισμού<sup>93</sup>

Σχετικά χαμηλά επίπεδα χλωριόντων είναι επαρκεί για να ξεκινήσουν τη διάβρωση σε δομές που εκτίθενται στην ατμόσφαιρα, όπου το οξυγόνο μπορεί να φτάσει εύκολα τον οπλισμό, ενώ πολύ υψηλότερα επίπεδα απαιτούνται σε δομές βυθισμένες σε θαλασσινό νερό ή σε ζώνες όπου το σκυρόδεμα είναι κορεσμένο από νερό, έτσι ώστε η παροχή οξυγόνου να παρεμποδίζεται και έτσι το δυναμικό του οπλισμού να είναι σχετικά χαμηλό<sup>66,94,95</sup>.

### 2.5.2 Διάχυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα

Τα χλωριόντα του περιβάλλοντος μεταφέρονται στο εσωτερικό του σκυροδέματος είτε με διάχυση είτε με μεταφορά μέσω νερού. Η μεταφορά των χλωριόντων του περιβάλλοντος στο εσωτερικό του σκυροδέματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, οι σπουδαιότεροι από τους οποίους είναι :

- Το πορώδες και η κατανομή των μεγεθών των πόρων του σκυροδέματος
- Το είδος του τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε
- 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 βρίσκονται διαλυμένα στο νερό των πόρων του σκυροδέματος και το οποία μπορούν να φτάσουν στην επιφάνεια του οπλισμού και να αρχίσουν την αποπαθητικοποίηση. Αυτά 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. Τα διαλυμένα χλωριόντα μπορούν 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 **Fridel**:  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ .

Τα χλωριόντα που διαχέονται από το περιβάλλον δημιουργούν ένα προφίλ στο σκυρόδεμα όπου κοντά στην εξωτερική επιφάνεια η συγκέντρωση των χλωριόντων είναι υψηλή και μειώνεται καθώς αυξάνεται το βάθος. Τόσο σε παραθαλάσσιες περιοχές όσο και σε δρόμους που εκτίθενται σε άλατα αποπάγωσης, το προφίλ των χλωριόντων υπακούει στην παρακάτω σχέση η οποία προέρχεται από δεύτερο νόμο του Fick:

$$\frac{C(x,t)}{C_s} = 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{x}{(2\sqrt{D \cdot t})} \right] \quad [2.7]$$

Όπου:  $C(x,t)$  η συγκέντρωση των χλωριόντων μετά από χρόνο  $t$  και σε βάθος  $x$ ,  $C_s$  η συγκέντρωση των διαχεόμενων ιόντων στην επιφάνεια του σκυροδέματος,  $D$  ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων,  $t$  ο χρόνος (χρόνια),  $x$  το βάθος σε (mm) και  $\operatorname{erf}$  η συνάρτηση σφάλματος ίση με:

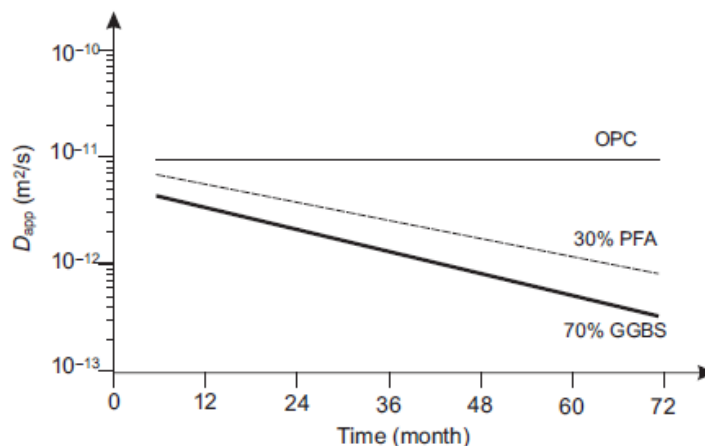
$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} \cdot dt \quad [2.8]$$

Αυτή η σχέση περιγράφει θεωρητικά την κινητική των μη σταθερών διαδικασιών διάχυσης κάτω από συγκεκριμένες παραδοχές που σπάνια συναντώνται σε πραγματικές δομές. Μόνο σε σκυρόδεμα πλήρως και μόνιμα κορεσμένο σε νερό μπορεί η διείδυση των χλωριόντων να γίνει αποκλειστικά με μηχανισμούς διάχυσης αλλιώς συμβάλλουν και άλλοι μηχανισμοί μεταφοράς στην είσοδο των χλωριόντων (τριχοειδής αναρρίχηση)<sup>96</sup>. Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω εξίσωση η οποία είναι πανομοιότυπη με την παραπάνω, αλλά ως συγκέντρωση χλωριόντων νοείται η συνολική, περιλαμβανομένων και των δεσμευμένων ιόντων χλωρίου.

$$C_x = C_s \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{(2\sqrt{D_{app} \cdot t})} \right) \right) \quad [2.9]$$

Όπου:  $C_x$ , το συνολικό περιεχόμενο χλωριόντων (% κατά βάρος τσιμέντου ή σκυροδέματος) σε χρόνο  $t$  (sec) και σε βάθος  $x$  (m) από την επιφάνεια του σκυροδέματος,  $D_{app}$  ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης χλωριόντων ( $m^2/s$ ) οποίος κυμαίνεται από  $10^{-13}$ - $10^{-10}$   $m^2/s$  ανάλογα με την ποιότητα του σκυροδέματος και τις συνθήκες έκθεσης (Σχήμα 2.12) και  $C_s$  η συγκέντρωση επιφανειακών χλωριόντων (% κατά βάρος τσιμέντου ή σκυροδέματος).

Ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης καθώς και η συγκέντρωση των επιφανειακών χλωριόντων συχνά προσδιορίζονται με βάση πειραματικά δεδομένα<sup>97,98,99,100,101,102</sup>.

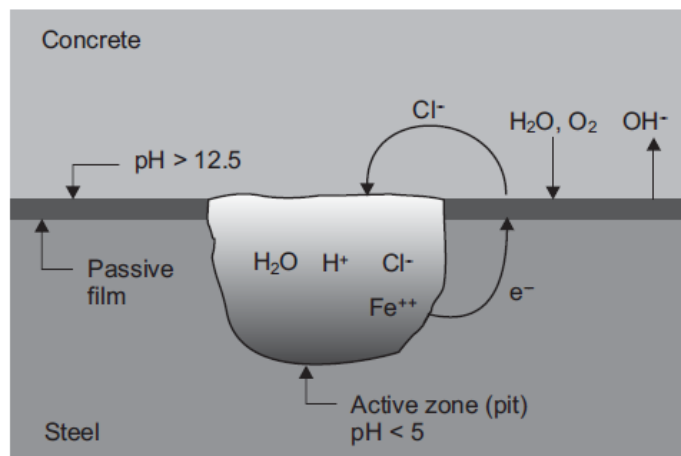


Σχήμα 2.12: Φαινόμενος συντελεστής διάχυσης χλωριόντων για τσιμέντο Portland (OPC), για τσιμέντο με υπτάμενη τέφρα (PFA) και για τσιμέντο με σκωρία υψικάμινων<sup>63</sup>

### 2.5.3 Μηχανισμός Διάβρωσης σε Σκυρόδεμα με Χλωριόντα

Τα ιόντα χλωρίου καταστρέφουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίων που βρίσκεται στην επιφάνεια του οπλισμού και συνεπώς όντας ακάλυπτος ο οπλισμός υπόκειται σε εντοπισμένη διάβρωση με βελονισμούς. Οι περιοχές στις οποίες το στρώμα οξειδίων έχει

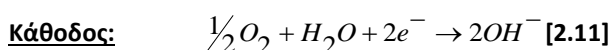
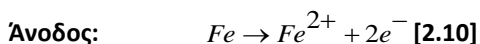
διαλυθεί δρουν ως άνοδοι ενώ οι γειτονικές περιοχές του χάλυβα με το προστατευτικό στρώμα λειτουργούν ως κάθοδοι όπου λαμβάνει χώρα η κατανάλωση του οξυγόνου. Ο μηχανισμός της διάβρωσης με βελονισμούς που διαδραματίζεται στην επιφάνεια του χάλυβα απεικονίζεται στο **Σχήμα 2.13**.

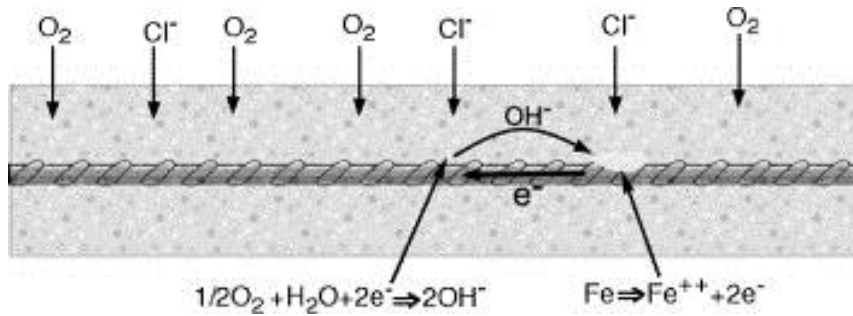


**Σχήμα 2.13:** Μηχανισμός διάβρωσης με βελονισμούς στον οπλισμό του σκυροδέματος<sup>63</sup>

Μετά την έναρξη της διαβρωτικής διαδικασίας το περιβάλλον γίνεται ιδιαίτερα επιθετικό ειδικά γύρω από τους βελονισμούς. Το ρεύμα που ρέει από τις ανοδικές στις καθοδικές περιοχές, αυξάνει τη συγκέντρωση των χλωριόντων (τα χλωριόντα όντας αρνητικά φορτισμένα οδηγούνται στην ανοδική περιοχή) και μειώνει την αλκαλικότητα (λόγω υδρόλυσης των παραγόμενων προϊόντων διάβρωσης). Αντιθέτως, το ρεύμα ενισχύει το προστατευτικό φιλμ στην παθητική περιοχή, εφόσον τείνει να εξαλείψει τα χλωριόντα ενώ ταυτόχρονα η καθοδική αντίδραση αυξάνει την αλκαλικότητα. Κατά συνέπεια, τόσο η ανοδική συμπεριφορά των δραστικών περιοχών, όσο και η καθοδική συμπεριφορά των παθητικών περιοχών, σταθεροποιούνται. Το φαινόμενο επιταχύνεται (αυτοκαταλυτικός μηχανισμός βελονισμών) και ο ρυθμός διάβρωσης μπορεί να φτάσει μέχρι και την τιμή 1 mm/y, η οποία γρήγορα οδηγεί σε μείωση της διατομής του οπλισμού.

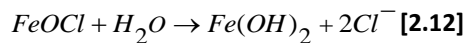
Ο παραπάνω μηχανισμός διάβρωσης ονομάζεται διάβρωση με δημιουργία **τοπικού γαλβανικού στοιχείου** (ιδιοδιάβρωση) και συμβαίνει πάνω στον ίδιο οπλισμό, όπου γειτονικές περιοχές αποτελούν την άνοδο και την κάθοδο, ανάλογα με την συγκέντρωση των χλωριόντων σε καθεμία από αυτές. Τα χλωριόντα προωθούνται στον οπλισμό μέσω διάχυσης και όταν η συγκέντρωσή τους αποκτήσει μια ορισμένη τιμή αρχίζει η αποπαθητικοποίηση του, λόγω δημιουργίας τοπικών γαλβανικών στοιχείων. Εκεί πραγματοποιείται η διάλυση του σιδήρου, σύμφωνα με τις αντιδράσεις:





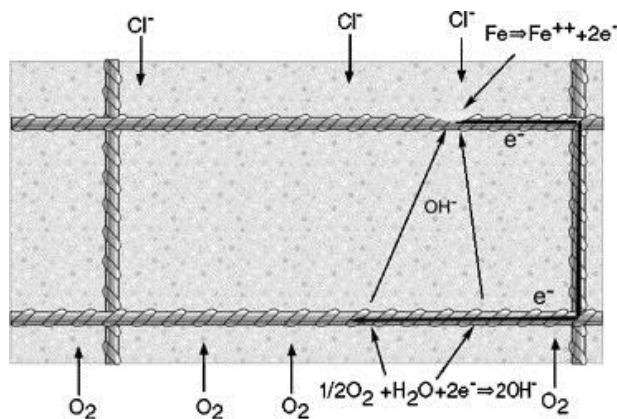
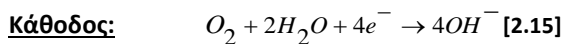
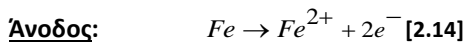
Σχήμα 2.14: Διάβρωση με τη δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων<sup>103</sup>

Τα ιόντα του σιδήρου που σχηματίζονται από την αντίδραση της καθόδου, αντιδρούν με τα χλωριόντα που έχουν φθάσει στην επιφάνεια του οπλισμού σχηματίζοντας διχλωριούχο σίδηρο ( $FeCl_2$ ) ο οποίος παρουσία του οξυγόνου μετατρέπεται σε χλωρίδιο του τρισθενούς σιδήρου ( $FeOCl$ ). Κατόπιν το χλωρίδιο υδρολύεται σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Από τα παραπάνω παρατηρείται ότι τα χλωριόντα λαμβάνονται σαν προϊόντα μετά το τέλος των αντιδράσεων. Συνεπώς είναι προφανές ότι οι παραπάνω αντιδράσεις αποτελούν ένα αυτοκαταλυόμενο σύστημα όταν η συγκέντρωση των χλωριόντων φθάσει σε μια ορισμένη τιμή. Έτσι ακόμη και αν σταματήσει η είσοδος χλωριόντων η διάβρωση του οπλισμού συνεχίζεται γιατί η συγκέντρωση των χλωριόντων στην επιφάνεια του οπλισμού παραμένει σταθερή.

Στην πράξη όμως ο μηχανισμός διάβρωσης που συνήθως συναντάται είναι διάβρωση με δημιουργία **γαλβανικού μακροστοιχείου**. Η είσοδος των χλωριόντων πραγματοποιείται μόνο από τη μια πλευρά της κατασκευής και τότε στις ράβδους που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του οπλισμού υπάρχει συγκέντρωση των χλωριόντων ενώ στις ράβδους που βρίσκονται στο εσωτερικό του οπλισμού η συγκέντρωση των χλωριόντων είναι ελάχιστη ή μηδέν. Έτσι οι ράβδοι με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση χλωριόντων δρουν σαν άνοδος ενώ οι ράβδοι με τη μικρότερη συγκέντρωση χλωριόντων δρουν σαν κάθοδος. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία ενός γαλβανικού μακροστοιχείου (**Σχήμα 2.15**) στο οποίο οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι οι εξής:



Σχήμα 2.15: Δημιουργία γαλβανικών μακροστοιχείων στην επιφάνεια διαφορετικών οπλισμών<sup>96</sup>

Στη συνέχεια, όπως και πριν, τα ιόντα του σιδήρου με τα υδροξυλιόντα σχηματίζουν υδροξείδιο του σιδήρου.

Η ταχύτητα διάβρωσης, στην περίπτωση της ιδιοδιάβρωσης εξαρτάται από το δυναμικό μεταξύ ανόδου-καθόδου, τη σχέση των επιφανειών ανόδου-καθόδου καθώς και από την ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος, ενώ στην περίπτωση δημιουργίας γαλβανικού μακροστοιχείου η ταχύτητα διάβρωσης είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της ιδιοδιάβρωσης.

Εκτός από το σχηματισμό της «κανονικής» ή κόκκινης σκουριάς όπως περιγράφηκε στις παραπάνω παραγράφους υπάρχει και ο σχηματισμός της μαύρης ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Ειδικότερα εάν η άνοδος και η κάθοδος είναι καλά διαχωρισμένες, δηλαδή απόσταση αρκετά εκατοστά, και η άνοδος δεν έχει επάρκεια από οξυγόνο (όπως άνοδος υποθαλάσσια) τα ιόντα του σιδήρου  $\text{Fe}^{2+}$  θα παραμείνουν στο διάλυμα. Αυτό σημαίνει ότι τα σχηματιζόμενα προϊόντα διάβρωσης δεν ασκούν εφελκυστικές τάσεις έτσι ώστε το σκυρόδεμα να αρχίσει να ρηγματώνεται, οπότε το φαινόμενο της διάβρωσης να είναι εμφανές και κατά συνέπεια διαγνώσιμο. Η μαύρη ή πράσινου χρώματος σκουριά ( $\text{Fe}_2\text{O}(\text{OH})_2$ ) εμφανίζεται σε οπλισμούς εκτεθειμένους στον αέρα ή κάτω από μεμβράνες στεγανοποίησης επιφανειών, κατασκευές υποθαλάσσιες και γενικότερα σε συνθήκες διάβρωσης κορεσμένες από νερό. Ο σχηματισμός τέτοιου είδους οξειδίων είναι σημαντικό να τονισθεί ότι καθιστά τη διάβρωση αρκετά επικίνδυνη λόγω του ότι ξεκινά και εξελίσσεται χωρίς να δίνει κανένα σημείο όπως ρηγματώσεις, ξεφλουδίσματα στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

#### 2.5.4 Διάβρωση σε Θαλασσινό Νερό

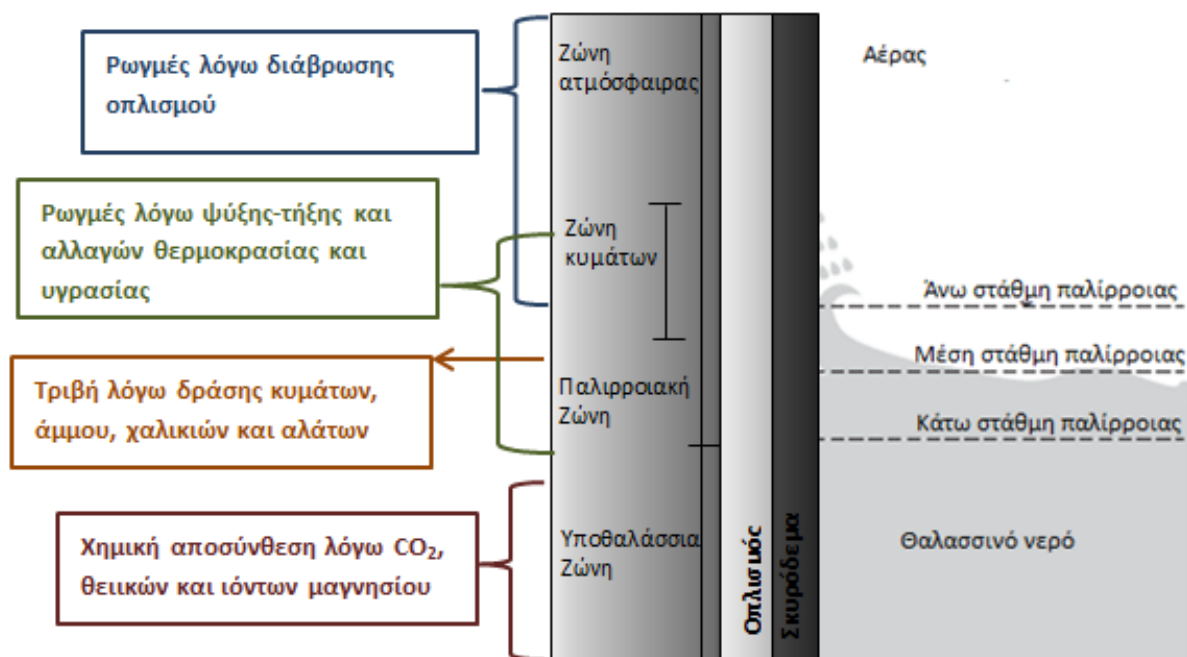
Η συμπεριφορά των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (γέφυρες, πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου) που εκτίθενται σε θαλασσίο περιβάλλον είναι μεγάλης σημασίας εξαιτίας του τεράστιου κόστους κατασκευής. Η συγκέντρωση των διαλυτών αλάτων σε ανοικτή θάλασσα ανέρχεται περίπου σε 3,5% κ.β., ενώ το pH ποικίλλει μεταξύ των τιμών 7,5-8,4. Τα ιόντα  $\text{Mg}^{2+}$  και  $\text{SO}_4^{2-}$  είναι ιδιαίτερα επιβλαβή για τα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου και η συγκέντρωσή τους είναι 1400 και 2700 mg/L αντίστοιχα, ενώ των  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$  είναι περίπου 11000 και 20000 mg/L.

Οι φθορές του σκυροδέματος που εκτίθεται σε θαλασσινό νερό μπορεί να οφείλονται σε<sup>104</sup>:

- Επίδραση των αλάτων (θειικών, χλωριούχων και μαγνησίου) μέσα στο θαλασσινό νερό με συνέπεια την αντίδραση αυτών με τα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου. Σε ενυδατωμένα μη οπλισμένα και χωρίς αδρανή τσιμέντα Portland τα πιο επικίνδυνα συστατικά του θαλασσινού νερού, από άποψης χημικής προσβολής των συστατικών του σκυροδέματος, είναι τα θειικά άλατα και το μαγνήσιο εφόσον η συγκέντρωσή τους υπερβαίνει τα 1500mg/ml και 500mg/ml, αντίστοιχα.
- Επίδραση αλκαλίων (νατρίου, καλίου) με τα αδρανή με συνέπεια την αντίδραση διόγκωσης αλκαλίων-αδρανών (αλκαλοπυριτική αντίδραση)
- Επίδραση Παγετού – Τήξεως εξαιτίας της κρυστάλλωσης αλάτων στο σκυρόδεμα λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών αλλά και διαφορών στα διάφορα μέρη της κατασκευής
- Βιολογική επίδραση με συνέπεια τον σχηματισμό βιολογικής μεμβράνης στην επιφάνεια του σκυροδέματος
- Υδροφθορά, εξαιτίας της βίαιης πρόσκρουσης του θαλασσινού νερού με την επιφάνεια του σκυροδέματος.

Γενικά, μία θαλάσσια κατασκευή η οποία έρχεται σε άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό, διακρίνεται σε τρεις βασικές ζώνες (

**Σχήμα 2.16**). Σε κάθε μια από τις ζώνες αυτές λαμβάνουν χώρα φυσικοχημικά φαινόμενα διαφορετικής έντασης, τα οποία επιδρούν αρνητικά στην ανθεκτικότητα της κατασκευής έναντι της διάβρωσης.



**Σχήμα 2.16:** Διάβρωση θαλάσσιων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος

**Ζώνη κάτω από το νερό:** Είναι η περιοχή, η οποία βρίσκεται μονίμως κάτω από την κατώτερη παλιρροιακή στάθμη. Όταν το σκυρόδεμα βρίσκεται μονίμως βυθισμένο κάτω από το νερό προστατεύεται λόγω του ομοιόμορφου περιβάλλοντος όσον αφορά τη θερμοκρασία και την περιεκτικότητα σε υγρασία, από τη συνεχή διαβροχή του από το θαλασσινό νερό. Επίσης αποκλείονται και άλλες μορφές διάβρωσης όπως διάβρωση από παγετό και διάβρωση μηχανικών δράσεων οι οποίες συναντώνται στην περίπτωση της εναλλασσόμενης διαβροχής (κύκλοι ύγρυνσης – ξήρανσης). Η ζώνη του σκυροδέματος που βρίσκεται κάτω από το νερό μονίμως υπόκειται κυρίως σε χημική διάβρωση από τα άλατα του θαλασσινού νερού (χλωριούχα, θειικά και άλατα μαγνησίου) αλλά περιορίζεται από την μικρή ποσότητα οξυγόνου.

**Παλιρροιακή Ζώνη:** Είναι η περιοχή μεταξύ της άνω και της κάτω παλιρροιακής στάθμης. Η ζώνη αυτή επηρεάζεται από τα κύματα και είναι η ζώνη στην οποία εμφανίζεται η μεγαλύτερη φθορά. Η διάβρωση που παρουσιάζεται οφείλεται κατά κύριο λόγο τόσο σε μηχανική φθορά από την πρόσκρουση των κυμάτων, αλλά και από τη μεταφορά διαβρωτικών αλάτων του νερού στο σκυρόδεμα. Επίσης στην παλιρροιακή ζώνη μπορεί να συμβεί παγετός, ενώ συγχρόνως αυτή υπόκειται σε χημική διάβρωση λόγω των διαλυμένων αλάτων του νερού αλλά και σε ενανθράκωση του σκυροδέματος από το CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας.

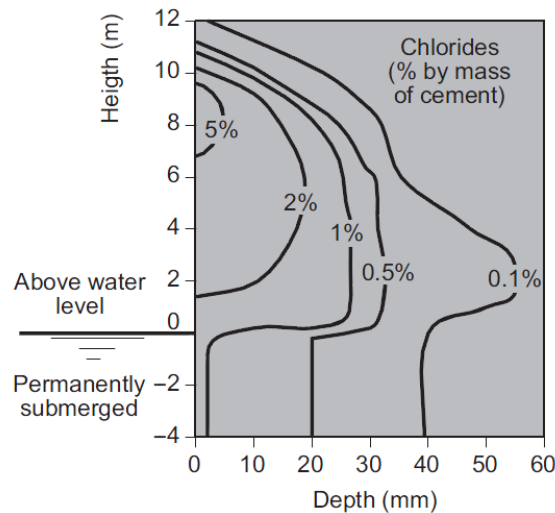
**Εκτεθειμένη Ζώνη:** είναι η περιοχή του σκυροδέματος η οποία βρίσκεται μονίμως υπό ατμοσφαιρική έκθεση. Επηρεάζεται μόνο από την υγρασία και τα σταγονίδια του νερού. Κύρια μορφή διάβρωσης του σκυροδέματος είναι η ενανθράκωσής του, ενώ ο οπλισμός της



κατασκευής διαβρώνεται λόγω των χλωριόντων του θαλασσινού νερού<sup>105</sup>. Είναι αξιοσημείωτο ότι στην περιοχή αυτή υπάρχουν τα περισσότερα χλωριόντα.

Ανάλυση του προφίλ χλωριόντων σε πραγματικές κατασκευές έδειξε ότι η επιφανειακή τους συγκέντρωση ( $C_s$ ) ποικίλει ανάλογα με τη δομή και παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ανάλογα με το χρόνο<sup>106</sup>. Για κατασκευές εκτεθειμένες σε θαλάσσιο περιβάλλον παρατηρήθηκε ότι η τιμή του  $C_s$  μετά από τρεις μήνες παρέμεινε σταθερή<sup>107</sup>, αν και δεν υπάρχει γενική συμφωνία σχετικά με την παραπάνω παρατήρηση<sup>108</sup>.

Είναι γεγονός πως σε παράκτιες περιοχές πολλές διεργασίες μεταφοράς αλληλεπιδρούν όπως τριχοειδής αναρρίχηση και διάχυση οι οποίες εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους όπως τη σχετική θέση, τη μέση στάθμη του νερού, το ύψος των κυμάτων, τη ζώνη παλίρροιας κ.α. Επιπλέον οι συνεχείς κύκλοι ύγρυνσης και ξήρανσης στις ζώνες παλίρροιας και άμπωτης μπορούν να προκαλέσουν συσσώρευση των χλωριδίων, ενώ έκθεση σε ανέμους και βροχή δύναται να αποπλύνει το προηγούμενος δεσμευμένο άλας του χλωρίου. Οι περισσότεροι από αυτούς τους παράγοντες εξαρτώνται από την σύνθεση του σκυροδέματος (τύπος τσιμέντου, συγκέντρωση δεσμευμένων χλωριόντων, απορροφητικότητα, διαπερατότητα υδρατμών). Το αποτέλεσμα είναι ότι η διείδυση των χλωριόντων είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο εξαρτώμενο από τη θέση, το περιβάλλον και το είδος του σκυροδέματος (**Σχήμα 2.17**).

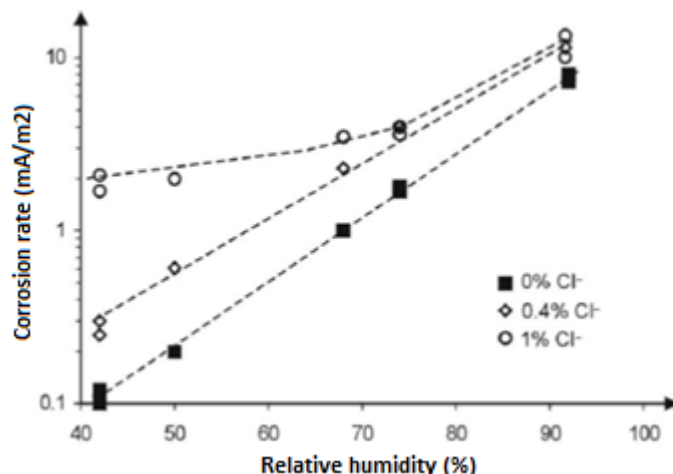


**Σχήμα 2.17:** Προφίλ χλωριόντων σε παραθαλάσσια κατασκευή συναρτήσει του ύψους από το θαλάσσιο επίπεδο<sup>109</sup> (τσιμέντο Portland,  $w/c=0.5$ ,  $C_3A=10\%$ )

### 2.5.5 Ενανθρακωμένο Σκυρόδεμα με Χλωριόντα

Σε ένα ενανθρακωμένο σκυρόδεμα η ύπαρξη χλωριόντων είναι πάρα πολύ δυσμενής ακόμα και όταν η συγκέντρωσή τους είναι τόσο μικρή ώστε να μην προκαλούσαν από μόνα τους διάβρωση. Στο **Σχήμα 2.18** δίνεται ο ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει της υγρασίας σε τεχνητά ενανθρακωμένα τσιμεντοκονιάματα με και χωρίς την παρουσία χλωριόντων.

Όπως φαίνεται ο ρυθμός διάβρωσης θα είναι αμελητέος μόνο όταν η εξωτερική σχετική υγρασία είναι κάτω από 75%, 60% ακόμα και 40%, καθώς η περιεκτικότητα των χλωριόντων αυξάνεται από μηδέν σε 1% κατά βάρος τσιμέντου.



Σχήμα 2.18: Συσχετισμός σχετικής υγρασίας και ρυθμού διάβρωσης σε ενανθρακωμένα τσιμεντοκονιάματα με και χωρίς χλωριόντα<sup>110</sup>

## 2.6 Διάβρωση Σκυροδέματος με Ρωγμές

Η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση είναι ένας ξεχωριστός τύπος διάβρωσης που εμφανίζεται στο σκυρόδεμα, όταν ασκούνται μηχανικές πιέσεις και ταυτόχρονα το υλικό βρίσκεται υπό την επίδραση παραγόντων που ευνοούν την διάβρωση.

Η διαδικασία αναπτύσσεται σε δύο βήματα:

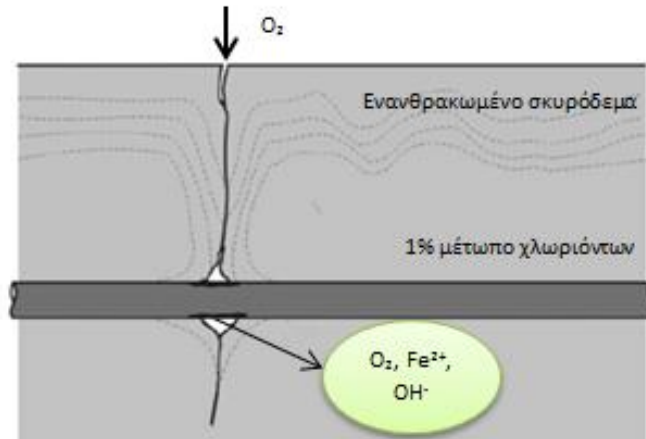
1. ένα ή διάφορα μικροραγίσματα δημιουργούνται στην επιφάνεια του σκυροδέματος
2. αυτές οι ρωγμές αυξάνονται έως ότου φθάσουν σε ένα ορισμένο βάθος όπου διαδίδονται πολύ γρήγορα

Η διάβρωση κατά τη διάρκεια του πρώτου βήματος δεν μπορεί να παρατηρηθεί με τη βοήθεια της μέτρησης του ποσοστού διάβρωσης, αφού η απώλεια μετάλλου είναι αμελητέα. Παράγοντες που ευνοούν την διάβρωση με μηχανική καταπόνηση είναι τα θειικά άλατα σουλφιδίων, ενώ τα χλωριόντα δεν σχετίζονται άμεσα με αυτόν τον τύπο διάβρωσης.

Οι περιπτώσεις διάβρωσης στις ρωγμές είναι ίδιες με την αυτή των χλωριόντων. Συγκεκριμένα υπάρχει η διάβρωση με δημιουργία τοπικού γαλβανικού στοιχείου (ιδιοδιάβρωση) και με δημιουργία γαλβανικού μακροστοιχείου<sup>53</sup>.

Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος και το πλάτος της ρωγμής τόσο μεγαλύτερη είναι η διάχυση των διαβρωτικών ουσιών του περιβάλλοντος στο εσωτερικό του σκυροδέματος και άρα τόσο μεγαλύτερη η διάβρωση. Αν οι ρωγμές φθάσουν στην επιφάνεια του οπλισμού, τότε αρχίζει η διάβρωση του.

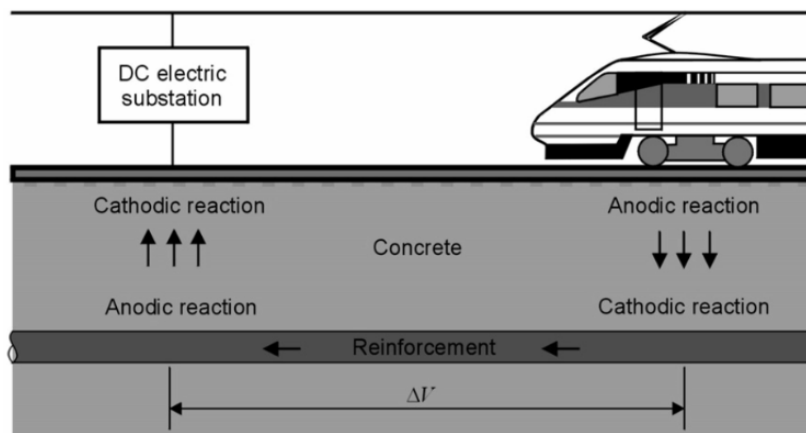
Αν το πλάτος της ρωγμής και το πάχος της επικάλυψης είναι μικρά, τότε δημιουργείται ένα γαλβανικό μακροστοιχείο, στο οποίο η άνοδος είναι η περιοχή του οπλισμού που είναι ακάλυπτος στη ρωγμή, ενώ η κάθοδος είναι η περιοχή του οπλισμού που είναι καλυμμένη από σκυρόδεμα γύρω από τη ρωγμή. Και σε αυτή την περίπτωση δημιουργούνται στη ρωγμή προϊόντα διάβρωσης που την γεμίζουν.



Σχήμα 2.19: Μηχανισμός διάβρωσης σε σκυρόδεμα με ρωγμές<sup>111</sup>

## 2.7 Διάβρωση Σκυροδέματος από Ρεύματα Διαφυγής

Τα ρεύματα διαφυγής, τα οποία προέρχονται από σιδηροδρομικούς σταθμούς και συστήματα καθοδικής προστασίας, μπορούν να ρέουν και μέσα από ενισχυμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα και να προκαλέσουν αλλαγές στο ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο σκυρόδεμα που επηρεάζουν τη διάβρωση του οπλισμού. Το ρεύμα μπορεί να είναι εναλλασσόμενο ή συνεχές, ανάλογα την πηγή και παρεκκλίνει από την καθορισμένη πορεία του λόγω του χαμηλότερης αντίστασης της νέας διαδρομής. Κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα που επηρεάζονται από ρεύματα διαφυγής είναι γέφυρες και τούνελ καθώς και κατασκευές κοντά σε σιδηροδρόμους. Το σκυρόδεμα αποτελεί τον ηλεκτρολύτη μέσω του οποίου ρέει το ηλεκτρικό ρεύμα και οι διαφορετικοί ράβδοι του οπλισμού αποτελούν τα σημεία ανόδου και καθόδου. Η διάβρωση λόγω ρευμάτων διαφυγής συμβαίνει με το μηχανισμό μακροκελιών και είναι εντοπισμένη φθορά, καταλήγοντας σε μεγάλη απώλεια του οπλισμού. Το εναλλασσόμενο ρεύμα είναι λιγότερο επικίνδυνο λόγω της συνεχούς αλλαγής της πολικότητάς του.



Σχήμα 2.20: Μηχανισμός διάβρωση σκυροδέματος από ρεύματα διαφυγής<sup>63</sup>

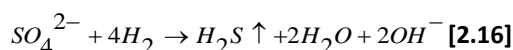
Τα ρεύματα διαφυγής σπάνια έχουν διαβρωτική επίδραση στο χάλυβα και στην πραγματικότητα ο παθητικοποιημένος οπλισμός σε αλκαλικό περιβάλλον επιδεικνύει μια ενδογενή αντοχή σε αυτά. Παρόλα αυτά κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες (μεγάλη συγκέντρωση υγρασίας) μπορεί η διάβρωση να ξεκινήσει ειδικά αν στο σκυρόδεμα υπάρχει

μικρή ποσότητα χλωριόντων, ακόμα και σε τόσο χαμηλό ποσοστό κανονικά δεν θα εκκίνησαν τη διάβρωση<sup>112,113</sup>.

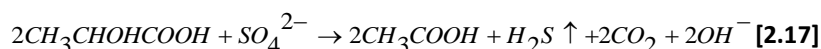
## 2.8 Βιολογική Διάβρωση Σκυροδέματος

Η βιολογική διάβρωση του σκυροδέματος προκαλείται από φυτικούς και ζωικούς μικροοργανισμούς οι οποίοι για την ανάπτυξή τους χρειάζονται ίχνη μεταλλικών στοιχείων τα οποία και προμηθεύονται από την επιφάνεια του σκυροδέματος προκαλώντας διάβρωσή. Η βιολογική διάβρωση του σκυροδέματος συμβαίνει σε κατασκευές οι οποίες βρίσκονται κοντά στη θάλασσα, σε υγρό περιβάλλον ή στο εσωτερικό αγωγών αποχετεύσεων. Οι παράγοντες που επιδρούν στην έναρξη της βιολογικής διάβρωσης είναι:

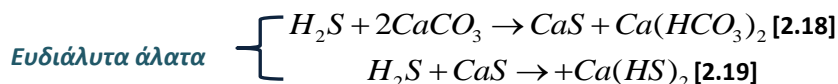
- **Ρίζες φυτών**, οι οποίες διεισδύουν στο σκυρόδεμα από διάφορες μικρορωγμές και γενικά από τα αδύνατα σημεία του σκυροδέματος. Με τις διαρρηκτικές δυνάμεις τις οποίες ασκούν, προκαλούν πρόσθετη ρηγμάτωση. Επίσης με την ανάπτυξη των φυτών συγκρατείται το νερό στην επιφάνεια του σκυροδέματος λόγω επιδράσεως παγετού. Η έκκριση οξέων από τις ρίζες μπορεί να προκαλέσει χημική διάβρωση του τσιμεντοκονιάματος. Η σήψη των ριζών η οποία δίνει χουμικό οξύ προκαλεί επίσης διάβρωση του σκυροδέματος.
- **Λειχήνες και θρύα** αναπτύσσονται σε υγρό σκυρόδεμα και συνήθως η παρουσία τους περνά απαρατήρητη. Η μείωση του pH του σκυροδέματος επιταχύνει την ανάπτυξη τους, ενώ παρουσία ανθρακικού οξέος η δράση αυτών γίνεται ελαφρώς διαβρωτική.
- **Φύκια**, η επίδραση τους είναι λιγότερο επιζήμια έναντι των άλλων ζωικών μικροοργανισμών (βακτηρίων). Συνήθως προστατεύουν το σκυρόδεμα και τον χάλυβα από τη διάβρωση, επειδή καταναλώνουν το οξυγόνο του νερού, προτού αυτό διεισδύσει στο σκυρόδεμα. Είναι δυνατόν να προκαλέσουν φθορά στο σκυρόδεμα όταν βρίσκονται σε περιοχή η οποία διαβρέχεται διαδοχικά και ξηραίνεται, διότι τότε συγκρατούν θαλασσινό νερό στο οποίο η συγκέντρωση των αλάτων αυξάνεται με την εξάτμιση του νερού. Επίσης, διάβρωση του σκυροδέματος μπορεί να προκαλέσουν ορισμένα μαλάκια τα οποία προσκολλώνται στην επιφάνειά του.
- **Βακτήρια**, αναπτύσσονται σε απορρίμματα και σε αγωγούς αποχετεύσεως και αντέχουν σε μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές (από 4-80°C). Τα βακτήρια δρουν είτε αναερόβια προκαλώντας διάσπασηθειικών αλάτων είτε αερόβια προκαλώντας σύνθεσηθειικών αλάτων. Τα βακτήρια τα διασπούν ταθειικά άλατα, ζουν από την οξείδωση διαφόρων στοιχείων όπως το άζωτο, θείο και σίδηρο, εκτός του άνθρακα. Από τη διάσπαση τωνθειικών αλάτων, τα ιόντα του θείου με το υδρογόνο παράγουν το υδρόθειο σύμφωνα με την αντίδραση:



Σε αγωγούς αποχετεύσεως, τα βακτήρια σχηματίζουν υδρόθειο από ταθειικά ιόντα αλλά και πρωτεΐνες όπως γαλακτικό οξύ.



Το υδρόθειο το οποίο σχηματίζεται, αντιδρά με τα άλατα της πάστας τσιμέντου και δίνει ευδιάλυτα άλατα, προκαλώντας απόπλυση του σκυροδέματος.



Τα βακτηρίδια αερόβιας δράσης αναπτύσσονται σε περιοχές όπου υπάρχει θερμότητα, υγρασία και ενώσεις θείου. Για να προκαλέσουν μεγάλης έκτασης φθοράς στο σκυρόδεμα, θα πρέπει να υπάρχουν επαρκείς ποσότητες υδρόθειου, διοξειδίου του άνθρακα, αζώτου, οξυγόνου και διάφορες άλλες ενώσεις όπως ευδιάλυτες ενώσεις φωσφόρου, σιδήρου και ιχνοστοιχεία. Σε νέο σκυρόδεμα τα βακτηρίδια δεν αναπτύσσονται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος. με την ενανθράκωση του σκυροδέματος όμως, η αλακαλικότητα του σκυροδέματος μειώνεται με συνέπεια την ανάπτυξη και επώαση των βακτηριδίων. Για  $pH \leq 9$  είναι δυνατόν να αναπτυχθεί το βακτήριο *Thiobacillus thioparus*, το οποίο χρησιμοποιώντας υδρόθειο ως πρώτη ύλη συνθέτει υποθειώδες και υποθειονικό οξύ. Με τη δημιουργία του υποθειονικού οξέος, το pH στην επιφάνεια του σκυροδέματος μειώνεται και γίνεται περίπου 5. Για τιμές αλκαλικότητας σκυροδέματος  $< 5$ , ο *Thiobacillus concretivorus* δημιουργεί μεγάλες συγκεντρώσεις θειικού οξέος, μειώνοντας το pH σε τιμές κάτω από 2.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η φθορά του σκυροδέματος σε αγωγούς αποχετεύσεως εμφανίζεται πάνω από τη στάθμη των υδάτων κατά συνέπεια η διάβρωση του δεν οφείλεται στα όξινα διαλύματα που φέρει ο αγωγός.

- **Βακτηριδιακή διάβρωση στο έδαφος:** Μια άλλη περίπτωση διάβρωσης είναι η βακτηριδιακή. Τα βακτήρια τα οποία βρίσκονται σε χώμα γενικότερα στο έδαφος (*thiobacilli*) μετατρέπουν τα σουλφίδια σε θειικά οξέα. Τα οξέα αυτά είναι ικανά να προκαλέσουν διάβρωση στον χάλυβα εάν έρθουν σε επαφή με την επιφάνεια του. Επίσης μπορεί να υπάρχουν και σιδηροβακτήρια (*ferrobacilli*) τα οποία προκαλούν διάβρωση *sulphides* στον χάλυβα (FeS). Αυτό το είδος της διάβρωσης συνοδεύεται με δυσάρεστη οσμή από τη δημιουργία του υδρογονοσουλφιδίων μικρή τράχυνση της επιφάνειας και μαύρη σκουριά εάν το μέταλλο βρίσκεται σε περιβάλλον υπέρκορο από νερό (π.χ. βυθισμένο). Σε αναερόβιες συνθήκες (έλλειψη οξυγόνου) τα βακτήρια αυτά μπορεί να διεισδύσουν στους κρατήρες που έχουν δημιουργηθεί επιφανειακά από τη διάβρωση με τους βελονισμούς.

## 2.9 Διάβρωση Σκυροδέματος από Θεϊκά Άλατα

Η προσβολή του σκυροδέματος από θεϊκά άλατα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της υποβάθμισης της ποιότητάς του και συναντάται σε πολλές χώρες, όπως Καναδά, Η.Π.Α., Μέση Ανατολή, κ.α.

Θεϊκά άλατα του νατρίου, του ασβεστίου και του μαγνησίου τα οποία είναι παρόντα σε αλκαλικά εδάφη και στο νερό αντιδρούν χημικά με τον ενυδατωμένο ασβεστόλιθο και το ενυδατωμένο αργιλικό ασβέστιο που βρίσκονται στο σκυρόδεμα δημιουργώντας θειικό ασβέστιο και θειοαργιλικό ασβέστιο, αντίστοιχα. Ο όγκος των προϊόντων είναι μεγαλύτερος και δημιουργεί εκτίναξη του σκυροδέματος επικάλυψης. Σκυρόδεμα με προσβολή από θεϊκά έχει χαρακτηριστική υπόλευκη εμφάνιση ενώ η φθορά συνήθως ξεκινά από τις άκρες και τις γωνίες και ακολουθεί βαθμιαία ρηγμάτωση και θρυμματισμός (**Σχήμα 2.21**).



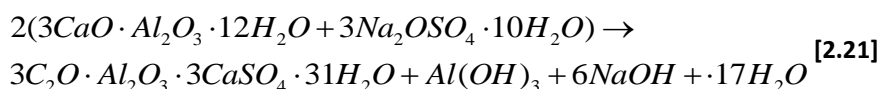
Σχήμα 2.21: Σκυρόδεμα με προσβολή θεικών αλάτων<sup>114</sup>

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι:

- Προσβολή  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  από θειικό νάτριο:



- Προσβολή ενυδατωμένου αργιλικού ασβεστίου από θειικό νάτριο:



- Προσβολή ενυδατωμένου αργιλικού ασβεστίου από θειικό ασβέστιο: το θειικό ασβέστιο προσβάλλει μόνο τα ενυδατωμένα αργιλικά άλατα και σχηματίζει θειοαργιλικό ασβέστιο, που είναι γνωστό ως εντριγκίτης και προκαλεί εσωτερικές ρωγμές στο σκυρόδεμα.
- Προσβολή  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , αργιλικού ασβεστίου και ενυδατωμένου πυριτικού ασβεστίου από θειικό μαγνήσιο:



Ο ρυθμός της προσβολής από θειικά αυξάνει με την αύξηση της πυκνότητας του διαλύματος, όμως κάτω από μία συγκέντρωση περίπου 0,5% για το  $\text{MgSO}_4$  ή 1% για το  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ο ρυθμός της αύξησης της έντασης της προσβολής γίνεται μικρότερος. Κορεσμένα διαλύματα  $\text{MgSO}_4$  οδηγούν σε σοβαρές φθορές, παρόλο που με ένα μικρό λόγο νερού / τσιμέντου η φθορά λαμβάνει χώρα μετά από 2-3 χρόνια. Συγκέντρωση της τάξης των 1000ppm (ως προς  $\text{SO}_3$ ) θεωρείται μέτρια επικίνδυνη ενώ συγκέντρωση 2000ppm θεωρείται πολύ επικίνδυνη, ειδικά αν το  $\text{MgSO}_4$  είναι το επικρατέστερο συστατικό. Οι αντίστοιχες τιμές για τα διαλυτά θειικά στο έδαφος είναι 0,2-0,5%. Πρέπει βέβαια να τονιστεί ότι η ταχύτητα προσβολής του σκυροδέματος δεν εξαρτάται μόνο από τη συγκέντρωση των θεικών αλλά και από το ρυθμό αναπλήρωσης των θεικών που αντιδρούν με το τσιμέντο.

### 2.10 Κατηγορίες έκθεσης σκυροδέματος σχετικές με τις περιβαλλοντικές δράσεις

Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206<sup>115</sup> καθορίζει τα διαβρωτικά περιβάλλοντα έκθεσης για τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.2. Σαν περιβάλλον έκθεσης νοείται το σύνολο των συνθηκών –φυσικών, περιβαλλοντικών και χημικών- που υπάρχουν σε κάθε περιοχή.

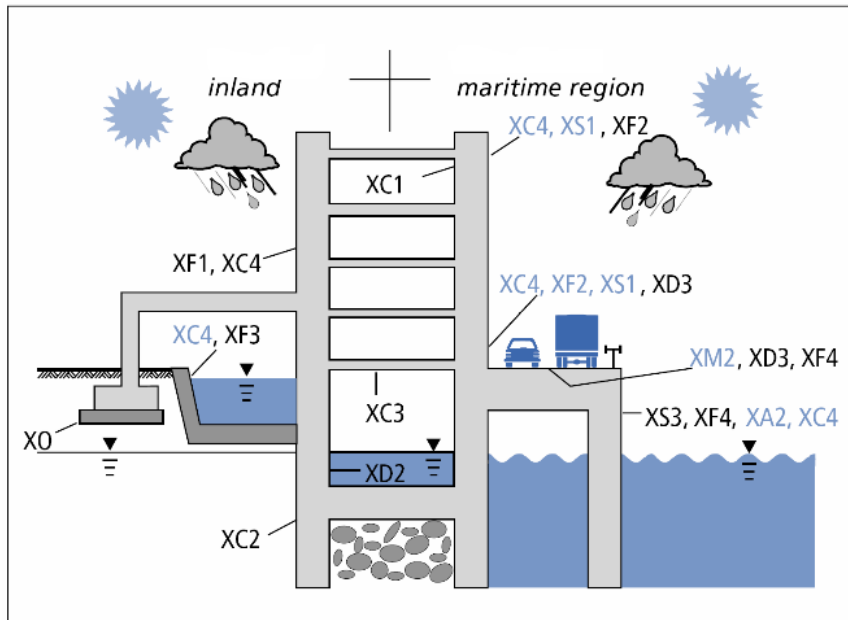
Πίνακας 2.2: Χαρακτηρισμός περιβάλλοντος έκθεσης για κατασκευές από Ο.Σ.<sup>46</sup>

Κατηγορία	Χαρακτηρισμός	Υποκατηγορίες	Περιγραφή περιβάλλοντος	Παραδείγματα
1	Κανένας κίνδυνος διάβρωσης ή προσβολής	X0	Άοπλο σκυρόδεμα ή οπλισμένο σε ξηρό περιβάλλον	Εσωτερικό κτηρίων με πολύ χαμηλή υγρασία
2	Διάβρωση προκαλούμενη από ενανθράκωση σκυροδέματος	XC1	Ξηρό ή μόνιμα υγρό	Εσωτερικό κτηρίων με χαμηλή υγρασία ή σκυρόδεμα μόνιμα βυθισμένο σε νερό.
		XC2	Υγρό, σπανίως ξηρό	Επιφάνειες σκυροδέματος που υπόκεινται σε μακροπρόθεσμη επαφή με το νερό. Θεμέλια.
		XC3	Μέτρια υγρασία	Εσωτερικό κτηρίων με μέτρια έως υψηλή υγρασία. Εξωτερικό σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε βροχή
		XC4	Κύκλοι ύγρυνσης-ξηράνσης	Επιφάνειες σκυροδέματος σε επαφή με το νερό που δεν καλύπτονται από την κατηγορία XC2.
3	Διάβρωση προκαλούμενη από χλωριόντα διαφορετικά από αυτά του θαλασσινού νερού	XD1	Μέτρια υγρασία	Επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε αερομεταφερόμενα ιόντα χλωρίου.
		XD2	Υγρό, σπανίως ξηρό	Πισίνες. Σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε βιομηχανικά υγρά που περιέχουν χλωριόντα.
		XD3	Κύκλοι ύγρυνσης-ξηράνσης	Μέρη γεφυρών εκτεθειμένα σε χλωριόντα. Πεζοδρόμια. Χώροι στάθμευσης.
4	Διάβρωση προκαλούμενη από χλωριόντα θαλασσινού νερού	XS1	Έκθεση σε αερομεταφερόμενα χλωριόντα άλλα όχι άμεση επαφή με θαλασσινό νερό.	Παραθαλάσσιες κατασκευές.
		XS2	Σκυρόδεμα μόνιμα βυθισμένο κάτω από το νερό.	Τμήματα θαλάσσιων κατασκευών.
		XS3	Ζώνη παλίρροιας, ζώνη κυμάτων.	Τμήματα θαλάσσιων κατασκευών.
5	Προσβολή από παγετό (εναλλαγές ψύξης/απόψυξης) με ή χωρίς αποπαγωτικά άλατα	XF1	Μέτριος κορεσμός νερού χωρίς άλατα αποπάγωσης.	Κάθετες επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε βροχή και παγετό.
		XF2	Μέτριος κορεσμός νερού, με άλατα αποπάγωσης.	Κάθετες επιφάνειες σκυροδέματος σε οδικά δίκτυα εκτεθειμένες σε παγετό και αερομεταφερόμενα άλατα αποπάγωσης.
		XF3	Υψηλός κορεσμός νερού χωρίς άλατα αποπάγωσης.	Οριζόντιες επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε παγετό και βροχή.
		XF4	Υψηλός κορεσμός νερού, άλατα αποπάγωσης και θαλασσινό νερό.	Καταστρώματα γεφυρών και δρόμων που εκτίθενται σε άλατα αποπάγωσης. Επιφάνειες σκυροδέματος που υπόκεινται ψεκασμό με άλατα αποπάγωσης και εκτίθενται σε παγετό. Ζώνη κυμάτων θαλάσσιων κατασκευών σε παγετό.
6	Χημική προσβολή	XA1	Ελαφρά επιθετικό χημικό περιβάλλον	Κατασκευές που εκτίθενται σε υπόγειο νερό με: 5,5-6,6pH, 200-600mg/l $SO_4^{2-}$ , 15-40mg/l $CO_2$ , 15-30mg/l $NH_4^+$ και 300-1000mg/l $Mg^{2+}$ . Κατασκευές που εκτίθενται σε έδαφος με: 2000-3000 $SO_4^{2-}$ mg/kg και τιμή οξύτητας >200ml/kg.
		XA2	Μετρίως επιθετικό χημικό περιβάλλον	Κατασκευές που εκτίθενται σε υπόγειο νερό με: 4,5-5,5pH, 600-3000mg/l $SO_4^{2-}$ , 40-100 mg/l $CO_2$ , 30-60mg/l $NH_4^+$ και 1000-3000mg/l $Mg^{2+}$ . Κατασκευές που εκτίθενται σε έδαφος με: 3000-12000mg/kg $SO_4^{2-}$ .
		XA3	Υψηλά επιθετικό χημικό περιβάλλον	Κατασκευές που εκτίθενται σε υπόγειο νερό με 4,0-4,5pH, 3000-6000mg/l $SO_4^{2-}$ , >100mg/l $CO_2$ , 60-100mg/l $NH_4^+$ και >3000mg/l $Mg^{2+}$ . Κατασκευές που εκτίθενται σε έδαφος με: 12000-24000mg/kg $SO_4^{2-}$ .



Οι κατηγορίες έκθεσης που πρόκειται να επιλεγθούν εξαρτώνται από τις διατάξεις που ισχύουν στον τόπο χρήσης του σκυροδέματος. Η παραπάνω ταξινόμηση έκθεσης δεν αποκλείει τη θεώρηση των ειδικών συνθηκών που υπάρχουν στον τόπο χρήσης του σκυροδέματος ή την εφαρμογή προστατευτικών μέτρων, όπως η χρήση ανοξειδωτού χάλυβα ή άλλου μετάλλου ανθεκτικού στη διάβρωση, καθώς και τη χρήση προστατευτικών επενδύσεων για το σκυρόδεμα ή τον οπλισμό.

Το σκυρόδεμα μπορεί να υπόκειται σε περισσότερες από μία δράσεις που περιγράφονται στον **Πίνακα 2.2** (Κατηγορίες Έκθεσης), συνεπώς οι περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες υπόκειται ίσως είναι αναγκαίο να εκφράζονται ως ένας συνδυασμός κατηγοριών έκθεσης. Τέλος, για ένα δεδομένο δομικό στοιχείο, οι διαφορετικές επιφάνειες από σκυρόδεμα μπορεί να υπόκεινται σε διαφορετικές περιβαλλοντικές δράσεις (**Σχήμα 2.22**).



**Σχήμα 2.22:** Κατηγορίες έκθεσης σκυροδέματος ανάλογα με το περιβάλλον



### 3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ Ο.Σ. ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα σχεδιάζονται έτσι ώστε να είναι ανθεκτικές στον χρόνο (durability) και να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Σύμφωνα με τα νέα Ευρωπαϊκά πρότυπα και συγκεκριμένα τον “ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 2”<sup>116</sup> ο οποίος είναι πλέον σε ισχύ, ο χρόνος ζωής στις συνήθεις κατασκευές από σκυρόδεμα είναι 50 χρόνια ενώ για τις γέφυρες εκτείνεται στα 120 χρόνια. Παρόλα αυτά, για κατασκευές μείζονος σημασίας ο χρόνος αυτός μπορεί να ποικίλει και να ανέλθει στα μέχρι και στα 200 έτη, όπως παρουσιάζεται στον **Πίνακα 3.1**.

**Πίνακας 3.1:** Απαιτούμενη διάρκεια ζωής για κατασκευές ανά τον κόσμο<sup>63</sup>

Έργο	Χώρα	Απαιτούμενη Διάρκεια ζωής σε έτη
Πλατφόρμες εντός θαλάσσης	-	40
King Fahd Causeway	Σαουδική Αραβία-Μπαχρέιν	75
Γέφυρα ποταμού Tejo	Πορτογαλία	99
Γέφυρα Great Belt Link	Δανία	100
Γέφυρα Øresund	Δανία-Σουηδία	100
Σήραγγα Harbour Tunnel	Αυστραλία	100
Σήραγγα Μάγχης	Αγγλία-Γαλλία	120
Γέφυρα Messina	Ιταλία	200
Φράγμα Eastern Scheldt	Ολλανδία	200
Βιβλιοθήκη της Αλεξάνδρειας	Αίγυπτος	200
Εθνική Βιβλιοθήκη Λονδίνου	Αγγλία	250

Η διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα αναγνωρίστηκε σαν μεγάλο πρόβλημα και σε μη παράκτιες περιοχές περίπου από τα τέλη της δεκαετίας του 1960. Έκτοτε, έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι με σκοπό την αντιμετώπιση της διάβρωσης, οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα για το αν πρόκειται για καινούριες ή για υφιστάμενες κατασκευές:

- A. Στις συνθήκες που πρέπει να επικρατήσουν κατά την κατασκευαστική φάση μιας δομής όπου ουσιαστικά πρόκειται για μέτρα πρόληψης.
- B. Στις επεμβάσεις που πραγματοποιούνται σε προϋπάρχουσες δομές όταν είναι αναγκαία η λήψη μέτρων έναντι της διάβρωσης.

Μια άλλη συνήθης κατηγοριοποίηση των επεμβάσεων στο σκυρόδεμα<sup>117</sup> είναι ανάλογα με τον τρόπο που παρέχουν προστασία. Έτσι, όλες οι μέθοδοι μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω 5 κατηγορίες:

1. **Ποιότητα σκυροδέματος** η οποία αφορά μόνο το κατασκευαστικό στάδιο.
2. **Χρήση εναλλακτικού οπλισμού** η οποία περιλαμβάνει υλικά που απομονώνουν ηλεκτρικά το χάλυβα από το σκυρόδεμα και δημιουργούν φράγμα για τα ιόντα χλωρίου και το νερό. Αφορά μόνο το κατασκευαστικό στάδιο.
3. **Επικαλύψεις σκυροδέματος** που απομονώνουν την επιφάνειά του από διαβρωτικούς παράγοντες.
4. **Ηλεκτροχημικές μέθοδοι** που χρησιμοποιούν ρεύμα και ανόδους για να προστατέψουν το χάλυβα ακόμα και όταν η συγκέντρωση των χλωριόντων είναι πολύ υψηλή.

5. **Αναστολείς διάβρωσης** οι οποίοι προσφέρουν προστασία αυξάνοντας την κρίσιμη συγκέντρωση των χλωριόντων, απομονώνοντας το σκυρόδεμα ή κάνοντας και τα δύο.

### 3.1 Ποιότητα Σκυροδέματος

Ένα σκυρόδεμα καλής ποιότητας είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για την πρόληψη της διάβρωσης του οπλισμού<sup>118</sup>. Ο όρος **“ποιότητα σκυροδέματος”** περιλαμβάνει μια σειρά από παράγοντες όπως<sup>119</sup>: Πάχος επικάλυψης, λόγος νερού/τσιμέντου ( $w/c$ ), ορυκτά πρόσθετα σκυροδέματος, τύπος τσιμέντου<sup>120</sup>, περιεκτικότητα τσιμέντου, συνθήκες ανάμειξης, συμπίκνωση και ξήρανσης σκυροδέματος, ύπαρξη ρωγμών τόσο σε μικροσκοπική όσο και σε μακροσκοπική κλίμακα, καθώς και άλλες παραμέτρους όπως ο περιεχόμενος αέρας. Οι κατηγορίες σκυροδέματος όπως προβλέπονται σήμερα σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ.-97<sup>121</sup> (αναμένεται αναθεώρηση το 2014) αναφέρονται στον **Πίνακας 3.2**.

**Πίνακας 3.2:** Κατηγορίες σκυροδέματος και αντίστοιχες θλιπτικές αντοχές σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ.-97

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

#### 3.1.1 Πάχος επικάλυψης

Μια κατασκευή από Ο.Σ. είναι πλέον ευρέως αποδεκτό ότι για να είναι ανθεκτική σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον είναι απολύτως απαραίτητο να παρέχει ένα επαρκές στρώμα κάλυψης πάνω από τον οπλισμό, ούτως ώστε να δυσχεραίνεται η διάχυση των χλωριόντων στην επιφάνεια του χάλυβα<sup>122</sup>.

Το επαρκές πάχος της επικάλυψης μπορεί να προσδιοριστεί με την εφαρμογή του δεύτερου νόμου διάχυσης του Fick, ο οποίος μοντελοποιεί επαρκώς την διάχυση των χλωριόντων μέσα από ένα πορώδες υλικό, όπως σκυρόδεμα<sup>123</sup>:

$$\frac{\partial C_x}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C_x}{\partial x^2} \right) \quad [3.1]$$

**Όπου:**  $C_x$  είναι η συγκέντρωση χλωριόντων σε βάθος  $C$  σε χρόνο  $t$  και  $D$  είναι ο συντελεστής διάχυσης των χλωριόντων.

Σύμφωνα με τον ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 2<sup>1,6</sup> οι τιμές του πάχους επικάλυψης κυμαίνονται από 10mm για έκθεση σε ξηρό περιβάλλον έως 55mm για προεντεταμένους χάλυβες σε κατασκευές εκτεθειμένες σε περιβάλλον χλωριόντων. Οι τιμές που αναφέρονται στον **Πίνακας 3.3** είναι οι ελάχιστες και τροποποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η μεταφορά των μηχανικών φορτίων και η αντίσταση στην φωτιά.

**Πίνακας 3.3:** Ελάχιστα πάχη επικάλυψης σύμφωνα με τον ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 2<sup>5</sup>. Οι τιμές πρέπει να αυξηθούν κατά 10mm ώστε να ληφθεί το ονομαστικό πάχος

Περιβάλλον έκθεσης		Ελάχιστο πάχος επικάλυψης (mm)	
		Χάλυβας	Προεντεταμένος χάλυβας
Κανένας κίνδυνος διάβρωσης ή προσβολής	X0	10	10
	Διάβρωση προκαλούμενη από ενανθράκωση	XC1	15
XC2, XC3		25	35
XC4		30	40
Διάβρωση από χλωριόντα	XS1, XD1	35	45
	XS2, XD2	40	50
	XS3, XD3	45	55

Η αύξηση του πάχους επικάλυψης επιφέρει τις περισσότερες φορές θετικά αποτελέσματα απομονώνοντας τον οπλισμό δεν πρέπει όμως να ξεπερνά ένα ανώτατο όριο για μηχανικούς και πρακτικούς λόγους. Πρακτικά, πάχη επικάλυψης άνω των 70-90mm δεν θεωρούνται ρεαλιστικά. Ωστόσο, ακόμη και με επαρκή κάλυψη του οπλισμού η διάβρωση δεν θα αποφευχθεί λόγω των ρωγμών που θα παρουσιαστούν στο σκυρόδεμα. Ως εκ τούτου, άλλα συμπληρωματικά μέτρα προστασίας πρέπει επίσης να ληφθούν σε μια νέα κατασκευή.

### 3.1.2 Λόγος νερού/τσιμέντο

Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά της ποιότητας σκυροδέματος που αναφέρθηκαν παραπάνω επιδρούν σημαντικά στην μηχανική αντοχή του σκυροδέματος και ειδικότερα η αναλογία νερού/τσιμέντου ενώ σε περιβάλλοντα με ποσοστά χλωριόντων ο τύπος του τσιμέντου είναι περισσότερο σημαντικός όσον αφορά τη διάβρωση.

Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο<sup>124</sup> για το σκυρόδεμα αναφέρεται στις απαιτήσεις για την σύνθεση και τις ιδιότητες του σκυροδέματος ώστε αυτό να ανθίσταται στις περιβαλλοντικές δράσεις οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της προβλεπόμενης διάρκειας ζωής της δομής. Ανάλογα με την επιθετικότητα του περιβάλλοντος συνιστώνται τιμές για το μέγιστο λόγο νερού/τσιμέντου αλλά και την ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο (**Πίνακας 3.4**). Οι τιμές αφορούν τη χρήση τσιμέντου Portland (CEM I).

**Πίνακας 3.4:** Συνιστώμενες οριακές τιμές λόγου νερού/τσιμέντο (w/c) και περιεκτικότητας σε τσιμέντο σύμφωνα με το πρότυπο EN 206<sup>6</sup>

Περιβάλλον Έκθεσης		Μέγιστη τιμή w/c	Ελάχιστη κατηγορία αντοχών	Ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο (kg/m <sup>3</sup> )
Κανένας κίνδυνος διάβρωσης ή προσβολής	X0	-	C12/15	-
Διάβρωση προκαλούμενη από ενανθράκωση	XC1	0,65	C20/25	260
	XC2	0,60	C25/30	280
	XC3	0,55	C30/37	280
	XC4	0,50	C30/37	300
Διάβρωση από χλωριόντα θαλασσινού νερού	XS1	0,50	C30/37	300
	XS2	0,45	C35/45	320
	XS3	0,45	C35/45	340
Διάβρωση από χλωριόντα εκτός θαλασσινού νερού	XD1	0,55	C30/37	300
	XD2	0,55	C30/37	320
	XD3	0,45	C35/45	320

### 3.1.3 Ορυκτά πρόσθετα σκυροδέματος

Οι ποζολάνες είναι πολύ διαδεδομένα υλικά προσθήκης στο σκυρόδεμα. Στα πλεονεκτήματά τους συμπεριλαμβάνονται η βελτίωση της εργασιμότητας, η μείωση της θερμότητας ενυδάτωσης, η βελτίωση της διαπερατότητας και η αύξηση της ανθεκτικότητας του σκληρυμένου σκυροδέματος. Στην κατηγορία των ποζολανών συγκαταλέγονται πολλά διαφορετικά υλικά τόσο τεχνητά όσο και φυσικά. Στις φυσικές ποζολάνες ανήκουν ηφαιστειακές τέφρες, αργιλικά και σχιστολιθικά υλικά, ενώ οι τεχνητές ποζολάνες περιλαμβάνουν βιομηχανικά παραπροϊόντα όπως πυριτική παιπάλη, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υφικαμίνων κ.α. Η προσθήκη τέτοιων υλικών με πολύ χαμηλό πορώδες σφραγίζει του πόρους του σκυροδέματος με αποτέλεσμα να μειώνεται δραστικά η διαπερατότητα επιβλαβών ουσιών όπως υγρασία, χλωριόντα, διοξείδιο του άνθρακα κ.α.<sup>125, 126,127</sup>.

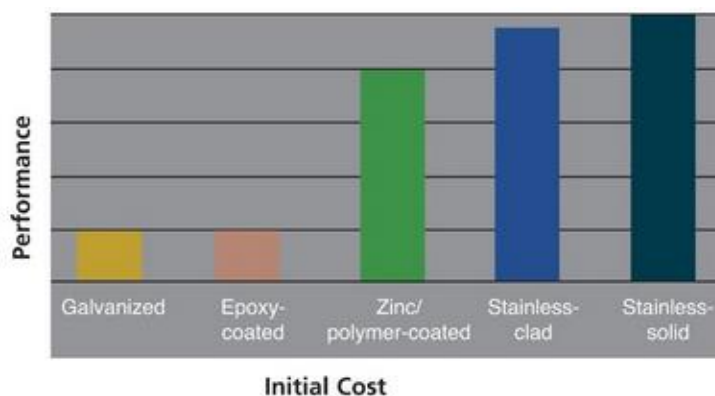
Όπως έχει προκύψει από την διεθνή βιβλιογραφία ότι η υπτάμενη τέφρα και η σκωρία υψικαμίνων μειώνουν επαρκώς το πορώδες<sup>128</sup>, αλλά φαίνεται ότι η πυριτική παιπάλη είναι περισσότερο δραστική στη σφράγιση των πόρων<sup>129,130</sup>. Μειονεκτεί όμως στο ότι μειώνει την εργασιμότητα, απαιτεί μεγάλο λόγο νερού/τσιμέντο και εντείνει τα προβλήματα συρρίκνωσης<sup>131</sup>. Το βέλτιστο ποσοστό πυριτικής παιπάλης για καταστρώματα γεφυρών βρέθηκε πως είναι 6-8% κ.β. τσιμέντου<sup>132</sup>.

Εκτός από τα ορυκτά πρόσθετα που προστίθενται στο σκυρόδεμα, έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον υπάρχει σήμερα για την αντικατάσταση μέρους των αδρανών με πλαστικά παραπροϊόντα<sup>133</sup>.

### 3.2 Εναλλακτικοί Οπλισμοί

Η πρώτη γραμμή άμυνας ενάντια στην διάβρωση του οπλισμού είναι το καλής ποιότητας σκυρόδεμα το οποίο λειτουργεί σαν φράγμα στην είσοδο των διαβρωτικών ουσιών. Παρόλα αυτά, στο σκυρόδεμα θα αναπτυχθούν σταδιακά ρωγμές μέσω των οποίων διαβρωτικοί παράγοντες θα απειλήσουν τον οπλισμό με αποτέλεσμα η τελική γραμμή άμυνας να είναι ο ίδιος ο οπλισμός.

Δυστυχώς η αντίσταση του χάλυβα έναντι της διάβρωσης δεν μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με αλλαγές στην δομή του ή στις τάσεις που υπόκεινται<sup>134</sup>. Έτσι για την παρεμπόδιση της διάβρωσης του οπλισμού σε περιοχές με έντονα διαβρωτικό προφίλ πρέπει είτε ο οπλισμός να επικαλυφθεί με κάποιο υλικό που τον απομονώνει από το περιβάλλον είτε πρέπει υλικά περισσότερο ανθεκτικά στη διάβρωση να χρησιμοποιηθούν<sup>135</sup>. Η επικάλυψη των οπλισμών είναι περισσότερο οικονομική μέθοδος από την αντικατάσταση του χάλυβα με άλλο προϊόν (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Σχετικό κόστος διαφόρων ειδών χαλύβων σε συνάρτηση με την αποτελεσματικότητα<sup>136</sup>

#### 3.2.1 Χάλυβας με εποξειδική επικάλυψη

Αυτή τη στιγμή η πιο διαδεδομένη μέθοδος προστασίας των γεφυρών στις Η.Π.Α. από τη διάβρωση είναι η χρήση χαλύβδινων οπλισμών καλυμμένων με εποξειδικά χρώματα.

Η χρήση εποξειδικά καλυμμένων χαλύβων ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970 και εφαρμόστηκε αρχικά σε καταστρώματα γεφυρών. Η τεχνική αυτή ήταν ήδη γνωστή στη βιομηχανία πετρελαίου όπου επικαλύπτονταν βιομηχανικοί χαλύβδινοι σωλήνες.

Τα εποξειδικά χρώματα που προορίζονται για τον οπλισμό δρουν με δύο τρόπους. Αρχικά λειτουργούν σαν φράγμα εμποδίζοντας το οξυγόνο και τα χλωριόντα να φτάσουν στην επιφάνεια του οπλισμού και δεύτερον αυξάνουν την ηλεκτρική αντίσταση μεταξύ γειτονικών

περιοχών του χάλυβα. Τα χρώματα αυτά μειώνουν την ένταση του ρεύματος διάβρωσης<sup>137</sup> το οποίο είναι υπεύθυνο για την εκτεταμένη φθορά που παρουσιάζεται λόγω διάβρωσης. Τέλος επειδή οι επικαλύψεις αυτές είναι ταυτόχρονα και φυσικά αλλά και ηλεκτρικά φράγματα πρέπει να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα κατά τη μεταφορά αλλά και την αποθήκευσή τους<sup>138</sup> ώστε να μην προκληθούν βλάβες στην επικάλυψη.

### 3.2.2 Χαλύβδινος οπλισμός με μεταλλικές επικαλύψεις και εναλλακτικές ράβδοι

Η επιτυχία των μεταλλικών επιστρώσεων στην προστασία από τη διάβρωση του χάλυβα σε άλλα περιβάλλοντα ενίσχυσε την προοπτική ότι παρόμοια επιτυχία θα επιτευχτεί και στο σκυρόδεμα.

Οι μεταλλικές επιστρώσεις του χάλυβα που προορίζονται για το σκυρόδεμα μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: θυσιαζόμενες και μη θυσιαζόμενες (ευγενής). Επικαλύψεις από ψευδάργυρο, ο οποίος παρουσιάζει πιο αρνητικό δυναμικό από το χάλυβα -είναι δηλαδή λιγότερο ευγενής- προσφέρει προστασία στο χάλυβα μέσω της κατανάλωσής του (θυσιαζόμενη επικάλυψη). Αντίθετα, περισσότερο ευγενή μέταλλα όπως ο χαλκός ή το νικέλιο όταν εφαρμοσθούν σαν επικάλυψη και σπάσουν τότε καταναλώνεται ο ίδιος ο οπλισμός ως λιγότερο ευγενής.

#### Γαλβανισμένος χάλυβας

Οι γαλβανισμένοι (ή επιψευδαργυρωμένοι) χάλυβες παράγονται με διαδικασία εν θερμώ, όπου αρχικά οι ράβδοι του οπλισμού καθαρίζονται και απομακρύνονται τα προϊόντα οξειδωσης που ενδεχομένως υπάρχουν στην επιφάνεια και έπειτα εμβαπτίζονται σε τήγμα ψευδαργύρου.

Όπως και ο χάλυβας έτσι και ο ψευδάργυρος δημιουργεί προϊόντα οξειδωσης που κατέχουν μεγαλύτερο όγκο από το αρχικό μέταλλο και σαν αποτέλεσμα προκαλούν ρωγμές στο σκυρόδεμα. Όμως πλεονεκτούν έναντι του κοινού δομικού χάλυβα στο ότι το υδροξείδιο του μετάλλου  $[Zn(OH)_2]$  που δημιουργείται δρα σαν ηλεκτρικός μονωτής δημιουργώντας ένα επιπλέον φράγμα στην εξέλιξη της διάβρωσης.

Οι γαλβανισμένοι χάλυβες είναι εμπορικά διαθέσιμοι με αποτέλεσμα να έχουν γίνει αντικείμενο εργαστηριακών<sup>139,140,141,142</sup> ερευνών και μελετών στο πεδίο<sup>143,144,145</sup>. Τα αποτελέσματα σε εργαστηριακή κλίμακα όμως είναι αντικρουόμενα ίσως λόγω του ότι δεν έχει πιστοποιηθεί η μεθοδολογία και η εργαστηριακή τεχνική που πρέπει να ακολουθηθεί. Έτσι, σε μια μελέτη παρουσιάστηκε ότι όταν το σκυρόδεμα εκτίθεται σε 4%κ.β NaCl, οι γαλβανισμένες ράβδοι διαβρώθηκαν λιγότερο και αργότερα από τον κοινό δομικό χάλυβα<sup>124</sup>. Σε άλλη μελέτη παρουσιάστηκε ότι όταν δοκίμια σκυροδέματος ήταν μερικώς εμβαπτισμένα σε κορεσμένο διάλυμα NaCl, ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης δεν παρουσίασε διαφορά ανάμεσα στα δύο είδη χαλύβων<sup>122</sup>. Σε επί τόπου ελέγχους διαπιστώθηκε ότι σε θαλάσσια γέφυρα που κατέρρευσε το 1935 στις Η.Π.Α. ο κοινός οπλισμός είχε διαβρωθεί αρκετά ώστε να προκαλέσει ρωγμές στο σκυρόδεμα ενώ ο γαλβανισμένος χάλυβας όχι<sup>146</sup>.

#### Ανοξειδωτος χάλυβας

Ο όρος “ανοξειδωτος χάλυβας” αναφέρεται σε μια ομάδα χαλύβων ανθεκτικών στη διάβρωση οι οποίοι περιέχουν κατ’ ελάχιστον 12% χρώμιο. Άλλα μέταλλα είναι δυνατόν να προστεθούν για να αυξήσουν την αντίσταση στη διάβρωση. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες

χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: φερριτικοί, φερριτικοί-ωστενιτικοί, ωστενιτικοί και μαρτενσιτικοί. Σε κάθε περίπτωση περιέχουν ελάχιστο άνθρακα. Οι φερριτικοί χάλυβες περιέχουν λιγότερο από 17% χρώμιο, οι ωστενιτικοί περιέχουν περίπου 18% χρώμιο και 8% νικέλιο, οι φερριτικοί-ωστενιτικοί (*duplex*) περιέχουν 22-28% χρώμιο και 4-8% νικέλιο και τέλος οι μαρτενσιτικοί περιέχουν 12-18% χρώμιο.

Η επιλογή είναι θέμα σχεδιασμού και εξαρτάται πάντα από τη ζητούμενη κατά περίπτωση αντίσταση στη διάβρωση, τις αναγκαίες μηχανικές αντοχές και το κόστος. Συγκεκριμένα, ο ανοξειδωτος χάλυβας τύπου **AISI 304** ή **304L** ανήκει στην κατηγορία των ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων και χρησιμοποιείται για κατασκευές που εκτίθενται σε ιδιαίτερα διαβρωτικό περιβάλλον, σε περιπτώσεις όπου προβλέπονται συγκολλήσεις (για παράδειγμα, για την αποκατάσταση ιστορικού κτιρίου στο Λονδίνο, Guildhall, London, χρησιμοποιήθηκαν 140 τόνοι ανοξειδωτου χάλυβα τύπου **AISI 304**). Ο ανοξειδωτος χάλυβας τύπου **AISI 316** ανήκει και αυτός στην κατηγορία των ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων και χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν υψηλά επίπεδα τάσεων και περιβάλλον εξαιρετικά διαβρωτικό σε συνδυασμό με υψηλές θερμοκρασίες (στην αποκατάσταση της Sydney Opera House στην Αυστραλία, έγινε χρήση οπλισμού και πλέγματος από ανοξειδωτο χάλυβα τύπου **AISI 316**, προς αντικατάσταση κοινού δομικού χάλυβα που αστόχησε έπειτα από 25 χρόνια έκθεσης σε θαλάσσιο περιβάλλον). Οι φερριτο – ωστενιτικοί (*duplex*) ανοξειδωτοι χάλυβες (η ποίο γνωστή κατηγορία είναι οι SAF 2205), έχουν αυξημένη αντίσταση στη διάβρωση, σε περιβάλλον υψηλής συγκέντρωσης χλωριόντων σε σχέση με τους ωστενιτικούς. Έχουν επίσης μεγαλύτερες αντοχές και καλύτερες τιμές δυσθραυστότητας.

Γενικά για τη σωστή χρησιμοποίηση του υλικού, θα πρέπει ο μελετητής να προσαρμοστεί σε μια επιλογή που θα λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες μέσα στις οποίες θα ζήσει το έργο. Στον **Πίνακα 3.5** δίνονται τα περιβάλλοντα χρήσης των ανοξειδωτων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος.

**Πίνακας 3.5:** Χρήση ανοξειδωτων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος ανάλογα το περιβάλλον έκθεσης<sup>147</sup>

Κατηγορία ποιότητας	Περιβάλλοντα χρήσης
W.1.4301/AISI 304L	Ηπειρωτικές περιοχές, περιβάλλον με χαμηλή συγκέντρωση χλωριόντων
W.1.4401/AISI 316LN	Θαλάσσιες περιοχές, περιβάλλον με υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων
W.1.4462/SAF 2205 Duplex	Περιβάλλοντα με πολύ υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων και όπου απαιτείται υψηλή αντοχή

Τυπικές εφαρμογές μερικής ή ολικής χρήσης ανοξειδωτων χαλύβων οπλισμού είναι οι παρακάτω:

- Οπλισμός θεμελίων σε περιοχές με υπόγεια νερά
- Κατασκευές σε υγρό περιβάλλον (π.χ. σήραγγες μετρό και τρένων, στοές, υπόγειες διαβάσεις, υπόγειοι δρόμοι), κατασκευές σε θαλάσσιο περιβάλλον, θεμελίωση εντός νερού, σε υγρό υπέδαφος, αποβάθρες, βάσεις σε γέφυρες
- Γέφυρες αερογέφυρες, αεροδιάδρομοι πεζών, μπαλκόνια και οπλισμοί εμφανών σκυροδεμάτων
- Σκελετός σκυροδέματος σε έργα αναπαλαιώσεων και μνημείων, αποκατάσταση αγαμάτων, μνημείων είτε από μάρμαρο είτε από πέτρα
- Πλατφόρμες σε ανοικτή θάλασσα, κυματοθραύστες
- Κατασκευές από σκυρόδεμα με αντιμαγνητικές απαιτήσεις.



Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει ο ανοξειδωτος χάλυβας για την ενίσχυση του σκυροδέματος είναι:

- ✓ Έχει από κατασκευής μεγάλη αντίσταση στην διάβρωση
- ✓ Δεν απαιτείται επιπλέον προστασία με άλλη μέθοδο (πχ. καθοδική προστασία)
- ✓ Παρουσιάζει καλή αντοχή, ολκιμότητα και συγκολλησιμότητα
- ✓ Πλεονεκτεί έναντι του χάλυβα με ανοξειδωτη επίστρωση λόγω του της αντοχής του σε κάμψη, χωρίς να υπάρχει φόβος καταστροφής της επίστρωσης.

Ο ανοξειδωτος χάλυβας καθώς και ο οπλισμός με επίστρωση ανοξειδωτου χάλυβα έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετά στον κατασκευαστικό τομέα τα τελευταία 15 χρόνια, αλλά καμία από αυτές τις δομές δεν είναι αρκετά μεγάλη σε ηλικία ώστε να αναμένονται βλάβες λόγω διάβρωσης. Μέχρι στιγμής η απόδοση του ανοξειδωτου χάλυβα θεωρείται ικανοποιητική. Για παράδειγμα, το 1984 ανοξειδωτος χάλυβας τύπου 304 είχε τοποθετηθεί σε κατάστρωμα γέφυρας βόρειο του Ντιτρόιτ των Η.Π.Α. η υπόλοιπη γέφυρα είχε κατασκευαστεί με χάλυβες επικαλυμμένους με εποξειδικά χρώματα. Σε έλεγχο το 1993 από την αρμόδια αρχή αποσπάστηκαν πυρήνες όπου παρατηρήθηκε ότι δεν υπήρχαν αποκολλήσεις ούτε ρωγμές λόγω διάβρωσης. Δύο από τους πυρήνες είχαν διαμήκειες ρωγμές (λόγω θερμοκρασίας και συρρίκνωσης) οι οποίες διασταυρώνονταν με τον οπλισμό αλλά δεν παρατηρήθηκαν περαιτέρω σημάδια διάβρωσης<sup>148</sup>.

#### **Χάλυβας με επικάλυψη ανοξειδωτου χάλυβα**

Ο ανοξειδωτος χάλυβας είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός στην παρεμπόδιση της διάβρωσης αλλά λόγω κόστους η χρήση του είναι περιορισμένη. Ο κοινός δομικός χάλυβας με επικάλυψη ανοξειδωτου χάλυβα ερευνάται σαν μια πιο οικονομική λύση, αλλά υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με την μειωμένη αντοχή σε κάμψη και στην περίπτωση καταστροφής της επικάλυψης όπου πλέον θα εκκινήσει η διάβρωση. Σε σχετική έρευνα<sup>149</sup> συγκρίθηκαν ο απλός δομικός χάλυβας με τον χάλυβα με ανοξειδωτη επικάλυψη. Ο ρυθμός και το δυναμικό διάβρωσης ελέγχονταν συνεχώς για εγκιβωτισμένα δοκίμια και για δοκίμια εμβαπτισμένα σε διάλυμα πόρων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα οι επικαλυμμένοι ανοξειδωτα χάλυβες διαβρώθηκαν με ρυθμό σχεδόν δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερο από τον κοινό χάλυβα.

#### **Χάλυβας με επικάλυψη νικελίου**

Επινικελωμένοι χάλυβες σαν οπλισμός στο σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του 1960. Το νικέλιο παρουσιάζει υψηλή αντίσταση στη διάβρωση σε χλωριούχα αλκαλικά διαλύματα και παρόλο που ο χάλυβας είναι λιγότερο ευγενής από το νικέλιο, η διάβρωση του υποκείμενου χάλυβα δεν θα επιταχυνθεί ουσιαστικά εάν καταστραφεί η επικάλυψη νικελίου<sup>150</sup>. Η έρευνα σχετικά με αυτό το είδος οπλισμού έχει δώσει σημαντικά αποτελέσματα αλλά το κόστος της επαρκούς επινικέλωσης του χάλυβα είναι σχετικά μεγάλο<sup>151</sup>.

#### **Οπλισμός τιτανίου**

Σε έρευνα του 1994<sup>152</sup> βρέθηκε ότι ο ρυθμός διάβρωσης ράβδων τιτανίου είναι 14.000 φορές μικρότερος από αυτόν του κοινού δομικού χάλυβα σε χλωριούχο διάλυμα με pH 7 και 135 φορές μικρότερος σε διάλυμα με pH 13. Διαπιστώθηκε επίσης πως οι ράβδοι τιτανίου θα αυξήσουν το χρόνο έναρξης ρωγμών 130 φορές αν εγκιβωτιστούν σε σκυρόδεμα. Το κόστος παραμένει απαγορευτικό σε αυτή την περίπτωση εφόσον οι ράβδοι τιτανίου κοστίζουν έξι φορές περισσότερο από αυτές του ανοξειδωτου χάλυβα.

### **Χάλυβας με επικάλυψη χαλκού**

Οι χάλυβες με επικάλυψη χαλκού δοκιμάστηκαν πρώτη φορά στο σκυρόδεμα το 1980<sup>153</sup>, όπου συγκρίθηκαν με κοινό δομικό χάλυβα με και χωρίς την προσθήκη αναστολέων διάβρωσης. Τα αποτελέσματα δημοσιεύτηκαν το 1996<sup>154</sup> όπου διαπιστώθηκε ότι οι επιχαλκωμένοι χάλυβες με πάχος επικάλυψης περίπου 0,5mm επέδειξαν μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση από τον κοινό δομικό χάλυβα ακόμα και αν το τελευταίος συνδυαζόταν με αναστολέα διάβρωσης νιτρικού ασβεστίου.

Τα αποτελέσματα για αυτό το είδος του οπλισμού είναι ενθαρρυντικά και το κόστος παρουσιάζεται ανεκτό αλλά περισσότερες έρευνες πρέπει να διεξαχθούν σχετικά με την επίδραση στην στατικότητα των δομών που προκαλείται λόγω της καθυστέρησης της ενυδάτωσης του τσιμέντου μετά από τη χρήση των εν λόγω οπλισμών.

### **Πλαστικός οπλισμός ενισχυμένος με ίνες**

Τα τελευταία χρόνια είναι αντικείμενο έρευνας η χρήση ινοπλισμένων πλαστικών υλικών για την ενίσχυση του σκυροδέματος. Μέχρι το 1996 περισσότερες από 15 γέφυρες κατασκευάστηκαν σε Ευρώπη, Ιαπωνία και Καναδά με τη χρήση των εν λόγω οπλισμών<sup>155</sup>.

Για την κατασκευή των πλαστικών υλικών ενισχυμένων με ίνες απαιτούνται τρία στοιχεία. Αρχικά οι ίνες οι οποίες αποτελούν το προϊόν όπλισης και ενισχύουν το μητρικό υλικό προσθέτοντας αντοχή. Οι περισσότεροι εμπορικές ίνες έχουν διάμετρο μικρότερη από 20μm και μήκος μεγαλύτερο από 100 φορές τη διάμετρό τους (>2mm). Στην πράξη χρησιμοποιούνται ίνες άνθρακα, γυαλιού και αραμιδίου. Οι ίνες δεν μπορούν να δράσουν μόνες τους γιατί παρά το γεγονός ότι έχουν μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό υστερούν σε διάτμηση και λυγισμό. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα εγκιβωτίζονται σε μια σύνθετη ρητινούχα πολυμερική μήτρα η οποία και αποτελεί το δεύτερο απαραίτητο στοιχείο για τις πλαστικές ενισχύσεις. Οι ρητίνες έχουν πολύ μικρότερη αντοχή και είναι λιγότερο δύσκαμπτες από τις ίνες, δρουν όμως σαν συνδετικό υλικό μεταφέροντας τα φορτία στις ίνες μέσω των διατμητικών τάσεων. Το τρίτο και τελευταίο στοιχείο είναι ένας παράγοντας σύζευξης ο οποίος βελτιώνει την πρόσφυση ανάμεσα στα προηγούμενα δύο στοιχεία<sup>156</sup>.

Σε μελέτη του 1997 εξετάστηκε η μακροπρόθεσμη αντοχή σύνθετου υλικού -πλαστικής μήτρας με ενίσχυση ινών γυαλιού-σαν οπλισμός σε έργα υποδομής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υδατικά και χλωριούχα διαλύματα μειώνουν την διάρκεια ζωής του υλικού μετά από μακροπρόθεσμη έκθεση σε συνθήκες κόπωσης. Έκθεση σε κύκλους ψύξης-απόψυξης σε διάλυμα 2% NaCl έδειξε μείωση της καμπτικής αντοχής και της σκληρότητας του υλικού.

Η πρώτη γέφυρα στις Η.Π.Α που κατασκευάστηκε με ενίσχυση από σύνθετα πλαστικά υλικά ήταν στην πολιτεία της West Virginia. Η κατασκευή της ολοκληρώθηκε το 1996 και σαν οπλισμός του σκυροδέματος στο κατάστρωμα της γέφυρας χρησιμοποιήθηκαν πλαστικοί σωλήνες οπλισμένοι με ίνες γυαλιού. Η γέφυρα παρακολουθείται και γίνονται έλεγχοι σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας, τη γήρανση και την απόκριση σε φορτία. Τα αρχικά αποτελέσματα δείχνουν ότι οι παραμορφώσεις της υπερκατασκευής είναι εντός των επιτρεπτών ορίων αλλά δεν έχει περάσει αρκετός χρόνος για την πλήρη εκτίμηση του υλικού ενίσχυσης.

Μέχρι αυτή τη στιγμή, τα ενισχυμένα με ίνες πλαστικά έχουν καλή απόδοση όταν χρησιμοποιούνται για την όπλιση του σκυροδέματος σε πειραματικό στάδιο σε



αυτοκινητοδρόμους. Παρόλα αυτά υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη όπως το ότι οι ίνες άνθρακα ενώ παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε κόπωση, υψηλή αντοχή στον εφελκυσμό και χαμηλή χαλάρωση, παρουσιάζουν χαμηλή αντοχή θραύσης. Τέλος, οι ίνες γυαλιού περιέχουν πυριτία η οποία συνδυαζόμενη με το υδροξείδιο του ασβεστίου του τσιμεντοπολτού μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια οπλισμού.

### 3.3 Αναστολείς Διάβρωσης

Οι αναστολείς διάβρωσης είναι χημικές ουσίες οι οποίες μπορούν να καθυστερήσουν ή ακόμα και να αποτρέψουν την έναρξη της διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα. Αρχικά ερευνήθηκαν το 1960 και στα μίγματα των τότε αναστολέων διάβρωσης χρησιμοποιήθηκαν νιτρώδες νάτριο και χρωμικά και βενζοϊκά άλατα νατρίου και καλίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα άλατα του νατρίου και του καλίου μειώναν την αντοχή του σκυροδέματος και δεν έδιναν ξεκάθαρα αποτελέσματα σχετικά με τη διάβρωση<sup>157,158</sup>. Παρόλα αυτά άλλοι αναστολείς διάβρωσης ερευνήθηκαν όπως το νιτρώδες ασβέστιο, δίνοντας ενθαρρυντικά αποτελέσματα.

Σήμερα, οι αναστολείς διάβρωσης χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους προστασίας από τη διάβρωση όπως π.χ. με εποξειδικά επικαλυμμένους χάλυβες. Αποτελούν μία από τις σημαντικότερες μεθόδους προστασίας του οπλισμού διότι ο μηχανισμός προστασίας τους γίνεται αναπόσπαστο κομμάτι του ίδιου του σκυροδέματος. Οι περισσότεροι αναστολείς δρουν χημικά σταθεροποιώντας την επιφάνεια του χάλυβα αν και κάποιιοι από αυτούς δρουν μειώνοντας το πορώδες του σκυροδέματος. Συνήθως προστίθενται σαν μίγματα με το νερό ανάμιξης όταν πρόκειται για νέες κατασκευές αλλά μπορούν επίσης να εφαρμοστούν στην εξωτερική επιφάνεια υφιστάμενων δομών με ψεκασμό ή επάλειψη.

#### 3.3.1 Κατηγορίες Αναστολέων Διάβρωσης

Οι αναστολείς διάβρωσης ανάλογα με τη δράση τους χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: ανοδικοί, καθοδικοί και οργανικοί αναστολείς διάβρωσης.

Οι **ανοδικοί αναστολείς** διάβρωσης μειώνουν τον ρυθμό διάβρωσης της ανοδικής δράσης, αντιδρούν με τα προϊόντα της διάβρωσης του οπλισμού και δημιουργούν ένα προστατευτικό λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του, ενώ παράλληλα έχουν τη δυνατότητα να δέχονται ηλεκτρόνια. Σταδιακά καλύπτεται όλη η επιφάνεια των χάλυβων, οπότε η διαδικασία της διάβρωσης σταμάτα. Η αποτελεσματικότητά τους είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη συγκέντρωσή τους σε σχέση με τη συγκέντρωση των χλωριόντων. Οι ανοδικοί αναστολείς διάβρωσης θεωρούνται ότι είναι «επικίνδυνοι» εξαιτίας του ότι εάν χρησιμοποιούνται σε πολύ μικρές ποσότητες, προκαλούν αύξηση του ρυθμού διάβρωσης. Παραδείγματα ανοδικών αναστολέων διάβρωσης αποτελούν τα χρωμικά, νιτρικά, μολυβδούχα, αλκαλοφωσφορικά, πυριτικά και ανθρακικά<sup>159</sup>.

Οι **καθοδικοί αναστολείς διάβρωσης** επιδρούν στην καθοδική δράση με αντίδραση με τα υδροξυλιόντα προς κατακρήμιση αδιάλυτων συστατικών στην καθοδική περιοχή, οπότε παρεμποδίζεται η διάχυση του οξυγόνου στην περιοχή γύρω από τον οπλισμό. π.χ. άλατα του ψευδαργύρου, του μαγνησίου ή του ασβεστίου. Οι καθοδικοί αναστολείς διάβρωσης θεωρούνται ως «ασφαλείς αναστολείς» διότι η ενεργή καθοδική επιφάνεια μειώνεται σε συνάρτηση με την ποσότητα του αναστολέα που χρησιμοποιείται<sup>160</sup>. Παραδείγματα

καθοδικών αναστολέων διάβρωσης αποτελούν ο ψευδάργυρος και τα άλατα μαγνησίου, μαγγανίου, αντιμονίου και νικελίου. Η αντίδραση αναστολής της διάβρωσης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως: διαλυτότητα, διασπορά και την αναλογία αναστολέα χλωριόντων (για τους ανοδικούς αναστολείς), τη χημική σύσταση του τσιμέντου, τις συνθήκες ωρίμανσης, θερμοκρασία και το pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος<sup>161</sup>. Από τους δύο αυτούς τύπους των αναστολέων διάβρωσης, οι ανοδικοί αναστολείς βρέθηκε ότι είναι πιο δραστικοί σε σχέση με τους καθοδικούς αναστολείς διάβρωσης.

Οι **οργανικοί (ή μικτοί) αναστολείς** θεωρείται ότι παρέχουν την καλύτερη αντιδιαβρωτική προστασία<sup>162</sup>. Είναι συνήθως οργανικές ενώσεις με πολικές ομάδες (αμίνες, οργανικά οξέα). Οι αναστολείς αυτοί δρουν είτε φράζοντας τους πόρους του σκυροδέματος εξασφαλίζοντας έτσι μείωση του εισερχόμενου οξυγόνου είτε προσροφώνται στη μεταλλική επιφάνεια επικαλύπτοντας τη με ένα προστατευτικό στρώμα<sup>163</sup>.

Με βάση τον τρόπο που προσροφώνται στην προστατευόμενη επιφάνεια, ταξινομούνται σε<sup>164</sup> αναστολείς φυσικής και χημικής ρόφησης. Οι **αναστολείς φυσικής ρόφησης** δρουν καλύπτοντας τα ενεργά κέντρα στην επιφάνεια του μετάλλου στα οποία οφείλεται η ύπαρξη γαλβανικών στοιχείων που είναι υπεύθυνα για τη διάβρωση. Ονομάζονται επίσης και πρωτογενείς, γιατί το στρώμα ρόφησης περιέχει μόνο τα μόρια του αναστολέα. Οι **αναστολείς χημικής ρόφησης** δρουν με επιφανειακή χημική αντίδραση στην επιφάνεια του μετάλλου την οποία καλύπτουν με το προϊόν της αντίδρασης. Ονομάζονται επίσης και δευτερογενείς, γιατί το στρώμα ρόφησης περιέχει το προϊόν της αντίδρασης μεταξύ του μετάλλου και του αναστολέα. Οι διαφορές μεταξύ φυσικής και χημικής ρόφησης αναφέρονται στον **Πίνακα 3.6**<sup>165</sup>.

**Πίνακας 3.6:** Διαφορές μεταξύ φυσικής και χημικής ρόφησης

Φυσική Ρόφηση	Χημική Ρόφηση
Ασθενής αλληλεπίδραση μετάλλου-αναστολέα διάβρωσης	Ισχυρή αλληλεπίδραση μετάλλου- αναστολέα διάβρωσης
Ύπαρξη δυνάμεων Wan der Waals. Μοριακή ενθαλπία ρόφησης ≈ 40 KJ/mol	Ύπαρξη χημικών δεσμών. Μοριακή ενθαλπία ρόφησης ≈ 600 KJ/mol
Μεταβολή της επιφάνειας του μετάλλου	Χημική μεταβολή της επιφάνειας του μετάλλου
Εφαρμογή κυρίως σε όξινα περιβάλλοντα	Εφαρμογή σε όξινα, ουδέτερα και αλκαλικά περιβάλλοντα

### 3.3.2 Μηχανισμός δράσης αναστολέων διάβρωσης

Οι αναστολείς διάβρωσης οι οποίοι προστίθενται στο φρέσκο σκυρόδεμα δρουν με δύο μεθόδους, ή αυξάνουν το χρόνο έναρξης της διάβρωσης ή/και μειώνουν τον ρυθμό διάβρωσης μετά την αποπαθητικοποίηση του χάλυβα. Σε υφιστάμενες δομές οι αναστολείς διάβρωσης εφαρμόζονται στην επιφάνεια του σκληρυμένου σκυροδέματος αν η διάβρωση βρίσκεται σε αρχικό στάδιο (πριν από την αποπαθητικοποίηση) και ο τρόπος δράσης τους είναι ο ίδιος με πριν, εφόσον η απαραίτητη συγκέντρωση αναστολέα έχει φτάσει στην επιφάνεια του χάλυβα. Αν η διάβρωση έχει ήδη αρχίσει η εφαρμογή του αναστολέα στην επιφάνεια του σκυροδέματος μπορεί μόνο να μειώσει τον ρυθμό διάβρωσης.

**Αναστολείς διάβρωσης για την παρεμπόδιση ή την καθυστέρηση της διάβρωσης σε καινούριες κατασκευές**

Το **νιτρώδες νάτριο ( $\text{Na}_2\text{NO}_3$ )** είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη χημική ένωση που χρησιμοποιείται για την αναστολή της διάβρωσης του οπλισμού του σκυροδέματος και

προστίθεται κατά το στάδιο της παραγωγής του τσιμεντοπολτού. Όταν η χρήση του συνδυάζεται με καλής ποιότητας σκυρόδεμα, επαρκές πάχος οπλισμού και σύμφωνα με τις απαιτούμενες οδηγίες τότε τα αποτελέσματα που δίνει είναι πολύ ενθαρρυντικά. Έχει χρησιμοποιηθεί στις Η.Π.Α., στην Ιαπωνία και τη Μέση Ανατολή, σε χώρους στάθμευσης, δρόμους και σε θαλάσσιες κατασκευές.

Το νιτρώδες ασβέστιο δρα σαν επιταχυντής σκλήρυνσης για το σκυρόδεμα, σαν παθητικοποιητής εξαιτίας της οξειδωτικής του ικανότητας και σαν σταθεροποιητής του παθητικού φιλμ του οπλισμού λόγω του ότι οξειδώνει ιόντα δισθενούς σιδήρου ( $Fe^{2+}$ ) προς ιόντα τρισθενούς σιδήρου ( $Fe^{3+}$ ), που σχηματίζουν ελάχιστα διαλυτά οξείδια του σιδήρου<sup>166</sup>. Σε όλες τις βιβλιογραφικές αναφορές<sup>167,64</sup> διαπιστώθηκε μια κρίσιμη τιμή συγκέντρωσης μεταξύ του αναστολέα και των χλωριόντων, περίπου ίση με 0,6, για την παρεμπόδιση της έναρξης της διάβρωσης. Αυτό σημαίνει ότι ο αναστολέας νιτρώδους ασβεστίου για να είναι αποτελεσματικός πρέπει να βρίσκεται σε επαρκή συγκέντρωση στην περιοχή του οπλισμού και ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης εξαρτάται από την δοσολογία του. Συνήθως για εμπορική χρήση συνίσταται η δοσολογία 30l/m<sup>3</sup> διαλύματος 20% νιτρώδους ασβεστίου για την παρεμπόδιση της διάβρωσης από χλωριόντα. Σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα το νιτρώδες νάτριο δρα σαν αναστολέας διάβρωσης επίσης. Σημαντικό μειονέκτημα του νιτρώδους ασβεστίου είναι η πιθανή αύξηση εντοπισμένης διάβρωσης σε περίπτωση που η δοσολογία δεν είναι αρκετή ή σε περίπτωση απόπλυσής του με το πέρασμα του χρόνου. Έτσι δεν συνίσταται η χρήση του σε κατασκευές μόνιμα βυθισμένες σε νερό για περιβαλλοντολογικούς και λόγους υγείας.

Το **μονο-φθοριοφωσφορικό νάτριο ( $Na_2PO_3F$ , MFP)**, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αναστολέας διάβρωσης εφαρμοζόμενος όμως μόνο στην επιφάνεια του σκυροδέματος και όχι σαν πρόσθετο λόγω της ανεπιθύμητης χημικής αντίδρασής του με το νωπό σκυρόδεμα<sup>168</sup>. Το MFP αντιδρά με τα ιόντα ασβεστίου προς δημιουργία αδιάλυτων προϊόντων όπως φωσφορικό ασβέστιο και φθοριούχο ασβέστιο και η δραστική ρίζα  $PO_3F^-$  εξαφανίζεται από το διάλυμα των πόρων.

Εργαστηριακές μελέτες<sup>169</sup> έδειξαν πως η εφαρμογή του MFP μπορεί να καθυστερήσει την έναρξη της διάβρωσης ακόμα και σε συγκεντρώσεις χλωριόντων έως 2% κ.β. τσιμέντου. Μια οριακή τιμή του λόγου των συγκεντρώσεων MFP/χλωριόντων ίση με 1 πρέπει να επιτευχθεί για την σημαντική μείωση στο ρυθμό διάβρωσης. Το βασικό μειονέκτημα της χρήσης του MFP είναι ότι για να δράσει σαν αναστολέας διάβρωσης πρέπει να διεισδύσει στον οπλισμό του σκυροδέματος. Αντιφατικά αποτελέσματα έχουν κατά καιρούς δημοσιευτεί<sup>41</sup>: σε αρχικές επί τόπου δοκιμές βρέθηκε ανεπαρκής διείσδυση του αναστολέα η οποία οφειλόταν στην πολύ πυκνή δομή του σκυροδέματος, στο μεγάλο πάχος επικάλυψης και στην μειωμένη εφαρμογή του αναστολέα. Σε πιο πρόσφατες εφαρμογές του MFP, όπως στην γέφυρα Peney κοντά στη Γενεύη καθώς και σε κτίρια από μπετόν και μπαλκόνια, εφαρμόστηκε πάνω στην καθαρισμένη επιφάνεια του σκυροδέματος σε δέκα και πλέον στρώσεις και το σκυρόδεμα εμποτίστηκε μέχρι τον οπλισμό σε λίγες εβδομάδες. Τέλος, η χρήση αναστολέα MFP που περιέχει γέλη προτάθηκε για τη βελτίωση της διείσδυσης του MFP και η έρευνα είναι ακόμη υπό συζήτηση.

Εδώ και δέκα περίπου χρόνια μια νέα ομάδα οργανικών μορίων και συγκεκριμένα οι **αλκαλοαμίνες** και οι **αμίνες** καθώς και τα άλατά τους με οργανικά και ανόργανα οξέα

χρησιμοποιούνται σαν συστατικά σε μίγματα αναστολέων διάβρωσης συνήθως με πολύπλοκες συνθέσεις που μπορεί να περιέχουν και ανόργανες ενώσεις<sup>170</sup>. Πολλές μελέτες δείχνουν ότι τα μίγματα αυτά είναι αρκετά αποτελεσματικά<sup>41,171,172,173</sup>. Ένας εμπορικός αναστολέας αυτού του τύπου (migrating inhibitor) περιέχει πτητικά συστατικά (διμεθυλοαιθαλοαμίνη) και μη-πτητικά συστατικά (βενζοϊκό οξύ)<sup>174</sup>. Για την πλήρη παρεμπόδιση της έναρξης της διαβρωτικής διαδικασίας σε κορεσμένο διάλυμα  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  με 1M NaCl ήταν απαραίτητη η παρουσία και δύο συστατικών σε αναλογία συγκέντρωσης αναστολέα/χλωριόντα περίπου ίση με 1. Με τη βοήθεια σύγχρονων μεθόδων ανάλυσης, όπως Φωτοηλεκτρονιακή Φασματοσκοπία Ακτίνων Χ (X-Ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) επιβεβαιώθηκε πως για την δημιουργία ενός προστατευτικού επιστρώματος επαρκούς πάχους πάνω στο χάλυβα είναι απαραίτητη η παρουσία και των δύο συστατικών του αναστολέα<sup>175</sup>.

#### **Αναστολείς διάβρωσης για την μείωση του ρυθμού διάβρωσης σε υφιστάμενες κατασκευές**

Η εφαρμογή αναστολέων διάβρωσης στην εξωτερική επιφάνεια υφιστάμενων κατασκευών με σκοπό την παύση ή έστω τη μείωση της ταχύτητας διάβρωσης αποτελεί μια πολύ καλή λύση για τον περιορισμό της διάβρωσης. Πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των αναστολέων διάβρωσης σε τέτοιες κατασκευές. Οι αναστολείς που προορίζονται για εφαρμογές αυτού του τύπου είναι κυρίως οργανικοί αναστολείς όπως το MFP και επίσης το νιτρώδες ασβέστιο.

Σε σχετική έρευνα, διάλυμα **MFP** συγκέντρωσης 15%κ.β εφαρμόστηκε επανειλημμένα σε δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος ( $w/c=0,65$  και πάχος επικάλυψης 12mm) με διάφορες συγκεντρώσεις χλωριόντων. Οι εγκιβωτισμένοι οπλισμοί είχαν υποστεί ήδη διάβρωση μετά από κύκλους ύγρυνσης-ξήρανσης για χρονικό διάστημα έξι μηνών. Η εφαρμογή του αναστολέα MFP έδειξε μείωση του ρυθμού διάβρωσης μόνο σε χαμηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων<sup>176</sup>.

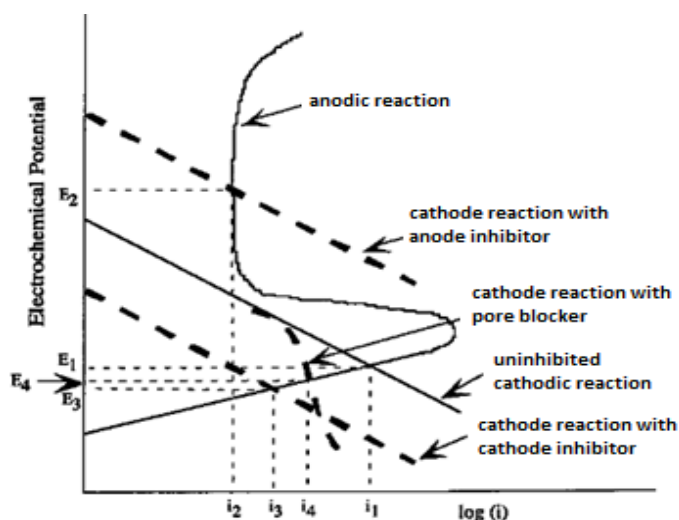
Αναστολείς διάβρωσης με βάση τις **αλκαλοαμίνες** εξετάστηκαν με παρόμοιο τρόπο<sup>177</sup>. Για την περίπτωση διάβρωσης σε εξέλιξη με συγκεντρώσεις χλωριόντων 1-2% κ.β. τσιμέντου δεν διαπιστώθηκε μείωση του ρυθμού διάβρωσης μετά την εφαρμογή των αλκαλοαμινών στην επιφάνεια των δοκιμίων<sup>178</sup>. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώθηκε και από άλλη έρευνα<sup>179</sup>, όπου ήδη διαβρωμένοι οπλισμοί εγκιβωτίστηκαν σε κονίαμα ( $w/c=0,75$ , πάχος επικάλυψης 25mm) και δεν διαπιστώθηκε σημαντική επίδραση στην ταχύτητα διάβρωσης των οπλισμών, παρά το γεγονός ότι το πάχος επικάλυψης ήταν μικρό και το κονίαμα πορώδες. Σε μη διαβρωμένους χάλυβες όμως αναστολείς αλκαλοαμινών είτε σαν μίγματα στο σκυρόδεμα είτε ψεκαζόμενοι στην επιφάνεια του σκληρυμένου σκυροδέματος έδειξαν σημαντική μείωση της ταχύτητας διάβρωσης, γεγονός που επιβεβαιώνεται από πολλούς συγγραφείς<sup>180, 181,182,183</sup>.

Σχετικά με το πρόβλημα της διάχυσης του αναστολέα μέχρι τον οπλισμό πιστεύεται πως αυτό επιτυγχάνεται με το νερό ή μέσω ατμών, αλλά μεγάλες αποκλίσεις στις μετρούμενες ταχύτητες αναφοράς έχουν αναφερθεί. Αυτό μπορεί να οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες των διεξαχθέντων πειραμάτων (τιμές σχετικής υγρασίας) και στις μεθόδους αποτίμησης αλλά γενικά είναι δύσκολο να καθορισθεί ο ρυθμός διάχυσης του αναστολέα με άγνωστη σύνθεση (οι εμπορικοί αναστολείς δεν διευκρινίζουν την ακριβή σύσταση των

μιγμάτων). Εκτενής έρευνα για τα φαινόμενα μεταφοράς έδειξε ότι ο ρυθμός διάχυσης των αναστολέων αμινοαλκοόλης είναι σαφώς μεγαλύτερος από αναστολείς που περιέχουν φωσφωρικά. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην αντίδραση των φωσφορικών με ιόντα ασβεστίου στην αλκαλική τσιμεντόπαστα η οποία εμποδίζει την περαιτέρω διάχυση. Για την αποφυγή λοιπόν της αντίδρασης πάρθηκαν πυρήνες από κατασκευή ηλικίας 100 ετών η οποία ήταν πλήρως ενανθρακωμένη και μελετήθηκε η διάχυση σε διάφορες συγκεντρώσεις των δύο αναστολέων. Σε δοσολογία  $500\text{g/m}^2$  για την αλκαλοαμίνη και μετά από επαναλαμβανόμενες στρώσεις υπήρξε ενδιάμεση ποσότητα αναστολέα μόνο για βάθος 15mm. Τριπλασιασμός της δοσολογίας,  $1500\text{g/m}^2$ , αύξησε την συγκέντρωση των αλκαλοαμινών αλλά το βάθος διάχυσης παρέμεινε το ίδιο. Μόνο μετά από πλημμύρισμα τις επιφάνειας για 28-50 μέρες με αναστολέα παρατηρήθηκε διαφορά στην διαχεόμενη συγκέντρωση που έφτασε σε 30mm βάθος και για τις αλκαλοαμίνες και για τα φωσφωρικά. Τέλος, σημαντικό πρόβλημα προκύπτει λόγω του ότι τις περισσότερες φορές μόνο το πιο πτητικό στοιχείο του αναστολέα μπορεί να μετρηθεί με ηλεκτρόδιο αμίνης με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν πληροφορίες για το μη-πτητικό. Για την επιτυχία της αναστολής βέβαια και τα δύο συστατικά απαιτούνται<sup>64</sup>.

### 3.3.3 Μηχανισμός προστασίας μέσω αναστολέων διάβρωσης

Από την πλευρά της ηλεκτροχημικής προσέγγισης του φαινομένου της διάβρωσης η επίδραση των αναστολέων διάβρωσης συνοψίζεται και δίνεται στο **Σχήμα 3.2** Οι καμπύλες πόλωσης δείχνουν την ανοδική και καθοδική δράση ως συνάρτηση της διαφοράς δυναμικού στη διεπιφάνεια χάλυβα (οπλισμού) / σκυροδέματος.



**Σχήμα 3.2:** Επίδραση αναστολέα διάβρωσης στο δυναμικό και την πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης<sup>184</sup>

Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν την ανοδική δράση (διάλυση /οξείδωση του σιδήρου  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ) και την καθοδική δράση ( $\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$ ) απουσία αναστολέα διάβρωσης, καθώς επίσης και το αντίστοιχο δυναμικό,  $E_1$ , και πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης,  $i_1$ . Η χρήση ενός ανοδικού αναστολέα διάβρωσης προκαλεί αύξηση του δυναμικού σε σημείο τέτοιο,  $E_2$ , όπου η ανοδική και καθοδική καμπύλη πόλωσης διασταυρώνονται στην παθητική περιοχή (βλέπε καμπύλη με κωδικό ονομασία «cathode reaction with anodic inhibitor», ενώ η πυκνότητα ρεύματος μειώνεται σε  $i_2$ .

Η χρήση καθοδικού αναστολέα διάβρωσης δρα στην καθοδική αντίδραση μειώνοντας τον ρυθμό της καθώς και το δυναμικό,  $E_3$ , και την πυκνότητα ρεύματος,  $i_3$ , όπως παρουσιάζεται στη γραμμή με κωδική ονομασία «καθοδικός αναστολέας διάβρωσης».

Η δράση των αναστολέων διάβρωσης οι οποίοι μπλοκάρουν ή φράζουν τους πόρους του σκυροδέματος παρεμποδίζοντας έτσι την είσοδο του οξυγόνου και κατά συνέπεια τη μείωση του ρεύματος παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.2** με διακεκομμένη γραμμή και κωδική ονομασία «pore blockers» και δίνουν τιμή δυναμικού και πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης,  $E_4$ ,  $i_4$ , αντίστοιχα. Στον **Πίνακα 3.7** συνοψίζεται η δράση και ο μηχανισμός της αναστολής της διάβρωσης τόσο στο δυναμικό και στην πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης<sup>185</sup>.

**Πίνακας 3.7:** Δράση των αναστολέων διάβρωσης στις παραμέτρους  $E_{corr}$  και  $i_{corr}$ .

Τύπος αναστολέα διάβρωσης	$E_{corr}$	$i_{corr}$
Ανοδικός	↑	↓
Καθοδικός	↓	↓
Μικτός	↓	↓

### 3.4 Ηλεκτροχημικές Μέθοδοι

Οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι περιλαμβάνουν μια σειρά από επεμβάσεις που βασίζονται στην μεταβολή του ανοδικού ή/και του καθοδικού δυναμικού με την επιβολή εξωτερικής πηγής ρεύματος ή μιας θυσιαζόμενης ανόδου. Έχουν τη δυνατότητα να περιορίσουν την διάβρωση σε μολυσμένο από χλωριόντα σκυρόδεμα και έτσι χρησιμοποιούνται σαν μέθοδοι αποκατάστασης. Τα τελευταία χρόνια όμως η καθοδική προστασία εφαρμόζεται και σε νέες κατασκευές σαν προληπτικό μέτρο.

#### 3.4.1 Καθοδική Προστασία (Cathodic Protection, CP)

Η επιστήμη της καθοδικής προστασίας ξεκίνησε το 1824 όταν ο Sir Humphrey Davy χρησιμοποίησε ανόδους από σίδηρο για να προστατέψει τα χάλκινα φύλλα που υπήρχαν στο κάτω μέρος των πλοίων του Βρετανικού Ναυτικού. Έκτοτε έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε πολλούς τομείς της τεχνολογίας όπως σε θαλάσσιες κατασκευές, σε υπόγειες δομές, σε σωλήνες και σε αποθηκευτικούς χώρους. Εφαρμογή καθοδικής προστασίας σε κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1973 σε κατάστρωμα γέφυρας στις Η.Π.Α. Η μέθοδος της καθοδικής προστασίας αρχικά εφαρμόζοταν σε περιπτώσεις υφιστάμενων κατασκευών όπου είχαν υποστεί εκτεταμένη διάβρωση αλλά πρόσφατα εφαρμόζεται σε καινούριες κατασκευές σαν προληπτικό μέτρο προστασίας. Στην διεθνή βιβλιογραφία γίνεται διάκριση των δύο περιπτώσεων και η εφαρμογή της μεθόδου σε υφιστάμενες κατασκευές καλείται “καθοδική προστασία-cathodic protection (CP)” σε αντιδιαστολή με την εφαρμογή σε νέες κατασκευές όπου επικρατεί ο όρος “καθοδική πρόληψη-cathodic prevention (CPre)”

#### **Βασική αρχή μεθόδου Καθοδικής Προστασίας**

Η καθοδική προστασία αποτελεί μια ηλεκτροχημική μέθοδο προστασίας από τη διάβρωση και βασίζεται σε τροποποιήσεις του ηλεκτροδιακού δυναμικού ανάμεσα στο μέταλλο και το περιβάλλον. Κατά τη διάβρωσή του ο χαλύβδινος οπλισμός οξειδώνεται στις ανοδικές περιοχές του συστήματος και η αντίδραση αυτή αντικατοπτρίζει την ανοδική δράση. Τα παραγόμενα ηλεκτρόνια μεταφέρονται δια μέσω του μετάλλου και καταναλώνονται στην κάθοδο η οποία μπορεί να είναι μια άλλη περιοχή του μετάλλου. Εάν το δυναμικό του



χάλυβα μετατοπιστεί σε πιο αρνητικές τιμές, γίνει δηλαδή ηλεκτροαρνητικότερο, τότε θα αποτελέσει την κάθοδο ενός ηλεκτρολυτικού κελιού και ο ρυθμός διάβρωσης θα ελαττωθεί ή θα παρεμποδιστεί ολοκληρωτικά με τη διάβρωση να λαμβάνει χώρα στην άνοδο και όχι στον οπλισμό-κάθοδο.

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 οπλισμένου σκυροδέματος με υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων στη μάζα τους σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους προστασίας<sup>186,187</sup>.

Στο οπλισμένο σκυρόδεμα η καθοδική προστασία μπορεί να εφαρμοστεί με δύο τρόπους:

- ✓ με θυσιαζόμενες ανόδους
- ✓ με επιβαλλόμενα εξωτερικά ρεύματα

Η κάθε μέθοδος έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και ανάλογα με την περίπτωση επιλέγεται η κατάλληλη επέμβαση. Μια βασική σύγκριση των δύο μεθόδων καθοδικής προστασίας παρουσιάζεται στον **Πίνακα 3.8**.

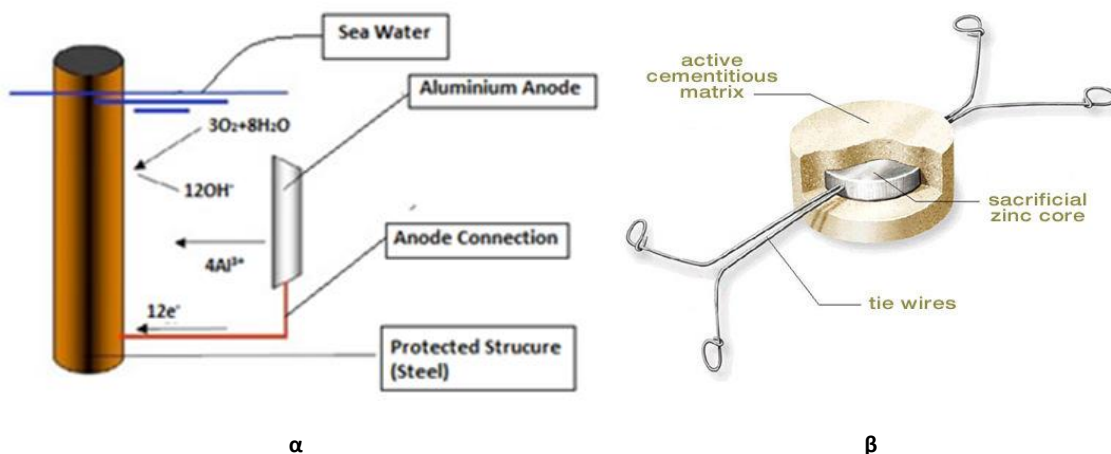
**Πίνακας 3.8:** Σύγκριση μεθόδων καθοδικής προστασίας

Θυσιαζόμενες άνοδοι	Εξωτερικά επιβαλλόμενο ρεύμα
Δεν απαιτεί εξωτερική τροφοδοσία	Απαιτεί εξωτερική τροφοδοσία
Λειτουργεί υπό σταθερή τάση	Η τάση μπορεί να ποικίλει
Η ένταση του ρεύματος είναι περιορισμένη	Η ένταση του ρεύματος μπορεί να ποικίλλει
Χρησιμοποιείται συνήθως σε συστήματα όπου οι απαιτήσεις του ρεύματος είναι χαμηλές	Μπορεί να σχεδιαστεί κατάλληλα για κάθε περίπτωση ρεύματος
Συνήθως χρησιμοποιείται σε χαμηλής αντίστασης ηλεκτρολύτες	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ηλεκτρολύτες οποιασδήποτε αντίστασης

### **Καθοδική Προστασία με Θυσιαζόμενες Ανόδους**

Στην καθοδική προστασία μέσω θυσιαζόμενων ανόδων η σύνδεση της καθόδου με την άνοδο γίνεται είτε με άμεση επαφή των δύο μετάλλων είτε μέσω μονωμένου καλωδίου. Η αρχή της μεθόδου στηρίζεται στη δημιουργία γαλβανικού στοιχείου μεταξύ της προστατευόμενης επιφάνειας και του θυσιαζόμενου ηλεκτροδίου, όπου το πρώτο αποτελεί την κάθοδο και το δεύτερο την άνοδο (**Σχήμα 3.3α**).

Πρακτικά, η μέθοδος εφαρμόζεται στην προστασία μεταλλικών επιφανειών στο έδαφος (δεξαμενές, σωλήνες), για πλοία αλλά και για κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος στο έδαφος, στη θάλασσα ή στον αέρα (**Σχήμα 3.3β**). Το θυσιαζόμενο ηλεκτρόδιο πρέπει να κατασκευάζεται από υλικό ανοδικότερο του μετάλλου που πρόκειται να προστατευθεί. Στην πράξη χρησιμοποιούνται τρία μέταλλα υπό μορφή κραμάτων, το μαγνήσιο, το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Το ανοδικότερο είναι το μαγνήσιο με αποτέλεσμα την ταχύτερη κατανάλωση του. Για τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα ως θυσιαζόμενες άνοδοι χρησιμοποιούνται συνήθως άνοδοι ψευδαργύρου υπό μορφή πλέγματος ή μεμονωμένων ανόδων.



**Σχήμα 3.3α:** (α) Σύστημα καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενη άνοδο αλουμινίου σε θαλάσσια κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος, (β) Καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους ψευδαργύρου

Η μέθοδος καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενες ανόδους παρουσιάζει το πλεονέκτημα της ευκολίας στην εγκατάσταση και την ελάχιστη ως ασήμαντη συντήρηση. Όμως η μειονεκτεί σε σχέση με την καθοδική προστασία με εξωτερικά εφαρμοζόμενο ρεύμα, στην μικρή διάρκεια ζωής των ανόδων, τον μεγάλο αριθμό ανόδων που απαιτείται για να εξασφαλιστεί προστασία στο σύνολο των οπλισμών και στις δυσκολίες που προκύπτουν από την συχνή αντικατάστασή τους (20-25 χρόνια).

#### **Καθοδική Προστασία με Εξωτερικά Επιβαλλόμενο Ρεύμα**

Η βασική αρχή της μεθόδου συνίσταται στην ύπαρξη μίας πηγής συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος που τροφοδοτεί την κατασκευή με ηλεκτρόνια. Η προστατευόμενη επιφάνεια συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της πηγής και ο θετικός με ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο (ηλεκτρογραφίτης, ανοξείδωτος χάλυβας, πυριτιούχος σίδηρος, άνθρακας) (**Σχήμα 3.4α**).

Για κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος που εκτίθενται στον ατμοσφαιρικό αέρα η συγκεκριμένη μέθοδος είναι περισσότερο αποτελεσματική από την γαλβανική καθοδική προστασία. Οι οπλισμοί συνδέονται με τον αρνητικό πόλο της εξωτερικής πηγής ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ χρησιμοποιείται μια κατάλληλη άνοδος από αγώγιμο υλικό, καθώς και ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς για τον έλεγχο του συστήματος. Με την εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος, το ηλεκτρικό δυναμικό του υπό προστασία μετάλλου μετατοπίζεται σε αρνητικές τιμές και έτσι αναστέλλεται ο μηχανισμός-πορεία της διάβρωσης. Το εξωτερικά εφαρμοζόμενο δυναμικό εξαλείφει τόσο την επίδραση των τοπικών γαλβανικών στοιχείων όσο και την επίδραση των μακροστοιχείων. Έτσι οι οξειδωτικές δράσεις δεν πραγματοποιούνται στην επιφάνεια της προς προστασίας κατασκευής αλλά στην άνοδο η οποία υφίσταται την επίδραση των διαβρωτικών παραγόντων. Επομένως η εφαρμογή της καθοδικής προστασίας απαιτεί την ύπαρξη κατάλληλων ανόδων οι οποίες καθορίζουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Πλέγματα του **Σχήμα 3.4β** χρησιμοποιούνται συχνά για την προστασία στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος εκτεθειμένων στον αέρα.

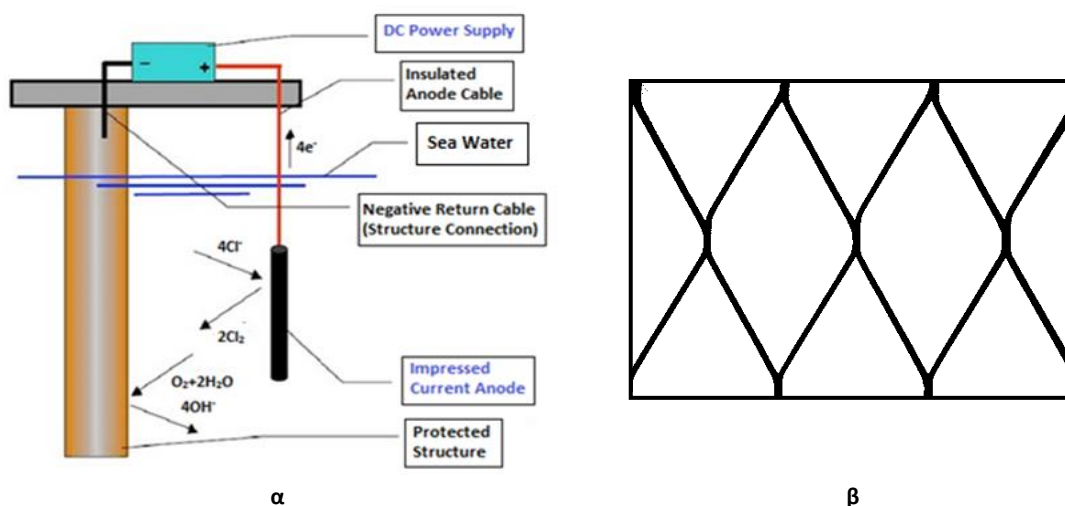
Σε περίπτωση υπόγειων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος μέσα σε υδατοκορεσμένα εδάφη, τα ρεύματα μειώνονται πολύ γρήγορα και μπορεί να πάρουν τιμές οι οποίες να είναι 1000 φορές μικρότερες από την αρχική τιμή. Σε καλώς αεριζόμενα εδάφη, απαιτούνται μεγάλες τιμές καθοδικού ρεύματος λόγω της μεγάλης διαθεσιμότητας οξυγόνου μέσα στο έδαφος. Σε θαλάσσιες κατασκευές εφαρμόζονται ρεύματα με πυκνότητα από 18 έως



42mA/m<sup>2</sup>. Γρήγορα όμως οι τιμές των ρευμάτων μειώνονται, πιθανώς λόγω των διαφόρων μικροοργανισμών που καταναλώνουν το οξυγόνο.

Η διάρκεια εφαρμογής της καθοδικής προστασίας εξαρτάται από την διάρκεια της ζωής των ανόδων. Εάν είναι δυνατή η ευχερής αλλαγή των ανόδων τότε η διάρκεια της εφαρμογής της καθοδικής προστασίας είναι απεριόριστη και επομένως η διάρκεια της ζωής της μεταλλικής κατασκευής θεωρητικά απεριόριστη<sup>188,189,190,191</sup>.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου η οποία εφαρμόζεται ευρέως, αποτελούν η ανθεκτικότητά της, αφού σχεδιάζονται συστήματα προστασίας με ορίζοντα πέραν της εικοσαετίας, η απαίτηση μικρού αριθμού ανόδων, οι περιορισμένες απαιτήσεις σε έλεγχο και η εύκολη αυτοματοποίηση της όλης διαδικασίας. Εκτός των άλλων, το σύστημα σχεδιάζεται ώστε να είναι αποδοτικό σε μία ευρεία γκάμα απαιτήσεων ρεύματος και δυναμικού και να προσαρμόζεται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Όμως, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος είναι υψηλό και κάποια αστοχία της πηγής ρεύματος μπορεί να προκαλέσει σωρεία προβλημάτων και σφαλμάτων που μπορεί να μην παρατηρηθούν αμέσως. Συνεπώς ο κίνδυνος είναι μεγάλος. Εκτός των παραπάνω, επηρεάζει και γειτονικές κατασκευές λόγω της μεγάλης ποσότητας διαφυγόντος ρεύματος.



Σχήμα 3.4: (α) Σύστημα καθοδικής προστασίας με εξωτερικά εφαρμοζόμενο ρεύμα για θαλάσσια κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος, (β) Σχήμα ανόδων τιτανίου υπό μορφή πλέγματος

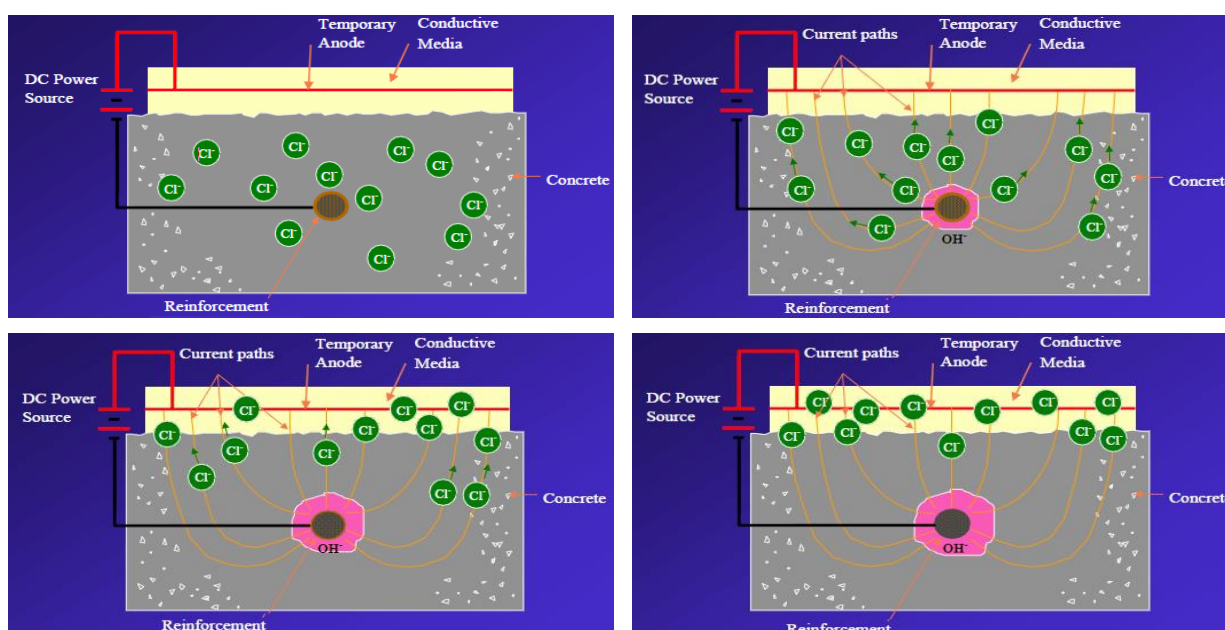
### 3.4.2 Ηλεκτροχημική Εξαγωγή Χλωριόντων (Electrochemical Desalination)

Η ηλεκτροχημική εξαγωγή χλωριόντων από το σκυροδέμα είναι η διαδικασία απομάκρυνσης των ιόντων χλωρίου από μια κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος με τη βοήθεια ηλεκτροχημικών μέσων. Μελετήθηκε αρχικά το 1970 από το Kansas Department of Transportation αλλά δεν εφαρμόστηκε τότε διότι απαιτούσαν πολύ υψηλά ρεύματα για την απομάκρυνση των χλωριόντων τα οποία βρέθηκε ότι αύξαναν την διαπερατότητα του σκυροδέματος, μειώναν την συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος και προκαλούσαν ρωγμές. Σε πιο πρόσφατες μελέτες όμως αποδείχτηκε πως η εφαρμογή ρεύματος κάτω από 5A/m<sup>2</sup> μπορεί να απομακρύνει τα χλωριόντα χωρίς να προκαλέσει ανεπιθύμητες παρενέργειες. Συνολικά απομακρύνεται το 20-50% των συνολικών χλωριόντων και τα υπόλοιπα κατανέμονται μακριά από τον οπλισμό.

### Βασική αρχή μεθόδου εξαγωγής χλωριόντων

Η ηλεκτροχημική απομάκρυνση των χλωριόντων μοιάζει με την καθοδική προστασία καθώς ο σπλισμός συνδέεται με τον αρνητικό πόλο μιας πηγής συνεχούς ρεύματος, ενώ ο θετικός πόλος συνδέεται με μια προσωρινή εξωτερική άνοδο τοποθετημένη μέσα στον ηλεκτρολύτη που καλύπτει την επιφάνεια του σκυροδέματος. Το ρεύμα ρέει δια μέσου του σπλισμού προς την άνοδο, δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο οποίο τα χλωριόντα απομακρύνονται από τον σπλισμό και κατευθύνονται προς τον ηλεκτρολύτη όπου και αφαιρούνται μέσω απορρόφησης (Σχήμα 3.5).

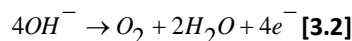
Το ρεύμα που εφαρμόζεται στην ηλεκτροχημική αυτή μέθοδο είναι συνήθως  $1A/m^2$  σκυροδέματος (το οποίο ισοδυναμεί με περίπου  $0,4-2A/m^2$  σπλισμού) και είναι πολύ υψηλότερο από την αντίστοιχη τιμή για την καθοδική προστασία που ανέρχεται σε  $0,0001-0,05 A/m^2$  σπλισμού. Η επιτυχής αφαίρεση των χλωριόντων εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος, από την κατάσταση του σκυροδέματος και από την τοποθεσία των σπλισμών.



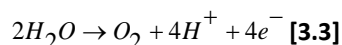
Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου εξαγωγής χλωριόντων<sup>192</sup>

### Μηχανισμός Αντιδράσεων

Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην κάθοδο (σπλισμός) και στην άνοδο έχει σαν αποτέλεσμα τη διεξαγωγή ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Ο ηλεκτρολύτης στις αντιδράσεις αυτές μπορεί να είναι κορεσμένο υδροξείδιο του ασβεστίου, υδροξείδιο του νατρίου, βορικό νάτριο ή απλά νερό βρύσης. Εάν ο ηλεκτρολύτης είναι αλκαλικός τότε τα υδροξυλιόντα μετατρέπονται σε οξυγόνο και νερό στην άνοδο, σύμφωνα με την αντίδραση:

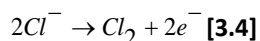


Εάν ο ηλεκτρολύτης είναι ουδέτερο διάλυμα τότε το νερό μετατρέπεται σε οξυγόνο και ιόντα υδρογόνου στην άνοδο, σύμφωνα με την αντίδραση:

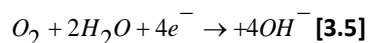


Σε αυτήν την περίπτωση, εάν ο ηλεκτρολύτης δεν περιέχει άλατα, το pH του διαλύματος αυξάνεται καθώς τα ιόντα υδρογόνου μεταφέρονται προς τον σπλισμό μέχρι να συναντήσουν τα χλωριόντα και τα υδροξυλικά που μετακινούνται προς την άνοδο. Τα ιόντα

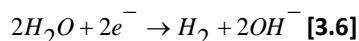
υδρογόνου αντιδρούν με τα υδροξυλιόντα προς δημιουργία νερού και με τα χλωριόντα προς δημιουργία υδροχλωρικού οξέος. Η περίσσεια χλωριόντων απελευθερώνεται στην άνοδο με τη μορφή αερίου.



Η δημιουργία υδροχλωρικού οξέος είναι ανεπιθύμητη γιατί επιθέεται στο σκυρόδεμα και το χλώριο σε μορφή αερίου θεωρείται επικίνδυνο για την υγεία και έτσι χρησιμοποιείται αλκαλικός ηλεκτρολύτης. Στον οπλισμό λοιπόν δημιουργούνται υδροξυλιόντα παρουσία νερού και οξυγόνου σύμφωνα με την αντίδραση:



Αν η παροχή οξυγόνου είναι περιορισμένη, τότε εκτός από τα υδροξυλιόντα παράγεται και αέριο υδρογόνο:



Εάν απομακρυνθούν τόσα χλωριόντα ώστε η συγκέντρωσή του να πέσει κάτω από την κρίσιμη τιμή, τότε η αύξηση των υδροξυλιόντων θα βοηθήσει στην επαναπαθητικοποίηση του οπλισμού.

Η ηλεκτροχημική αφαίρεση των χλωριόντων έχει κάποιους περιορισμούς και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν η ζημιά στο σκυρόδεμα είναι εκτεταμένη και απειλεί τη στατικότητα της δομής. Οι ρωγμές και οι αποφλοιώσεις του σκυροδέματος πρέπει να απομακρυνθούν συμβατικά πριν από την εφαρμογή της μεθόδου για να αποφευχθεί η επαφή του ηλεκτρολύτη με τον οπλισμό και να δημιουργηθεί ηλεκτρικό κύκλωμα. Πιθανό αποτέλεσμα της μεθόδου είναι επίσης η έναρξη της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης<sup>193</sup> εάν και εφόσον υπάρχει τέτοιος κίνδυνος.

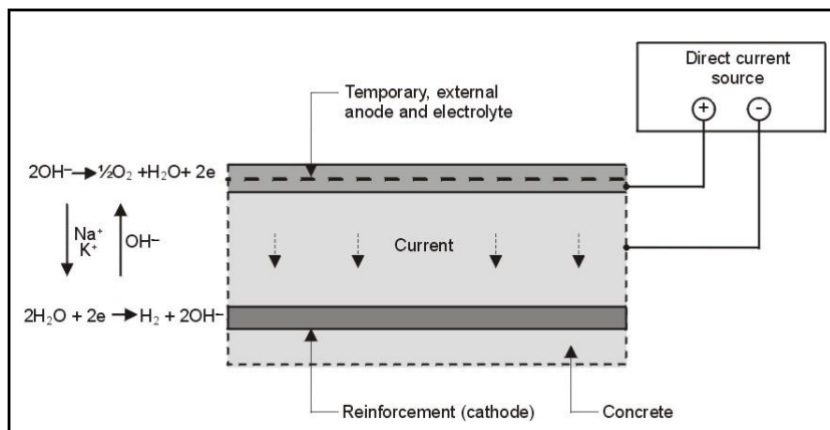
### 3.4.3 Ηλεκτροχημική Επαναλκαλοποίηση (Electrochemical Realkalization, RE)

Η επαναφορά του παθητικοποιημένου φιλμ του οπλισμού σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα μέσω ηλεκτροχημικής επαναλκαλοποίησης παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στο τέλος της δεκαετίας του 1980<sup>194</sup>. Το αρχικό σύστημα αποτελείτο από ένα χαλύβδινο πλέγμα στερεωμένο στην επιφάνεια της κατασκευής (άνοδος) όπου ψεκαζόταν χαρτοπολτός εμποτισμένος με διάλυμα ανθρακικού νατρίου ως ηλεκτρολύτη. Αργότερα, άνοδοι τιτανίου και ηλεκτρολύτες σε υγρή μορφή χρησιμοποιήθηκαν. Η τεχνική έχει εφαρμοστεί σε πολλές χώρες και κυρίως σε Νορβηγία και Αγγλία. Πρόσφατα, μια παραλλαγή αυτής της τεχνικής άρχισε να χρησιμοποιείται όπου το ρεύμα που απαιτείται προέρχεται από μια θυσιαζόμενη άνοδο<sup>195,196</sup>. Η τεχνική της ηλεκτροχημικής επαναλκαλοποίησης αφήνει την επιφάνεια του σκυροδέματος αφόρτιστη με αποτέλεσμα να είναι κατάλληλη και για κατασκευές υψηλής αρχιτεκτονικής σημασίας, όπως μνημεία<sup>197</sup>.

#### **Βασική αρχή μεθόδου**

Στην τεχνική της ηλεκτροχημικής επαναλκαλοποίησης του σκυροδέματος απαιτείται συνεχές ρεύμα το οποίο επιβάλλεται ανάμεσα στον οπλισμό (κάθοδος) και σε μια άνοδο η οποία τοποθετείται προσωρινά στην εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής. Συνήθως χρησιμοποιούνται σαν άνοδοι πλέγματα τιτανίου ή κοινού χάλυβα. Η άνοδος περιβάλλεται από διάλυμα ανθρακικού νατρίου συγκεντρώσεως 1M το οποίο ψεκάζεται στην επιφάνεια. Λόγω της σχετικά υψηλής πυκνότητας ρεύματος που επιβάλλεται (1-2A/m<sup>2</sup>) ένα αρκετά μεγάλο πάχος ενανθρακωμένου σκυροδέματος μπορεί να επαναλκαλοποιηθεί μέσα σε

μερικές μέρες ή εβδομάδες. Μετά το τέλος της διαδικασίας τόσο το πλέγμα της ανόδου όσο και ο ηλεκτρολύτης απομακρύνονται. Η βασική δομή του συστήματος απεικονίζεται στο **Σχήμα 3.6**.



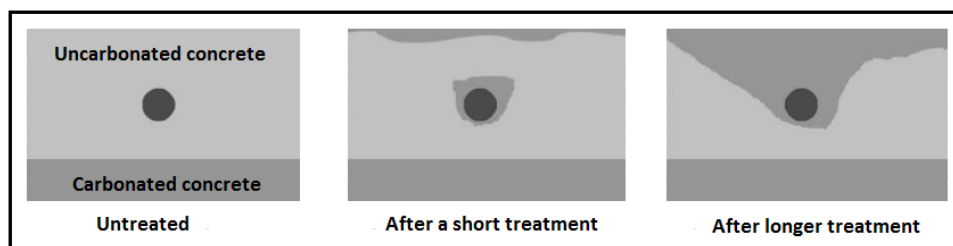
**Σχήμα 3.6:** Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτροχημικής επανακαλοποίησης του σκυροδέματος

### Μηχανισμός Αντιδράσεων

Τα υδροξυλιόντα παράγονται μέσω ηλεκτρόλυσης στον οπλισμό που αποτελεί την κάθοδο μέσω της αντίδρασης [3.6]. Μέρος τους μετακινείται προς την άνοδο, ενώ τα υπόλοιπα καταναλώνονται από τα ιόντα νατρίου που εισέρχονται στην περιοχή. Στα ανοδικά πλέγματα πραγματοποιείται η αντίδραση [3.2] για το σχηματισμό οξυγόνου. Ανθρακικά ιόντα διεισδύουν από τον ηλεκτρολύτη στο σκυροδέμα μέσω ηλεκτρο-οσμωτικής ροής, διάχυσης και τριχοειδούς αναρρίχησης. Η υψηλή ποσότητα των παραγόμενων υδροξυλιόντων έχει σαν αποτέλεσμα την άνοδο του pH σε τιμές κοντά στο 14<sup>198,199</sup>. Μετά την επανακαλοποίηση ένα μέρος των υδροξυλιόντων θα αντιδράσει με το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub>, αυξάνοντας την περιεκτικότητα σε ανθρακικό άλας οδηγώντας σε πτώση του pH. Η προσθήκη ανθρακικού νατρίου σε επαρκή ποσότητα δύναται να σταθεροποιήσει το pH σε τιμές 10,5-11.

Σχετικά με το φαινόμενο της ηλεκτρο-όσμωσης, υπάρχει έντονη διαμάχη. Αρχικά εργαστηριακά αποτελέσματα<sup>65,200,201</sup> δεν έδειξαν στοιχεία εμφάνισης του φαινομένου αλλά πρόσφατες μελέτες<sup>202,203</sup> υποστηρίζουν την ύπαρξή του επιβεβαιώνοντας παλαιότερες δημοσιεύσεις<sup>204,205</sup>. Η ηλεκτρο-όσμωση παρατηρήθηκε σε ενανθρακωμένο σκυροδέμα αλλά όχι σε μη ενανθρακωμένο και έτσι περισσότερη έρευνα αναμένεται να αποσαφηνίσει το μηχανισμό. Ο μηχανισμός της επανακαλοποίηση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Στο αριστερό σχήμα δείχνεται η έκταση της ενανθράκωσης πριν από την επέμβαση, ενώ στο μεσαίο σχήμα φαίνεται ότι μετά από μικρό χρονικό διάστημα που επιβάλλεται η τεχνική η ενανθρακωμένη περιοχή έχει αυξηθεί γύρω από τον οπλισμό (λόγω ηλεκτρόλυσης) και στην επιφάνεια του σκυροδέματος (λόγω απορρόφησης, ηλεκτρο-όσμωσης ή/και διάχυσης).



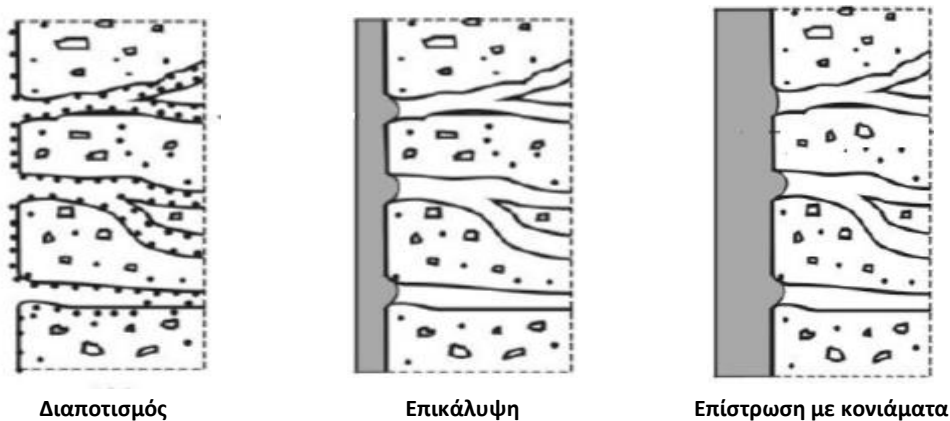
**Σχήμα 3.7:** Επίδραση ηλεκτρο-όσμωσης σε επανακαλοποίηση ενανθρακωμένου σκυροδέματος<sup>206</sup>

Τέλος, στο δεξί τμήμα φαίνεται το σπλισμένο σκυροδέμα μετά από μεγαλύτερο χρονικό διάστημα επιβολής της τεχνικής όπου η ενανθρακωμένη ζώνη είναι συνεχής, από την επιφάνεια μέχρι τον σπλισμό του σκυροδέματος. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει η πιθανότητα αλκαλοπυριτικής αντίδρασης εφόσον τα χρησιμοποιηθέντα αδρανή έχουν τέτοιο κίνδυνο.

### 3.5 Επικαλύψεις Σκυροδέματος

Ο σκοπός της επικάλυψης του σπλισμένου σκυροδέματος είναι η δημιουργία ενός στρώματος χαμηλής διαπερατότητας έτσι ώστε να απομονώνεται η δομή από επιβλαβείς διαβρωτικούς παράγοντες. Το στρώμα της επικάλυψης δρα σαν φράγμα στην είσοδο των χλωριόντων με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης. Οι περισσότερες επικαλύψεις εμποδίζουν ταυτόχρονα και την είσοδο του νερού αφήνοντας όμως ελεύθερη τη δυνατότητα διαπνοής, δηλαδή την εξάτμιση των ατμών από το εσωτερικό του σκυροδέματος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε νέες δομές αλλά και σε υφιστάμενες κατασκευές σαν μέθοδος αποκατάστασης με περιορισμένη όμως αποτελεσματικότητα ειδικά αν το επίπεδο των χλωριόντων είναι υψηλό.

Η επιφανειακή προστασία του σκυροδέματος μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους και οι συνιθέστερες είναι ο διαποτισμός, η επικάλυψη και η επίστρωση (Σχήμα 3.8.).



Σχήμα 3.8: Επιφανειακές επεμβάσεις σε σκυροδέμα<sup>207</sup>

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

#### 3.5.1 Διαποτισμός

Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά διαποτισμού είναι σιλανικής και σιλοξανικής βάσης. Τα υλικά αυτής της κατηγορίας έχουν πυριτική βάση και δρουν σαν υδροφοβικοί παράγοντες. Δεν γεμίζουν τους πόρους του σκυροδέματος όπως τα υλικά σφράγισης αλλά



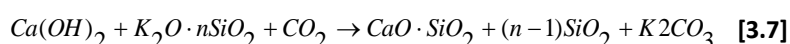
αντιδρούν χημικά με το σκυρόδεμα σχηματίζοντας μια υδροφοβική στρώση η οποία αποτρέπει την είσοδο χλωριόντων και νερού αλλά επιτρέπει την εξάτμιση των ατμών<sup>208</sup>. Διαφορετικοί τύποι σκυροδέματος απαιτούν διαφορετικά πάχη επικάλυψης και διαφορετικά υλικά ανάλογα με το πορώδες και τις τριχοειδείς ρωγμές. Πριν από την εφαρμογή απαιτείται κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας ώστε να έχουν απομακρυνθεί σκόνες και έλαια ούτως ώστε να μπορέσει το υλικό διαποτισμού να φτάσει στην επιφάνεια του σκυροδέματος και να αντιδράσουν χημικά. Επαναβαφή συστήνεται κάθε 5 περίπου χρόνια και δεν απαιτείται η απομάκρυνση του προηγούμενου στρώματος. Στα πλεονεκτήματα των υλικών διαποτισμού συγκαταλέγονται η ευκολία εφαρμογής, η δυνατότητα εφαρμογής σε οποιοδήποτε μέρος της δομής κατά τη διάρκεια ή και έπειτα από την κατασκευαστική φάση. Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται το υψηλό κόστος και η σχολαστικότητα καθαρισμού της επιφάνειας που απαιτείται πριν από την εφαρμογή.

### 3.5.2 Επικάλυψη

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι **οργανικές** και οι **ανόργανες** επικαλύψεις δεδομένου ότι το πάχος τους δεν υπερβαίνει τα 300μm.

⇒ **Ανόργανες επικαλύψεις:** 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<sup>209</sup>.

Η συγκράτηση της υδρύαλου με το υπόστρωμα (σκυρόδεμα, 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.

⇒ **Οργανικές επικαλύψεις:** η κατηγορία αυτή θα συζητηθεί αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

### 3.5.3 Επίστρωση

#### **Επιστρώσεις με κονιάματα**

Τα επιστρώματα γίνονται από ειδικά σκυροδέματα υψηλής ποιότητας και αντοχής που συνήθως είναι κατασκευασμένα με τσιμέντο Portland ή με πρόσθετα πολυμερή. Σκοπός τους είναι να μειώσουν την διαπερατότητα του υπάρχοντος σκυροδέματος. Πριν την κατασκευή τους απαιτείται προετοιμασία του υποστρώματος ώστε να επιτευχθεί η συνεργασία μεταξύ παλιού και νέου υλικού. Η παρασκευή τους γίνεται επί τόπου ενώ πριν την τοποθέτησή του απαιτείτε διαβροχή του υποστρώματος. Το πάχος τους είναι συνήθως 40-50mm. Είναι απαραίτητη η συντήρησή τους για 72 ώρες γιατί οι υψηλές θερμοκρασίες του περιβάλλοντος

προκαλούν πρόωρη ξήρανση του υποστρώματος και συστολή ξήρανσης η οποία αποτελεί τον σοβαρότερο κίνδυνο.

#### **Υδατοστεγής μεμβράνες**

Διατίθενται συνήθως σε έτοιμα βιομηχανοποιημένα φύλλα αλλά και σε υγρά υλικά τα οποία είναι πιο ακριβά αλλά και πιο εύχρηστα και ακριβή στην εφαρμογή τους. Στα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγονται: εύκολη τοποθέτηση, καλή πρόσφυση με το υπόστρωμα, δεν αντιδρά με τα συστατικά του σκυροδέματος, εμποδίζει την διείσδυση των χλωριόντων και της υγρασίας υπό διάφορες συνθήκες. Η τοποθέτηση των μεμβρανών στο σκυρόδεμα θα πρέπει να γίνεται κάτω από καλές καιρικές συνθήκες και με αυστηρή τήρηση των κατασκευαστικών λεπτομερειών. Οι μεμβράνες κινδυνεύουν από της φυσαλίδες οι οποίες δημιουργούν από την διόγκωση της υγρασίας και των αέριων που παγιδεύονται στο σκυρόδεμα. Αντίθετα αυτές που δημιουργούνται μέσα στην μεμβράνη, δεν μειώνουν την προστασία του σκυροδέματος ως προς τη διείσδυση των χλωριόντων ή της υγρασίας. Οι καιρικές συνθήκες το πορώδες και η υγρασία του σκυροδέματος καθορίζουν την εμφάνιση των φυσαλίδων. Στα μειονεκτήματά των μεμβρανών περιλαμβάνονται η μικρή ανθεκτικότητα στο χρόνο και η ανάγκη αποκατάστασης.

#### **Πολυμερικός διαποτισμός**

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν το περιβάλλον είναι πολύ διαβρωτικό ώστε να μειωθεί η διαπερατότητα του σκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό γίνεται πλήρωση των κενών με πολυμερή σε βάθος 35-50mm. Η διαδικασία που ακολουθείται περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Καθαρισμός της επιφάνειας του σκυροδέματος από τυχών ξένες ουσίες
- Άπλωμα άμμου στο σκυρόδεμα ώστε να αποφευχθεί το θερμικό σοκ του σκυροδέματος κατά την επακολουθούσα εφαρμογή υψηλών θερμοκρασιών
- Ξήρανση του σκυροδέματος που πραγματοποιείται με διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών για αρκετό χρονικό διάστημα (120°C για 8 ώρες)
- Σταδιακή απόψυξη του σκυροδέματος με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην απορροφηθεί υγρασία από το περιβάλλον (38°C για 12-36 ώρες)
- Αφαίρεση του αέρα από το σκυρόδεμα με εφαρμογή κενού
- Προσθήκη μονομερούς
- Προσθήκη αδιάβροχων μεμβρανών στην επιφάνεια, ώστε να εμποδίσουμε την εξάτμιση του μονομερούς
- Θερμικός καταλυτικός πολυμερισμός του μονομερούς στους 74°C για 5 ώρες. Το συνηθέστερο μονομερές είναι το μεθακρυλικό μεθύλιο διότι έχει μικρό ιξώδες, υψηλό σημείο βρασμού, εύκολο πολυμερισμό και δεν είναι τοξικό, έχει όμως υψηλό κόστος.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εφαρμόζεται σ' όλα τα σκυροδέματα ανεξάρτητα από την ποιότητα ή την σύστασή του και ότι βελτιώνει όλες τις ιδιότητές του. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η ιδιαίτερη προσοχή που πρέπει να δειχτεί κατά τη διάρκεια της ξήρανσης του σκυροδέματος γιατί μπορεί να προκληθεί ρηγμάτωση. Επίσης απαιτείται ειδικός εξοπλισμός και εξειδικευμένο προσωπικό.

### 3.6 Επισκευή και Αποκατάσταση Δομικών Στοιχείων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα

Ο ποίο 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 (απομείωση της διατομής του υπάρχοντος οπλισμού λόγω διάβρωσης, στατική ανεπάρκεια της κατασκευής λόγω διάβρωσης)
4. Επικάλυψη του εκτεθειμένου οπλισμού με τσιμεντοειδή χρώματα ή εποξειδικές ρητίνες ανάλογα βέβαια και με το σύστημα επισκευής που θα επιλεγεί στο στάδιο της αποκατάστασης.
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 (στεγανοποίηση) του σκυροδέματος σε ρύπους όπως χλωριόντα, διοξείδιο του άνθρακα ή υγρασία, νερό.

Κρίσιμο στάδιο είναι η επιλογή των υλικών αποκατάστασης των φθορών αλλά και η τεχνική εφαρμογής τους. Ωστόσο θα πρέπει να σημειωθεί και να αποσαφηνισθεί 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.

Η τοπική αποκατάσταση φθορών σε είδη «μολυσμένο» από χλωριόντα σκυρόδεμα μελλοντικά προκαλεί επανεμφάνιση της διάβρωσης και δημιουργία ρηγματώσεων στις παράπλευρες/ γειτονικές επιφάνειες του σκυροδέματος όπου έγινε η επισκευή και η αποκατάσταση. Η επανεμφάνιση της διάβρωσης συμβαίνει ακόμα και αν είχαν καθαιρεθεί και αποκατασταθεί όλα τα σαθρά (διαβρωμένα) δομικά στοιχεία της κατασκευής κατά τη διάρκεια των επισκευών της/ της αναμόρφωσης της. Κυρίως λόγος επανεμφάνισης της διάβρωσης είναι ότι λόγω της δημιουργίας γαλβανικού στοιχείου μεταξύ των επισκευασμένων και μη περιοχών. Η μερική αποκατάσταση των φθορών έχει ως συνέπεια τη διάβρωση των γειτονικών περιοχών εκεί όπου η συγκέντρωση των χλωριόντων στη μάζα του υπάρχον σκυροδέματος έχει ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή. Στην περίπτωση αυτή η διάβρωση προχωρά σε εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς εξαιτίας της διαφοράς δυναμικού που αναπτύσσεται στον οπλισμό μεταξύ των επισκευασμένων (ο οπλισμός βρίσκεται σε παθητική κατάσταση) και των κρίσιμων (οπλισμός σε ενεργή κατάσταση στις γειτονικές μη επισκευασμένες περιοχές) και μη περιοχών.

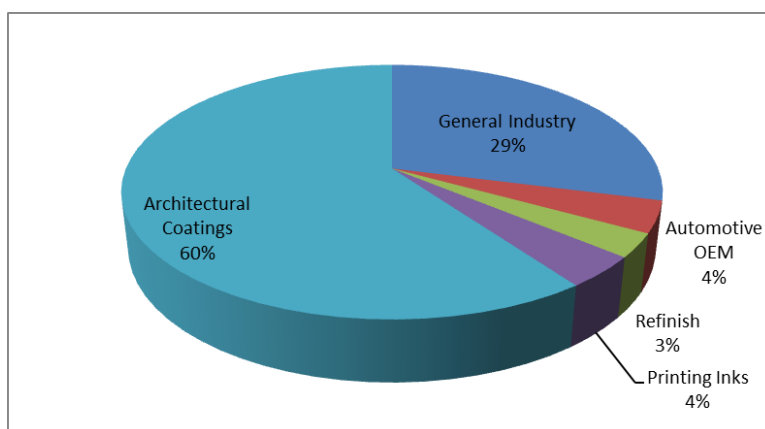
Συνήθως η αποκατάσταση και η προστασία κατασκευών από Ο.Σ. των οποίων η διάβρωση οφείλεται στην προσβολή τους από χλωριόντα, γίνεται με εφαρμογή άλλων μεθόδων προστασίας (π.χ. καθοδική προστασία, αφαλάτωση), ή συνδυασμός συμβατικής αποκατάστασης και προστασία αυτής δια μέσω ηλεκτροχημικών μεθόδων .



#### 4. ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ

**Ο**ι οργανικές επικαλύψεις είναι ιστορικά η παλαιότερη μέθοδος προστασίας και διακόσμησης επιφανειών και αποτελεί τη μέθοδο με τα περισσότερα τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα για την προστασία των μεταλλικών υλικών από τη διάβρωση. Υπολογίζεται ότι σήμερα επικαλύπτεται περίπου το 85% των μεταλλικών κατασκευών που εκτίθενται σε διάφορα διαβρωτικά μέσα και ότι το κόστος τους αντιστοιχεί στο μισό περίπου των εξόδων που γίνονται κατά την αποκατάστασή τους.

Στο οπλισμένο σκυρόδεμα η χρήση των οργανικών επικαλύψεων είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη διότι εκτός από τον αξιόλογο βαθμό προστασίας που προσφέρουν στην κατασκευή, διακοσμούν την επιφάνεια του σκυροδέματος χωρίς να αυξάνουν το βάρος της συνολικής δομής. Τα οικοδομικά/ αρχιτεκτονικά χρώματα καταλαμβάνουν σήμερα το 60% της παγκόσμιας παραγωγής χρωμάτων γεγονός που αποδεικνύει την ευρεία χρήση τους (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Παγκόσμια παραγωγή χρωμάτων για το 2000<sup>210</sup>

##### 4.1 Βασικοί Ορισμοί

Σύμφωνα με το πρότυπο DIN EN ISO 4618<sup>211</sup> που είναι έως τώρα σε ισχύ ως **επικάλυψη** ορίζεται το προϊόν σε υγρή μορφή ή σε μορφή πάστας ή σε μορφή σκόνης το οποίο όταν εφαρμόζεται σε ένα υπόστρωμα δημιουργεί μεμβράνη η οποία διαθέτει προστατευτικές, διακοσμητικές ή/και άλλες ιδιότητες. Οι επικαλύψεις χωρίζονται σε:

- **Χρώματα:** έγχρωμες επικαλύψεις οι οποίες όταν εφαρμοστούν σε ένα υπόστρωμα δημιουργούν αδιαφανή μεμβράνη και έχουν προστατευτικές, διακοσμητικές ή συγκεκριμένες τεχνικές ιδιότητες.
- **Βερνίκια:** διαφανής επικαλύψεις που δεν περιλαμβάνουν πιγμέντα και πληρωτικά
- **Λάκες:** μίγματα φυσικών ή συνθετικών ρητινών σε πτητικό οργανικό διαλύτη.

##### 4.2 Συστατικά Χρωμάτων

Μια οργανική επικάλυψη περιέχει διάφορα συστατικά με το πιο σημαντικό να είναι το **συνδεδετικό μέσο** ή **ρητίνη** η οποία συγκρατεί όλα τα άλλα συστατικά της επικάλυξης όταν σχηματίσει τη στερεή μεμβράνη μετά την εφαρμογή της στο υπόστρωμα. Η ρητίνη είναι στερεής ή παχύρρευστης υγρής μορφής και με την βοήθεια των **διαλυτικών** μπορεί η ρευστότητά της να μεταβληθεί. Η ρητίνη με το διαλυτικό δημιουργούν μια διαφανή επικάλυψη, το βερνίκι. Για την δημιουργία των χρωμάτων είναι απαραίτητη η προσθήκη

των **πιγμέντων**, τα οποία είναι λεπτόκοκκα κονιόμορφα χρωστικά υλικά αδιάλυτα στους διαλύτες του επιχρίσματος και προσδίδουν χρωματικές αποχρώσεις κάνοντας την μεμβράνη αδιαφανή. Στα διαφόρων ειδών πιγμένα αποδίδονται και οι αντιδιαβρωτικές ικανότητες των χρωμάτων. Τα **πληρωτικά υλικά** είναι λεπτόκοκκα κονιόμορφα μη χρωστικά υλικά, αδιάλυτα στους διαλύτες του επιχρίσματος, που προστίθενται στα χρώματα με σκοπό την αύξηση της καλυπτικότητας<sup>212</sup>.

Εκτός από τα κύρια συστατικά του χρώματος υπάρχουν και τα **βοηθητικά ή πρόσθετα** τα οποία χρησιμοποιούνται προκειμένου να μεταβάλουν μια ορισμένη ιδιότητα του χρώματος. Παραδείγματα προσθέτων είναι ξηραντικά, αντιπετσωτικά, θιξοτροπικά, κ.α.

#### 4.2.1 Συνδετικά Μέσα ή Φορείς (binders)

Το συνδετικό μέσο αποτελεί το πιο σημαντικό από τα συστατικά των χρωμάτων καθώς εξασφαλίζει την προσκόλληση και συνοχή μέσα στο στρώμα αυτού. Η φύση του καθορίζει το τύπο και τις ιδιότητες του χρώματος (διαλυτότητα, διαπερατότητα, μηχανικές ιδιότητες, ρεολογική συμπεριφορά).

Σαν συνδετικά χρωμάτων τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά είναι οι ρητίνες οι οποίες είναι και φυσικά προϊόντα (φυσικές ρητίνες) αλλά σήμερα λόγω της υψηλής κατανάλωσής τους χρησιμοποιούνται μόνο τεχνητές ρητίνες. Από χημικής απόψεως οι ρητίνες είναι πολυμερή και προέρχονται από την σύνδεση πολλών ομοίων μορίων (ή από συμπολυμερισμό δύο ή περισσότερων απλών μορίων), η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί κάτω από ορισμένες συνθήκες. Η διαφορά των χρωμάτων από τα άλλα προϊόντα πολυμερών που χρησιμοποιούνται καθημερινά είναι ότι η διαδικασία σκλήρυνσης δεν έχει ολοκληρωθεί αλλά ολοκληρώνεται κατά την εφαρμογή τους πάνω στην επιφάνεια βαφής. Οι πλέον χρησιμοποιούμενες ρητίνες αυτή τη στιγμή είναι συνθετικά πολυμερή (αλκυδικές, βινυλικές, εποξειδικές ρητίνες, πολυουρεθάνες, καουτσούκ, κ.α.) τα οποία βρίσκονται σαν αιώρημα σε νερό (χρώματα υδατικής διασποράς ή πλαστικά χρώματα) ή σε φυσικά έλαια όπως σε λινέλαιο (βερνίκια με βάση τα λάδια) ή σε οργανικά μέσα όπως εστέρες, κετόνες και αρωματικοί υδρογονάνθρακες (μη υδατικά χρώματα)<sup>213</sup>.

Η πλέον χαρακτηριστική ιδιότητα μιας ρητίνης είναι ο σχηματισμός του υμένα, δηλαδή του στερεού στρώματος (μεμβράνη), που δύναται να συγκρατεί τα πιγμένα. Η ικανότητα σχηματισμού του υμένα μπορεί να γίνεται στην συνήθη θερμοκρασία ή να απαιτεί υψηλότερες θερμοκρασίες. Ο υμένας έχει μηχανικές ιδιότητες ανάλογα το είδος της ρητίνης και οι μηχανικές ιδιότητες μπορούν να τροποποιηθούν με την προσθήκη μιας δεύτερης ρητίνης γνωστής με το όνομα πλαστικοποιητής που ουσιαστικά προσδίδει ελαστικότητα στο χρώμα.

Η διαδικασία σκλήρυνσης, γνωστή σαν ξήρανση, διαφέρει από ρητίνη σε ρητίνη. Μετά την εφαρμογή του χρώματος, οι αντιδράσεις οι οποίες λαμβάνουν χώρα κατά τη στερεοποίηση διακρίνονται σε τρεις τύπους<sup>214</sup>:

1. **Φυσική ξήρανση:** Η ανάπτυξη του φιλμ με φυσική ξήρανση οφείλεται στην εξάτμιση των διαλυτών που υπάρχουν στο υγρό επίστρωμα αμέσως μετά την εφαρμογή αυτού. Οι ρητίνες της κατηγορίας αυτής ονομάζονται θερμοπλαστικές.
2. **Χημικός σχηματισμός πλέγματος:** Με τη χημική γήρανση ο σχηματισμός του φιλμ είναι αποτέλεσμα χημικής αντίδρασης. Τα μόρια του συνδετικού αντιδρούν, είτε με

συστατικά του περιβάλλοντος (υγρασία, οξυγόνο) είτε με χημικά υλικά που προστίθενται για το σκοπό αυτό (σκληρυντές), δίνοντας ένα άπειρο τρισδιάστατο μόριο το οποίο κανονικά δεν μπορεί να διαλυθεί ξανά αφού οι δράσεις είναι μη αντιστρεπτές. Παραδείγματα επιστρωμάτων με τέτοια συνδεδετικά είναι τα εποξειδικά και τα πολυεστερικά. Οι ρητίνες που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία καλούνται θερμοσκληρυνόμενες.

3. **Συσσωμάτωση:** Σε επιστρώματα διασποράς, κυρίως στα υδατικά, το συνδεδετικό υλικό δεν διαλύεται αλλά διασπείρεται σε μικρά τεμάχια. Μετά την εξάτμιση του διαλύτη τα πολυμερή σωματίδια συνενώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας ένα αδιάλυτο φιλμ όπως στην περίπτωση 1.

Η διάκριση μεταξύ των τριών μηχανισμών δεν είναι πάντοτε σαφής καθώς οι μηχανισμοί αυτοί μπορεί να συμβαίνουν ταυτοχρόνως. Οι βασικότερες ρητίνες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή χρωμάτων που εφαρμόζονται στην επιφάνεια κονιαμάτων και σκυροδεμάτων αναλύονται παρακάτω.

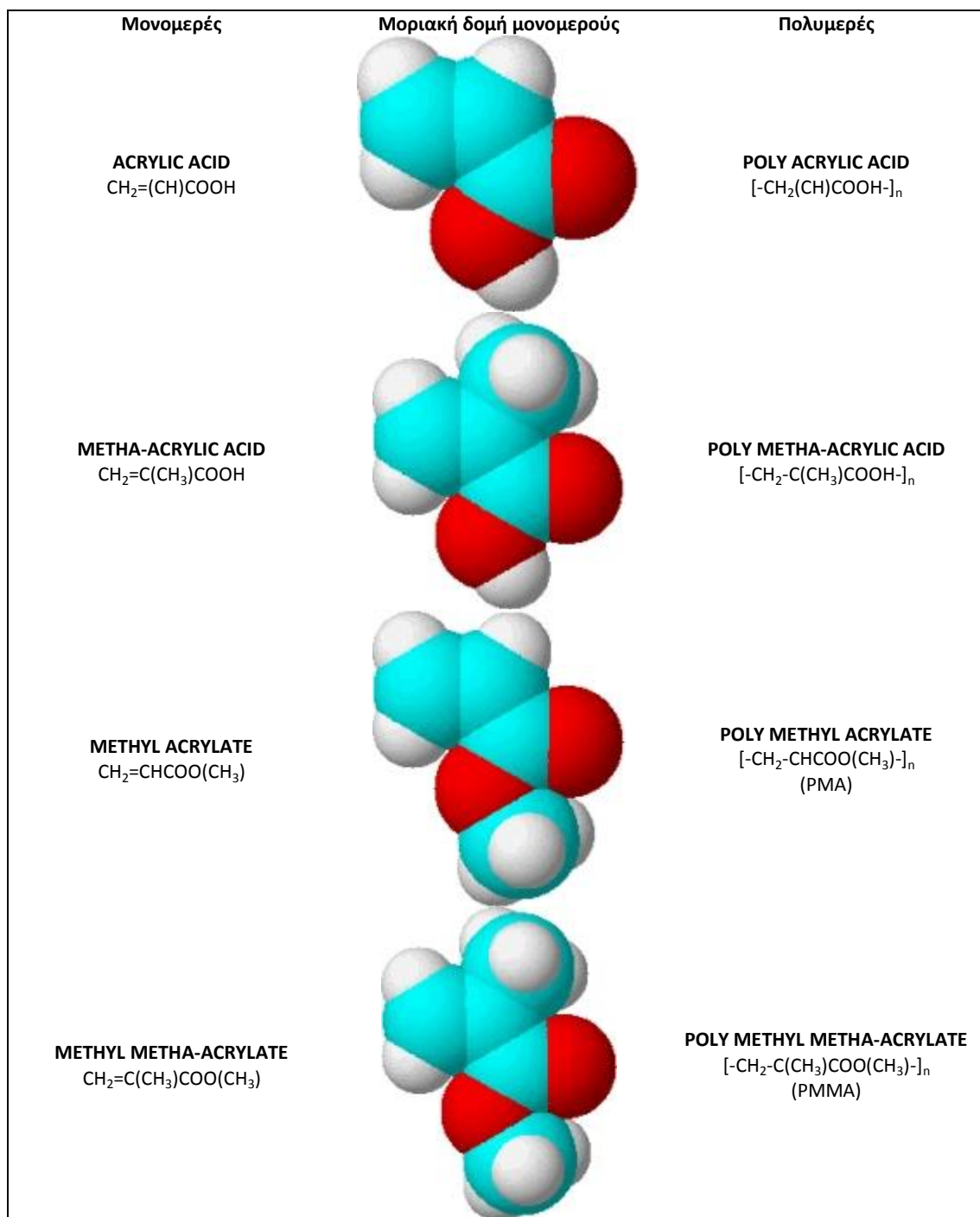
#### 4.2.1.1 Ακρυλικές Ρητίνες

Οι ακρυλικές ρητίνες που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή των χρωμάτων περιλαμβάνουν μια μεγάλη ομάδα πολυμερών και συμπολυμερών, τα οποία προέρχονται από πολυμερισμό με μηχανισμό ελευθέρων ριζών ακρυλικών ή μεθακρυλικών μονομερών (π.χ. αιθυλικού ή μεθυλικού εστέρα του ακρυλικού και μεθακρυλικού οξέος). Η μοριακή δομή των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων ακρυλικών μονομερών μαζί με την αντίστοιχη ομοπολυμερή ομάδα δίνεται στο **Σχήμα 4.2**.

Το πολυ-μεθακρυλικό μεθύλιο, PMMA, είναι άμορφο, διαφανές θερμοπλαστικό με εξαιρετική αντοχή στις καιρικές συνθήκες. Κατέχει 92% διαπερατότητα φωτός, πράγμα που του προσδίδει καλύτερες οπτικές ιδιότητες από αυτές των ανόργανων γυαλιών, χρησιμοποιούμενο έτσι ως οργανικό γυαλί. Η καλή διαπερατότητα φωτός του PMMA αξιοποιείται και στις οπτικές ίνες.

Το υψηλό (σε σχέση με άλλα συνήθη πολυμερή) μέτρο ελαστικότητάς του κατά Young (περίπου 75MPa) και η αξιόλογη θερμική σταθερότητά του (σταθερή θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης 1050°C), το καθιστά κατάλληλο για υπαίθριες εφαρμογές (δεν σαπνοποιείται υπό κανονικές συνθήκες), σε λάμπες, παράθυρα αεροπλάνων (ως πολυμερές με σταυροδεσμούς), στην οδοντιατρική κ.λ.π. Οι μηχανικές ιδιότητές του μπορούν να βελτιωθούν με προσανατολισμό των φύλλων της χυτεύσεως, καθώς επίσης και με συμπολυμερισμό με ακρυλονιτρίλιο, στυρένιο, βουταδιένιο και ακρυλικά.

Τα πλεονεκτήματά των ακρυλικών πολυμερών γενικότερα είναι η χρωματική σταθερότητα, η διαφάνεια, η αντίσταση στις καιρικές συνθήκες (υγρασία και ηλιακή ακτινοβολία ή αλλιώς weathering) και στη γήρανση και η μεγάλη αντοχή τους. Το ακρυλικό μονομερές αυξάνει την ευκαμψία, την αντοχή και την αντίσταση στο νερό, όσο μεγαλώνει ο δεσμός της εστερικής αλυσίδας. Τα περισσότερα ακρυλικά υλικά με τα οποία ασχολούνται οι μηχανικοί της διάβρωσης είναι αυτά που συνδέονται και με άλλες ρητίνες (π.χ. εποξειδικές, βινυλικές και τροποποιημένες ισοκυανικές). Η χρήση των ακρυλικών σε αυτούς τους συνδυασμούς προσβλέπει στην αύξηση της εξωτερικής αντοχής και της αντίστασης στις καιρικές συνθήκες και στη διατήρηση της καλής εμφάνισης των επικαλύψεων για μεγάλες χρονικές περιόδους.



**Σχήμα 4.2:** Μορφές ακρυλικών ρητινών που χρησιμοποιούνται στα χρώματα (C=μπλε χρώμα, O<sub>2</sub>=κόκκινο χρώμα, H<sub>2</sub>=λευκό χρώμα)<sup>215</sup>

Τα ακρυλικά χρησιμοποιούνται κυρίως στο φινίρισμα των αμαξωμάτων, των ψυγείων και άλλων παρόμοιων προϊόντων που απαιτούν εξαιρετική αντοχή στις μεγάλης διάρκειας καθώς και στις εργοστασιακές επικαλύψεις.

Η τεχνολογία των ακρυλικών επεκτάθηκε στον τομέα των επικαλύψεων αρχικά με τη μορφή των ακρυλικών ρητινών και αργότερα με τη μορφή ακρυλικών γαλακτωμάτων.

**α) Ακρυλικά πολυμερή που σχηματίστηκαν με τεχνική πολυμερισμού διαλύματος ή ακρυλικές ρητίνες (acrylic solution polymers).**

Υπάρχουν δύο κατηγορίες ακρυλικών ρητινών: τα θερμοπλαστικά πολυμερή που σκληραίνουν απλά με εξάτμιση του διαλύτη και τα θερμοσκληρυνόμενα που περιέχουν λειτουργικές ομάδες που αντιδρούν με ένα άλλο λειτουργικό υλικό (π.χ μελαμίνη, εποξείδιο) και σχηματίζουν ένα δίκτυο σταυροδεσμών.

Οι **θερμοπλαστικές ακρυλικές ρητίνες** προκύπτουν συνήθως από συμπολυμερισμό συνδυασμών μεθακρυλικού μεθυλίου (MMA), μεθακρυλικού βουτυλίου (BMA), ακρυλικού αιθυλίου (EA), ακρυλικού βουτυλίου (BA).

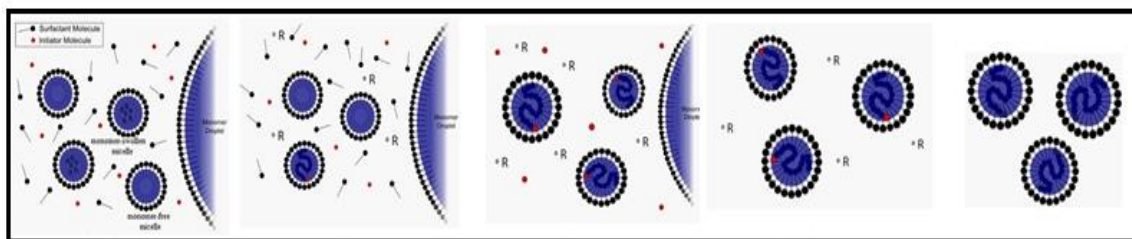
Οι θερμοπλαστικές ακρυλικές ρητίνες είναι καθαρά, άχρωμα διαλύματα και αν δεν προστεθεί πιγμέντο, στεγνώνουν και σχηματίζουν καθαρά, άχρωμα φιλμ. Χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά σε μορφή που δεν περιέχει πιγμέντο σαν προστατευτικά για μεταλλικά πλαστικά (metalized plastics) και μέταλλα που γυαλίζουν όπως ο ορείχαλκος. Οι ακρυλικές ρητίνες αποτελούν γενικά εξαιρετικό μέσο άλεσης για τη διασπορά πιγμένων.

Είναι αρκετά αδρανείς και συνεπώς παραμένουν σταθερές όταν αναμιχθούν με πιγμέντα, χρώματα και πληρωτικά. Επίσης δεν αποχρωματίζουν σκόρες μετάλλων, όπως για παράδειγμα σκόρες αλουμινίου. Οι περισσότερες ιδιότητες ξηρού υμένα (φιλμ), όπως η επιμήκυνση, η αντοχή σε εφελκυσμό, η σκληρότητα και η αντίσταση στους διαλύτες των θερμοπλαστικών ρητινών βελτιώνονται όταν το μοριακό βάρος αυξάνεται μέχρι περίπου 100.000 ενώ με περαιτέρω αύξηση έχουν την τάση να μειώνονται.

Οι **θερμοσκληρυνόμενες ακρυλικές ρητίνες** μετατρέπουν γραμμικές-μετρίου μοριακού βάρους πολυμερικές αλυσίδες σε δομές πολύ μεγάλου μοριακού βάρους. Τα πλεονεκτήματα τους έναντι των θερμοπλαστικών ρητινών είναι: α) αυξημένη σκληρότητα, β) καλύτερη αντίσταση στο «μαλάκωμα» (softening) σε υψηλές θερμοκρασίες, γ) καλύτερη αντίσταση σε διαλύτες και δ) καλύτερη διασπορά στερεών.

**β) Ακρυλικά πολυμερή που σχηματίστηκαν με τεχνική πολυμερισμού γαλακτώματος (acrylic emulsion polymers).**

Για να σχηματιστούν, τα ακρυλικά μονομερή παίρνουν τη μορφή γαλακτώματος και μετά πολυμερίζονται σαν μικρές σταγόνες σε μια συνεχή υδατική φάση. Οι σταγόνες σταθεροποιούνται με επιφανειακά ενεργές ουσίες (surfactants) και συνήθως δε χρησιμοποιείται καθόλου διαλύτης. Προκειμένου να επιτευχθούν καλύτερες φυσικές ιδιότητες, απαιτείται γενικότερα μεγαλύτερο μοριακό βάρος σε σχέση με τις ακρυλικές ρητίνες (100.000 έως 1.000.000 για ένα γαλακτώμα και 75.000 έως 100.000 για ένα πολυμερές διαλύματος.) Η ικανότητα ενός γαλακτώματος να σχηματίζει φιλμ και να συνδέεται με το πιγμέντο βελτιώνεται όσο μικραίνει το μέγεθος των σωματιδίων. Αρχικά τα ακρυλικά γαλακτώματα χρησιμοποιήθηκαν κυρίως σαν διακοσμητικές επικαλύψεις παρά για αντίσταση στη διάβρωση. Η τάση σήμερα είναι να αντικαταστήσουν τα συστήματα οργανικού διαλύτη λόγω της απαίτησης για μείωση των πτητικών που προέρχονται από οργανικούς διαλύτες.



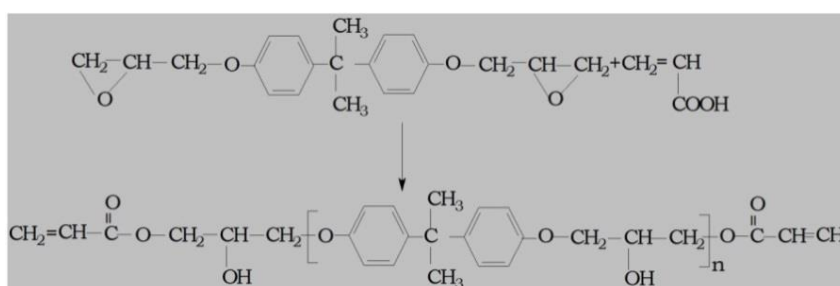
Σχήμα 4.3: Σχηματική αναπαράσταση μηχανισμού πολυμερισμού γαλακτωμάτων<sup>216</sup>

#### 4.2.1.2 Βινυλικές Ρητίνες

Οι βινυλικές ρητίνες είναι προϊόντα πολυμερισμού συστατικών που περιέχουν ομάδες βινυλίου. Στη βιομηχανία χρωμάτων χρησιμοποιούνται συμπολυμερή του βινυλοχλωριδίου, του οξικού βινυλίου και άλλων μονομερών και γαλακτωματοποιημένα συμπολυμερή του οξικού βινυλίου.

Οι ρητίνες βινυλίου χρησιμοποιούνται σε συστήματα επικαλύψεων βάσης διαλύτη και στη παραγωγή μελανιών και συγκολλητικών ουσιών. Ένα πλήρες σύστημα περιέχει τη ρητίνη, το διαλύτη, πλαστικοποιητή, πιγμέντο (εάν πρόκειται για επικαλύψεις εξωτερικών επιφανειών) και προαιρετικά συστατικά όπως σταθεροποιητές, τροποποιημένη/ες ρητίνες και σταυροσυνδετικές ενώσεις. Η φτωχή πρόσφυση στα μέταλλα πολλών συστημάτων που περιέχουν βινυλική ρητίνη τα κάνει χρήσιμα για αποφλοιούμενα επιστρώματα.

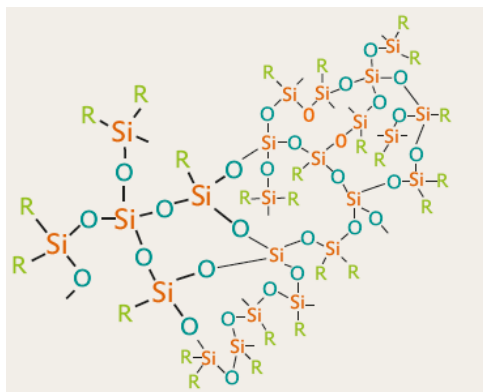
Η πολύ καλή αντίσταση στο νερό και στους περιβαλλοντικούς παράγοντες, η ευκαμψία, ο ταχύς χρόνος στεγνώματος και η ευκολία στην εφαρμογή τα καθιέρωσε στα επιστρώματα συντήρησης (σε δεξαμενές νερού, γέφυρες, ηλεκτρικούς πυλώνες) και στα υφαλοχρώματα. Για να πληρούνται οι προϋποθέσεις των οδηγιών για της πτητικές ενώσεις (VOC) οι εξελίξεις στα βινυλικά χρώματα επικεντρώθηκαν σε συστήματα υψηλής περιεκτικότητας σε στερεά και σε συστήματα υδατικής διασποράς<sup>217</sup>.



Σχήμα 4.4: Παραγωγή ρητίνης βινυλικού εστέρα από εποξειδική ρητίνη και ακρυλικό οξύ

#### 4.2.1.3 Ρητίνες Σιλικόνης

Οι σιλικόνες είναι οργανικές ενώσεις και ανήκουν στην κατηγορία των πολυοργανοσιλοξανών. Στα προϊόντα της κατηγορίας αυτής το πυρίτιο είναι άμεσα συνδεδεμένο με τον άνθρακα και τουλάχιστον ένα άτομο οξυγόνου. Το μόριο της σιλικόνης (Σχήμα 4.5) καταλαμβάνει υβριδική θέση ανάμεσα σε οργανικές και ανόργανες ενώσεις, όπου ο σιλοξανικός σύνδεσμος (Si-O-Si) είναι υπεύθυνος για τον ανόργανο χαρακτήρα της ένωσης και οι οργανικές ιδιότητες προέρχονται άμεσα από τη σύνδεση πυριτίου και άνθρακα.

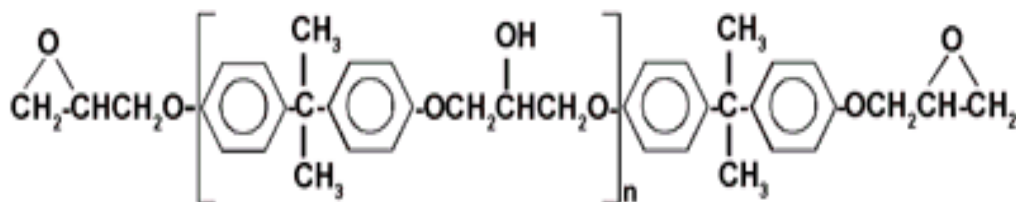


Σχήμα 4.5: Ιδανικό μόριο σιλικόνης<sup>218</sup>

Ο βασικότερος λόγος για την ευρεία χρήση των σιλικονούχων ρητινών είναι η θερμική τους σταθερότητα, η αντίσταση στις καιρικές συνθήκες, η διατήρηση της ελαστικότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες και η υδροφοβικότητά τους<sup>219</sup>. Σαν φορείς σε οργανικές επικαλύψεις χρησιμοποιούνται είτε μόνες τους είτε σε συνδυασμό με άλλες ρητίνες δημιουργώντας χρώματα κατάλληλα για σκυροδέματα και μέταλλα όπου η αντοχή στην υψηλή θερμοκρασία και στις καιρικές συνθήκες είναι σημαντική.

#### 4.2.1.4 Εποξειδικές Ρητίνες

Οι εποξειδικές ρητίνες ανήκουν στην κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών. Τα βασικά συστατικά ενός συστήματος εποξειδικής ρητίνης είναι το προπολυμερές της εποξειδικής ρητίνης και ο σκληρυντής (hardener or curing agent). Το προπολυμερές, που χρησιμοποιείται συνήθως στη βιομηχανία χρωμάτων, συνθέτεται από ένα εποξειδικό μονομερές όπως η επιχλωρυδρίνη και ένα κατάλληλο αντιδραστήριο, όπως η δισφαινόλη-Α και πολυμερίζεται με μηχανισμό προσθήκης (Σχήμα 4.6). Το γραμμικό προπολυμερές μπορεί να είναι είτε χαμηλού μοριακού βάρους με  $n = 0-25$  και μορφή παχύρευστου υγρού, είτε υψηλού μοριακού βάρους με  $n > 200$  και στερεά μορφή.



Σχήμα 4.6: Παρασκευή προπολυμερούς εποξειδικής ρητίνης<sup>220</sup>

Στη συνέχεια αντιδρά με τον κατάλληλο σκληρυντή για τη δημιουργία ενός πολυμερούς τρισδιάστατου πλέγματος σταυροδεσμών. Οι πιο διαδεδομένοι σκληρυντές είναι οι αλειφατικές αμίνες όπως η αιθυλενοδιαμίνη (EDA), η διεθυλενοτριαμίνη (DETA) και η τριεθυλενοτετραμίνη (TETA), τα πολυαμίδια και οι κετιμίνες. Οι αλειφατικές αμίνες δίνουν στα εποξειδικά συστήματα την ιδιότητα ωρίμανσης σε θερμοκρασία δωματίου, υψηλή σκληρότητα και αντοχή στη διάβρωση και τα ήπια χημικά. Η υψηλή τιμή του pH και η υψηλή τάση ατμών όμως κάνουν επικίνδυνο το χειρισμό τους αν και έχουν φτηνή τιμή στην αγορά.

Έτσι προτιμούνται τα πολυαμίδια και οι κετιμίνες καθώς και άλλες τροποποιημένες πολυαμίνες που έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα και μεγαλύτερη ασφάλεια στη διαδικασία χειρισμού<sup>221</sup>.



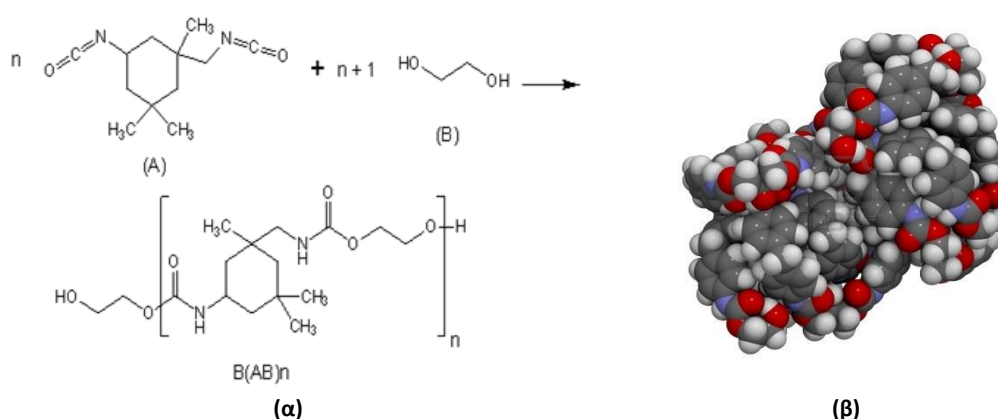
Λόγω της καλής πρόσφυσης, των καλών αντιδιαβρωτικών τους ιδιοτήτων, την αντοχή σε όξινα και αλκαλικά περιβάλλοντα, τις πολύ καλές μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, οι εποξειδικές ρητίνες χρησιμοποιούνται ευρέως για την βαφή και συντήρηση μεταλλικών επιφανειών, μετόν, πλαστικού και ξύλου σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, δεξαμενές εσωτερικά και εξωτερικά, πλοία, οικιακό εξοπλισμό<sup>222</sup> κλπ.

Οι αμινορητίνες και μερικές φαινολικές ρητίνες αντιδρούν σε υψηλές θερμοκρασίες με τις εποξειδικές ρητίνες και δίνουν προϊόντα που χρησιμοποιούνται σε θερμικά επεξεργασμένα επιστρώματα διαλύτου. Δίνουν σχετικά μικρό χρόνο ωρίμανσης σε θερμοκρασία δωματίου και καλή ποιότητα στο χρωματισμό για εφαρμογές σε βιομηχανικό εξοπλισμό, οικιακό εξοπλισμό, νοσοκομειακή επίπλωση κ.α.

Επίσης μπορούν να εστεροποιηθούν με λιπαρά οξέα δίνοντας προϊόντα που εκτείνονται από αεροξηραίνόμενα σε θερμοεπεξεργασμένα συστήματα επικαλύψεων. Χρησιμοποιούνται στα ναυτιλιακά επιστρώματα και λόγω της σκληρότητας και ανθεκτικότητας που παρέχουν σε επικαλύψεις δαπέδων ειδικών χρήσεων.

#### 4.2.1.5 Πολυουρεθάνες

Οι πολυουρεθάνες είναι πολυμερή που προκύπτουν από αντιδράσεις ισοκυανιδίων με πολυόλες μέσω ουρεθανικών δεσμών  $-NHCO-$  (Σχήμα 4.7). Δύο τύποι ισοκυανικών χρησιμοποιούνται για την παρασκευή πολυουρεθανικών επιστρωμάτων που τους δίνουν εξαιρετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Αλειφατικά ισοκυανίδια με ευρύτερα χρησιμοποιούμενα το 4,4' δισοκυανικό διφενυλμεθάνιο (MDI) και το δισοκυανικό τολουόλιο(TDI) και αρωματικά ισοκυανίδια όπως το υδρογονωμένο MDI (HDMI) και το δισοκυανικό εξαμεθυλένιο(HDI). Τα αλειφατικά ισοκυανίδια αν και είναι ακριβότερα χρησιμοποιούνται στα πολυουρεθανικά επιστρώματα που απαιτείται εξαιρετική αντίσταση στον ήλιο και αποφυγή δισχρωματιών.



Σχήμα 4.7: Αντίδραση σχηματισμού πολυουρεθάνης<sup>223</sup>, (β) μόριο πολυουρεθάνης<sup>224</sup>

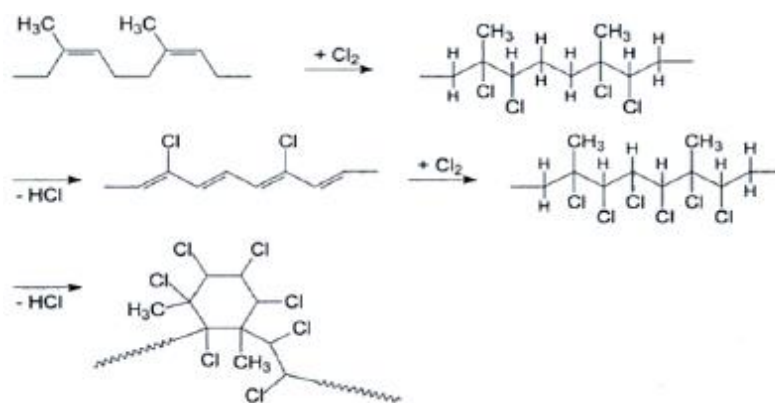
#### 4.2.1.6 Χλωριωμένο φυσικό-συνθετικό καουτσούκ

Το χλωριωμένο καουτσούκ αρχικά παρασκευαζόταν από το φυσικό καουτσούκ με θερμική ή χημική διάσπαση των διπλών δεσμών και στη συνέχεια με διαδικασίες χλωρίωσης. Σήμερα παρασκευάζεται από συνθετικό καουτσούκ και η χλωρίωση γίνεται με την επίδραση υπεριώδους ακτινοβολίας. Έτσι το χλώριο αρχικά δεσμεύεται στους διπλούς δεσμούς και

σχηματίζονται νέοι διπλοί δεσμοί με την απομάκρυνση του υδροχλωρίου που σχηματίζεται (Σχήμα 4.8).

Τα συστήματα επικαλύψεων που περιέχουν χλωριωμένο καουτσούκ έχουν ταχύτερους χρόνους στεγνώματος και σχηματίζουν ανθεκτικά και στιλπνά φιλμ με υψηλή στεγανότητα και ταχύτερη επανάληψη εφαρμογών. Έχουν μεγάλη αντίσταση στα πιο πολλά χημικά, οξέα, αλκάλια, άλατα, έλαια, ανθεκτικότητα στις περιβαλλοντικές συνθήκες και δεν είναι εύφλεκτα. Χρησιμοποιούνται στις πισίνες, στη ναυτιλιακή βιομηχανία, σε δεξαμενές, γέφυρες και οδοστρώματα κ.α.

Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται η υποβάθμιση και ευθραυστότητα στις υψηλές θερμοκρασίες και η υποβολή αμμοβολής της επιφάνειας επικάλυψης.



Σχήμα 4.8: Παρασκευή χλωριωμένου καουτσούκ

Έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε στερεά και καλή διαλυτότητα στους περισσότερους διαλύτες. Το είδος και το ποσό του διαλύτη που χρησιμοποιούνται διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο της διαδικασίας εφαρμογής που χρησιμοποιείται.

Οι οδηγίες για τον περιορισμό των πτητικών ενώσεων προκάλεσαν μείωση στις πωλήσεις χλωριωμένου καουτσούκ με επιπλέον μείωση στα επόμενα έτη [55,63,69].

#### 4.2.1.7 Πολυεστέρες

Οι πολυεστέρες αναπτύχθηκαν στο τέλος της δεκαετίας του 1940 και δημιουργούνται με αντιδράσεις συμπύκνωσης ανάμεσα στην αιθυλενογλυκόλη και το τереφθαλικό οξύ. Η ομάδα του εστέρα στην πολυεστερική αλυσίδα είναι πολική με το οξυγόνο του καρβονυλίου να είναι ελαφρώς θετικά ενώ του άνθρακα να είναι ελαφρώς αρνητικά φορτισμένο. Το θετικό και αρνητικό φορτίο των διαφορετικών εστερικών ομάδων έχει σαν αποτέλεσμα την γειτνίαση τους και έτσι δημιουργείται μια ισχυρή ευθύγραμμη. Οι πολυεστέρες δεν απαιτούν πλαστικοποιητές στη δομή τους.



Σχήμα 4.9: Ομάδα πολυεστέρα σε πολυμερική αλυσίδα<sup>225</sup>

Οι πολυεστέρες παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στο σκίσιμο και αυτή η ιδιότητα τους χρησιμοποιήθηκε ευρέως στην παραγωγή φιλμ ταινιών. Από τα μέσα του 1990 οι πολυεστέρες εισήχθησαν και στη βιομηχανία των χρωμάτων όπου αποτελούν βασικές ρητίνες στην παραγωγή μελανιών.

#### 4.2.2 Πιγμέντα (pigments)

Τα πιγμέντα ή χρωστικές ουσίες μέσα στο χρώμα προσφέρουν<sup>226</sup>:

1. **Οπτικές λειτουργίες** όπως το να προσδίδουν χρώμα, αδιαφάνεια και στιλπνότητα
2. **Προστασία** αναφορικά με την επιφάνεια που προστατεύεται κάτω από το χρώμα αλλά και στο ίδιο το χρώμα και συγκεκριμένα στην ρητίνη η οποία είναι ευπαθής στην UV ακτινοβολία.
3. **Ενίσχυση** εφόσον βοηθούν το συνδετικό υλικό να κολλήσει στην επιφάνεια.

Οι χρωστικές ουσίες απαρτίζονται από μικροσκοπικά στερεά σωματίδια με μέγεθος μικρότερο από 1μm σε διάμετρο και κατά συνέπεια μπορούν να αντανakλούν το φως.

Για να είναι ένα πιγμέντο αποτελεσματικό θα πρέπει να είναι ομοιόμορφα διασκορπισμένο μέσα στο διαλύτη και σε επαφή με αυτόν. Γύρω από τα σωματίδια της χρωστικής ουσίας υπάρχει ένα στρώμα αέρα ή υγρασίας (σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι και κάποιο αέριο) και για έρθει σε επαφή το πιγμέντο με το διαλύτη θα πρέπει αυτό το στρώμα να μετατοπιστεί, διεργασία η οποία είναι γνωστή με τον όρο «διαβροχή». Αν η διαβροχή του πιγμέντου δεν γίνει σωστά τότε μπορεί να παρουσιαστούν ραβδώσεις στην τελική επιφάνεια του χρώματος και έτσι πρέπει να γίνει σωστή επιλογή διαλυτών και πιγμέντων κατά την παραγωγή των χρωμάτων.

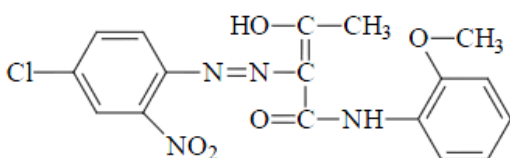
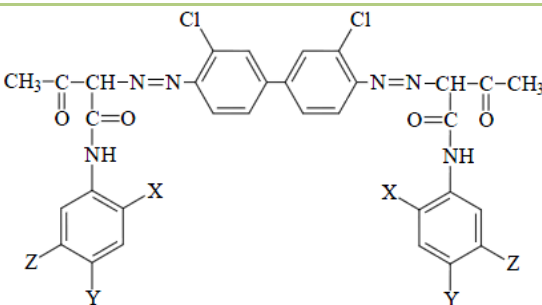
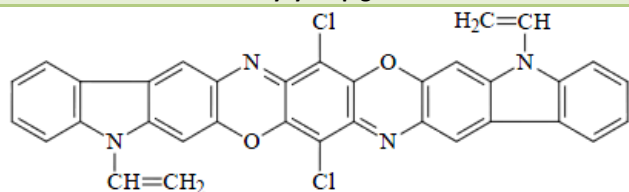
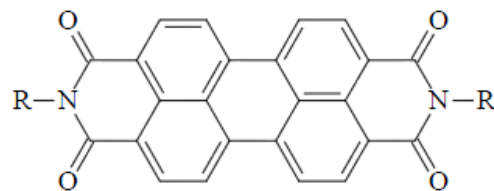
Πολλά φυσικά αλλά και συνθετικά υλικά χρησιμοποιούνται σήμερα σαν πιγμέντα στη βιομηχανία των χρωμάτων καλύπτοντας όλες τις πιθανές αποχρώσεις αλλά και την τελική όψη του φινιρίσματος. Συνήθως τα πιγμέντα αυτά κατηγοριοποιούνται σε οργανικά (**Πίνακας 4.1**) και ανόργανα (**Πίνακας 4.2**). Υπάρχουν και 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.

Τα οργανικά πιγμέντα, προτιμώνται γιατί:

- Είναι πιο φωτεινά
- Είναι πιο ισχυρά (αν και αυτό ποικίλει σε μεγάλο βαθμό μεταξύ των οργανικών χρωστικών ουσιών)
- Είναι περισσότερο διαφανή (δεν αποτελεί πάντα πλεονέκτημα)

Επιπλέον τα οργανικά πιγμέντα έχουν μεγαλύτερη αντοχή χρωματισμού (δηλαδή απαιτείται μικρότερη ποσότητά τους για την επίτευξη χρώματος ίδιας ισχύς με κάποιο ανόργανο πιγμέντο) και μεγαλύτερη στιλπνότητα.

Πίνακας 4.1: Οργανικά πιγμέντα και αποχρώσεις

Ομάδα	Χρωστική	Αποχρώσεις
<b>Azo Dyes</b>		
<b>Μonoazo</b>	 <p style="text-align: center;">arylamide yellow (PY 73)</p>	κίτρινο πορτοκαλί κόκκινο καφέ μωβ
<b>Diazo</b>		κίτρινο πορτοκαλί κόκκινο καφέ μπλε
<b>Polycyclic pigments</b>		
<b>Dioxazine</b>	 <p style="text-align: center;">dioxazine violet (PV 23)</p>	μωβ
<b>Perylene</b>		κόκκινο καφέ

Τα ανόργανα πιγμέντα χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως καθώς δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο της μετανάστευσης, είναι σταθερά σε θερμοκρασία και φως και είναι και πολύ πιο οικονομικά από τα οργανικά πιγμέντα. Χρησιμοποιούνται επίσης και για την παρασκευή ειδικών κατηγοριών πιγμέντων (αντιδιαβρωτικά) καθώς και για την κατασκευή πιγμέντων λευκού και μαύρου χρώματος καθώς είναι αδύνατον να δημιουργούν καθαρές λευκές και μαύρες αποχρώσεις με την χρήση οργανικών πιγμέντων.

Παράδειγμα λευκού πιγμέντου είναι το διοξείδιο του τιτανίου το οποίο αναμφισβήτητα αποτελεί τη σημαντικότερη χρωστική αυτή τη στιγμή διεθνώς. Παρουσιάζει την μεγαλύτερη διαφάνεια και ισχύ χρωματισμού και σε συνδυασμό με την καθαρή λευκή του απόχρωση και το λεπτό μέγεθος των σωματιδίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν αδιαφανοποιητής σε χρώματα υψηλής καλυπτικότητας και μειωμένης περιεκτικότητας σε πιγμένο. Κατά συνέπεια κατασκευάζονται χρώματα με υψηλή ελαστικότητα και αυξημένη ανθεκτικότητα.

Πίνακας 4.2: Ιδιότητες ανόργανων πιγμέντων

	Παραγωγή	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Αποχρώσεις
<b>Άνθρακας</b>	Αποσύνθεση ανθρακούχων ενώσεων	Υψηλή αντοχή, καθαρή απόχρωση, αντίσταση σε καιρικές συνθήκες και σε ακτινοβολία	Δημιουργεί παχύ στρώμα	μαύρο
<b>Διοξείδιο του τιτανίου</b>	Συντίθενται	Υψηλή αντοχή και καλυπτικότητα, χαμηλή τιμή, καλή αντίσταση στην ακτινοβολία	Δημιουργία ριζών που αποδομούν την ρητίνη	λευκό
<b>Οξειδία του σιδήρου</b>	Συνήθως εξορύσσονται αλλά μπορούν και να συντεθούν	Αντίσταση σε καιρικές συνθήκες και σε ακτινοβολία, αδρανές	Αδυναμία παραγωγής καθαρών αποχρώσεων	κίτρινο, κόκκινο, καφέ, μαύρο
<b>Χρωμικά άλατα του ψευδαργύρου</b>	Συντίθεται σύμφωνα με την αντίδραση <sup>1</sup>	Τα διαβρωτικά προϊόντα της <sup>2</sup> λειτουργούν σαν αναστολείς συμφωνά με την <sup>3</sup>	Δημιουργεί παχύ στρώμα	κίτρινο
<b>Αζουρίτης Na<sub>7</sub>Al<sub>6</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>24</sub>S<sub>2</sub></b>	Θέρμανση πάνω από 800C καολίνη, Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , θείου και άνθρακα	Καθαρές αποχρώσεις	Ξεθώριασμα όταν βρίσκεται σε επαφή με οξέα	μπλε
<b>Χρωμικά οξειδία</b>		Θερμική σταθερότητα, αντίσταση σε οξέα, καιρικές συνθήκες και ακτινοβολία	Αδυναμία παραγωγής καθαρών αποχρώσεων	πράσινο, μπλε
<b>Σουλφίδια του καδμίου</b>	Αντίδραση αλάτων του καδμίου με θειούχο νάτριο	Αντίσταση σε ακτινοβολία και θερμότητα, υψηλή καλυπτικότητα	Υψηλό κόστος, χαμηλή αντοχή σε καιρικές συνθήκες	κιτρινοπράσινο έως κόκκινο και βαθυκόκκινο
<b>Λιθοπόνιο ZnS mixed with BaSO<sub>4</sub></b>	Συντίθεται σύμφωνα με την εξίσωση <sup>4</sup>	Εύκολη διαβροχή, αδρανές	Χαμηλή αντοχή σε καιρικές συνθήκες	λευκό

Χρησιμοποιείται είτε η συγκέντρωση όγκου του πιγμέντου (PVC) είτε η αναλογία πιγμέντου-συνδετικού (P:B). Το PVC είναι ο λόγος του όγκου του πιγμέντου προς τον ολικό όγκο των μη πτητικών συστατικών μιας επικάλυψης. Είναι μάλλον ο σημαντικότερος παράγοντας συνταγολόγησης που πρέπει να ληφθεί υπ' όψη όταν επιλέγονται αντιδιαβρωτικά πιγμένα και ιδιαίτερα όταν απαιτούνται δύο ή περισσότεροι αναστολείς για μία δεδομένη εφαρμογή. Υπάρχει ένα κρίσιμο σημείο (ή ένα εύρος τιμών του PVC) που αντιστοιχεί στην βέλτιστη συμπεριφορά του πιγμέντου. Αυτό το σημείο αντιστοιχεί στην πιο πυκνή διάταξη των μορίων του πιγμέντου λαμβανομένου υπόψη του επιπέδου διασποράς του συστήματος. Είναι δύσκολος ο υπολογισμός του αλλά πολύ σημαντικός για χρώματα που πρέπει να συνδυάζουν άριστη συμπεριφορά και ανθεκτικότητα.

#### 4.2.3 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 στυλνότητα του επιστρώματος. Δεν υπάρχει ένας ιδανικός

<sup>1</sup>  $4ZnO + 2CrO_3 + k_2Cr_2O_7 \rightarrow K_2CrO_4 + 3ZnCrO_4 \cdot Zn(OH)_2$

<sup>2</sup>  $4Fe + 2H_2O + 3O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 \cdot H_2O$  (spongy mass)

<sup>3</sup>  $2Cr^{6+} + 2Fe + 6OH^- \rightarrow 2Cr^{3+} + Fe_2O_3$  (hard, protective coating) + 3H<sub>2</sub>O

<sup>4</sup>  $ZnSO_4 + BaS \rightarrow BaSO_4(s) + ZnS(s)$

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 πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι διαλύτες παρουσιάζονται στον Η ακετόνη είναι ο διαλύτης που χρησιμοποιείται περισσότερο μόνος του ή σε συνδυασμό με αλκοόλες (ισοβουτυλική αλκοόλη), αρωματικούς υδρογονάνθρακες (τολουόλιο, ξυλόλιο) ή εστέρες (n- βουτυλεστέρας).

**Πίνακας 4.3:** Περισσότερο συχνό διαλύτες για την παραγωγή χρωμάτων

Χημική Ομάδα	Παράδειγμα
Αλειφατικοί υδρογονάνθρακες	νάφθα
αρωματικοί υδρογονάνθρακες	τολουόλιο, ξυλόλιο
Κετόνες	ακετόνη, μεθυλ-αιθυλ-κετόνη, μεθυλ-ισοβουτυλοκετόνη
Εστέρες	αιθυλεστέρας, οξικός αμυλεστέρας
Αλκοόλες	μεθανόλη, προπανόλη, ισοπροπανόλη, κυκλοεξανόλη
Νερό	

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 και η διαφορά τους είναι ότι τα διαλυτικά είναι τα καθεαυτό διαλυτικά των ρητινών ενώ τα αραιωτικά δεν είναι διαλύτες αλλά προστίθενται στο διαλυτικό ώστε να ρίξουν το κόστος. Ο διαλύτης μαζί με το 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 0,454kg πολυμερούς ανά 0,454kg διαλύτη<sup>227</sup>.

#### 4.2.4 Πληρωτικά Υλικά

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

#### 4.2.5 Πρόσθετα Υλικά

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 ιζηματοποίηση 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 [83]. Διακρίνονται σε<sup>228</sup>:

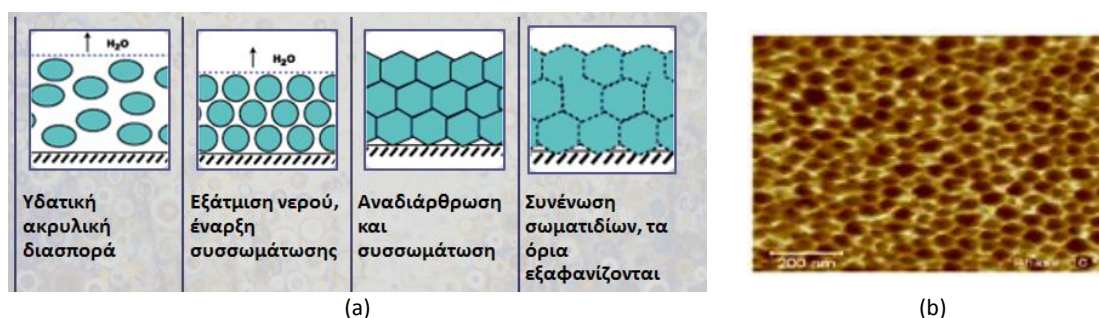
- **Ξηραντικά πρόσθετα:** Ρυθμίζουν το χρόνο στερεοποίησης μετά την εφαρμογή. Συνήθως είναι οργανικά άλατα κοβαλτίου, μαγγανίου ή μολύβδου.
- **Αντιοξειδωτικά πρόσθετα :** Χρησιμοποιούνται για την αποφυγή σχηματισμού πήγματος στα τοιχώματα των δοχείων φύλαξης και για να ελαττώσουν την οξείδωση της περίσσειας 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.

### 4.3 Οργανικές Επικαλύψεις για Σκυρόδεμα

Οι επιφάνειες από εμφανές μπετόν και οι τοιχοποιίες παρουσιάζουν στην πλειοψηφία τους υψηλή αλκαλικότητα με αποτέλεσμα πολύ συνηθισμένα χρώματα μετάλλων να κρίνονται ακατάλληλα για εφαρμογή. Παράδειγμα αποτελούν τα αλκυδικά χρώματα όπου η εστερική τους δομή υφίσταται εύκολα σαπωνοποίηση από την βασική επιφάνεια. Κάτω όμως από ορισμένες προϋποθέσεις (κατάλληλο αστάρωμα, στοκάρισμα) μπορεί να εφαρμοσθεί και αλκυδικό χρώμα σε τοίχο. Γενικά, τα χρώματα που εφαρμόζονται σε σκυρόδεμα χωρίζονται στα χρώματα υδατικών διασπορών που είναι συνήθως συμβατικών εφαρμογών και στα χρώματα που περιέχουν οργανικούς διαλύτες και προορίζονται για κατασκευές που εκτίθενται σε πιο επιθετικό διαβρωτικό περιβάλλον.

#### 4.3.1 Χρώματα Υδατικών Διασπορών

Στην κατηγορία των χρωμάτων υδατικής διασπορά ο φορέας είναι διεσπαρμένος μέσα σε μια υδατική φάση και κατά την ξήρανση, όσο εξατμίζεται το νερό, τα σωματίδια πλησιάζουν μεταξύ τους ώπου κάποια στιγμή συντήκονται (coalescence), σχηματίζοντας τον υμένα του χρώματος (Σχήμα 4.10).



**Σχήμα 4.10:** (α) Σχηματισμός υμένα σε χρώματα υδατικής διασποράς, (b) απεικόνιση σε μικροσκόπιο ξηρού φιλμ χρώματος<sup>229</sup>



#### 4.3.1.1 Συμβατικές Επικαλύψεις

Τα πιο γνωστά χρώματα υδατικής διασποράς είναι τα “πλαστικά” και τα “ακρυλικά” χρώματα τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως σε συμβατικές εφαρμογές σε σκυρόδεμα και σε τοιχοποιία. Παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως καλές αντοχές στις εξωτερικές συνθήκες, στο νερό, στο πλύσιμο, στην τριβή, στον ήλιο κ.α. (Πίνακας 4.4).

Πίνακας 4.4: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υδατικών διασπορών

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Απουσία οσμής και κινδύνου για την υγεία	Αργή εξάτμιση σε χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλή σχετική υγρασία.
Χωρίς κίνδυνο ανάφλεξης ή εκρήξεων	Σε ορισμένες περιπτώσεις παρουσιάζουν μειωμένη αντοχή στο νερό
Ελάχιστη εκπομπή οργανικών διαλυτών στην ατμόσφαιρα	Παγώνει χρώματος κάτω από τους 0°C.

#### Πλαστικά Χρώματα

Το βασικό πολυμερές αυτής της κατηγορίας είναι ο οξικός εστέρας της βινυλικής αλκοόλης (polyvinyl acetate, PVA) αλλά σήμερα τα ομοπολυμερή του δεν χρησιμοποιούνται σχεδόν καθόλου στα χρώματα αλλά σχεδόν αποκλειστικά σε κόλλες, αστάρια τοίχων και σε υδροχρώματα. Για την παραγωγή χρωμάτων χρησιμοποιούνται κυρίως συμπολυμερή PVA με versatic acid (vinyl ester of versatic acid, Veo-Va) και συμπολυμερή PVA με ακρυλικές ρητίνες. Χρησιμοποιούνται κυρίως για οικοδομικά χρώματα τοίχων εσωτερικής χρήσης.

#### Ακρυλικά Χρώματα

Χρησιμοποιούνται κυρίως για εξωτερικές εφαρμογές σε τοίχους οικοδομών. Τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται στην κατηγορία αυτή είναι καθαρά ακρυλικά πολυμερή και συμπολυμερή στυρενίου- ακρυλικών.

Τα ακρυλικά γαλακτώματα εφαρμόζονται :

α) **σε αρχιτεκτονικές επικαλύψεις** (architectural coatings): τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν είναι η μειωμένη οσμή, η καλύτερη ποιότητα του αέρα, η ασφάλεια σε αντίθεση με τις λαδομπογιές. Επίσης μπορούν να εφαρμοστούν με καλά αποτελέσματα ακόμα και σε μέτριας ποιότητας υποστρώματα. Τέλος, όσον αφορά στη μακροχρόνια απόδοση και προστασία, σε πολλές εφαρμογές υπερτερούν έναντι των λαδομπογιών. Ειδικότερα για κατασκευές που εκτίθενται σε έντονες καιρικές συνθήκες, έχουν εξαιρετική απόδοση καθώς δεν απορροφούν υπεριώδη ακτινοβολία και εμφανίζουν μεγάλη αντίσταση στην υδρόλυση.

β) **επικαλύψεις συντήρησης** : χρησιμοποιούνται κυρίως για προστασία από τη διάβρωση μεταλλικών επιφανειών, όπως γέφυρες, δεξαμενές αποθήκευσης και άλλες βιομηχανικές κατασκευές που εκτίθενται σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον. Τα ακρυλικά γαλακτώματα, σε αντίθεση με τα αλκυδικά χρώματα, δεν συνεχίζουν να σκληραίνουν μετά την ξήρανση του φιλμ (υμένα) του χρώματος και παραμένουν εύκαμπτα ώστε να διαστέλλονται και να συστέλλονται ταυτόχρονα με το υπόστρωμα. Με αυτό τον τρόπο προστατεύεται πιο αποτελεσματικά το μέταλλο<sup>230</sup>.

Τα καθαρά ακρυλικά γαλακτώματα έχουν και αρκετές άλλες χρήσεις εκτός από χρώματα για τοίχους. Μάλιστα οι χρήσεις τους διευρύνονται όλο και περισσότερο επειδή είναι αρκετά φιλικά προς το περιβάλλον.

Τα χρώματα αυτά διατίθενται σε γυαλιστερά και ημίστιλπνα και εφαρμόζονται σε ποικιλία από υποστρώματα, συμπεριλαμβανομένου του χάλυβα, γαλβανισμένων μετάλλων, αλουμινίου, σκυροδέματος, ξύλου. Ένα υδατικό ακρυλικό αστάρι στεγνώνει γρήγορα, επαναβάφεται σε μικρό χρονικό διάστημα και προσφέρει καλή πρόσφυση σε αμμοβολισμένο χάλυβα, γαλβανισμένη λαμαρίνα ή αλουμίνιο.

Ένα ακρυλικό επανόχρωμα εμφανίζει καλή διατήρηση στιλπνότητας, αντοχή στις καιρικές συνθήκες και στην υπεριώδη ακτινοβολία, χωρίς να κιτρινίζει. Στεγνώνει γρήγορα και εφαρμόζεται μέχρι και τους 5° C. Μπορεί να εφαρμοστεί και πάνω σε πολλά χρώματα διαλύτη, σχηματίζοντας υβριδικά συστήματα. Τα ημίστιλπνα επανοχρώματα εφαρμόζονται σε πάχος έως και 80 μικρά, και εμφανίζουν εξίσου καλές ιδιότητες με τα γυαλιστερά, ενώ έχουν και καλύτερη αντοχή στο νερό. Επιπλέον, τα ακρυλικά έχουν καλή αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία, στεγνώνουν γρήγορα, και δεν κιτρινίζουν, ούτε σαπωνοποιούνται.

#### 4.3.1.2 Χρώματα με Προϊόντα Νανοτεχνολογίας

Ο όρος “νανοτεχνολογία” χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη δημιουργία και χρήση λειτουργικών δομών μεγέθους 1- 100nm και αποτελεί σήμερα την αιχμή της τεχνολογίας έχοντας εφαρμοστεί σε όλους σχεδόν τους τομείς της επιστήμης.

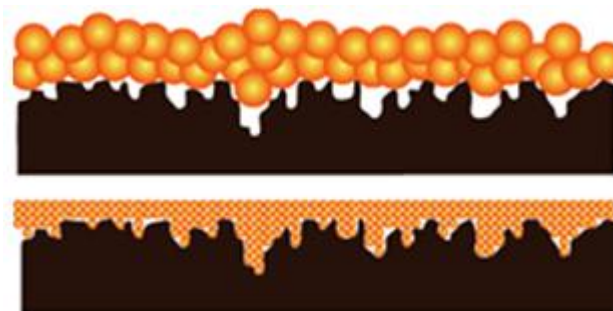
Τα νανοσωματίδια επιδεικνύουν μια σειρά από μοναδικές ιδιότητες, όπως:

- Το μέγεθός τους είναι μικρότερο από το μήκος κύματος του ορατού φάσματος
- Δυνάμεις όπως Van der Waals, ηλεκτρική αντίσταση και μαγνητικές δυνάμεις παίζουν κυρίαρχο ρόλο σε σχέση με τις βαρυτικές και τις δυνάμεις αδράνειας.
- Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των νανοσωματιδίων είναι η πολύ υψηλή αναλογία επιφάνειας/όγκου (**Σχήμα 4.11**). Σαν αποτέλεσμα δημιουργούνται μεγάλα επιφανειακά άτομα και οι ιδιότητές τους κυριαρχούν στην τελική συμπαγή δομή.
- Τα νανοσωματίδια βελτιώνουν πολλές ιδιότητες των τελικών σωμάτων όπως χημικές και θερμικές ιδιότητες, μειώνουν το βάρος της τελικής δομής καθώς και την αδιαφάνεια.

Όσον αφορά τη βιομηχανία των χρωμάτων για εφαρμογές στο οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν γίνει αλληπάλληλες προσπάθειες ώστε να βρεθεί ένα χρώμα -μια σύνθεση- η οποία θα καλύπτει όλες τις απαιτήσεις μιας προστατευτικής επικάλυψης. Από τις μέχρι τώρα εφαρμογές των συμβατικών χρωμάτων φαίνεται ότι μπορεί να γίνει επιλογή κάποιων ιδιοτήτων, π.χ. ένα χρώμα να έχει καλή αντίσταση σε χημικά αλλά η αντίσταση του σε καιρικές συνθήκες να είναι φτωχή. Η νανοτεχνολογία υπόσχεται να καλύψει αυτό το κενό προσφέροντας χρώματα με πολλαπλές ιδιότητες.

Τα “νανοχρώματα” είναι υλικά τα οποία παράγονται μέσω συρρίκνωσης σε μοριακό επίπεδο με σκοπό την δημιουργία μιας πολύ πυκνής δομής. Έχουν αναπτυχθεί επιτυχώς χρώματα νανοτεχνολογίας για επικάλυψη και προστασία μεταλλικών επιφανειών όπως αλουμινίου ή μαγνησίου<sup>231,232</sup>, ή γαλβανισμένου χάλυβα με προσθήκη αναστολέων διάβρωσης<sup>233</sup>. Η προσθήκη νανοσωματιδίων στα χρώματα μπορεί να αναβαθμίσει τις ιδιότητες της επικάλυψης επιτρέποντας της να λειτουργεί σαν μια πολλαπλή επίστρωση συνδυάζοντας πολλές ιδιότητες οι οποίες δεν θα ήταν δυνατόν να επιτευχθούν με παραδοσιακά συστήματα, χωρίς το κόστος να είναι απαγορευτικό. Έτσι παράγονται επικαλύψεις οι οποίες είναι ταυτόχρονα πολύς υψηλής αντίστασης στην τριβή και ταυτόχρονα ανθεκτικές στην απορρόφηση υγρασίας και αυτό-καθαριζόμενες. Η αποτελεσματικότητά τους ενισχύεται

εφόσον παρουσιάζουν καλή αδιαφάνεια, ελαστικότητα και ισχυρή δομή. Τέλος, τα νανοσωματίδια που χρησιμοποιούνται στα χρώμα (π.χ.  $\text{nano-ZnO}$ ) είναι μη-τοξικά οπότε και από περιβαλλοντολογικής άποψης οι επικαλύψεις νανοτεχνολογίας είναι πολλά υποσχόμενες.



**Σχήμα 4.11:** Χαρακτηριστική ιδιότητα των συστημάτων νανοτεχνολογίας είναι η σχέση ανάμεσα στον όγκο και την επιφάνεια. Τα υλικά αυτά έχουν μακράν μεγαλύτερη επιφάνεια στον ίδιο όγκο συγκρινόμενα με παραδοσιακά συστήματα. Για το λόγο αυτό αναπτύσσουν ισχυρές δυνάμεις συνάφειας

Οι βασικές ιδιότητες των επικαλύψεων νανοτεχνολογίας είναι:

- Καλύτερη εμφάνιση της επιφάνειας
- Καλή χημική αντίσταση
- Μειωμένη διαπερατότητα διαβρωτικών ουσιών και κατά συνέπεια μεγαλύτερη αντίσταση στη διάβρωση.
- Οπτική διαύγεια
- Αύξηση μοριακής και θερμικής σταθερότητας
- Αντιολισθητικές ιδιότητες και αντίσταση κατά του θαμβώματος
- Καλύτερη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Καλύτερη διατήρηση στιλπνότητας και άλλων μηχανικών ιδιοτήτων
- Μη αντανάκλαστική επιφάνεια
- Χωρίς χρωμικά και μόλυβδο
- Καλή πρόσφυση σε πολλά είδη υποστρωμάτων
- Αντιμικροβιακές, αντιμολυσματικές ιδιότητες
- Καλή αντίσταση στην UV ακτινοβολία
- Ικανότητα αυτοϊασης και αυτοκαθαρισμού

Στα μειονεκτήματα των νανοχρωμάτων περιλαμβάνονται:

- Το ενδεχόμενο της συσσώρευσης των σωματιδίων κατά τη διαδικασία της διασποράς λόγω μεγάλης επιφανειακής ενέργειας
- Υπάρχει περίπτωση τα νανοσωματίδια των πιγμέντων να χάσουν το χρώμα τους λόγω πολύ μικρού μεγέθους και έτσι να χαθεί η αδιαφάνεια
- Απαιτείται πολύ σταθερό μητρικό υλικό για την αναστολή της φωτοκαταλυτικής δραστηριότητας των νανοσωματιδίων  $\text{TiO}_2$
- Ενδέχεται να προκύψουν προβλήματα σκλήρυνσης
- Παρατεταμένη χρήση των νανοσωματιδίων ενδεχομένως να προκαλέσει νέα περιβαλλοντολογικά προβλήματα όπως καινούρια τοξικά υλικά αλλά και να έχει επιπτώσεις στην υγεία εφόσον τα εξαιρετικά μικρά νανοσωματίδια μπορεί να δράσουν σαν καταλύτες στις χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο ανθρώπινο σώμα.

### 4.3.2 Χρώματα με Οργανικούς Διαλύτες

Στις επιφάνειες σκυροδέματος χρησιμοποιούνται επίσης και χρώματα με οργανικούς διαλύτες, όπως ακρυλικά, βινυλικά, χρώματα χλωριωμένου καουτσούκ, εποξειδικά, χρώματα πολυουρεθάνης κ.ά.

#### *Ακρυλικά χρώματα διαλύτου*

Είναι κατάλληλα για εφαρμογή σε πέτρες, τσιμέντο, σκυρόδεμα και άλλες επιφάνειες τοίχων. Υπάρχουν στην αγορά συνήθως με το όνομα «μπετοχρώματα» ή και «τσιμεντοχρώματα». Είναι ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες, στο νερό της βροχής και στην αλκαλικότητα του τσιμέντου. Τα ακρυλικά τσιμεντοχρώματα στους τοίχους έχουν το πλεονέκτημα ότι ενώ δεν επιτρέπουν στο νερό της βροχής να περάσει δια μέσου του υμένα στον τοίχο, είναι διαπερατά από τους υδρατμούς και έτσι επιτρέπουν στον τοίχο να «αναπνέει».

#### *Χλωριωμένου καουτσούκ*

Χρησιμοποιούνται ευρέως ως βιομηχανικά χρώματα για χημικές μονάδες, διυλιστήρια, δεξαμενές και γέφυρες και έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τα βινυλικά, όπως ισχυρή σφράγιση (barrier) χημικές αντοχές, εξωτερική αντοχή και καλή αντοχή στην τριβή και την πρόσκρουση.

Όπως όλα τα χρώματα φυσικής ξήρανσης, είναι δυνατό να επαναδιαλυτοποιηθούν. Αυτό έχει ως πλεονέκτημα την ευελιξία στην επαναβαφή, με μειονέκτημα την έλλειψη αντοχής στους περισσότερους διαλύτες. Το φιλμ μπορεί να καταστραφεί με την επαφή του με κάποιο διαλύτη, ενώ υπάρχει πάντα και το ενδεχόμενο της παγίδευσης του διαλύτη μέσα στη στρώση του χρώματος. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα κατά την επαναβαφή ενός συστήματος χλωριωμένου καουτσούκ σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Τα καουτσουκικά συστήματα έχουν πολύ καλή αντοχή στο νερό, ενώ είναι αρκετά ανθεκτικά στα οξέα, τα αλκάλια, και τα περισσότερα διαβρωτικά χημικά. Εντούτοις, η αντοχή τους σε φυτικά και ζωικά έλαια είναι περιορισμένη. Λόγω του μεγάλου μοριακού βάρους των ρητινών τους απαιτούν μεγάλες ποσότητες ισχυρών διαλυτών για να διατηρούν το χρώμα στην υγρή φάση κατά την εφαρμογή. Δεν αντέχουν σε μακροχρόνια έκθεση σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 70 °C, αφού προκαλείται χημική αποσύνθεση του χρώματος, με δημιουργία υδροχλωρικού οξέος ως κύριο παραπροϊόν της αντίδρασης. Χρησιμοποιούνται με επιτυχία για πισίνες. Το πλεονέκτημα τους έναντι των εποξειδικών/ πολυουρεθανικών συστημάτων είναι ότι συντηρούνται (επαναβάφονται) πολύ ευκολότερα.

#### *Εποξειδικά*

Ανάλογα με τους διάφορους τύπους εποξειδικών, οι χρήσεις τους είναι διαφορετικές παρουσιάζοντας όμως κάποια κοινά πλεονεκτήματα (Πίνακας 4.5).

**Καθαρά εποξειδικά:** Χημικές δεξαμενές, δεξαμενές πόσιμου νερού, σύστημα γενικής βιομηχανικής χρήσης. Επίσης τα καθαρά εποξειδικά χρώματα χρησιμοποιούνται συχνά ως αστάρια σε συστήματα με τελικά χρώματα πολυουρεθάνης.

**Εποξυ-φαινολικά:** Χημικές δεξαμενές, με καλύτερες ιδιότητες από τα καθαρά εποξειδικά. Έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε ορισμένα χημικά καθώς και στην θερμοκρασία έναντι των καθαρών εποξειδικών.

**Εποξειδικά λιθανθρακόπισσας:** Δεξαμενές, τοιχία πρανών.

**Εποξειδικές μαστίχες:** Πολλές εφαρμογές σε βιομηχανία και κατασκευές. Κατάλληλα για χρήση πάνω και κάτω από την επιφάνεια του νερού. Απαραίτητη η χρήση επανοχρώματος για έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία. Καλή διείσδυση και πρόσφυση στις περισσότερες επιφάνειες.

**Πίνακας 4.5:** Πλεονεκτήματα και περιορισμοί εποξειδικών συστημάτων

Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Καλή αντοχή στο νερό	Χαμηλή αντοχή σε υπεριώδη ακτινοβολία, εμφανίζουν κιμωλίαση στο φως του ήλιου.
Καλή πρόσφυση στην επιφάνεια	Εφαρμογή και αντίδραση εξαρτώνται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος - κανονικά συστήματα απαιτούν θερμοκρασίες άνω των 10°C, συστήματα για χειμερινές συνθήκες μέχρι -5°C.
Χημικές αντοχές	Δυσκολία στην επαναβαφή μετά την αντίδραση
Αντοχή σε αλκάλια	Συστήματα δύο συστατικών, απαιτούν καλή ανάμιξη και πιθανόν να παρουσιάσουν υψηλές απώλειες.
Εξαιρετική αντοχή σε μηχανική καταπόνηση	Μέτρια αντοχή στα οξέα
Μεγάλη διάρκεια ζωής	Προκαλούν αλλεργίες
Ορισμένα συστήματα είναι εγκεκριμένα για επαφή με τρόφιμα και πόσιμο νερό.	Απαιτούν εξειδικευμένη γνώση για σωστή εφαρμογή.
Δυνατότητα για υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά και χαμηλή σε πτητικά.	

### Πολυουρεθανικά

**Πολυουρεθάνης 2 συστατικών.** Έχουν εξαιρετική αντοχή στις καιρικές συνθήκες, το νερό, τα χημικά. Μεγάλη στιλπνότητα (εκτός από τα ματ και τα σατινέ) και σκληρότητα. Μειονεκτήματα τους είναι το σχετικά υψηλό κόστος και οι ισχυροί οργανικοί διαλύτες. Όμως τελευταία έχουν αναπτυχθεί χρώματα και βερνίκια πολυουρεθάνης 2 συστατικών με νερό αντί διαλύτη, σε καλές σχετικά ποιότητες. Έτσι το ένα σοβαρό μειονέκτημα δεν υφίσταται πλέον.

**Πολυουρεθάνης 1 συστατικού** (καθαρή πολυουρεθάνη σε αντίθεση με τα τροποποιημένα αλκυδικά). Ξηραίνονται με την υγρασία της ατμόσφαιρας. Έχουν πολύ μεγάλη αντοχή, γυαλάδα, σκληρότητα. Μειονέκτημα το υψηλό κόστος, οι ισχυροί οργανικοί διαλύτες και ο κίνδυνος πολυμερισμού μέσα στο κουτί πριν την χρήση.

Τα συστήματα δύο συστατικών έχουν πλήθος εφαρμογών, για υψηλές επιδόσεις σε μέταλλο, σκυρόδεμα, ξύλο και πλαστικό. Τα πολυουρεθανικά χρησιμοποιούνται κυρίως ως επανοχρώματα σε εποξειδικά συστήματα βαφής. Εμφανίζουν εξαιρετική διατήρηση στιλπνότητας και χρώματος σε εξωτερικές συνθήκες. Επιπλέον, είναι ανθεκτικά σε χημικά και διαλύτες. Ως χημικά αντιδρώντα χρώματα, ο χρόνος αντίδρασής τους εξαρτάται από τη θερμοκρασία, η οποία συνήθως οφείλει να είναι πάνω από 0° C.

### Πολυεστερικά

Τα πολυεστερικά χρώματα είναι γρήγορης αντίδρασης, μεγάλου πάχους χρώματα, τα οποία ενισχύονται με νιφάδες γυαλιού. Προσδίδουν μακροχρόνια προστασία σε μεταλλικές κατασκευές γενικά, ειδικότερα σε αντικείμενα που υφίστανται μακροχρόνια υψηλές μηχανικές καταπονήσεις. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές σκυροδέματος. Είναι γνωστά για την αντοχή τους σε διαλύτες, χημικά, νερό και διάβρωση.

Συνήθως είναι συστήματα δύο συστατικών και εφαρμόζονται σε κανονικές θερμοκρασίες. Έχουν σχετικά μικρό χρόνο ζωής δοχείου και πρέπει να εφαρμόζονται από ειδικά πιστόλια. Συνήθως αντιδρούν εντός δύο ωρών από την εφαρμογή και μπορούν να εφαρμοστούν σε πάχη 600-1500 μικρών ανά στρώση. Παρουσιάζουν άριστη αντοχή στο νερό και την υγρασία, και προτιμώνται για εφαρμογές όπου υπάρχει έκθεση σε γλυκό ή θαλασσινό νερό. Επίσης έχουν καλή χημική αντοχή σε αργό πετρέλαιο, λιπαντικά λάδια, διαλύματα αλάτων, καθώς και σε πολλά οξέα και διαλύτες. Εντούτοις, έχουν περιορισμένη αντοχή σε αλκαλικό περιβάλλον.

Λόγω του υψηλού πάχους εφαρμογής των συστημάτων αυτών, είναι βασική η σωστή προεργασία της επιφάνειας. Τόσο οι επιφάνειες από χάλυβα, όσο και αυτές από σκυρόδεμα πρέπει να υφίστανται αμμοβολή με ψήγματα (grit blasting). Για χάλυβα, το ελάχιστο είναι Sa2½. Σε επιφάνειες σκυροδέματος, πρέπει να εφαρμόζεται ένα σφραγιστικό βινυλικού εστέρα προκειμένου να εξασφαλιστεί η καλή πρόσφυση για το πολυεστερικό χρώμα.

#### **Βινυλικού εστέρα**

Τα χρώματα βινυλικού εστέρα είναι γνωστά για την καλή τους αντοχή σε διαλύτες και χημικά. Δίνουν λύσεις, ιδιαίτερα σε προστασία εσωτερικού δεξαμενών. Είναι αποτελεσματικά σε προστασία από μια σειρά από χημικά, συμπεριλαμβανομένης της αμόλυβδης βενζίνης. Γενικά έχουν καλύτερες χημικές αντοχές από τα πολυεστερικά χρώματα. Έχουν καλύτερη αντοχή σε διαλύτες, πολύ καλύτερη αντοχή σε αλκαλικό περιβάλλον, και ελαφρώς καλύτερη αντοχή σε οξέα. Η αντοχή τους σε θερμοκρασία είναι επίσης μεγαλύτερη.

#### **4.4 Συστατικά Χρωμάτων και Περιβάλλον**

Το μεγαλύτερο πρόβλημα αναφορικά με τη ρύπανση του περιβάλλοντος στις βιομηχανίες χρωμάτων είναι οι οργανικοί διαλύτες οι οποίοι από πλευράς υγιεινής όταν έρθουν σε επαφή με το δέρμα διαλύουν το λίπος που ευρίσκεται στην επιφάνειά του και μπορούν να προκαλέσουν δερματίτιδες. Η εισπνοή ορισμένων διαλυτών επίσης μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα.

Το μεγαλύτερο όμως πρόβλημα με τους διαλύτες είναι η συμμετοχή τους στην ατμοσφαιρική ρύπανση και ιδιαίτερα στην φωτοχημική ρύπανση. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε αφορμή για τη θέσπιση νέων κανονισμών. Για την ΕΕ εκδόθηκε η οδηγία 42/2004/EC με την οποία επιβάλλεται η παραγωγή χρωμάτων με χαμηλή περιεκτικότητα σε πτητικές οργανικές ενώσεις (volatile organic compounds, VOCs).

Τα VOCs είναι πτητικά οργανικά συστατικά με αρκετά υψηλή τάση ατμών (vapor pressure) υπό κανονικές συνθήκες, ώστε να εξατμίζονται και να εισέρχονται στην ατμόσφαιρα (αλδεύδες, κετόνες και αρκετοί H/C ανήκουν στα VOCs). Οι διαλύτες, σαν VOCs, μπορεί να προκαλέσουν τη δημιουργία όζοντος, γιατί στην τροπόσφαιρα οι εκπομπές VOCs αντιδρούν υπό την επίδραση του ηλιακού φωτός και παρουσία νιτρικών οξέων μετατρέπουν το οξυγόνο σε όζον. Η παγκόσμια οργάνωση Υγείας (World Health Organisation) έχει θέσει ως όριο στην Ευρώπη για το όζον μέσο όρο των μετρήσεων τα 120μg/m<sup>3</sup> για οκτώ ώρες, αλλά πολύ συχνά αναφέρονται υψηλότερες τιμές.

Σύμφωνα με την Γερμανική νομοθεσία οι οργανικοί διαλύτες κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες (TA Luft<sup>234</sup>). Η κατηγορία I περιλαμβάνει τους πλέον επιβλαβείς διαλύτες. Στην

περίπτωση εκπομπών διαλυτών της κατηγορίας αυτής η περιεκτικότητα τους στα αέρια εξαερισμού πρέπει να είναι το ανώτερο  $20 \text{ mg/m}^3$  και ακόμη στο ρεύμα εξαερισμού η εκπεμπόμενη ποσότητα πρέπει να είναι το πολύ  $0,1 \text{ kg/h}$ . Οι διαλύτες της κατηγορίας II έχουν αντιστοίχως όρια τα  $150 \text{ mg/m}^3$  και  $3 \text{ kg/h}$ . Οι διαλύτες της κατηγορίας III έχουν όρια εκπομπής  $300 \text{ mg/m}^3$  και  $6 \text{ kg/h}$ . Ο Πίνακας 4.6 δίνει την κατάταξη των διαλυτών. Οι χρησιμοποιούμενοι διαλύτες στις οργανικές επικαλύψεις οφείλουν να ανήκουν στις κατηγορίες II και III. Στην περίπτωση της χρησιμοποίησης μιγμάτων διαλυτών ισχύουν τα όρια εκπομπών  $300 \text{ mg/m}^3$  και  $6 \text{ Kg/h}$ . Ακόμη πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαλύτες κατά κύριο λόγο είναι υποπροϊόντα πετρελαίου και η τιμή τους είναι επίσης σημαντική. Για τους λόγους αυτούς σήμερα γίνεται προσπάθεια μείωσης της χρήσης των διαλυτών στην βιομηχανία των χρωμάτων.

Για την αντιμετώπιση της νέας πραγματικότητας οι βιομηχανίες χρωμάτων έχουν τις ακόλουθες λύσεις:

- ανάπτυξη υδατοδιαλυτών ρητινών (ή διασπορών),
- ανάπτυξη παραγωγής ρητινών με μικρή περιεκτικότητα σε διαλύτες (μέσης ή υψηλής περιεκτικότητας σε στερεά),
- ανάπτυξη ρητινών για παραγωγή χρωμάτων σε μορφή σκόνης,
- χρησιμοποίηση αποδεκτών για το περιβάλλον διαλυτών.

Από τις λύσεις αυτές οι δύο πρώτες χρησιμοποιούνται ήδη στην βιομηχανία των αυτοκινήτων (ηλεκτροφορητική βαφή), στην επαναβαφή αυτοκινήτων και άλλων μεταλλικών κατασκευών. Η χρησιμοποίηση υδατικών διασπορών στην βαφή οικοδομών έχει σήμερα γενικευτεί και κατακτά όλο και μεγαλύτερο ποσοστό στην αγορά χρωμάτων. Η τρίτη περίπτωση χρησιμοποιείται στην βιομηχανική βαφή μεταλλικών κατασκευών και ιδιαίτερα στην ηλεκτροστατική βαφή του αλουμινίου. Η τελευταία λύση λόγω της υψηλής τιμής των αποδεκτών διαλυτών δεν έχει χρησιμοποιηθεί ακόμη σε μεγάλη έκταση.

Πίνακας 4.6: Κατάταξη διαλυτών (TA -Luft)

Κατηγορία	Ονομασία	Χημικός Τύπος
I	Βενζόλιο	$\text{C}_6\text{H}_6$
I	Τετραχλωράνθρακας	$\text{CCl}_4$
I	Διαιθύλαμίνη	$\text{C}_4\text{H}_{11}\text{N}$
II	Ξυλόλιο	$\text{C}_8\text{H}_{10}$
II	Τολουόλιο	$\text{C}_7\text{H}_8$
II	Κυκλοεξανονη	$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}$
II	Στυρόλιο	$\text{C}_8\text{H}_8$
II	Τριμεθύλβενζόλιο	$\text{C}_9\text{H}_{12}$
II	Τετραχλωροαιθυλένιο	$\text{C}_2\text{Cl}_4$
II	Ξυλενόλη	$\text{C}_8\text{H}_{10}\text{O}$
III	Ακετόνη	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$
III	Αλιφατικοί υδρογονάνθρακες	
III	Αλιφατικές αλκοόλες	
III	Διασετόναλκοόλη	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$
III	Μεθύλ-ισοβουτύλ κετόνη	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$
III	Αιθυλενογλυκόλη	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$
III	Δίσοβουτύλ κετόνη	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}$
III	Οξικός εστέρας	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$
III	Οξικός βουτύλεστέρας	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$



#### 4.5 Απαιτήσεις Χρωμάτων

Ένα επίστρωμα το οποίο προορίζεται για επικάλυψη του σκυροδέματος, οπλισμένου ή μη, δέχεται τις επιβλαβείς επιδράσεις του περιβάλλοντος και εκτός από αυτές πρέπει να αντιμετωπίσει:

- την αυξημένη αλκαλικότητα του σκυροδέματος
- την ανταλλαγή της υγρασίας του περιβάλλοντος με το σκυρόδεμα
- την διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος

Γενικά, οι απαιτήσεις τις οποίες πρέπει να πληροί μία οργανική επικάλυψη προστατευτική του σκυροδέματος είναι να:

- παρεμποδίζει την είσοδο του νερού
- παρεμποδίζει την είσοδο του CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>
- έχει υψηλή διαπερατότητα σε υδρατμούς
- είναι ανθεκτική σε υψηλή αλκαλικότητα και στην παρουσία αλάτων
- έχει υψηλή συνάφεια με το σκυρόδεμα ακόμα και εάν είναι βρεγμένο
- έχει ανθεκτικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία
- έχει διεισδυτική ικανότητα στους πόρους του σκυροδέματος
- έχει ελαστικότητα ώστε να ακολουθεί τις παραμορφώσεις της επιφάνειας χωρίς να κάνει ρωγμές

Η ταυτόχρονη εκπλήρωση όλων των παραπάνω απαιτήσεων είναι δύσκολη και κατά συνέπεια δίνεται βαρύτητα σε συγκεκριμένες ιδιότητες ανάλογα με τις απαιτήσεις της κατασκευής που πρόκειται να προστατευτεί. Επιπλέον ένα χρώμα οφείλει να ικανοποιεί απαιτήσεις που είναι μεταξύ τους αντίθετες και εξουδετερώνονται π.χ. υδρατμοπερατότητα έναντι αδιαβροχοποίησης, πορώδες διαπνοής έναντι δυνατότητας αυτοκαθαρισμού, ελαστικότητα έναντι μηχανικών αντοχών απότριψης<sup>235</sup> κ.α. Στην συνέχεια ακολουθεί εκτενής αναφορά στις πιο σημαντικές ιδιότητες των χρωμάτων.

#### Πρόσφυση

Ανεπαρκής πρόσφυση του χρώματος συνεπάγεται αποκόλληση (ξεφλούδισμα) του υλικού σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα. Αντίθετα υψηλή τιμή πρόσφυσης πέρα από την μακροχρόνια αντοχή συνεπάγεται και ικανότητα του επιχρίσματος να αντεπεξέλθει σε τυχόν αντίξοες συνθήκες που θα εμφανιστούν στην διάρκεια ζωής του χρώματος (παροδική ύπαρξη υγρασίας στο υπόστρωμα). Η ικανότητα πρόσφυσης σχετίζεται με τη διεισδυτικότητα και συνάφεια που έχει ένα επίχρισμα με την επιφάνεια πάνω στην οποία εφαρμόζεται. Η χρησιμοποίηση ειδικών ασταριών με υψηλή διεισδυτικότητα και συνάφεια με το υπόστρωμα προτείνεται πάντα για την ενδυνάμωση του υποστρώματος και την καλύτερη πρόσφυση του τελικού στρώματος.

Η δοκιμασία με βάση το πρότυπο **ASTM D4541-09e1**<sup>236</sup> εξετάζει την πρόσφυση ενός χρώματος στην επιφάνεια την οποία εφαρμόζεται, μετρώντας την ελάχιστη τάση εφελκυσμού που απαιτείται για να αποκολληθεί ή να σπάσει το εφαρμοσθέν χρώμα. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, ένα επίχρισμα που εξασφαλίζει την καλή μακροχρόνια πρόσφυση πρέπει να έχει μέση τιμή 5 μετρήσεων μεγαλύτερη του 2MPa και καμία μικρότερη του 1,5MPa.

**Ελαστικότητα**

Χαμηλή ελαστικότητα (υψηλή διάμετρος άξονα κάμψης) έχει σαν συνέπεια τον αυξημένο κίνδυνο δημιουργίας ρηγματώσεων, ιδιαίτερα σε ανάγλυφες επιφάνειες ή σε μεγάλα πάχη εφαρμογής. Αυτό πέρα από το κακό αισθητικό αποτέλεσμα σημαίνει και μείωση της προστασίας λόγω της δυνατότητας εισροής νερού στο υπόστρωμα μέσω των μικρορωγμών του χρώματος.

Το πρότυπο **DIN 53152 (1993-05)**<sup>237</sup> εξετάζει την ελαστικότητα του χρώματος με βάση την ικανότητα κάμψης μεταλλικού δοκιμίου γύρω από ένα κυλινδρικό άξονα συγκεκριμένης διαμέτρου. Τα χρώματα για να εξασφαλίζουν μακροχρόνια αντοχή στις διαφόρου είδους μικρορηγματώσεις πρέπει να έχουν τιμές ελαστικότητας μικρότερες των 4mm κατά DIN 53152.

**Αντοχή Πλυσίματος**

Η αντοχή ενός χρώματος, εσωτερικής ή εξωτερικής χρήσης, στον καθαρισμό με πλύση και τριβή είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού αυτή είναι μια βασική διεργασία στον κύκλο συντήρησης κάθε χρώματος. Επιπλέον, στην περίπτωση χρώματος εξωτερικής προστασίας αυτό σημαίνει αντοχή σε προσπίπτουσα βροχή ωθούμενη από δυνατό άνεμο.

Το πρότυπο ASTM D4060 – 10<sup>238</sup> εξετάζει την ικανότητα ενός χρώματος να αντέξει στην μηχανική καταπόνηση που ασκείται κατά το πλύσιμο της επιφάνειας του με σκληρή βούρτσα, χωρίς να αποκαλυφθεί το υπόστρωμα. Ένα χρώμα που αντέχει σε μηχανική καταπόνηση με τριβή, κατά το προαναφερθέν πρότυπο, μεγαλύτερη από 15000 στροφές, προσφέρει το πλεονέκτημα της πλεονόμησης επιφάνειας και της υψηλής αντοχής σε αλληπάλληλους κύκλους συντήρησης.

**Αντοχή Στα Αλκάλια**

Η αντοχή ενός πλαστικού χρώματος στα αλκάλια είναι ιδιαίτερα σημαντική λόγω του γεγονότος ότι οι περισσότερες επιφάνειες στις οποίες εφαρμόζονται (εμφανές μπετόν, σοβάς) παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλή αλκαλικότητα. Επιπλέον, τα διάφορα οικιακά καθαριστικά τα οποία χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό επιφανειών είναι αλκαλικής βάσης. Το πρότυπο ASTM D1308-02<sup>239</sup> εξετάζει την αντοχή ενός επιχρίσματος σε αλκαλικό περιβάλλον με βάση την εναπόθεση διαλύματος NaOH στην επιφάνεια του. Ένα πλαστικό χρώμα έχει καλές αντοχές στα αλκάλια όταν μετά την εναπόθεση NaOH 0,5% στην επιφάνεια του για 4 ώρες δεν παρουσιάζει προβλήματα, όπως μαλάκωμα, εμφάνιση φουσκαλών, αποκόλληση και αποχρωματισμό. Βάσει του ΕΛΟΤ 788 στο σημείο προσβολής με το αλκάλια δεν πρέπει να παρατηρείται καμία αλλαγή της απόχρωσης εκτός από μια ελαφρότατη μεταβολή της στιλπνότητας και της ανακλαστικότητας.

**Συμπεριφορά Στη Φωτιά**

Ένα πλαστικό χρώμα, το οποίο έχει μικρή αναφλεξιμότητα σαν επίχρισμα και κατά την καύση του εκλύεται μικρό ποσό θερμότητας δε συμβάλλει στην εξάπλωση της φωτιάς. Με αυτόν τον τρόπο συνεισφέρει στην πυροπροστασία του κτιρίου στο οποίο έχει εφαρμοστεί. Το πρότυπο BS 476-10:2009<sup>240</sup> εξετάζει τη συμπεριφορά ενός επιχρίσματος στη φωτιά με βάση την ταχύτητα εξάπλωσης της φλόγας και της θερμότητας που εκλύεται κατά την καύση του δοκιμίου. Η συμπεριφορά ενός χρώματος στη φωτιά εξετάζεται πάντα σε συνάρτηση με το συγκεκριμένο υπόστρωμα πάνω στο οποίο έχει εφαρμοστεί. Ένα πλαστικό χρώμα το εφαρμοζόμενο σε μη καιγόμενες δομικές επιφάνειες (σοβάς, μπετόν) πρέπει να καλύπτει τις

απαιτήσεις Class 1 κατά BS 476-10:2009 ώστε να θεωρείται ότι έχει ικανοποιητική συμπεριφορά στη φωτιά.

Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι υπάρχουν ιδιαίτερες κατηγορίες χρωμάτων όπως χρώματα ανθεκτικά στην υψηλή θερμοκρασία και χρώματα πυρόσβεσης.

#### **Σκληρότητα**

Η έλλειψη ικανοποιητικής σκληρότητας είναι δυνατόν να οδηγήσει σε τραυματισμό και αποφλοίωση του χρώματος. Η σκληρότητα των χρωμάτων μετράται συνήθως με βάση το πρότυπο ASTM D2134 - 93(2012)<sup>241</sup>.

#### **Υδρατμοπερατότητα**

Ένα ιδανικό χρώμα λειτουργεί σαν βαλβίδα πάνω στην πρόσοψη επιτρέποντας στον υδρατμό να περάσει από μέσα προς τα έξω αλλά αποκλείοντας την διείσδυση νερού από έξω προς τα μέσα. Είναι επομένως υδρατμοπερατό αλλά μη υδατοπερατό.

Η διαπερατότητα των υδρατμών έχει να κάνει με το ότι οι πόροι/τριχοειδή δεν φράζουν αλλά αποκτούν αρνητική διαβροχή εφόσον παραμένουν διαπερατοί στους ατμούς. Η αρνητική αυτή διαβροχή δεν πρέπει να είναι παροδική αλλά να διαρκεί αρκετά αφού άλλωστε καλείται να προστατεύσει την επιφάνεια στην οποία εφαρμόζεται η επικάλυψη όχι μόνο αρχικά αλλά και αργότερα.

Ο παράγοντας την διαπερατότητας σε υδρατμούς διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα της επικάλυψης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι εγκλωβισμένοι στα τοιχία υδρατμοί αν δεν αφήνονται να εξέλθουν διαμέσου αυτής έχουν σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται φουσκάλες και έπειτα σκασίματα. Το ισχύον πρότυπο για την μέτρηση της υδρατμοπερατότητας είναι το DIN EN ISO 7783-2.

#### **Υδατοπερατότητα**

Ένα χρώμα εξωτερικής προστασίας με μικρή υδατοπερατότητα (αδιάβροχο) εξασφαλίζει την αποτελεσματική προστασία της επιφάνειας από το νερό της βροχής, την εξωτερική υγρασία και τον παγετό. Επιπροσθέτως, εμποδίζεται η διείσδυση των υδατοδιαλυτών ρύπων καθώς και των επικίνδυνων για τα δομικά στοιχεία υδατοδιαλυτών ουσιών, στους πόρους του χρώματος και στην επιφάνεια. Επομένως, σε ένα ιδανικό χρώμα λαμβάνει χώρα ο φωτοχημικός καθαρισμός του γιατί λόγω του ότι η διείσδυση νερού είναι αδύνατη μέσα στο χρώμα αυτό αποκλείεται και η απόθεση υδατοδιαλυτού ρύπου στους πόρους του. Οι σταγόνες νερού αποθέτουν τον ρύπο μόνο επιφανειακά και αυτός χάνει φωτοχημικά, με την βοήθεια του ήλιου, την πρόσφυση του ώστε να ξεπλένεται με την επόμενη βροχή. Η πρόσοψη παραμένει έτσι «φρεσκοβαμμένη» για πολλά χρόνια.

Η υδατοπερατότητα των χρωμάτων μετράται με το πρότυπο DIN EN 1062-3 (2008-04).

#### **Διαπερατότητα CO<sub>2</sub>**

Η αναφορά στην ενανθράκωση είναι απαραίτητη όταν πρόκειται για επικαλύψεις που θα εφαρμοστού σε σκυρόδεμα όπου ένα ιδανικό χρώμα οφείλει να λειτουργεί ως φράγμα ενανθράκωσης της επικαλυπτόμενης επιφάνειας. Με τον τρόπο αυτό θα παρεμποδίζεται η φθορά τόσο του σκυροδέματος όσο και του οπλισμού. Το CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας προκαλεί ενανθράκωση του σκυροδέματος και κάτω από αυτές τις συνθήκες λαμβάνει χώρα και διάβρωση του οπλισμού. Τα δύο αυτά είδη διάβρωσης δεν είναι ανεξάρτητα. Εάν δηλαδή το σκυρόδεμα ενανθρακώνεται τότε αργά ή γρήγορα το περιβάλλον θα φτάσει στον οπλισμό

και θα τον διαβρώσει.

Αποτελέσματα σχετικής έρευνας<sup>242</sup> έδειξαν ότι καθοριστικό στην διαπερατότητα του αερίου διοξειδίου του άνθρακα διαδραματίζει το μέγεθος των πόρων του σκυροδέματος για ακτίνα μεγαλύτερη από 500nm. Όταν στην επιφάνεια εφαρμόζεται ένα χρώμα ο αριθμός των μεγάλων πόρων (αυτών με ακτίνα μεγαλύτερη από 500nm) ελαττώνεται σημαντικά και το ίδιο συμβαίνει και με την διαπερατότητα του αερίου. Η εφαρμογή της επικάλυψης στο υπόστρωμα του σκυροδέματος έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός υμένα ο οποίος κλείνει τους τριχοειδείς πόρους της επικαλυπτόμενης επιφάνειας. Με τον τρόπο αυτόν μειώνεται η διαπερατότητα των αερίων και προστατεύεται αποτελεσματικά το σκυρόδεμα. Για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας σε CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται το πρότυπο prEN 1062-6:2001<sup>243</sup>.

#### **Αντίσταση στην ώσμωση**

Ώσμωση ονομάζεται η μεταφορά νερού μέσω ημιπερατής μεμβράνης από ένα διάλυμα μικρής συγκέντρωσης σε ένα διάλυμα μεγάλης συγκέντρωσης. Οι οργανικές επικαλύψεις συμπεριφέρονται σαν ημιδιαπερατές μεμβράνες. Όταν αυτές τοποθετηθούν σε επιφάνεια που έχει χλωριόντα ή άλλα ιόντα αυτά υποβοηθούν το σχηματισμό διαλύματος μεγάλης συγκέντρωσης με αποτέλεσμα τη δημιουργία φλукταινών (Blistering) στις περιοχές αυτές από τη μεταφορά νερού προς τη διεπιφάνεια επικάλυψης-υποστρώματος. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερο είναι το φαινόμενο της ώσμωσης, τόσο μειώνεται η διάρκεια ζωής και η αποτελεσματικότητα της επικάλυψης.

#### **Συγκέντρωση όγκου πιγμέντου**

Σαν συγκέντρωση όγκου πιγμέντου (P.V.C.: Pigment Volume Concentration) ορίζεται ο λόγος του όγκου του πιγμέντου στη μονάδα όγκου ενός δοσμένου μίγματος πιγμέντου-φορέα (μόνο τα στερεά λαμβάνονται υπόψη) και εκφράζεται από τη σχέση:

$$P.V.C. = \frac{V_{\pi}}{V_{\pi} + V_{\varphi}} \quad [4.1]$$

Όπου:  $V_{\pi}$  ο όγκος του πιγμέντου και  $V_{\varphi}$  ο όγκος του φορέα

Τονίζεται ότι είναι άμεση η εξάρτηση της συμπεριφοράς ενός χρώματος από το κρίσιμο C.P.V.C.

#### **Καλυπτικότητα**

Η καλυπτική ικανότητα του χρώματος είναι απόλυτα ταυτισμένη με την ποσότητα του χρώματος και του αριθμού των επιστρώσεων που απαιτούνται για την αποτελεσματική κάλυψη μιας επιφάνειας. Η καλυπτική ικανότητα ενός υψηλής ποιότητας λευκού χρώματος είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ποιότητα και το ποσοστό τιτανίου που περιέχει. Στην περίπτωση των αποχρώσεων η καλυπτικότητα συνδέεται με την ποιότητα και ποσότητα των χρωστικών.

Η μέθοδος με βάση το πρότυπο BS EN ISO 2814:2006<sup>244</sup> εξετάζει την καλυπτική ικανότητα ενός χρώματος με βάση το λόγο αντίθεσης που παρουσιάζει η κάλυψη του χρώματος πάνω σε μαύρη και άσπρη επιφάνεια. Σύμφωνα με το προαναφερθέν πρότυπο, για να έχει ένα πλαστικό χρώμα μια ελάχιστη αποδεκτή καλυπτική ικανότητα πρέπει ο λόγος αντίθεσης να είναι μεγαλύτερος του 0,95.

### **Επιταχυνόμενη Γήρανση**

Η ηλιακή ακτινοβολία, η ζέστη, η υγρασία και η βροχή προκαλούν φωτοχημικές και μηχανικές αλλοιώσεις στα χρώματα λόγω της καταστροφικής τους δράσης κυρίως πάνω στο συνδετικό υλικό του χρώματος (binder) αλλά και στα άλλα υλικά που περιέχονται στο χρώμα. Τα προβλήματα που μπορούν να υπάρξουν σε ένα ματ πλαστικό χρώμα εξωτερικής προστασίας είναι κιμωλίαση (chalking), σκασίματα, φουσκώματα, ξεφλουδίσματα καθώς και αλλοίωση της απόχρωσης.

Η αντοχή ενός υδατικού χρώματος στην επιταχυνόμενη γήρανση, και κατ' επέκταση στις κλιματολογικές συνθήκες, εξαρτάται από την συνταγή του χρώματος και κυρίως από την ποιότητα του συνδετικού μέσου, του τιτανίου και των χρωστικών στην περίπτωση των αποχρώσεων. Το συνδετικό μέσο στα χρώματα εξωτερικής προστασίας πρέπει να είναι καλής ποιότητας ακρυλική ρητίνη λόγω της ιδιαίτερης αντοχής που έχουν στην ηλιακή ακτινοβολία.

Το πρότυπο ASTM G57-06 (2012)<sup>245</sup> εξετάζει την αντοχή του χρώματος στις κλιματολογικές συνθήκες με βάση το χρόνο αντοχής των δοκιμών σε προγραμματισμένους κύκλους ακτινοβολίας UV και υγρασίας σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Βάσει του προτύπου αυτού ένα χρώμα εξωτερικής προστασίας πρέπει να έχει ελάχιστο χρόνο αντοχής στο QUV τις 1500 hrs για να προσφέρει αξιόπιστη και μακροχρόνια προστασία.

### **Πορώδες**

Το πορώδες ενός χρώματος συνδέεται άμεσα με τη δυνατότητα διαφόρων ρύπων που υπάρχουν σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους να διεισδύσουν στο χρώμα, καθώς και με τη δυσκολία απομάκρυνσης τους. Επιπλέον το πορώδες συνδέεται με βαθμό διείσδυσης μιας επίστρωσης στην προηγούμενη.

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D3924 - 80(2011)<sup>246</sup> το πορώδες μιας οργανικής επικάλυψης εξετάζεται με βάση τη μείωση της επιφανειακής ανακλασιμότητας που προκαλείται από το λέκιασμα ενός λευκού χρώματος με υλικό λερώματος υψηλής διεισδυτικότητας. Βάσει του προτύπου αυτού για να εξασφαλίζει ένα πλαστικό χρώμα καλό μακροχρόνιο αισθητικό αποτέλεσμα πρέπει να έχει τιμή πορώδους μικρότερη του 5.

### **Πάχος**

Η χρονική αντοχή ενός υποστρώματος είναι ανάλογη του πάχους του χρώματος που το προστατεύει. Αυτό δικαιολογείται από την άποψη ότι μεγάλο πάχος καταναλώνεται μετά από μεγάλο χρόνο. Πρέπει ωστόσο να τονιστεί ότι μεγάλα πάχη είναι σε μεγάλο βαθμό αντισυμβατικά, ενώ δεν είναι δεδομένο αν το υπερβολικά μεγάλο πάχος έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί το μέταλλο σε όλη τη διάσταση του. Συνήθως χρησιμοποιείται το πρότυπο ASTM D 6132-08<sup>247</sup> για την αποτίμηση του πάχους του ξηρού φιλμ.

## **4.6 Κριτήρια Επιλογής Συστήματος Επικάλυψης**

Κατά την επιλογή ενός συστήματος χρωμάτων γίνεται αρχικά προσδιορισμός του περιβάλλοντος στο οποίο θα βρεθεί η κατασκευή ή το αντικείμενο που πρόκειται να προστατευθεί και κατόπιν η επιλογή του καλύτερου συστήματος, η οποία βασίζεται στην κατά το δυνατόν ευρύτερη κάλυψη των κριτηρίων που αναφέρονται παρακάτω.

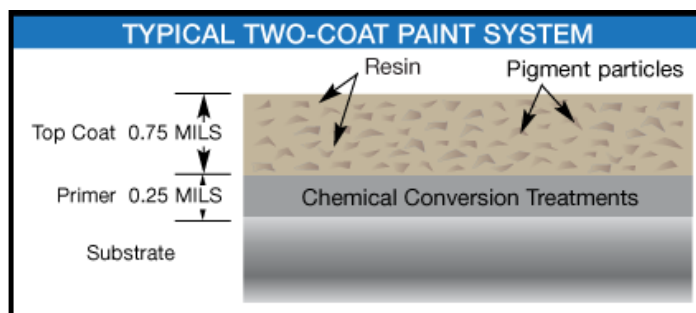
- **Καλύτερη δυνατή σταθερότητα της επικάλυψης στις αναμενόμενες συνθήκες:** Περιλαμβάνει την αντίσταση που εμφανίζει το χρώμα στα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος (υγρασία, βιομηχανικά αέρια, υπεριώδεις ακτινοβολίες), την χημική αντίσταση (σε οξέα, αλκάλια, άλατα), την μηχανική αντίσταση (σε τριβή, δόνηση), την θερμική αντίσταση, την αντίσταση στην ώσμωση, κ.α.
- **Ελαχιστοποίηση του κόστους εργασίας:** Αφορά την προκατεργασία της επιφάνειας, την εφαρμογή και την επιδιόρθωση του επιστρώματος, καθώς και την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιδράσεων.
- **Ελαχιστοποίηση του κόστους πρώτων υλών:** Σε σχέση με την τρέχουσα τιμή του χρώματος αλλά και με τον αναμενόμενο χρόνο ζωής του.
- **Περιβαλλοντικές επιδράσεις του επιστρώματος και της διαδικασίας εφαρμογής του:** Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη περιβαλλοντικοί νόμοι και κανονισμοί που αφορούν τη σύνθεση και των τρόπων εφαρμογής των διαφόρων χρωμάτων και συστημάτων επικάλυψης. Είναι προφανές ότι δεν υπάρχει ένα χρώμα που να ικανοποιεί όλες αυτές τις απαιτήσεις, όπως επίσης δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί κάθε χρώμα σε κάθε επιφάνεια.

#### 4.7 Διαδικασία Εφαρμογής Πολυστρωματικών Συστημάτων

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 (**Σχήμα 4.12**):

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



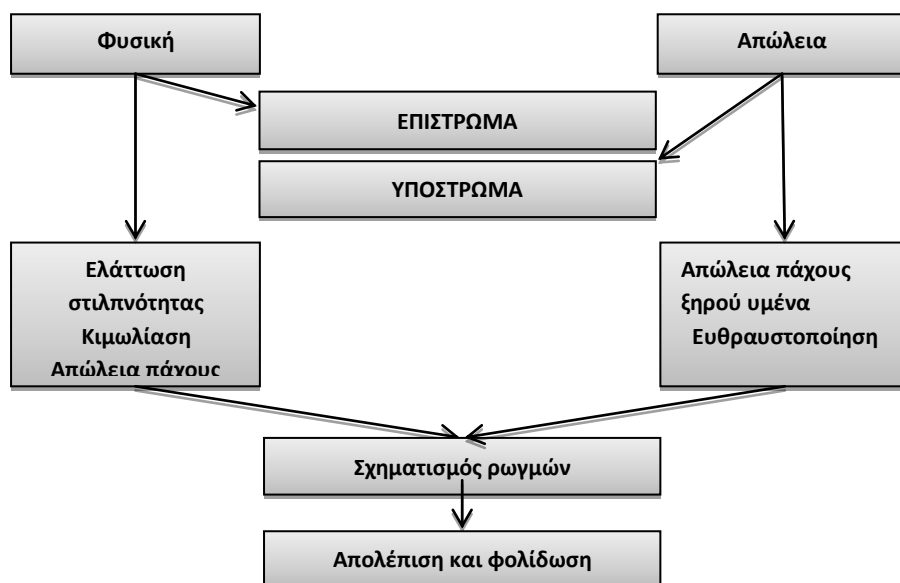
Σχήμα 4.12: Πολυστρωματικό σύστημα σε σκυρόδεμα<sup>248</sup>

#### 4.8 Μηχανισμός Διάβρωσης κάτω από Οργανικά Επιστρώματα

Σε σχέση με το διαβρωτικό περιβάλλον η απώλεια της προστατευτικής δράσης των οργανικών επιστρωμάτων μπορεί κατά προσέγγιση να χωριστεί σε δύο κατηγορίες (

**Σχήμα 4.13).** Η πρώτη αφορά στην υποβάθμιση των ιδιοτήτων του λόγω φυσικής αποσάθρωσης (επίδραση της ατμόσφαιρας) και προκαλείται κυρίως από την υπεριώδη ακτινοβολία μαζί με την επίδραση του νερού, του οξυγόνου και των ατμοσφαιρικών ρυπαντών<sup>249,250</sup>.

Η δεύτερη συνίσταται στην απώλεια της πρόσφυσης με το υπόστρωμα λόγω χημικών επιδράσεων στο επίστρωμα σε συνδυασμό όμως και με επιδράσεις της ατμόσφαιρας όπως η διείδυση μέσα στο επίστρωμα ρυπαντών (π.χ SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>). Και στις δύο περιπτώσεις δημιουργούνται ρωγμές (από τριχοειδείς μέχρι σχετικά μεγάλου εύρους) που προχωρούν προς το υπόστρωμα. Τελικά εμφανίζεται απολέπιση και φολίδωση του επιστρώματος, γεγονός που υποδηλώνει και το τέλος της προστατευτικής δράσης του χρώματος<sup>251</sup>.



Σχήμα 4.13: Πορεία απώλειας της προστατευτικής δράσης των οργανικών επιστρωμάτων<sup>9</sup>

#### 4.8 Αστοχίες Χρωμάτων και Επιχρισμάτων

Η αστοχία που προκαλείται στα χρώματα και στα επιστρώματα μπορεί γενικά να αποδοθεί σε έξι βασικές αιτίες:

1. **Ανεπαρκής προετοιμασία της επιφάνειας** του υποστρώματος πάνω στο οποίο θα εφαρμοσθεί η επικάλυψη. Η προετοιμασία του υποστρώματος συνήθως περιλαμβάνει καθαρισμό για την απομάκρυνση ακαθαρσιών, χημική προεπεξεργασία και τράχυνση της επιφάνειας
2. **Ακατάλληλη επιλογή επιστρώματος.** Είτε το επιλεγμένο χρώμα είναι ακατάλληλο για το περιβάλλον στο οποίο προορίζεται, είτε δεν είναι συμβατό με την επιφάνεια του υποστρώματος.
3. **Ακατάλληλη εφαρμογή.** Το πρόβλημα αυτό απαντάται και σε μικρής κλίμακας εφαρμογές και σε μεγαλύτερης κλίμακας έργα και συμβαίνει όταν δεν πληρούνται οι απαιτούμενες προδιαγραφές κατά την εφαρμογή.



4. **Ανεπαρκής ξήρανση, συντήρηση και λανθασμένοι χρόνοι επαναβαφής.** Το πρόβλημα αυτό και πάλι οφείλεται στην μη τήρηση των προδιαγραφών και των ειδικών παραμέτρων κάθε χρώματος. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η θερμοκρασία του χρώματος και η θερμοκρασία περιβάλλοντος.
5. **Έλλειψη προστασίας** ενάντια στο νερό και σε υδατικά συστήματα. Αυτό αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα ειδικά όταν η έκθεση γίνει σε περιβάλλοντα που περιέχουν διαβρωτικούς παράγοντες όπως π.χ. χλωριόντα.
6. **Μηχανικές βλάβες** οι οποίες οφείλονται σε ακατάλληλο χειρισμό του υποστρώματος με αποτέλεσμα την προσβολή του χρώματος.

Υπάρχουν αναρίθμητοι τρόποι αστοχίας οι οποίοι προκύπτουν από τις παραπάνω αιτίες αλλά σε γενικές γραμμές μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες:

- Αστοχίες που σχετίζονται με τον σχηματισμό του υμένα του χρώματος
- Αστοχίες που σχετίζονται με το υπόστρωμα
- Αστοχίες σχετιζόμενες με φυσικά ελαττώματα

#### **4.8.1 Αστοχίες που σχετίζονται με τον σχηματισμό του υμένα του χρώματος**

Υπάρχουν πολλοί τύποι αστοχίας των χρωμάτων και των επιστρωμάτων οι οποίες δεν μπορούν να ελεγχθούν και να αποφευχθούν γιατί σχετίζονται με την διαμόρφωση του χρώματος και το σχηματισμό της μεμβράνης του. Εάν το χρώμα το οποίο επιλέχθηκε από τον μηχανικό για μια συγκεκριμένη εφαρμογή δεν είναι κατάλληλο τότε θα αστοχήσει όσο καλή και να είναι η διαδικασία εφαρμογής του. Οι αστοχίες αυτής της κατηγορίας οφείλονται στα κύρια συστατικά του χρώματος και περιλαμβάνουν τις ρητίνες που χρησιμοποιήθηκαν, τον τύπο του πιγμέντου και τον διαλύτη του χρώματος. Στον **Πίνακας 4.7** παρουσιάζονται οι αστοχίες αυτής της κατηγορίας μαζί με τις αιτίες και την πιθανή πρόληψη ώστε να αποφευχθεί το πρόβλημα.



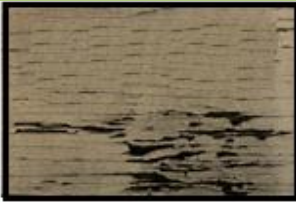






#### **4.8.2 Αστοχίες που σχετίζονται με το υπόστρωμα**

Πριν την εφαρμογή μιας επικάλυψης η επιφάνεια του σκυροδέματος πρέπει να είναι στεγνή και καθαρή. Οι αστοχίες που παρατηρούνται λόγω ανεπαρκούς προετοιμασίας της επιφάνειας είναι έλλειψη πρόσφυσης, ξεφλούδισμα του χρώματος, εκδορές και σχηματισμός αλάτων κάτω από την επιφάνεια της επικάλυψης. Αναλυτικά οι αστοχίες αυτές παρουσιάζονται στον **Πίνακας 4.8**.

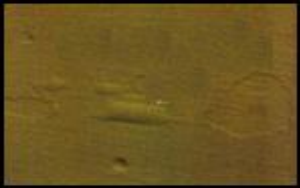
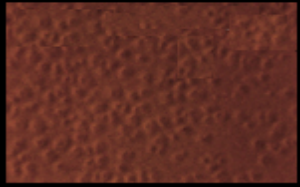

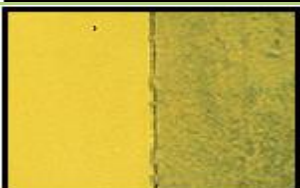
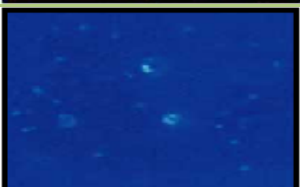




#### **4.8.3 Αστοχίες που σχετίζονται με φυσικά ελαττώματα**


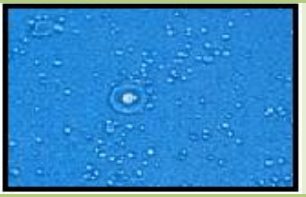



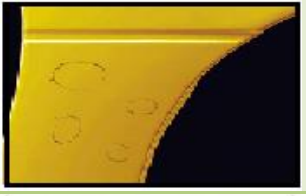


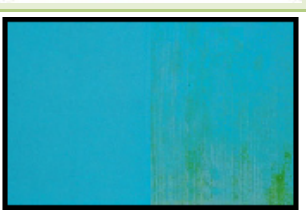
Πολλοί τύποι αστοχιών λόγω φυσικών ελαττωμάτων έχουν παρατηρηθεί, μελετηθεί και κατηγοριοποιηθεί και αρκετοί από αυτούς παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά με τις ατέλειες που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Οι ατέλειες όμως που αναφέρονται στον θεωρούνται από τη βιομηχανία των χρωμάτων ότι ανήκουν στην κατηγορία αυτή και θεωρούνται χαρακτηριστικά παραδείγματα.

**Πίνακας 4.7:** Αστοχίες που σχετίζονται με το σχηματισμό του φιλμ του χρώματος<sup>252,253,254,255</sup>

Αστοχίες Χρωμάτων	Μορφή Επιφάνειας	Αιτία Αστοχίας	Πρόληψη	
<b>Κιμωλίαση (Chalking)</b>	Μαλακή επιφάνεια που μοιάζει με πούδρα αλλά ξεπλένεται εύκολα.	Αποικοδόμηση ρητινών λόγω UV ακτινοβολίας. Ακατάλληλο πιγμέντο.	Χρήση ρητινών ανθεκτικών σε UV ακτινοβολία και ειδικών πιγμέντων.	
<b>Διάβρωση (Erosion)</b>	Παρόμοιο με την κιμωλίαση. Απομάκρυνση μεγάλων περιοχών και σημάδια πινέλου.	Κιμωλίαση και επιφανειακή αποσάθρωση.	Χρήση χρωμάτων ανθεκτικών στην κιμωλίαση με καλές θιξοτροπικές ιδιότητες.	
<b>Μικρές ρωγμές (Checking)</b>	Ανόμοιες, μικρές, μη συνεχείς ρωγμές.	Επιφανειακές τάσεις λόγω συρρίκνωσης.	Χρήση ρητινών ανθεκτικών στις καιρικές συνθήκες και αδρανών πιγμέντων.	
<b>Alligatoring</b>	Μεγάλες ρωγμές σε μορφή πλέγματος	Εσωτερικές τάσεις με μεγαλύτερη συρρίκνωση της επιφάνειας.	Εφαρμογή λεπτών στρωμάτων χρώματος και ξήρανση πριν την επαναβαφή.	
<b>Ρηγμάτωση (Cracking)</b>	Μικρές ρωγμές από το χρώμα μέχρι το υπόστρωμα, διαφόρων γεωμετριών.	Τάσεις οφειλόμενες σε συνεχή πολυμερισμό/οξειδωση.	Χρήση χρωμάτων με ρητίνες και πιγμέντα που δεν αντιδρούν.	
<b>Σκάσιμο (Mud Cracking)</b>	Μεγάλες ρωγμές που ομοιάζουν με την επιφάνεια από λάσπη αφού ξεραθεί και σκάσει.	Ταχεία ξήρανση χρωμάτων μεγάλης περιεκτικότητας σε πιγμέντα.	Χρήση χρωμάτων με υψηλή πρόσφυση.	
<b>Ζάρωμα (Wrinkling)</b>	Αυλάκια και ραβδώσεις στο επιφάνεια επίστρωσης.	Ταχύτερη ξήρανση ανώτερων στρωμάτων από των υπολοίπων.	Χρήση χρωμάτων με παρόμοιους χρόνους ξήρανσης,	
<b>Βιολογική Αστοχία (Biological Failure)</b>	Μαλάκωμα της επιφάνειας. Κηλίδες μαύρου ή καφέ χρώματος.	αποικοδόμηση λόγω βακτηρίων και μυκήτων.	Χρήση μυκητοκτόνων ή βακτηριοκτόνων στα χρώματα.	
<b>Αποχρωματισμός (Discoloration)</b>	Κιτρίνισμα, ξεθώριασμα ή γκριζάρισμα.	Λόγω καιρικών συνθηκών ή εξαιτίας χημικών αντιδράσεων ή λόγω UV ακτινοβολίας.	Χρήση ρητινών και πιγμέντων που παρουσιάζουν σταθερότητα χρώματος.	

Πίνακας 4.8: Αστοχίες σχετικές με το υπόστρωμα και με φυσικά αίτια

Αστοχίες Χρωμάτων	Μορφή Επιφάνειας	Αιτία Αστοχίας	Πρόληψη	
<b>Blistering</b>	Φουσκάλες οι οποίες περιέχουν υγρασία ή αλλά υγρά	Ρυπασμένη επιφάνεια πριν από την εφαρμογή του χρώματος.	Καθαρισμός επιφάνειας πριν από την εφαρμογή της επίχρισης.	
<b>Φυσαλίδες και κρατήρες (Bubbles and craters)</b>	Οι φυσαλίδες περιέχουν αέρα, ενώ οι κρατήρες είναι φυσαλίδες που έσκασαν.	Παγιδευμένη υγρασία ή διαλύτες κατά την διαδικασία της ξήρανσης. Ρυπασμένη επιφάνεια	Εφαρμογή χρωμάτων σε μικρές στρώσεις.	
<b>Χρωματικές αποκλίσεις (Color mismatch)</b>	Χρωματικές διαφορές ανάμεσα σε περιοχές που επισκευάστηκαν και στις αρχικές.	Αποκλίσεις στην υγρασία του χρώματος, στο υπόστρωμα στο πάχος και στην εφαρμογή.	Απαιτείτε συνέπεια στην υγρασία του χρώματος, στο πάχος και στην εφαρμογή του.	
<b>Προσμίξεις και ακαθαρσίες (Dirt)</b>	Προσμίξεις που περιέχονται στο χρώμα ή στη βαμμένη επιφάνεια.	Μη εξειδικευμένη ικανότητα βαφής.	Βελτίωση της καθαριότητας του υποστρώματος.	
<b>Διακοπές (Fish eyes)</b>	Μικρές εσοχές κατά μήκος της επιφάνειας.	Προκαλείται από υπολείμματα λαδιού και γράσου και κυρίως προϊόντων σιλικόνης.	Απομάκρυνση προϊόντων σιλικόνης.	
<b>Θάμπωμα (Gloss variation)</b>	Μπαλώματα, απώλειες της λάμψης της επιφάνειας.	Σημεία υγρασίας στην πρώτη στρώση και ανεπαρκής συντήρηση.	Σωστή εφαρμογή του χρώματος και συνεχές πάχος βαφής.	
<b>Mottling</b>	Εναπόθεση αλάτων στην επιφάνεια του χρώματος που προέρχεται από το νερό που διαπερνά το υπόστρωμα του σκυροδέματος.	Ανεπαρκής προετοιμασία της επιφάνειας, ρύποι ατμόσφαιρας και υψηλή υγρασία.	Περιορισμός υγρασίας και σωστός εξαερισμός.	
<b>Orange peel</b>	Επαναλαμβανόμενες περιοχές με βαθουλώματα που ομοιάζουν με την επιφάνεια του πορτοκαλιού.	Οφείλεται στο υψηλό ιξώδες του χρώματος και στην υψηλή θερμοκρασία που προκαλεί ταχεία απώλεια διαλυτών.	Κατάλληλος ψεκασμός με μείωση του ιξώδους.	
<b>Δάκρυσμα (Sagging)</b>	«Τρέξιμο» του χρώματος πριν από την σκλήρυνση της μεμβράνης.	Μεγάλο πάχος βαφής.	Κατάλληλη εφαρμογή βαφής, διόρθωση ποσότητας διαλύτη	

<p><b>Ξεφλούδισμα (Peeling -adhesion loss)</b></p>	<p>Πρόωρος αποχωρισμός χρώματος και υποστρώματος.</p>	<p>Ύπαρξη ρυπαντών και υψηλή συμπυκνωμένη υγρασία.</p>	<p>Καθαρισμός και περιορισμός της υγρασίας.</p>	
<p><b>Διαρροή διαλύτη (Solvent popping)</b></p>	<p>Μικροσκοπικοί κρατήρες στην επιφάνεια του χρώματος.</p>	<p>Υπερβολικά γρήγορη απώλεια διαλύτη.</p>	<p>Αποφυγή συσσωματωμένων πιγμέντων, έλεγχος διαλύτη και ρυθμού εξάτμισης.</p>	
<p><b>Μετανάστευση (Bleeding)</b></p>	<p>Λέκιασμα του χρώματος τελικής στρώσης.</p>	<p>Οφείλεται σε αμμοβολή ή σε ενδιάμεσο χρώμα που περιέχει λιθανθρακόπισσα ή άσφαλτο. Εντείνεται από τον ήλιο.</p>	<p>Δεν επιδιορθώνεται. Οι μεταχρωματισμένες περιοχές σφραγίζονται με χρώμα αλουμινίου χωρίς να σταματήσει το φαινόμενο.</p>	
<p><b>Blushing / blooming</b></p>	<p>Γαλακτώδης και θαμπή επιφάνεια.</p>	<p>Οφείλεται σε συμπυκνώματα και στην υγρασία της επιφάνειας, η οποία μορφοποιεί λευκά σημεία στην επιφάνεια.</p>	<p>Σε μικρές περιοχές μπορεί να αφαιρεθεί με τρίψιμο ενώ μεγάλη έκταση πρέπει να επαναβαφεί.</p>	
<p><b>Pinhole</b></p>	<p>Μικροσκοπικές τρύπες ή ομάδα αυτών στο τελικό στρώμα.</p>	<p>Ελλείψεις εργασία καθαρισμού υποστρώματος ή τεχνική βαφής. Εναπομένονσα υγρασία ή λάδια στο αστάρι.</p>	<p>Καθαρισμός επιφάνειας και επαναβαφή.</p>	
<p><b>Edge mapping</b></p>	<p>Μπαλώματα σκούρου χρώματος στην τελική στρώση.</p>	<p>Παγίδευση διαλυτών στο υπόστρωμα, ακατάλληλη ανάδευση των συστατικών, ανεπαρκής καθαρισμός και εφαρμογή του χρώματος.</p>	<p>Καλό στέγνωμα και γυάλισμα επιφάνειας με γυαλόχαρτο, μόνωση και ίσως επαναβαφή.</p>	
<p><b>Blocking</b></p>	<p>Παρουσιάζεται σε εσωτερική τοιχοποιία σε σημεία επαφής δύο διαφορετικών επικαλύψεων.</p>	<p>Ελλείψεις χρόνος ξήρασης.</p>	<p>Σε αρχικό στάδιο διορθώνεται με χρήση ταλκ.</p>	
<p><b>Απόπλυση (Leaching)</b></p>	<p>Σκουρόχρωμες κηλίδες και λαμπερά σημεία σε χρώματα από λατέξ.</p>	<p>Οφείλεται σε καιρικές συνθήκες αυξημένης υγρασίας η οποία παγιδεύεται στο χρώμα και με την ξήραση αποπλένεται στην επιφάνεια.</p>	<p>Αποφυγή βαφής κάτω από 10°C ή αργά το βράδυ.</p>	
<p><b>Χαμηλή αντοχή στα αλκάλια</b></p>	<p>Απώλεια χρώματος και πλήρης αποδόμηση του χρώματος</p>	<p>Οφείλεται στην υψηλή αλκαλικότητα του φρέσκου σκυροδέματος το οποίο δεν έχει συντηρηθεί επαρκώς.</p>	<p>Εφαρμογή χρώματος μετά από τουλάχιστον 30 ημέρες συντήρησης της κατασκευής (ιδανικά μετά από 1 έτος). Χρήση χρωμάτων υψηλής αντίστασης στα αλκάλια.</p>	

## 5. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

**Α**ντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση της προστασίας που προσφέρουν οι οργανικές επικαλύψεις στο οπλισμένο σκυρόδεμα όσον αφορά τη διάβρωση του οπλισμού από Cl<sup>-</sup> και από CO<sub>2</sub>.

Οι οργανικές επικαλύψεις που μελετώνται προορίζονται για εφαρμογή στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος και ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες με ποικίλες εφαρμογές και χρήσεις. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει συμβατικές επικαλύψεις υδατικών διασπορών και γαλακτωμάτων. Οι χρήσεις των παραπάνω χρωμάτων είναι τυπικές, κυρίως για εσωτερικές και εξωτερικές τοιχοποιίες. Η δεύτερη κατηγορία επικαλύψεων που εξετάστηκε περιλαμβάνει χρώματα ειδικών εφαρμογών και βιομηχανικών χρήσεων, όπως σε δεξαμενές νερού, γέφυρες και πισίνες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν καουτσουκικά και εποξειδικά χρώματα διαλύτου με πολυουρεθανικό φινίρισμα. Στην τρίτη κατηγορία ανήκουν τα χρώματα τελευταίας γενιάς με προϊόντα νανοτεχνολογίας. Πρόκειται για ακρυλικές και σιλοξανικές υδατικές διασπορές που προορίζονται για συμβατικές χρήσεις σε κονιάματα ή σκυροδέματα με βελτιωμένες όμως αντιμικροβιακές και σφραγιστικές ιδιότητες.

Οι παραπάνω επικαλύψεις προστατεύουν το οπλισμένο σκυρόδεμα και δρουν **έμμεσα** δυσχεραίνοντας την διάχυση των χλωριόντων που αποπαθητικοποιούν το χάλυβα και προστατεύοντας το σκυρόδεμα από την ενανθράκωση. Για την μελέτη της αποτελεσματικότητας των επικαλύψεων και τη σύγκριση της απόδοσής τους, η πειραματικής διαδικασίας της διδακτορικής διατριβής χωρίστηκε σε δύο ενότητες.

Στην **πρώτη ενότητα** της διδακτορικής διατριβής εξετάζονται βασικές φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες όλων των κατηγοριών των επικαλύψεων οι οποίες σχετίζονται έμμεσα με τη διάβρωση του οπλισμού. Συγκεκριμένα εξετάστηκε η υδατοπερατότητα των οργανικών επικαλύψεων η οποία αποτελεί βασική παράμετρο μιας επικάλυψης καθώς το νερό δύναται να μεταφέρει διαβρωτικούς παράγοντες, όπως τα χλωριόντα. Ο προσδιορισμός της υδατοπερατότητας έγινε με βάση το ισχύον πρότυπο DIN EN 1062-3<sup>256</sup>. Η υδρατμοπερατότητα αποτελεί πολύ σημαντική φυσικοχημική παράμετρο για μια οργανική επικάλυψη εφόσον ένα υδρατμοπερατό χρώμα δίνει τη δυνατότητα στο σκυρόδεμα να «αναπνέει» με αποτέλεσμα οι υδρατμοί να εξατμίζονται και να μην υγροποιούνται απειλώντας τον οπλισμό του σκυροδέματος. Η μέτρηση της υδρατμοπερατότητας έγινε με βάση το πρότυπο DIN EN 7783-2:1999<sup>257</sup>. Ο ρυθμός διάχυσης των Cl<sup>-</sup> και του CO<sub>2</sub> επίσης προσδιορίστηκε για τις επικαλύψεις κάθε κατηγορίας με σκοπό την εύρεση των αντίστοιχων συντελεστών. Εκτός από τις φυσικοχημικές παραμέτρους, οι μηχανικές ιδιότητες ενός χρώματος επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα μιας επικάλυψης σε ένα επιθετικό περιβάλλον. Στην παρούσα διατριβή εξετάστηκαν η αντοχή σε συνάφεια με δύο τρόπους, σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM D4541 - 09e1<sup>258</sup> και ASTM D3359-09e2<sup>259</sup> αλλά και η αντοχή των επικαλύψεων σε θάλαμο αλατονέφωσης σε συμφωνία με το ASTM B117 - 11<sup>260</sup>.

Στην **δεύτερη ενότητα** της διδακτορικής διατριβής εξετάζεται η συμπεριφορά των επικαλύψεων έναντι διάβρωσης και ενανθράκωσης. Η εφαρμογή των επικαλύψεων γίνεται σε οπλισμένο σκυρόδεμα και σε οπλισμένο τσιμεντοκονίαμα με σκοπό τη σύγκριση της

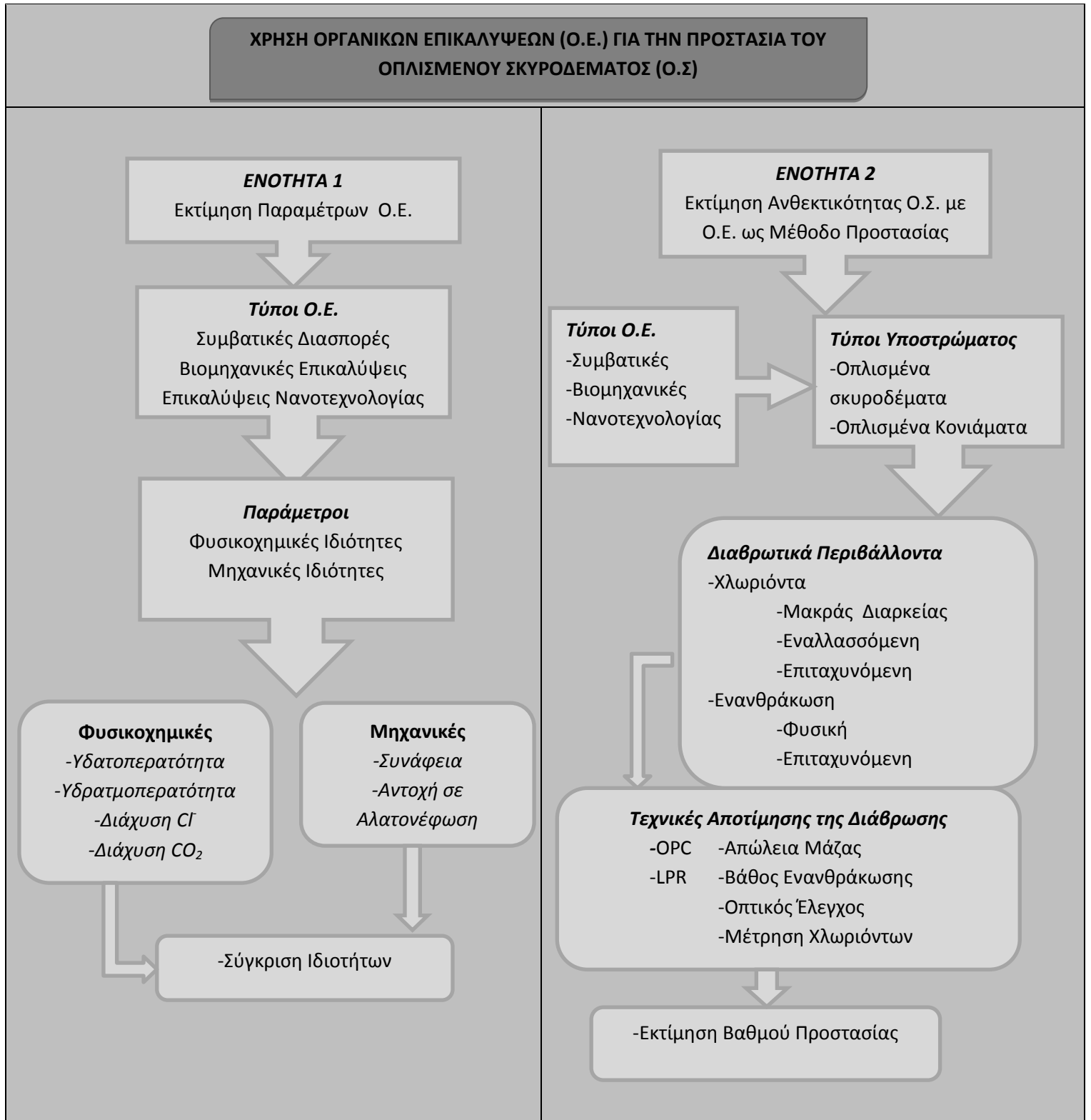
συμπεριφοράς των επικαλύψεων στα δύο υποστρώματα. Για την μελέτη της διάβρωσης του οπλισμού από ιόντα χλωρίου οι συνθήκες έκθεσης ήταν σε τρία διαφορετικά περιβάλλοντα.

Αρχικά εκτιμήθηκε η συμπεριφορά έναντι διάβρωσης μακρά διαρκείας η οποία επετεύχθη με μερική εμβάπτιση των δοκιμίων σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 600 ημερών και 1600 ημερών για τσιμεντοκονιάματα και σκυροδέματα αντίστοιχα. Το παραπάνω περιβάλλον προσομοιάζει τη διάβρωση σε παράκτιες και παραθαλάσσιες περιοχές ή σε περιοχές όπου υπάρχει μεταφορά ιόντων χλωρίου. Το δεύτερο περιβάλλον έκθεσης ήταν σε θάλαμο αλατονέφωσης όπου μελετήθηκε η συμπεριφορά των επικαλύψεων κάτω από επιταχυνόμενες συνθήκες διάβρωσης. Τέλος εκτιμήθηκε η προστασία των επικαλύψεων σε εναλλασσόμενες συνθήκες διάβρωσης η οποία παρατηρείται σε μέρη κατασκευών που εκτίθενται στο φαινόμενο παλίρροιας-άμπωτης. Για το σκοπό αυτό τα δοκίμια εκτέθηκαν σε συνεχής κύκλους ύγρανσης –ξήρανσης για διάστημα 6 μηνών σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl, όπου παρέμεναν διαδοχικά εντός και εκτός του διαλύματος.

Οι μέθοδοι αποτίμησης της διάβρωσης από χλωριόντα περιελάμβαναν ηλεκτροχημικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό του δυναμικού και του ρεύματος διάβρωσης, της αντίστασης πόλωσης και του ρυθμού διάβρωσης. Μετά το τέλος των πειραμάτων μετρήθηκε και η απώλεια μάζας των εγκιβωτισμένων οπλισμών και πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος των εγκιβωτισμένων χαλύβων. Η μέτρηση των διαχεόμενων χλωριόντων επετεύχθη με τη Μέθοδο Mohr.

Για την εκτίμηση της προστασίας που προσφέρουν οι επικαλύψεις έναντι ενανθράκωσης δοκίμια τσιμεντοκονιάματος και σκυροδέματος εκτέθηκαν σε φυσικές και σε επιταχυνόμενες συνθήκες ενανθράκωσης και μετά το τέλος των πειραμάτων μετρήθηκε το βάθος ενανθράκωσης.

Στον **Σχήμα 5.1** δίνεται το γενικό διάγραμμα ροής του πειραματικού μέρους της διδακτορικής διατριβής.



Σχήμα 5.1: Γενικό Διάγραμμα Ροής Διδακτορικής διατριβής





## 6. ΥΛΙΚΑ

### 6.1 Δοκίμια

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή κατασκευάστηκαν δοκίμια οπλισμένου και άοπλου τσιμεντοκονιάματος και σκυροδέματος με σκοπό την σύγκριση της συμπεριφοράς των υπό μελέτη επικαλύψεων σε διαφορετικά υποστρώματα. Για όλα τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM II 32.5N με χημική σύσταση που δίνεται στον **Πίνακα 6.1**. Για τα οπλισμένα δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν οπλισμοί τύπου B500C με την % χημική σύσταση του **Πίνακα 6.2**.

**Πίνακας 6.1:** % Ορυκτολογική Σύσταση τσιμέντου Portland (OPC) τύπου II32.5N

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

**Πίνακας 6.2:** % Χημική σύσταση χαλύβων B500C

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

#### 6.1.1 Δοκίμια Σκυροδέματος

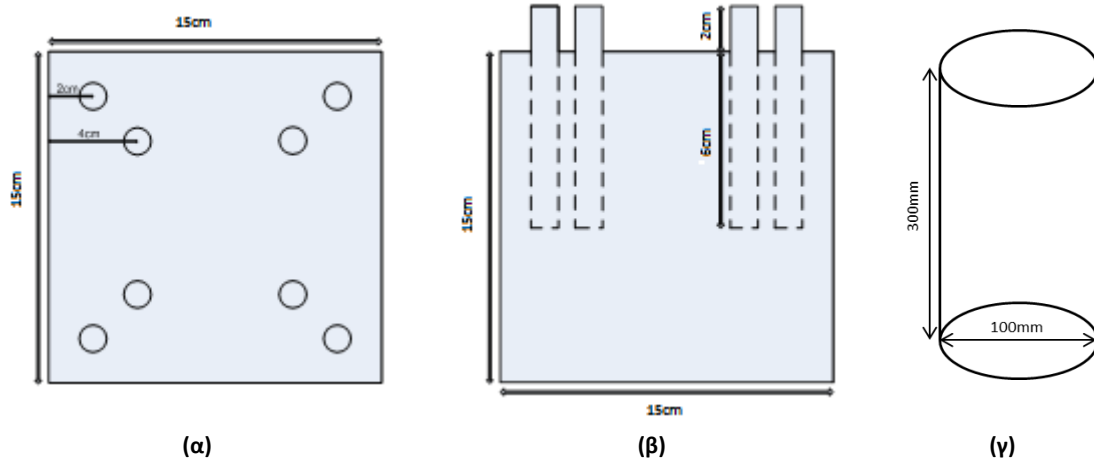
Για την κατασκευή των δοκιμών σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM II 32.5N και σαν αδρανή υλικά χρησιμοποιήθηκαν χαλίκια, ψηφίδες και άμμος σε αναλογίες που φαίνονται στον **Πίνακα 6.3**, όπου δίδεται η αναλυτική μελέτη σύνθεσης για την κατασκευή των δοκιμών. Το νερό ήταν ποιότητας ποσίμου και η αναλογία νερού /τσιμέντου ήταν 0,62. Οι οπλισμοί ήταν τύπου B500C με διάμετρο 10mm, ύψος 100mm και είναι σύμφωνοι με το πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3<sup>261</sup>.

**Πίνακας 6.3:** Μελέτη Σύνθεσης για την κατασκευή οπλισμένων και άοπλων σκυροδεμάτων

Υλικά	Ποσότητες	
	1m <sup>3</sup>	1kg
Τσιμέντο	285	12825
Χαλίκι	520	23400
Ψηφίδα	290	13050
Άμμος	1100	49500
Νερό	185	8325
Πρόσμικτο (Glenium)	5,2	67
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>2380</b>	

Τα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της διάβρωσης μακράς διάρκειας και εμβαπτίσθηκαν μερικώς σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl. Ήταν κυβικά με

διαστάσεις 150mm x 150mm x 150mm και σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκαν 8 οπλισμοί, από 2 στις ακμές του κύβου και σε αποστάσεις 20mm και 40mm, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.1**. Πριν από τον εγκιβωτισμό τους οι χαλύβδινοι οπλισμοί καθαρίστηκαν σύμφωνα με το ISO/DIS 8407.3<sup>262</sup> και ζυγίστηκαν με ακρίβεια 0.1mg.



**Σχήμα 6.1:** (α) Κάτοψη και (β) πλαϊνή όψη δοκιμίων οπλισμένου σκυροδέματος, (γ) δοκίμια άοπλου σκυροδέματος

Τα άοπλα δοκίμια σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της αντίστασης των επικαλύψεων σε ενανθράκωση και για τη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των χρωμάτων. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια υλικά που περιγράφηκαν παραπάνω. Τα άοπλα δοκίμια ήταν κυλινδρικά με διαστάσεις 100mm x 300mm και στη συνέχεια κόπηκαν σε φέτες πάχους 20mm.

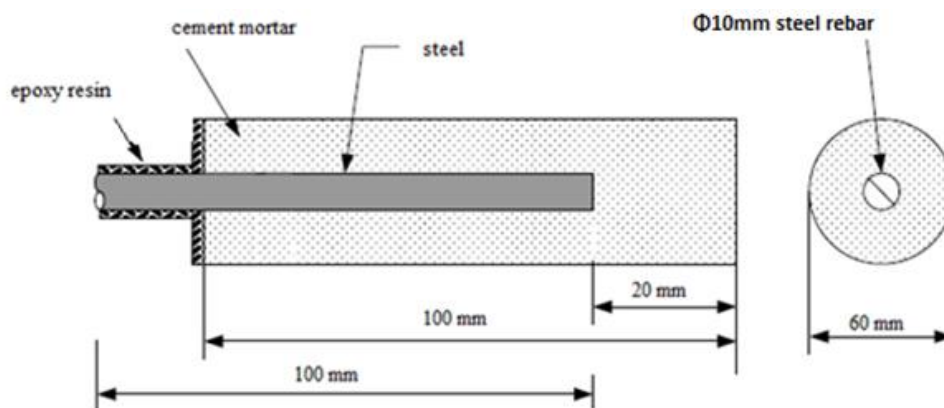
### 6.1.2 Δοκίμια Τσιμεντοκονιάματος

Για την κατασκευή των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM II 32.5N, άμμος θραυστή λατομείου κοκκομετρίας 250μm-4mm και νερό Πολυτεχειούπολης Ζωγράφου, το οποίο θεωρείται κατάλληλο για παρασκευή σκυροδέματος σύμφωνα με το ΕΛΟΤ 452<sup>263</sup>. Η κοκκομετρική διαβάθμιση και η χημική σύσταση της άμμου δίνεται στον **Πίνακα 6.4**.

**Πίνακας 6.4:** Κοκκομετρική διαβάθμιση και χημική σύσταση άμμου για δοκίμια τσιμεντοκονιάματος

	Βάρος (g)	%
4mm<d	23	5,23
2mm<d<4mm	106,08	24,13
1mm<d<2mm	77,62	17,66
500μm<d<1mm	56,47	12,85
250μm<d<500μm	45,88	10,44
d<250μm	130,55	29,7

Οι οπλισμοί που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου B500C με διάμετρο 10mm, ύψος 100mm και είναι σύμφωνα με το ΕΛΟΤ 1421-3<sup>6</sup>. Η αναλογία άμμου/τσιμέντου/νερού ήταν 1/3/0,55 και τα δοκίμια ήταν κυλινδρικά με διαστάσεις 40mm διαμέτρου και 100mm μήκους. Οι χαλύβδινοι οπλισμοί ήταν ομοαξονικά τοποθετημένοι, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.2** και πριν από τον εγκιβωτισμό τους καθαρίστηκαν σύμφωνα με το ISO/DIS 8407.3<sup>240</sup> και ζυγίστηκαν με ακρίβεια 0,1mg.



Σχήμα 6.2: Δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος

Οι οπλισμοί τοποθετήθηκαν κατά 20mm από τη βάση του δοκιμίου. Τα δοκίμια παρέμειναν στα καλούπια για 24 ώρες σε περιβάλλον 20°C και σχετικής υγρασίας RH=100% και στη συνέχεια μετά την απομάκρυνση τους από τα καλούπια συντηρήθηκαν σε θάλαμο συντήρησης για 24 ώρες στους 25°C, με σχετική υγρασία RH=99%. Η ξήρανση και η σταθεροποίηση των δοκιμών οπλισμένης τσιμεντοκονίας πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον εργαστηρίου για 8 ημέρες. Για την λήψη ηλεκτροχημικών μετρήσεων η ηλεκτρική συνέχεια των οπλισμών επιτεύχθηκε δια μέσω χάλκινου καλωδίου γύρω από κάθε οπλισμό και ένα μείγμα από δύο διαφορετικές εποξειδικές ρητίνες χρησιμοποιήθηκε για την κάλυψη του εκτεθειμένου μέρους του οπλισμού, ώστε να προστατευθεί από την ατμοσφαιρική διάβρωση.

Τα δοκίμια οπλισμένου και άοπλου τσιμεντοκονιάματος χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της προστασίας από την επιταχυνόμενη και εναλλασσόμενη διάβρωση και την ενανθράκωση αλλά και για την αποτίμηση φυσικοχημικών και μηχανικών παραμέτρων.

## 6.2 Συστήματα Επικαλύψεων

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετήθηκαν συνολικά 18 οργανικές επικαλύψεις οι οποίες κατηγοριοποιούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες. Για κάθε οργανική επικάλυψη χρησιμοποιήθηκε και το αντίστοιχο αστάρι σαν πρώτη στρώση με σκοπό την προετοιμασία της επιφάνειας και τη βελτίωση της πρόσφυσης με την επικάλυψη που ακολούθησε.

### 6.2.1 Μέθοδος Βαφής

Οι οργανικές επικαλύψεις εφαρμόστηκαν στην επιφάνεια των δοκιμών με πινέλο σε δύο στρώσεις, η δεύτερη στρώση 24 ώρες μετά την πρώτη και κάθετα σε αυτήν. Το πάχος κάθε επικάλυψης μετρήθηκε με παχύμετρο τύπου eban 2000 Mk2 σύμφωνα με το αντίστοιχο πρότυπο<sup>264</sup>. Μετά το τέλος και της δεύτερης στρώσης τα δοκίμια αφέθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου για τουλάχιστον 7 ημέρες πριν από οποιαδήποτε έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον.

### 6.2.2 Οργανικές Επικαλύψεις

Οι οργανικές επικαλύψεις που μελετήθηκαν και συγκρίθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή δίνονται στον ακόλουθο πίνακα, μαζί με την αντίστοιχη κωδική ονομασία. Σε κάθε περίπτωση δίνεται και το αντίστοιχο αστάρι που εφαρμόστηκε.

Πίνακας 6.5: Συστήματα επικαλύψεων

Κατηγορία 1: Συμβατικές Οργανικές Επικαλύψεις				
		Κωδικός	Ασάρι	Σύσταση Επικάλυψης
Ακρυλικά	100% Ακρυλικά	Acr1	Συνδεδετικό διάφανο ασάρι διαλύτη. Συμπολυμερή στυρενίου και ακρυλικών ρητινών. Πυκνότητα: 0,85±0,03 g/ml. Στερεά κ.ό.: 28±2%.	100% ακρυλικό χρώμα για εξωτερικές και εσωτερικές επιφάνειες. Στερεά κ.ό.: 43±3%. Πυκνότητα: 1,46±0,05 gr/ml.
		Acr2	Συνδεδετικό διάφανο ασάρι διαλύτη. Συμπολυμερή στυρενίου και ακρυλικών ρητινών. Πυκνότητα: 0,85±0,03 g/ml. Στερεά κ.ό.: 28±2%.	100% ακρυλικό χρώμα εξωτερικής χρήσης. Στερεά κ.ό.: 38±3%. Στερεά κ.ό.: 38±3%. Πυκνότητα: 1,47±0,05 gr/ml.
		Acr3	Ενός συστατικού σιλοξανικός υδροαπωθητικός εμποτισμός για υποστρώματα τσιμεντοειδούς βάσης. Πυκνότητα: 0,8 kg/l.	100% ακρυλικό υδ/το χρώμα για εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες. Στερεά κ.ό.: 39±3%. Ειδικό Βάρος: 1,34±0,05 gr/ml.
	Σύνθετα Ακρυλικά	Acr_sil	Συνδεδετικό διάφανο ασάρι διαλύτη. Συμπολυμερή στυρενίου και ακρυλικών ρητινών. Πυκνότητα: 0,85±0,03 g/ml. Στερεά κ.ό.: 28±2%.	Σιλικονούχο-ακρυλικό υδαταπωθητικό χρώμα εξωτερικής χρήσης. Στερεά κ.ό.: 48±3% Πυκνότητα: 1,52±0,04 gr/ml.
		Acr_glas	Ειδική ρητίνη, εμποτισμός τσιμεντοκονιών και μπετόν δαπέδου, συνδεδετική στρώση μεταξύ παλιού και νέου κονιάματος και για βελτίωση υδροχρωμάτων.	100% ακρυλικό υδ/το χρώμα με flakes γυαλιού, για εσωτερική και εξωτερική τοιχοποιία. Σύνολο στερεών κ.ο.: 72–73%. Ειδικό Βάρος: 1,5 gr/cm <sup>3</sup>
		Acr_cem	Συνδεδετικό διάφανο ασάρι διαλύτη. Συμπολυμερή στυρενίου και ακρυλικών ρητινών. Πυκνότητα: 0,85±0,03 g/ml. Στερεά κ.ό.: 28±2%.	Ακρυλικό τσιμεντόχρωμα νερού για κάθε επιφάνεια τσιμέντου. Στερεά κ.ό.: 53±3%. Πυκνότητα : 1,57±0,04 gr/ml.
		Acr_rel	Συνδεδετικό διάφανο ασάρι διαλύτη. Συμπολυμερή στυρενίου και ακρυλικών ρητινών. Πυκνότητα: 0,85±0,03 g/ml. Στερεά κ.ό.: 28±2%.	Ανάγλυφο ακρυλικό επίχρισμα για εξωτερικές επιφάνειες. Στερεά κ.ό.: 70±3%. Πυκνότητα: 1,70±0,14 gr/ml.
	Ελαστομερή Ακρυλικά	Elast_horz	Συνδεδετικό διάφανο ασάρι διαλύτη. Συμπολυμερή στυρενίου και ακρυλικών ρητινών. Πυκνότητα: 0,85±0,03 g/ml. Στερεά κ.ό.: 28±2%.	Θερμοανκλαστικό ελαστομερές στεγανοποιητικό-ακρυλικό χρώμα για εξωτερικές οριζόντιες επιφάνειες. Στερεά κ.ό.: 48±4%. Πυκνότητα: 1,35±0,04 gr/ml
		Elast_vert	Συνδεδετικό διάφανο ασάρι διαλύτη. Συμπολυμερή στυρενίου και ακρυλικών ρητινών. Πυκνότητα: 0,85±0,03 g/ml. Στερεά κ.ό.: 28±2%.	Θερμοανκλαστικό ελαστομερές χρώμα εξωτερικών τοίχων για κάθετες επιφάνειες. Στερεά κ.ό.: 54±3%. Πυκνότητα: 1,41±0,05 gr/ml .
	Πλαστικά	Plast1	Συνδεδετικό διάφανο ασάρι διαλύτη. Συμπολυμερή στυρενίου και ακρυλικών ρητινών. Πυκνότητα: 0,85±0,03 g/ml. Στερεά κ.ό.: 28±2%.	Πλαστικό χρώμα, διασπορά με βάση συμπολυμερές PVA για εσωτερικές επιφάνειες. Στερεά κ.ό.: 39±3%. Πυκνότητα: 1,47±0,05 gr/ml.
		Plast2	Συνδεδετικό διάφανο ασάρι διαλύτη. Συμπολυμερή στυρενίου και ακρυλικών ρητινών. Πυκνότητα: 0,85±0,03 g/ml. Στερεά κ.ό.: 28±2%.	Πλαστικό χρώμα εσωτερικής χρήσης. Διασπορά με βάση συμπολυμερές στυρενίου-ακρυλικό. Στερεά κ.ό.: 38±3%. Πυκνότητα: 1,50±0,05 gr/ml.
	Κατηγορία 2: Επικαλύψεις Βιομηχανικών Εφαρμογών			
		Κωδικός	Ασάρι	Σύσταση Επικάλυψης
		Erox	Εποξειδικό ασάρι 2 συστατικών, για τη βαφή δαπέδων και ως υπόστρωμα για τσιμεντένιες επιφάνειες. Στερεά κ.ο.: 58%. Ειδικό Βάρος: 0.99 kg/l.	Καθαρό εποξειδικό χρώμα δύο συστατικών, σκληρυνόμενο με αμίνη. Στερεά κ.ό.: 95%. Πυκνότητα: 1.55 kg/l
		Poly	Εποξειδικό ασάρι 2 συστατικών, για τη βαφή δαπέδων και ως υπόστρωμα για τσιμεντένιες επιφάνειες. Στερεά κ.ο.: 58%. Ειδικό Βάρος: 0.99 kg/l.	Χρώμα δύο συστατικών πολυουρεθάνης, με αλειφατικού τύπου ισοκυανικά. Στερεά κ.ό.: 49±3%. Πυκνότητα: 1.20-1.40 kg/l
		Rub	Ειδική ρητίνη, εμποτισμός τσιμεντοκονιών και μπετόν δαπέδου, συνδεδετική στρώση μεταξύ παλιού και νέου κονιάματος και για βελτίωση υδροχρωμάτων.	Ρευστό καουτσούκ, υλικό ακρυλικής βάσεως ενός συστατικού για τη στεγανοποίηση νέων αλλά και παλαιών επιφανειών. Πυκνότητα: 1,37±0.5 g/cm <sup>3</sup>
		Sol_cem	Συνδεδετικό διάφανο ασάρι διαλύτη. Συμπολυμερή στυρενίου και ακρυλικών ρητινών. Πυκνότητα: 0,85±0,03 g/ml. Στερεά κ.ό.: 28±2%.	Τσιμεντόχρωμα διαλύτη για εξωτερικές επιφάνειες, συμπολυμερισμός στυρενίου με ακρυλικές ρητίνες. Στερεά κ.ό.: 49±3%. Πυκνότητα: 1,48±0.04 kg/l
Κατηγορία 3: Επικαλύψεις με Προϊόντα Νανοτεχνολογίας				
		Κωδικός	Ασάρι	Σύσταση Επικάλυψης
		Silox_nano	Ακρυλικό ασάρι νερού με ακρυλικές διασπορές. Στερεά κ.ο.: 25,9%. Ειδικό Βάρος: 1kg/l.	Σιλοξανικό χρώμα νανοτεχνολογίας με βάση το νερό. Στερεά κ.ο.: 50%, Ειδικό Βάρος: 1,60kg/l
		Acr_nano	Ακρυλικό ασάρι νερού με ακρυλικές διασπορές. Στερεά κ.ο.: 25,9%. Ειδικό Βάρος: 1kg/l.	100% ακρυλικό χρώμα νερού για εξωτερική χρήση με τεχνολογία NPS. Στερεά κ.ο.: 64%, Ειδικό Βάρος: 1,48kg/l
		Elast_nano	Ενός συστατικού σιλοξανικός υδροαπωθητικός εμποτισμός. Πυκνότητα: 0,8 kg/l.	Ελαστομερικό χρώμα νανοτεχνολογίας. Στερεά κ.ο.: 50 ± 3%. Ειδικό Βάρος 1,32 ± 0,05 kg/l

## 7. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ

**Η** πρώτη ενότητα της διδακτορικής διατριβής ασχολείται με την αποτίμηση βασικών φυσικοχημικών και μηχανικών παραμέτρων των οργανικών επικαλύψεων οι οποίες επηρεάζουν έμμεσα το φαινόμενο της διάβρωσης του σπλισμού. Οι ιδιότητες που περιγράφονται παρακάτω μετρήθηκαν και στις τρεις κατηγορίες των χρωμάτων.

### 7.1 Φυσικοχημικές Ιδιότητες

#### 7.1.1 Υδατοπερατότητα

Η μέτρηση της υδατοπερατότητας των οργανικών επικαλύψεων μετράται σύμφωνα με το πρότυπο DIN EN 1062-3 (2008-04)<sup>265</sup> όπου υπολογίζεται ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης της επίστρωσης  $w$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{h}$ ). Η μέθοδος αυτή ενδείκνυται για επικαλύψεις και συστήματα επικαλύψεων που εφαρμόζονται σε πορώδη υποστρώματα όπως τούβλο, τσιμέντο, κονίαμα ενώ δεν είναι κατάλληλη για επικαλύψεις ή συστήματα επικαλύψεων που έχουν συντελεστή ταχύτητας μεταφοράς υγρού ύδατος μικρότερο από  $0.05$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{h}$ ).

#### Δοκίμια

Για τη μέτρηση της υδατοπερατότητας άσπλα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος κόπηκαν με τη βοήθεια κοπτικού μηχανήματος σε τρία μέρη (Σχήμα 7.1), 20mm από κάθε άκρο. Τα ακραία τμήματα απομακρύνθηκαν με σκοπό την αποφυγή του φαινομένου συσσώρευσης των αδρανών που ενδέχεται να είχε συμβεί κατά το στάδιο της ανάμιξης των συστατικών του τσιμεντοκονιάματος μέσα στον περιστροφικό αναδευτήρα. Στο τμήμα που παρέμεινε, ύψους 50 mm, εφαρμόσθηκε η προς μελέτη επικάλυψη. Τα δοκίμια αφέθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 2 εβδομάδες προκειμένου να στεγνώσει το χρώμα πριν την έναρξη των μετρήσεων.



Σχήμα 7.1: Δοκίμια άσπλου τσιμεντοκονιάματος για την μέτρηση της υδατοπερατότητας

#### Διαδικασία Μετρήσεων

Αρχικά τα δοκίμια ζυγίζονται με ακρίβεια  $0,01$  g. Στη συνέχεια τοποθετούνται σε δοχείο το οποίο γεμίζεται με αποσταγμένο νερό και αφήνεται να φτάσει τη θερμοκρασία των  $23 \pm 2$  °C. Τα δοκίμια τοποθετούνται σε ειδικά πλαστικά στηρίγματα με την επικαλυμμένη πλευρά να κοιτάει προς τα κάτω με τέτοιο τρόπο ώστε αυτή η πλευρά να είναι βυθισμένη στο νερό κατά 10mm. Η μέτρηση της υδατοπερατότητας περιλαμβάνει τη μέτρηση του βάρους των δοκιμίων μετά το πέρας 1h, 2h, 3h, 6h και 24h, όπου τα δοκίμια απομακρύνονται από το νερό σκουπίζονται προσεκτικά με απορροφητικό χαρτί και ζυγίζονται με ακρίβεια  $0,01$  g. Η υδατοπερατότητα προσδιορίζεται παριστάνοντας γραφικά την αύξηση της μάζας των

δοκιμίων, συναρτήσει του τετραγώνου του χρόνου. Η κλίση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης που προκύπτει είναι ο συντελεστής της υδατοπερατότητας  $w$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{\text{h}}$ ). Οι τιμές του συντελεστή υδατοαπορρόφησης κρίνονται βάσει της κατάταξης του EN 1062-3 που δίνεται στον **Πίνακας 7.1**.

**Πίνακας 7.1:** Κατηγοριοποίηση επικαλύψεων σύμφωνα με το πρότυπο DIN EN 1062-3 (2008-04)<sup>11</sup>

Κατηγορία	Ρυθμός υδατοπερατότητας $w$ ( $\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{\text{h}}$ ).
I (υψηλή)	> 0,5
II (μέτρια)	0,1 – 0,5
III (χαμηλή)	< 0,1

### 7.1.2 Υδρατμοπερατότητα

Η περατότητα σε υδρατμούς των οργανικών επικαλύψεων μετράται με βάση το πρότυπο DIN EN ISO 7783-2<sup>266</sup>, όπου υπολογίζεται ο ρυθμός υδρατμοπερατότητας  $V$  ( $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ ), ο οποίος ορίζεται σαν “η μάζα των υδρατμών που διαβιβάζεται σε μια ορισμένη χρονική περίοδο δια μέσου συγκεκριμένου εμβαδού της επίστρωσης κάτω από ορισμένες σταθερές συνθήκες σχετικής υγρασίας σε κάθε πλευρά της επίστρωσης”. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για επικαλύψεις, συστήματα επικαλύψεων και άλλα σχετικά προϊόντα που προορίζονται για εξωτερική λιθοδομή και σκυρόδεμα.

#### Δοκίμια

Σύμφωνα με τη μέθοδο του πορώδους υποστρώματος, το προς εξέταση υλικό εφαρμόζεται στην μία πλευρά κατάλληλου υποστρώματος με περατότητα υδρατμών μικρότερη από  $240 \text{ g}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ . Το σύστημα υποστρώματος- βαφής τοποθετείται επάνω σε ειδικά δοχεία που περιέχουν διάλυμα ένυδρου φωσφορικού αμμωνίου, για τη δημιουργία ατμόσφαιρας 93% σχετικής υγρασίας και σφραγίζεται ούτως ώστε να μην υπάρχει απώλεια υδρατμών παρά μόνο από την επιφάνεια του χρώματος (**Σχήμα 7.2**).



**Σχήμα 7.2:** Σύστημα υποστρώματος βαφής για την μέτρηση της υδρατμοπερατότητας

Τα δοκίμια αφήνονται σε συνθήκες περιβάλλοντος για 24h, ώστε να στεγνώσει το υλικό σφράγισης και έπειτα τοποθετούνται σε ειδικά κλιματιζόμενο θάλαμο ( $25^\circ\text{C}$ , 50% RH) και ζυγίζονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, συνήθως ανά 24 ώρες. Για επιστρώσεις με υψηλό ρυθμό διαπερατότητας μπορεί να απαιτηθούν πολύ μικρότερα διαστήματα (3,6,8 ωρών). Το τεστ έχει ολοκληρωθεί όταν τρία ή τέσσερα σημεία βρίσκονται πάνω σε ευθεία γραμμή, κάτι που συνεπάγεται τη σταθεροποίηση της ταχύτητας διάχυσης των υδρατμών. Πρέπει να σημειωθεί ότι η επικαλυμμένη πλευρά των δοκιμίων αντιμετώπιζε την μικρότερη σχετική υγρασία με σκοπό να προσομοιωθεί η εφαρμογή του χρώματος σε τοιχοποιίες όπου στο εσωτερικό παρατηρείται αυξημένη υγρασία λόγω του νερού των πόρων του σκυροδέματος.



**Διαδικασία Μετρήσεων**

Για κάθε ένα από τα δείγματα προσδιορίζεται η ολική μάζα μετά από συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και παριστάνετε γραφικά ως συνάρτηση του χρόνου. Υπολογίζεται η διαπερατότητα των υδρατμών  $\Delta m$  (mg/h) από την ολική μεταβολή της μάζας σε κάθε χρονική περίοδο, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Delta m_i = \frac{m_1 - m_2}{t_2 - t_1} \quad [7.1]$$

Υπολογίζεται ο ρυθμός διαπερατότητας υδρατμών  $V$  ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ) για κάθε δείγμα:

$$V = \frac{240 \cdot \Delta m_i}{A_i} \quad [7.2]$$

**όπου:**  $m_1, m_2$  η ολική μάζα (mg) στους χρόνους  $t_1, t_2$  (h),  $A_i$  η επιφάνεια του δείγματος  $i$  ( $\text{m}^2$ )  
Για υποστηριζόμενα φιλμ που εφαρμόστηκαν σε πορώδες υπόστρωμα, υπολογίζεται ο ρυθμός με τον οποίο διαπερνούν οι υδρατμοί το σύστημα επικάλυψης, με τη χρήση της εξίσωσης:

$$V = \frac{V_{cs} \cdot V_s}{V_s - V_{cs}} \quad [7.3]$$

**όπου:**  $V$  ο ρυθμός διαπερατότητας των υδρατμών του συστήματος επικάλυψης ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ),  $V_{cs}$  ο ρυθμός διαπερατότητας των υδρατμών του πορώδους υποστρώματος που είναι επικαλυμμένο με το υλικό της επικάλυψης ή το σύστημα επικάλυψης ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ),  $V_s$  ο ρυθμός διαπερατότητας των υδρατμών του πορώδους υποστρώματος ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ).

Σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 7783-2 υπολογίζεται το πάχος στρώματος αέρα ισοδύναμης διάχυσης  $s_d$  (m), το οποίο ορίζεται ως “το πάχος ενός στατικού στρώματος αέρα το οποίο κατέχει, κάτω από τις ίδιες συνθήκες, τον ίδιο ρυθμό διαπερατότητας υδρατμών όπως η επίστρωση”, από τον ακόλουθο τύπο:

$$s_d = \frac{\delta L}{\delta} \quad [7.4]$$

**όπου:**  $\delta L$  ο συντελεστής υδρατμοπερατότητας του αέρα και  $\delta$  ο συντελεστής υδρατμοπερατότητας της επικάλυψης ( $\text{g} \cdot \text{m}^2 / \text{d} \cdot \text{Pa}$ ).

Για  $T = 23^\circ\text{C}$  και  $p_0 = p = 1013,25 \text{ hPa}$ ,  $\Delta p = 1207 \text{ Pa}$  (η οποία ισοδυναμεί με μια διαφορά πίεσης ατμών από 93% σχετική υγρασία σε 50% σχετική υγρασία, υπό τις παραπάνω συνθήκες), η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$s_d = \frac{21}{V} \quad [7.5]$$

Οι τιμές της διαπερατότητας κρίνονται βάσει της κατάταξης του EN ISO 7783-2 (**Πίνακας 7.2**).

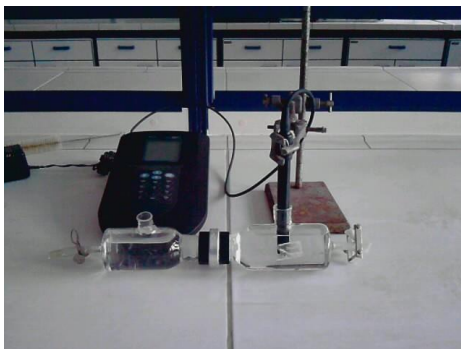
**Πίνακας 7.2:** Κατάταξη διαπερατότητας σε υδρατμούς για επιστρώσεις σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 7783-2

Κατηγορία	Ρυθμός υδρατμοπερατότητας $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$	$s_d$ (m)
I (υψηλή)	> 150	> 0,14
II (μέτρια)	15 – 150	0,14 – 1,4
III (χαμηλή)	< 15	< 1,4

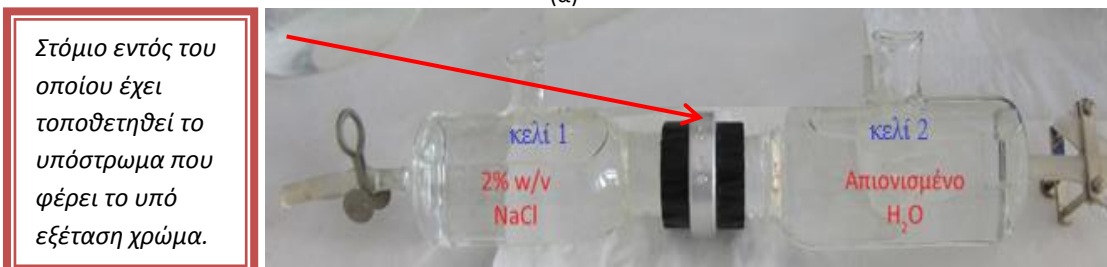
### 7.1.3 Διαπερατότητα σε χλωριόντα

#### 7.1.3.1 Διαπερατότητα Χλωριόντων Συναρτήσεως του Χρόνου

Για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας σε ιόντα χλωρίου η πειραματική διάταξη αποτελείται από δύο κελιά, καθένα όγκου 500ml, τα οποία χωρίζονται από μια μεμβράνη πάνω στην οποία είχε εφαρμοστεί η οργανική επικάλυψη. Το υπόστρωμα που έφερε το χρώμα ήταν υψηλής υδατοπερατότητας με διαστάσεις 50mm σε διάμετρο και 3mm πάχος. Το συνολικό πάχος χρώματος που εφαρμόστηκε σε κάθε δοκίμιο κάθε χρώματος ήταν  $300 \pm 10 \mu\text{m}$  και η εφαρμογή έγινε με συσκευή εφαρμογής σταθερού υγρού πάχους (film applicator). Το πρώτο κελί περιείχε διάλυμα χλωριούχου νατρίου (2,0% w/v NaCl) ενώ στο δεύτερο προστέθηκε απιονισμένο νερό και η επιφάνεια στην οποία είχε εφαρμοστεί η επικάλυψη έβλεπε το διάλυμα του χλωριούχου άλατος. Τα χλωριόντα, ακολουθώντας του νόμους της διάχυσης για την επίτευξη ισορροπίας, θα διαπεράσουν την μεμβράνη προς το διάλυμα του ύδατος. Η συγκέντρωση των χλωριόντων που δύναται να διαπεράσει την επικαλυμμένη επιφάνεια προσδιορίζεται δια μέσω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του διαλύματος στο Κελί 2. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μετρήθηκε με αγωγιμόμετρο Sension7 από την Hach και μετατράπηκε σε όρους συγκέντρωσης μετά την βαθμονόμηση πρότυπων διαλυμάτων γνωστής περιεκτικότητας χλωριόντων. Στο **Σχήμα 7.3** δίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας σε ιόντα χλωρίου καθώς και η κυψέλη προσδιορισμού.



(α)



(β)

**Σχήμα 7.3:** (α) Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας σε ιόντα χλωρίου, (β) κυψέλη προσδιορισμού όπου διακρίνονται τα κελιά 1, 2

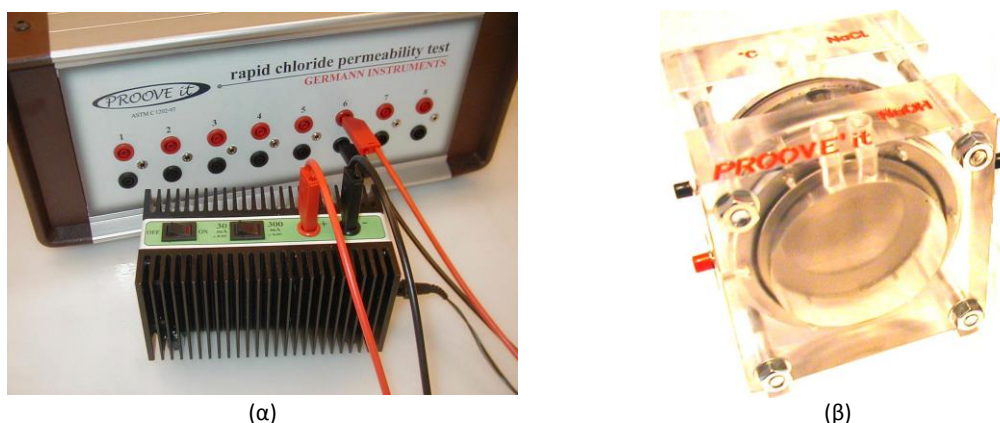
#### 7.1.3.2 Διαπερατότητα Χλωριόντων Συναρτήσεως του Ηλεκτρικού Φορτίου

Η μέτρηση των χλωριόντων συναρτήσεως του ηλεκτρικού φορτίου πραγματοποιείται σύμφωνα με το Πρότυπο ASTM C1202 -  $12^{267}$  και τα δοκίμια σκυροδέματος χαρακτηρίζονται ως προς την διαπερατότητά τους σε ιόντα χλωρίου. Η δοκιμή αυτή αναπτύχθηκε από τον Whiting<sup>268</sup>

και αναφέρεται ως “*Rapid Chloride Permeability Test, RCPT*”. Η δοκιμή είναι γρήγορη και αξιόπιστη με μεγάλη επαναληψιμότητα στα πειραματικά αποτελέσματα και χρησιμοποιείται ευρέως για το χαρακτηρισμό διαφόρων ειδών σκυροδεμάτων. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της υψηλής τάσης που εφαρμόζεται, καθώς και ότι τα αποτελέσματα είναι ποιοτικά και όχι ποσοτικά αφού δεν μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής διάχυσης.

### Δοκίμια

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιούνται δοκίμια άοπλου σκυροδέματος διαμέτρου 100mm και πάχους 50mm τα οποία είναι κορεσμένα σε νερό. Τα δείγματα υπόκεινται στην εφαρμογή συνεχούς ρεύματος τάσης 60V για 6 ώρες χρησιμοποιώντας τη συσκευή που φαίνεται στο **Σχήμα 7.4**.



**Σχήμα 7.4:** (α) Συσκευή παροχής ρεύματος για μέτρηση διαπερατότητας χλωριόντων, (β) κελί διεξαγωγής πειραμάτων

### Διαδικασία μετρήσεων

Στο κελί που απεικονίζεται στο **Σχήμα 7.4 (β)** τοποθετούνται διαλύματα NaCl συγκέντρωσης 3% w/v και NaOH συγκέντρωσης 0,3M εκατέρωθεν στα 2 διαμερίσματα της κυψέλης και ανάμεσα στα διαλύματα τοποθετείτε το δοκίμιο σκυροδέματος. Το συνολικό φορτίο που περνά προσδιορίζεται και χρησιμοποιείτε για την κατηγοριοποίηση του σκυροδέματος σύμφωνα με τα κριτήρια του **Πίνακας 7.3**.

**Πίνακας 7.3:** Σχέση διαπερατότητας χλωριόντων και διερχόμενου φορτίου σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1202 - 12<sup>3</sup>

Διερχόμενο φορτίο (Coulomb)	Διαπερατότητα χλωριόντων
>4000	Υψηλή
2000-4000	Μέτρια
1000-2000	Χαμηλή
100-1000	Πολύ χαμηλή
<100	Αμελητέα

#### 7.1.4 Συντελεστής Διάχυσης CO<sub>2</sub>

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή διάχυσης των επικαλύψεων σε CO<sub>2</sub>, βαμμένα και άβαφα δοκίμια άοπλου τσιμεντοκονιάματος τοποθετούνται σε θάλαμο ενανθράκωσης με υψηλή περιεκτικότητα CO<sub>2</sub>. Τα δοκίμια παραμένουν στο θάλαμο για επαρκές χρονικό διάστημα ώστε να εξασφαλισθεί η διάχυση του CO<sub>2</sub> και στη συνέχεια σπάζονται όπου και μετράται το βάθος ενανθράκωσης σε φρέσκιες τομές με διάλυμα φαινολοφθαλείνης, όπως περιγράφεται στην §6.4.

Το βάθος ενανθράκωσης το οποίο μετρήθηκε για κάθε επικάλυψη μετά την έκθεση των δοκιμίων στον θάλαμο ενανθράκωση χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του συντελεστή ενανθράκωσης  $K$ , σύμφωνα με την εξίσωση<sup>269</sup>:

$$x = K\sqrt{t} \quad [7.6]$$

**Όπου:**  $K$  η σταθερά ενανθράκωσης [ $\text{cm/s}^{0.5}$ ],  $x$  το βάθος ενανθράκωσης [ $\text{cm}$ ] και  $t$  ο χρόνος που παρέμειναν τα δοκίμια στο θάλαμο [ $\text{s}$ ].

Αν δοκίμια με και χωρίς επικάλυψη είναι εκτεθειμένα σε ατμόσφαιρα  $\text{CO}_2$  για το ίδιο χρονικό διάστημα, τότε:

$$t_0 = t \Rightarrow \frac{1}{K^2} x_0^2 = \frac{1}{K^2} x^2 + \frac{1}{K^2} \frac{2D}{d} x \quad [7.7]$$

**Όπου:**  $t_0$ ,  $t$  ο χρόνος έκθεσης [ $\text{s}$ ] για μη επικαλυμμένα και επικαλυμμένα δοκίμια αντίστοιχα,  $x_0$ ,  $x$  τα βάθη ενανθράκωσης [ $\text{cm}$ ] για μη επικαλυμμένα και επικαλυμμένα δοκίμια αντίστοιχα. Η παραπάνω εξίσωση οδηγεί στο συντελεστή διάχυσης  $d$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] της κάθε οργανικής επικάλυψης, ως ακολούθως:

$$d = \frac{2 \cdot D \cdot x}{x_0^2 - x^2} \quad [7.8]$$

Η σταθερά διάχυσης των ενανθρακωμένων δοκιμίων  $D$  επιλέχθηκε<sup>270</sup> ίση με  $2,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Είναι πολύ συνηθισμένο να συγκρίνεται η αντίσταση μιας επικάλυψης με την αντίσταση που θα παρουσίαζε ένα φανταστικό στατικό στρώμα αέρα που έχει κάτω από τις ίδιες συνθήκες την ίδια διαπερατότητα σε διοξείδιο του άνθρακα με αυτήν της επικάλυψης. Το στρώμα αυτό καλείται “ισοδύναμο πάχος αέρα”,  $s_d$  [ $\text{m}$ ], όσο μεγαλύτερο είναι τόσο καλύτερα προστατεύει το χρώμα το σκυρόδεμα από ενανθράκωση και δίνεται από την εξίσωση:

$$s_d = \frac{D_{air}}{d} \quad [7.9]$$

**Όπου:**  $D_{air}$  είναι ο συντελεστής διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα στον αέρα και ισούται με  $153 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Ο παράγοντας αντίστασης διάχυσης  $\mu$  [αδιάστατο μέγεθος] υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$s_d = \mu \cdot S \quad [7.10]$$

**Όπου:**  $S$  είναι το πάχος της επικάλυψης [ $\text{m}$ ].

## 7.2 Μηχανικές Ιδιότητες

### 7.2.1 Προσδιορισμός της πρόσφυσης μέσω της ελάχιστης εφελκυστικής τάσης αποκόλλησης (Pull-off test)

Ο προσδιορισμός της πρόσφυσης μιας επίστρωσης με τη μέθοδο Pull-off πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 24624:1993/ BS EN ISO 4624:2003<sup>271</sup> και το πρότυπο ASTM D4541 - 09e1<sup>272</sup>. Σύμφωνα με αυτό καθορίζεται μια μέθοδος για την αξιολόγηση της πρόσφυσης μιας επίστρωσης ή ενός συστήματος επικάλυψης, βερνικιού ή παρόμοιων προϊόντων, μετρώντας την ελάχιστη εφελκυστική τάση που χρειάζεται για την αποκόλληση ή τη ρήξη της επίστρωσης σε κάθετη κατεύθυνση από το υπόστρωμα. Τα αποτελέσματα της δοκιμής επηρεάζονται όχι μόνο από τις μηχανικές ιδιότητες της επίστρωσης, αλλά και από τη φύση του υποστρώματος, τη μέθοδο εφαρμογής της επίστρωσης και τις συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος. Η δοκιμή πραγματοποιείται με τη

χρήση ειδικών κυλίνδρων (dollys), οι οποίοι κολλώνται στην επιφάνεια του επιστρώματος, με τη χρήση εποξειδικής κόλλας δύο συστατικών, σε 3 διαφορετικά σημεία. Χρησιμοποιείται ειδική συσκευή με την οποία ασκείται κάθετη προς την επιφάνεια του δοκιμίου εφελκυστική τάση μέχρι αποκόλλησης των κυλίνδρων (Σχήμα 7.5).



Σχήμα 7.5: Elcometer Model 106 Adhesion Tester

Η εκτίμηση των αποτελεσμάτων προκύπτει από τον Πίνακα 7.4 σύμφωνα με το πρότυπο. Το αποτέλεσμα εκφράζεται σαν ποσοστό επί τοις εκατό της επιφάνειας και η θέση ρήξης στο σύστημα που δοκιμάζεται, σαν ρήξη πρόσφυσης, ρήξη συνοχής ή ρήξη πρόσφυσης /συνοχής.

Πίνακας 7.4: Κατάταξη αποτελεσμάτων δοκιμής pull-off σε επιστρώσεις

Τάξη	Αποτέλεσμα	
A	Ρήξη συνοχής του δοκιμίου	Cohesive failure of substrate
A/B	Ρήξη πρόσφυσης μεταξύ δοκιμίου /πρώτης στρώσης επιχρίσματος	Adhesive failure between substrate and first coat
B	Ρήξη συνοχής πρώτης στρώσης	Cohesive failure of first coat
B/C	Ρήξη πρόσφυσης μεταξύ πρώτης / δεύτερης στρώσης	Adhesive failure between first and second coats
-/Y	Ρήξη πρόσφυσης μεταξύ τελικής στρώσης και κόλλας	Adhesive failure between final coat and adhesive
Y	Ρήξη συνοχής της κόλλας	Cohesive failure of adhesive
Y/Z	Ρήξη πρόσφυσης μεταξύ κόλλας και κυλίνδρου	Adhesive failure between adhesive and test cylinder

### 7.2.2 Προσδιορισμός της πρόσφυσης του επιστρώματος με τη δοκιμή της σταυροειδούς χάραξης (Cross Cut Test)

Τα οργανικά επιστρώματα εφαρμόζονται σε μια μεγάλη ποικιλία υποστρωμάτων από διάφορα υλικά ( ξύλο, μέταλλα, πλαστικά, κεραμικά) για διακοσμητικούς, προστατευτικούς και λειτουργικούς λόγους. Σε κάθε περίπτωση είναι επιτακτική η ανάγκη το επίστρωμα να έχει καλή πρόσφυση με το υπόστρωμα. Η αξιολόγηση της πρόσφυσης είναι αναπόσπαστο μέρος της ανάπτυξης της τεχνολογίας των επικαλύψεων. Η πρόσφυση σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D907<sup>273</sup> ορίζεται ως “η κατάσταση στην οποία δύο επιφάνειες συγκρατούνται μαζί από διεπιφανειακές δυνάμεις οι οποίες μπορούν να είναι είτε δυνάμεις σθένους ή συμπλεκτικές δράσεις ή και τα δύο ταυτόχρονα”.

Σκοπός της μεθόδου της σταυροειδούς χάραξης είναι η εκτίμηση της πρόσφυσης της επίστρωσης στο υπόστρωμα καθώς και μεταξύ ασταριού και δεύτερης στρώσης επίστρωσης. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 2409: 1992(E)<sup>274</sup> η δοκιμή πρέπει να πραγματοποιείται σε

θερμοκρασία  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Με ειδικό χαρακτή (Σχήμα 7.6) γίνονται στην επιφάνεια της επικάλυψης αρχικά 6 οριζόντιες χαράξεις και στη συνέχεια 6 κάθετες στις προηγούμενες ώστε να σχηματιστεί ένα δικτυωτό πλέγμα. Όλες οι χαραγές πρέπει να εισχωρούν στην επιφάνεια του υποστρώματος σύμφωνα με την απαίτηση του προτύπου.



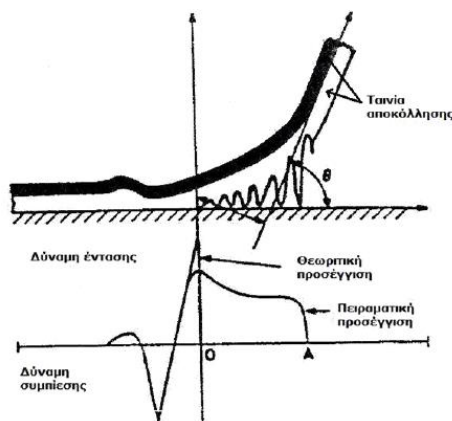
Σχήμα 7.6: Cross-cut tester, MODEL 295/I, Erichsen

Η δοκιμή πραγματοποιείται σε 3 διαφορετικά σημεία πάνω στο κάθε δοκίμιο και σε περίπτωση που τα 3 αποτελέσματα διαφέρουν περισσότερο από μία μονάδα κατηγοριοποίησης, η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί σε άλλα 3 σημεία. Το κενό μεταξύ των εγκοπών του κοπτικού εργαλείου-χαρακτή σε κάθε κατεύθυνση θα πρέπει να είναι το ίδιο. Εξαρτάται κάθε φορά από το πάχος της επικάλυψης και από τον τύπο του υποστρώματος σύμφωνα με τις ακόλουθες οδηγίες:

- ⊕ Για πάχος επικάλυψης 0μm έως 60μm: 1mm κενό, για σκληρά υποστρώματα (π.χ. χάλυβας)
- ⊕ Για πάχος επικάλυψης 0μm έως 60μm: 2mm κενό, για μαλακά υποστρώματα (π.χ. αλουμίνιο).
- ⊕ Για πάχος επικάλυψης 61μm έως 120μm: 2mm κενό, για σκληρά και μαλακά υποστρώματα
- ⊕ Για πάχος επικάλυψης 121μm έως 250μm: 3mm κενό, για σκληρά και μαλακά υποστρώματα.

Μόνο για σκληρά υποστρώματα πραγματοποιείται και μια επιπρόσθετη δοκιμή. Σύμφωνα με αυτήν επικολλάται μία διαφανής ταινία ευαίσθητη στην πίεση στα σημεία πάνω στα δοκίμια τα οποία προηγουμένως χαραχτηκαν και αποκολλάται με συγκεκριμένη και ίδια κάθε φορά δύναμη. Στο Σχήμα 7.7 δίνεται το προφίλ της αποκόλλησης, όπου η δύναμη της αποκόλλησης στην πραγματικότητα διανέμεται στη περιοχή των σημείων 0 και A και δεν συγκεντρώνεται στο θεωρητικό σημείο 0 αλλά η δύναμη της έντασης είναι μεγαλύτερη και στα δύο σημεία. Αξίζει να αναφερθεί και η σημαντικότητα της δύναμης συμπίεσης της ταινίας πάνω στην επιφάνεια η οποία προηγείται της εντατικής δύναμης και λαμβάνεται υπόψη στις δοκιμές cross-cut με ταινία αποκόλλησης. Η μέτρηση της δύναμης αποκόλλησης πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D3330 / D3330M - 04(2010)<sup>275</sup> και τη χρήση ειδικού ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού.





Σχήμα 7.7: Προφίλ αποκόλλησης, δοκιμής cross-cut με ταινία αποκόλλησης

Η εκτίμηση των αποτελεσμάτων προκύπτει από την κατάταξη της εμφάνισης της επιφάνειας μετά τη δοκιμή με τη βοήθεια του Πίνακας 7.5.

Πίνακας 7.5: Κατάταξη για τη δοκιμή σταυροειδούς χάραξης σε επιστρώσεις<sup>16</sup>

Κατάταξη	Περιγραφή	Εμφάνιση της επιφάνειας της σταυροειδούς περιοχής από την οποία προήλθε η απολέπιση. (Παράδειγμα για 6 παράλληλες χαραγές)
0	Κανένα από τα τετράγωνα του δικτύματος δεν έχει αποσπαστεί.	—
1	Απόσπαση μικρών νιφάδων της επικάλυψης στις τομές των χαραγών. Επηρεάζεται μια περιοχή του δικτύματος όχι μεγαλύτερη από 5%.	
2	Η επικάλυψη έχει απολεπιδωθεί στις άκρες ή/και στα σημεία τομής των χαραγών. Επηρεάζεται μια περιοχή από 5-15%.	
3	Η επικάλυψη εμφανίζει αποφλοίωση στις άκρες των χαραγών εν μέρει ή ολοκληρωτικά σε μεγάλες ταινίες, ή/και εμφανίζει αποφλοίωση εν μέρει ή ολοκληρωτικά σε διαφορετικά σημεία των τετραγώνων. Επηρεάζεται ένα ποσοστό 15-35% της επιφάνειας.	
4	Η επικάλυψη εμφανίζει αποφλοίωση στις άκρες των χαραγών σε μεγάλες ταινίες ή/και κάποια τετράγωνα έχουν επηρεαστεί μερικώς ή εξ' ολοκλήρου. Επηρεάζεται ποσοστό της επιφάνειας 35-65%.	
5	Κάθε επίπεδο αποφλοίωσης που δεν εντάσσεται στην κατηγορία 4.	

### 7.2.3 Αντοχή σε θάλαμο αλατονέφωσης

Η χρήση της μεθόδου της αλατονέφωσης εφαρμόζεται για περισσότερα από 100 χρόνια για τον έλεγχο της επιδεκτικότητας στη διάβρωση μεταλλικών και μη μεταλλικών υλικών, καθώς και για τον έλεγχο του βαθμού προστασίας που προσφέρουν οι επικαλύψεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι δοκιμές πραγματοποιούνται για τη σύγκριση της συμπεριφοράς μετάλλων και επικαλύψεων κατά την εφαρμογή συγκεκριμένου προτύπου. Για τη διεξαγωγή δοκιμών διάβρωσης σε επικαλύψεις προστασίας του χάλυβα, προτάθηκε για πρώτη φορά δοκιμή με ουδέτερο διάλυμα αλατονέφωσης στο πλαίσιο του προτύπου ASTM B117 - 11<sup>276</sup>. Πολλές βελτιώσεις και αναθεωρήσεις έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια τόσο ως προς τις δοκιμές αλατονέφωσης όσο και στους θαλάμους που χρησιμοποιούνται και τις διατάξεις. Οι πιο κοινά αποδεκτές μέθοδοι εφαρμογής δοκιμών αλατονέφωσης περιγράφονται με ακρίβεια στα πρότυπα:

- ASTM B117 “Standard method of salt spray (FOG) testing”
- BS 368 “Standard test method for copper-accelerated acetic- salt spray (FOG) testing”



- ASTM G85 “Standard practice for modified salt spray (FOG) testing”

Σημειώνεται ότι υπάρχουν δοκιμές διάβρωσης στις οποίες εφαρμόζονται συνθήκες υψηλής υγρασίας, όπου απιονισμένο νερό χρησιμοποιείται ως συστατικό της διάβρωσης και στις οποίες δεν περιλαμβάνεται άλας ως στοιχείο διάβρωσης (ASTM D1735, ASTM D2247, ASTM G 60).

Σαν τεχνική, η αλατονέφωση, παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα με σημαντικότερο την ταχύτητα με την οποία δίνει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Επιπλέον η χρήση της είναι απλή και ειδικά στις σύγχρονες διατάξεις που διαθέτουν δυνατότητα προγραμματισμού, η υλοποίηση συγκεκριμένων συνθηκών ακόμα και πολύπλοκων ακολουθιών με διάφορες εναλλαγές θερμοκρασίας και άλλων παραγόντων, γίνεται πολύ εύκολα. Τέλος, το λειτουργικό κόστος της διάταξης είναι αρκετά χαμηλό γιατί το διαβρωτικό μέσο που χρησιμοποιεί (υδατικό διάλυμα NaCl) είναι πολύ φτηνό και απλό στην παρασκευή.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται η μικρή επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων<sup>277</sup>, η οποία όμως αποφεύγεται με τη χρήση αρκετά μεγάλου αριθμού όμοιων δειγμάτων εκτεθειμένων στις ίδιες συνθήκες ή με την επανεκτέλεση της δοκιμής στις ίδιες συνθήκες<sup>278</sup> ώστε να είναι δυνατή μια στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Οι δοκιμές αλατονέφωσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: στις δοκιμές σε «στατικές» συνθήκες και στις δοκιμές σε «κυκλικές» συνθήκες.

- **Στατικές συνθήκες:** Στις στατικές δοκιμές οι συνθήκες και η ατμόσφαιρα παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής: θερμοκρασία, πυκνότητα νέφους, pH του ηλεκτρολυτικού διαλύματος. Οι δοκιμές μπορεί να διαρκούν 24 ώρες την ημέρα, 7 ημέρες την εβδομάδα για όλο το διάστημα έκθεσης. Στη συνέχεια τα δοκίμια απομακρύνονται από το θάλαμο για μελέτη και ανάλυση. Το πρότυπο ASTM B117 περιγράφει στατικές συνθήκες δοκιμής αλατονέφωσης. Η διαδικασία του προτύπου αυτού καθορίζει διαρκή έκθεση σε αλατονέφωση 5% σε θερμοκρασία 35°C.
- **Κυκλικές συνθήκες:** Η σύγχρονη έρευνα επικεντρώνεται στο σχεδιασμό δοκιμών που προσομοιάζουν περισσότερο την πραγματική έκθεση στο περιβάλλον και στις συνθήκες λειτουργίας. Με γνώμονα αυτό σχεδιάζονται νέες κυκλικές δοκιμές. Κατά τις κυκλικές δοκιμές, τα δοκίμια υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενη σειρά βημάτων συγκεκριμένου χρόνου, διαφορετικής ατμόσφαιρας, έως ότου ολοκληρωθεί ο προκαθορισμένος χρόνος έκθεσης ή αριθμός κύκλων. Ένα πλήρες σύνολο βημάτων συνιστά έναν κύκλο. Τα βήματα αυτά περιλαμβάνουν:
  - Διαφορετικές θερμοκρασίες
  - Μεταβαλλόμενα επίπεδα σχετικής υγρασίας RH (20-100%)
  - Διάφορα διαβρωτικά συστατικά (ρυπαντές, ηλεκτρολύτες)

Στις περισσότερες περιπτώσεις μελέτης επικαλύψεων για σκυρόδεμα που εκτίθεται σε παραθαλάσσιο περιβάλλον οι συνθήκες έκθεσης είναι σύμφωνες με το πρότυπο ASTM B117. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων διεξάγεται δια μέσου σύγκρισης μιας ιδιότητας πριν και μετά την έκθεση των δοκιμών στην διαβρωτική ατμόσφαιρα. Συνήθως αξιολογείται ο βαθμός σκωρίασης των δοκιμών με βάση το πρότυπο ASTM D610-07<sup>279</sup>. Μια σειρά από άλλες ιδιότητες είναι δυνατόν να αποτιμηθούν, όπως η εμφάνιση φουσκάλων με βάση το

ASTM D714 - 02(2009)<sup>280</sup>, η αντοχή σε τριβή σύμφωνα με το ASTM D1654-08<sup>281</sup> και η πρόσφυση με βάση το ASTM D3359.

### **Αρχή Μεθόδου**

Η συσκευή αλατονέφωσης δεν μετρά ένα συγκεκριμένο φυσικό μέγεθος που σχετίζεται με τη διάβρωση, αλλά δημιουργεί σε έναν κλειστό θάλαμο (θάλαμος πειραμάτων) κατάλληλες συνθήκες (εντονότερες από αυτές του περιβάλλοντος) που μπορούν να ρυθμιστούν σύμφωνα με την επιθυμία του χειριστή, ώστε να επιταχυνθεί η διάβρωση των υπό εξέταση υλικών. Συνήθως πάντως επιδιώκεται οι συνθήκες αυτές να αναπαράγουν όσο το δυνατόν πιστότερα τις επιπτώσεις των πραγματικών συνθηκών εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα και την αύξηση του ρυθμού της διάβρωσης.

Η δημιουργία των επιθυμητών συνθηκών επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση της θερμοκρασίας μέσα στο θάλαμο πειραμάτων (συνήθως μπορεί να μεταβάλλεται από 15 έως 45°C) και τον ψεκασμό κατάλληλου διαβρωτικού μέσου (συνήθως πρόκειται για υδατικό διάλυμα NaCl). Ο χαρακτηρισμός των διαβρωμένων υλικών γίνεται με άλλες τεχνικές, όπως π.χ. οπτική μικροσκοπία, ηλεκτρονική μικροσκοπία, φασματοσκοπικές μέθοδοι κλπ, που χρησιμοποιούνται και στην περίπτωση που η διάβρωση οφείλεται σε έκθεση στο φυσικό περιβάλλον.

### **Περιγραφή Συσκευής**

Η συσκευή αλατονέφωσης αποτελείται από τρία βασικά τμήματα:

#### **a. Το θάλαμο στον οποίο τοποθετούνται τα προς εξέταση υλικά (θάλαμος πειραμάτων).**

Το σημαντικότερο τμήμα της συσκευής αλατονέφωσης είναι ο θάλαμος στον οποίο τοποθετούνται τα προς εξέταση υλικά. Έχει ορθογωνική διατομή, το μέγεθός του διαφέρει ανάλογα με τον κατασκευαστή και είναι κατασκευασμένος συνήθως από πλαστικό ή από μέταλλο επικαλυμμένο με πλαστικό και στο επάνω μέρος του κλείνει με κατάλληλο κινητό κάλυμμα. Το κάλυμμα αυτό εφαρμόζει αεροστεγώς με εμβάπτιση του χείλους του σε αυλάκι με νερό (water-seal) που διατρέχει όλη την περίμετρο του θαλάμου. Ο θάλαμος πειραμάτων είναι επίσης εφοδιασμένος με:

- κατάλληλα στηρίγματα για την τοποθέτηση των δοκιμίων
- μια οπή στον πυθμένα από την οποία γίνεται η εκκένωση του νερού που συσσωρεύεται από την υγροποίηση των υδρατμών και τη συνένωση σταγονιδίων του διαβρωτικού μέσου κατά τη λειτουργία του
- μια οπή εξόδου του αέρα που χρησιμοποιείται για την εκνέφωση του διαβρωτικού μέσου, ώστε η πίεση μέσα στο θάλαμο να είναι ίδια με την ατμοσφαιρική
- κατάλληλη διάταξη για τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του. Για το σκοπό αυτό το πλευρικό τοίχωμά του είναι διπλό. Η θερμοκρασία ελέγχεται είτε με την τοποθέτηση ηλεκτρικής αντίστασης στο διάκενο του πλευρικού τοιχώματος, είτε με την κυκλοφορία ενός ρευστού (συνήθως νερό) στον ίδιο χώρο.

#### **b. Το σύστημα αποθήκευσης, τροφοδοσίας και εκνέφωσης του διαβρωτικού μέσου.**

Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει κατάλληλη δεξαμενή στο κάτω μέρος της συσκευής όπου είναι αποθηκευμένο το διαβρωτικό μέσο (διάλυμα NaCl). Από τη δεξαμενή αυτή το διαβρωτικό μέσο οδηγείται σε κατάλληλο ακροφύσιο τοποθετημένο μέσα στο θάλαμο των πειραμάτων μαζί με υγρό αέρα που προέρχεται από τον υγροποιητή. Στον υγροποιητή

παρέχεται ρεύμα αέρα υπό πίεση από εξωτερικό αεροσυμπιεστή. Καθώς αυτό το ρεύμα διέρχεται από τη συγκεκριμένη διάταξη, περνά μέσα από μια στήλη νερού ορισμένης θερμοκρασίας, οπότε θερμαίνεται στη θερμοκρασία του νερού και καθίσταται κορεσμένο σε υγρασία. Ο υγρός αέρας που παράγεται με τον τρόπο αυτό οδηγείται στο θάλαμο πειραμάτων μαζί με το διαβρωτικό μέσο μέσα από το ακροφύσιο που αναφέρθηκε προηγουμένως, οπότε αναμιγνύονται με αποτέλεσμα τελικά να δημιουργείται μία “ομίχλη” στο χώρο όπου βρίσκονται τα δοκίμια. Η ομίχλη αυτή συνιστά το κατ’ εξοχήν διαβρωτικό μέσο, από την άποψη ότι αυτή έρχεται σε άμεση επαφή με τα δοκίμια. Η θερμοκρασία της ρυθμίζεται από τη θερμοκρασία του υγρού αέρα που παράγει ο υγροποιητής.

**c. Το σύστημα ελέγχου και καταγραφής των συνθηκών μέσα στο θάλαμο πειραμάτων.**

Το σύστημα αυτό είναι το πιο εξελιγμένο από τεχνολογικής άποψης τμήμα της συσκευής αλατονέφωσης. Αποτελείται από έναν Η/Υ (που μπορεί να είναι και ενσωματωμένος στη συσκευή) και ένα μεγάλο πλήθος αισθητήρων που βρίσκεται κυρίως μέσα στο θάλαμο πειραμάτων. Ο Η/Υ καταγράφει τις ενδείξεις των αισθητήρων και τις συγκρίνει με κάποιες προδιαγεγραμμένες τιμές. Αν κάποια (ή κάποιες) ενδείξεις αποκλίνουν από τις αντίστοιχες προδιαγραφές (πέρα από κάποια ορισμένα όρια), ο Η/Υ ενεργοποιεί κατάλληλες ηλεκτρομηχανικές / ηλεκτρικές / ηλεκτρονικές διατάξεις που αποκαθιστούν τις επιθυμητές συνθήκες. Αν π.χ. ο αισθητήρας μέτρησης της θερμοκρασίας του θαλάμου πειραμάτων καταγράψει μείωση της θερμοκρασίας κάτω από ένα όριο που έχει προκαθοριστεί από το χειριστή, ο Η/Υ θέτει αυτόματα σε λειτουργία το σύστημα θέρμανσης του θαλάμου μέχρι να αποκατασταθεί το πρόβλημα.

Με τη βοήθεια του Η/Υ η αλατονέφωση είναι δυνατόν να λειτουργεί αδιάκοπα για πολλές ημέρες ακολουθώντας προδιαγεγραμμένο πρόγραμμα μεταβολής των συνθηκών του θαλάμου πειραμάτων. Ο Η/Υ μάλιστα μπορεί να αντεπεξέλθει ακόμα και σε διάφορες μικροδιαταραχές όπως παροδικές διακοπές ρεύματος, επανεκκινώντας αυτόματα μετά από ένα τέτοιο συμβάν και συνεχίζοντας τη διαδικασία από το σημείο στο οποίο διακόπηκε. Τέλος, ο Η/Υ προστατεύει τη συσκευή και από πιθανή αμέλεια του χειριστή της, όπως π.χ. την προσπάθεια εκκίνησης με κενή δεξαμενή διαβρωτικού μέσου.

Ο θάλαμος αλατονέφωσης που χρησιμοποιήθηκε σ’ αυτή τη διπλωματική είναι ο Q FOG CCT1100 (Σχήμα 3.19), της εταιρείας Q Panel και διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Ονομαστικό μέγεθος 1100l
- Χωρητικότητα με υγρό 1103l
- Χωρητικότητα χωρίς υγρό 857 l

Ο θάλαμος αλατονέφωσης είναι αρκετά μεγάλης χωρητικότητας ώστε να διασφαλίζονται ομοιογενείς συνθήκες κατανομής συνθηκών θερμοκρασίας, υγρασίας και κατανομής ψεκασμού. Τα ανώτερα μέρη, του θαλάμου σχεδιάζονται έτσι ώστε οι σταγόνες που σχηματίζονται από την αλατονέφωση στις επιφάνειές του να μην πέφτουν στα δείγματα.



**Σχήμα 7.8:** Θάλαμος αλατονέφωσης (Q FOG CCT 1100)

Τα κυριότερα μέρη του θαλάμου είναι τα εξής:

- Πίνακας ελέγχου: Οι συνθήκες δοκιμών ελέγχονται συνεχώς κατά τη διάρκεια όλης της διαδικασίας.
- Δοχείο διαλύματος άλατος: Τα 120 l εξασφαλίζουν αρκετό διάλυμα για να μπορεί να πραγματοποιηθεί αλατονέφωση έως και για 5 συνεχόμενες ημέρες.
- Στήλη φυσαλίδων (Bubble tower): Ο σκοπός αυτής της διάταξης είναι ο κορεσμός του αέρα με υγρασία πριν να φτάσει το ακροφύσιο εκνέφωσης. Για το λόγο αυτό επιτυγχάνεται κορεσμός του αέρα σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές του θαλάμου. Η θερμοκρασία και ο κορεσμός ελέγχονται αυτόματα.
- Γεννήτρια ατμού (Vapor generator): Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της υγρασίας, ο θάλαμος διατηρείται στο 100% της σχετικής υγρασίας από ατμούς που παράγονται κατά τη θέρμανση νερού στο Vapor generator.
- Συμπιεστής αέρα (Purge Blower) και Εναλλάκτης θερμότητας (Air Heater): Ο συμπιεστής αέρα ενεργοποιείται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της ξήρανσης για να φέρνει αέρα δωματίου στο θάλαμο. Όταν απαιτείται περιβάλλον υψηλότερο του εργαστηρίου, ο εναλλάκτης θερμότητας ενεργοποιείται και η ροή αέρος από τον συμπιεστή περνάει από τον ενεργοποιημένο εναλλάκτη θερμότητας στη διαδρομή του προς το θάλαμο.
- Θερμικές πλάκες: Οι δύο πλάκες είναι τοποθετημένες στον πυθμένα του θαλάμου. Χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της αλατονέφωσης. Επίσης ενεργοποιούνται, όποτε χρειάζεται, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της ξήρανσης για τη διατήρηση της προγραμματισμένης θερμοκρασίας θαλάμου.



## 8. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ

**Η** δεύτερη ενότητα της διδακτορικής διατριβής εξετάζει το βαθμό προστασίας των οργανικών επικαλύψεων έναντι διάβρωσης του οπλισμού από χλωριόντα και ενανθράκωση εξαιτίας του ότι, όπως έχει ήδη αναφερθεί και στην εισαγωγή, τα χλωριόντα και η ενανθράκωση είναι οι αιτίες για την διάβρωση του οπλισμού τόσο μόνες τους ή με συνεργιστικότητα. Για την πρώτη περίπτωση το πείραμα περιελάμβανε έκθεση των δοκιμίων: i) σε εναλλασσόμενες συνθήκες διάβρωσης με κύκλους ύγρανσης-ξηράνσης, ii) σε επιταχυνόμενες συνθήκες διάβρωσης με παραμονή σε θάλαμο αλατονέφωσης και iii) διάβρωση μακράς διάρκειας με έκθεση των δοκιμίων σε χλωριούχο διάλυμα. Για όλα τα περιβάλλοντα έκθεσης η αποτελεσματικότητα των οργανικών επικαλύψεων εκτιμήθηκε: i) με ηλεκτροχημικές μεθόδους, ii) με αποτίμηση της απώλειας μάζας των οπλισμών μετά το πέρας της έκθεσης, iii) με οπτική παρατήρηση της επιφάνειας των εγκιβωτισμένων χαλύβων μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου οπτικών ινών και iv) με μέτρηση των χλωριόντων στη μάζα των δοκιμίων με ογκομετρικές μεθόδους. Για την δεύτερη περίπτωση εξετάζεται η ενανθράκωση τόσο σε δοκίμια που είχαν εκτεθεί σε φυσικό περιβάλλον όσο και σε δοκίμια που τοποθετήθηκαν σε θάλαμο με αυξημένη συγκέντρωση CO<sub>2</sub>.

### 8.1 Ηλεκτροχημικές Μετρήσεις Αποτίμησης της Διάβρωσης

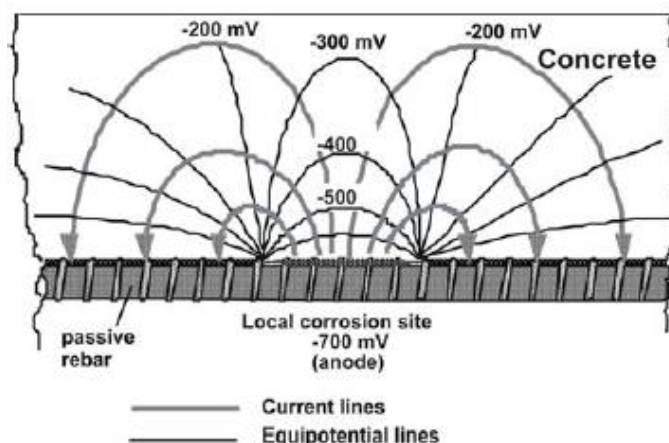
#### 8.1.1 Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης (OCP)

Η χρονική καταγραφή του δυναμικού διάβρωσης ( $E_{corr}$ ) είναι από τις πλέον συνηθισμένες τεχνικές για την αποτίμηση της διαβρωτικής κατάστασης του χάλυβα και αποτελεί μέθοδο μη καταστροφική η οποία επιτρέπει την παρακολούθηση και τον χαρακτηρισμό της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα συναρτήσει του χρόνου. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν δίνει πληροφορίες σχετικά με την κινητική της διάβρωσης, με αποτέλεσμα να γίνετε γνωστή η κατάσταση του οπλισμού αλλά όχι ο ρυθμός με τον οποίο εξελίξετε το φαινόμενο. Η τεχνική της αποτίμησης του δυναμικού διάβρωσης περιγράφεται αναλυτικά στο πρότυπο ASTM C876 - 09<sup>282</sup>.

#### *Αρχή Μεθόδου*

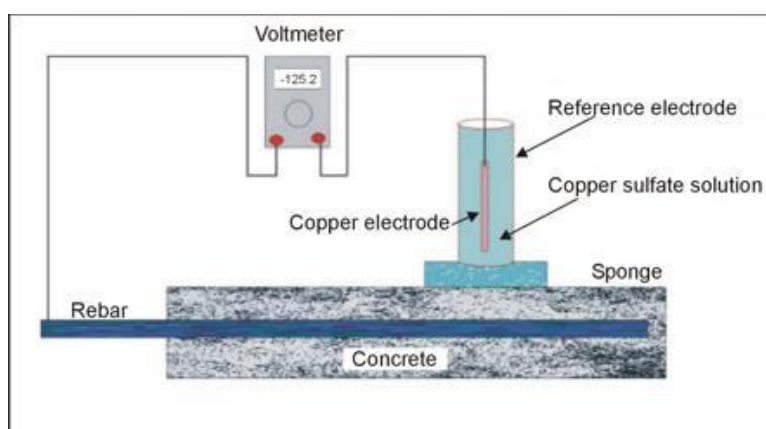
Ως δυναμικό διάβρωσης ( $E_{corr}$ ) ή δυναμικό ισορροπίας ή δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος ( $E_{OCP}$ ) ορίζεται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στον χαλύβδινο οπλισμό (ημιστοιχείο) και σε ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς (ημιστοιχείο). Οι προκύπτουσες τιμές εξαρτώνται από το ηλεκτρόδιο αναφοράς που χρησιμοποιείται και από την κατάσταση του εγκιβωτισμένου χάλυβα.

Οι τιμές του δυναμικού διάβρωσης δεν μετρώνται άμεσα στην διεπιφάνεια σκυροδέματος/οπλισμού (**Σχήμα 8.1**) λόγω της ύπαρξης του πάχους επικάλυψης του σκυροδέματος. Σαν αποτέλεσμα οι τιμές επηρεάζονται α) από την πτώση του δυναμικού (iR drop) που εμφανίζεται εξαιτίας της επικάλυψης του σκυροδέματος και β) από τα δυναμικά συνένωσης/επαγόμενα ρεύματα (junction potentials).



**Σχήμα 8.1:** Ηλεκτρικό πεδίο και ροή ρεύματος σε διαβρωμένο χάλυβα λόγω δημιουργίας μικρο-γαλβανικού στοιχείου

Όταν επιτευχθεί ηλεκτρολυτική σύνδεση ανάμεσα στον σπλισμό και σε ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς, το ηλεκτρικό κύκλωμα είναι κλειστό και το δυναμικό διάβρωσης μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια ενός βολτομέτρου μεγάλης εσωτερικής αντίστασης ώστε το ρεύμα το οποίο διέρχεται από αυτό να είναι πρακτικά μηδενικό όπως και το γινόμενο  $IR$ . Η πειραματική διάταξη στην περίπτωση του σπλισμένου σκυροδέματος για την μέτρηση του δυναμικού δίνεται στο **Σχήμα 8.2**.



**Σχήμα 8.2:** Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του σπλισμού στο σκυρόδεμα

### Ηλεκτρόδια Αναφοράς

Είναι πάντα απαραίτητο να αναφέρεται το είδος του ηλεκτροδίου αναφοράς που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης. Συνήθως στην πράξη χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια που αναφέρονται στον **Πίνακα 8.1**, όπου δίνεται και η τιμή τους έναντι του πρότυπου ηλεκτροδίου του υδρογόνου (SHE).

**Πίνακας 8.1:** Συνήθη ηλεκτρόδια αναφοράς για μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης

Ηλεκτρόδιο	Ονομασία	Δυναμικό έναντι πρότυπου ηλεκτροδίου υδρογόνου
Κεκορεσμένου χαλκού/θεικού χαλκού	CSE	+ 0,318 vs SHE
Κεκορεσμένου καλομέλανα ( $Hg/Hg_2Cl_2$ ) KCl	SCE	+ 0,241 vs SHE
Χλωριούχου αργύρου ( $Ag/AgCl$ ) KCl	SSCE	+ 0,199 vs SHE

Για επί τόπου μετρήσεις χρησιμοποιείται κυρίως το ηλεκτρόδιο κεκορεσμένου χαλκού/θεικού χαλκού εξαιτίας του ότι είναι το πιο ανθεκτικό και λόγω του ότι παρέχει



μεγάλη ακρίβεια<sup>283</sup> και επαναληψιμότητα στις μετρήσεις. Τα υπόλοιπα δύο ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται κυρίως σε εργαστηριακή κλίμακα.

### Κατάσταση οπλισμού σκυροδέματος συναρτήσει δυναμικού διάβρωσης

Η τιμή του δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα συναρτήσει του χρόνου αποτελεί ένδειξη της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα δηλαδή εάν ο χαλύβδινος οπλισμός βρίσκεται σε ενεργή ή παθητική κατάσταση. Οι τιμές όμως του δυναμικού εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως από το πάχος της επικάλυψης, την αντίσταση του σκυροδέματος (περιεχόμενη υγρασία) και την διαθεσιμότητα του οξυγόνου. Παραδείγματα εύρους τιμών δυναμικού για διάφορες συνθήκες σκυροδέματος δίνονται στον **Πίνακας 8.2**.

**Πίνακας 8.2:** Κατάσταση σκυροδέματος και εύρος τιμών δυναμικού διάβρωσης

Κατάσταση σκυροδέματος	Δυναμικό ως προς Cu/CuSO <sub>4</sub> , sat (V)
Σκυρόδεμα κορεσμένο σε νερό σε περιβάλλον απουσίας οξυγόνου	-0,9...-1,0 V
Σκυρόδεμα με υγρασία και χλωριόντα	-0,4...-0,6 V
Σκυρόδεμα με υγρασία χωρίς χλωριόντα	+0,1...-0,2 V
Ενανθρακωμένο σκυρόδεμα με υγρασία	+0,1...-0,4 V
Ξηρό ενανθρακωμένο σκυρόδεμα	+0,2...0 V
Ξηρό σκυρόδεμα	+0,2...0 V

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87<sup>1</sup> οι τιμές του μετρούμενου δυναμικού διάβρωσης, αποτελούν ένδειξη για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο οπλισμός στο σκυρόδεμα . για την περίπτωση ηλεκτροδίου κεκορεσμένου καλομέλανα οι τιμές διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον **Πίνακας 8.3**.

**Πίνακας 8.3:** Πιθανότητα διάβρωσης ανάλογα με την τιμή του δυναμικού διάβρωσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87<sup>1</sup>

Δυναμικό διάβρωσης (mV) vs SCE	Πιθανότητα διάβρωσης
>-126	Παθητική κατάσταση (90% πιθανότητα, ο οπλισμός δε διαβρώνεται)
-126 to -276	Ασαφής κατάσταση
<-276	Υψηλή (90% κίνδυνος διάβρωσης)
<-426	Διάβρωση σε εκτεταμένο βαθμό

### 8.1.2 Τεχνική Γραμμικής Πόλωσης (LPR)

Η τεχνική της γραμμικής πόλωσης είναι από τις πλέον συνηθισμένες τεχνικές για την μέτρηση των βασικών ηλεκτροχημικών παραμέτρων κατά την διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος. Η ακριβής διαδικασία της τεχνικής περιγράφεται στο πρότυπο ASTM G59 - 97(2009)<sup>284</sup>. Τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι:

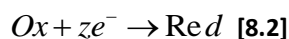
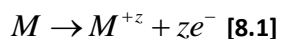
- ✓ η ταχύτητα των μετρήσεων η οποία είναι πολύ χρήσιμη ιδιαίτερα για συγκριτικά πειράματα, όπως για παράδειγμα η ποιοτική εκτίμηση διαφόρων αναστολέων
- ✓ είναι μη καταστρεπτική μέθοδος, επειδή η πόλωση που εφαρμόζεται είναι μικρή, η επιφάνεια του δοκιμίου δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα
- ✓ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ακριβείς μετρήσεις πολύ μικρών ποσοστών διάβρωσης (μικρότερων από 0.1 mpy) που είναι δύσκολο να πραγματοποιηθούν με συμβατικές τεχνικές απώλειας βάρους ή τεχνικές αναλυτικής χημείας. Η μέτρηση χαμηλών ποσοστών διάβρωσης είναι ιδιαίτερα σημαντική σε πυρηνικές,

φαρμακευτικές και σε βιομηχανίες τροφίμων όπου ακόμα και ίχνη ακαθαρσιών και μόλυνσης αποτελούν πρόβλημα

- ✓ οι μετρήσεις του ποσοστού διάβρωσης που προκύπτουν από την τεχνική αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε κατασκευές που δεν μπορούν να ελεγχθούν οπτικά ή να υποβληθούν σε δοκιμές απώλειας βάρους, όπως για παράδειγμα υπόγειοι αγωγοί και δεξαμενές ή τμήματα μεγάλων χημικών εγκαταστάσεων (εργοστασίων)
- ✓ οι ωμικές πτώσεις τάσης είναι συνήθως αμελητέες και με τη βοήθεια της ηλεκτρονικής μπορούν πρακτικά να μηδενισθούν

### Αρχή Μεθόδου

Οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις βασίζονται στην ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης και μετρούν τις ηλεκτρικές ιδιότητες της ηλεκτρισμένης διπλοστοιβάδας, δηλαδή της διεπιφάνειας μετάλλου / διαλύματος. Επιτρέπουν τη διερεύνηση του μηχανισμού της διάβρωσης, την παρακολούθηση και τον έλεγχο της. Η κινητική των ηλεκτροχημικών δράσεων ενός μετάλλου το οποίο διαβρώνεται μπορεί να προσδιοριστεί από τουλάχιστον τρεις παραμέτρους, όπως η πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης ( $i_{corr}$ , κατά Stern-Geary), το δυναμικό διάβρωσης ( $E_{corr}$ ) και οι σταθερές Tafel ( $\beta_a$  και  $\beta_c$ ). Οπότε η συμπεριφορά του μετάλλου μπορεί να απεικονιστεί από τις καμπύλες πόλωσης ( $E - I$ ). Η εκτίμηση των παραπάνω παραμέτρων οδηγεί στον προσδιορισμό της αντίστασης πόλωσης  $R_p$  και του ρυθμού διάβρωσης. Έστω ότι κατά τη διάβρωση ενός μετάλλου M ισχύει:



Από την εξίσωση Butler – Volmer η οποία παρέχει τη συμμετοχή της καθοδικής και της ανοδικής δράσης στο ρεύμα μιας αντίδρασης μεταφοράς φορτίου είναι ίσο με:

$$i = i_o \left\{ \exp\left(\frac{azF\eta}{RT}\right) - \exp\left[-\frac{(1-a)zF\eta}{RT}\right] \right\} \quad [8.3]$$

Όπου:  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία [K],  $R$  η σταθερά των αερίων,  $z$  ο αριθμός των ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων,  $a$  παράγοντας συμμετρίας,  $F$  η σταθερά Faraday.

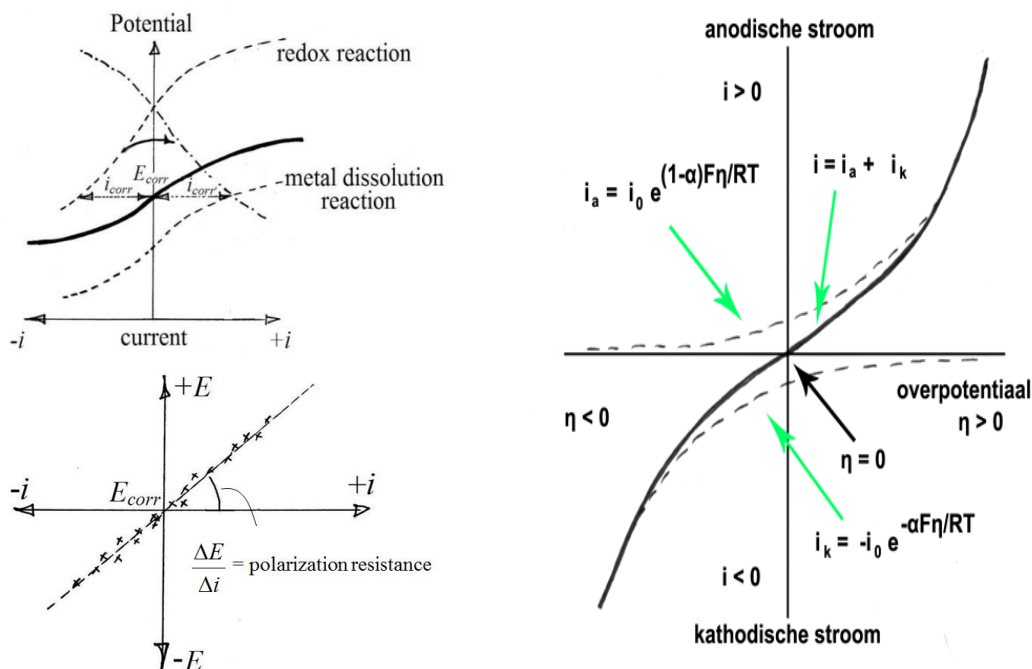
Για χαμηλές υπερτάσεις  $n=E-E_o$ , δηλαδή όταν  $\left(\frac{azF\eta}{RT}\right) \ll 1$  και  $\frac{(1-a)zF\eta}{RT} \ll 1$ , τότε οι

εκθετικοί όροι της εξίσωσης 7.2 για την ανοδική και καθοδική συνιστώσα του ολικού ρεύματος μπορούν κατά προσέγγιση να αποδοθούν από τους δύο πρώτους όρους των αντιστοιχών σειρών Taylor, δηλαδή:

$$\exp\left[-\frac{(1-a)zF\eta}{RT}\right] = 1 - \frac{(1-a)zF\eta}{RT} \quad [8.4]$$

Αν στην εξίσωση Butler –Volmer αντικαταστήσουμε τους εκθετικούς όρους με τα αναπτύγματα Taylor τότε  $i = i_o \frac{zF}{RT} n$ . Από αυτή την οριακή μορφή της εξίσωσης Butler –

Volmer φαίνεται ότι για πολύ μικρές τιμές υπέρτασης  $|\eta| \leq 10\text{mV}$  δηλαδή για δυναμικό κοντά στο δυναμικό ισορροπίας, ισχύει η γραμμική σχέση μεταξύ δυναμικού και πυκνότητας ρεύματος (Σχήμα 8.3).



Σχήμα 8.3: Ανοδική και καθοδική περιοχή των δυναμικών E συναρτήσει της πυκνότητας του ρεύματος.

Η κλίση της ευθείας αυτής για δυναμικό  $E_{corr}$  συνιστά την αντίσταση πόλωσης  $R_p$ , όπου

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} = \frac{\eta}{\Delta i} \quad [8.5]$$

Κατά τη διαδικασία της διάβρωσης, ο ρυθμός της ανοδικής και της καθοδικής δράσης αποτελούν ζεύγος αντιδράσεων στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου για συγκεκριμένη πυκνότητα ρεύματος γνωστή ως  $i_{corr}$ . Σε σταθερές συνθήκες (steady state conditions), οι πυκνότητες ρεύματος στην ισορροπία είναι  $i_a = -i_c = i_{corr}$

Όταν εφαρμόζεται πόλωση από το δυναμικό διάβρωσης, η υπέρταση σε σχέση με την ανοδική και καθοδική πυκνότητα ρεύματος είναι:

$$\eta_a = \beta_\alpha \log \left( \frac{i_a}{i_o} \right) = \beta_\alpha \log \left( \frac{i_a}{i_{corr}} \right) \quad \eta_a = \Delta E = (E - E_{corr}) > 0 \quad [8.6]$$

$$\eta_c = -\beta_c \log \left( \frac{i_c}{i_o} \right) = -\beta_c \log \left( \frac{i_c}{i_{corr}} \right) \quad \eta_c = \Delta E = E - E_{corr} < 0 \quad [8.7]$$

Λύνοντας τις Εξισώσεις 7.4 και 7.5 ως προς την ανοδική και καθοδική πυκνότητα ρεύματος τότε η συνολική πυκνότητα ρεύματος είναι:

$$i = i_a - i_c = i_{corr} \left\{ \exp \left[ \frac{2,303(E - E_{corr})}{\beta_\alpha} \right] - \exp \left[ \frac{2,303(E - E_{corr})}{\beta_c} \right] \right\} \quad [8.8]$$

Η Εξίσωση 7.6 είναι μία άλλη μορφή της εξίσωσης Butler – Volmer, η οποία ποσοτικοποιεί τις κινητικές παραμέτρους της ηλεκτροχημικής διάβρωσης.

Από την πρώτη παράγωγο της πυκνότητας ρεύματος ως προς το δυναμικό προκύπτει:

$$\left(\frac{di}{dE}\right) = 2,303i_{corr} \begin{cases} \beta_a^{-1} \exp\left[\frac{2,303(E - E_{corr})}{\beta_a}\right] \\ -\beta_c^{-1} \exp\left[-\frac{2,303(E - E_{corr})}{\beta_c}\right] \end{cases} \quad [8.9]$$

Για  $E=E_{corr}$  τότε:

$$\left(\frac{di}{dE}\right)_{E=E_{corr}} = 2,303i_{corr} \left(\frac{\beta_a + \beta_c}{\beta_a\beta_c}\right) \quad [8.10]$$

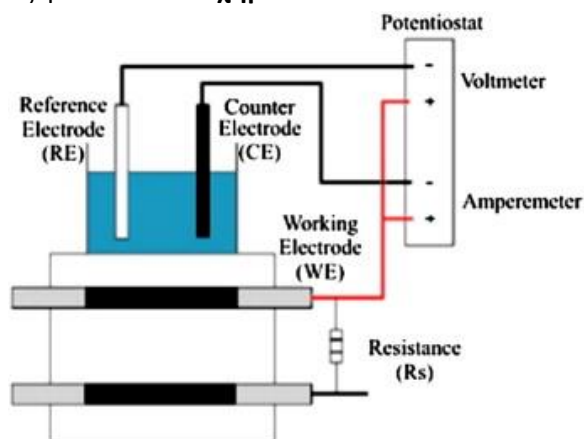
$$R_p = \left(\frac{di}{dE}\right)_{E=E_{corr}}^{-1} = \frac{\beta_a\beta_c}{2,303i_{corr}(\beta_a + \beta_c)} = \frac{B}{i_{corr}} \quad [8.11]$$

Όπου **B** σταθερά Stern - Geary ίση με  $B = \frac{\beta_a\beta_c}{2,303i_{corr}(\beta_a + \beta_c)}$  και συνδέεται με την ανοδική

$\beta_a$  και καθοδική  $\beta_c$  σταθερά Tafel. Για το οπλισμένο σκυρόδεμα οι τιμές της σταθεράς B κυμαίνονται από 26mV έως 52mV, ανάλογα την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο οπλισμός μέσα στο σκυρόδεμα (B=26 mV όταν ο οπλισμός είναι σε ενεργή κατάσταση και B=52 mV όταν ο οπλισμός είναι σε παθητική κατάσταση). Από την **Εξίσωση [8.11]** προκύπτει ότι η αντίσταση πόλωσης  $R_p$  είναι αντιστρόφως ανάλογη της πυκνότητας ρεύματος.

#### Ηλεκτροχημικό Κελί

Η τεχνική της Γραμμικής Πόλωσης συνίσταται στη σάρωση του δυναμικού σε μια περιοχή πόλωσης  $\pm 20$  mV από το δυναμικό διάβρωσης και την καταγραφή του αντίστοιχου ρεύματος. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τρία ηλεκτρόδια, όπου οι χαλύβδινοι οπλισμοί αποτελούν το ηλεκτρόδιο εργασίας, το ηλεκτρόδιο κεκορεσμένου καλομέλανα (SCE) αντιπροσωπεύει το ηλεκτρόδιο αναφοράς και οι ράβδοι άνθρακα αποτελούν το βοηθητικό ηλεκτρόδιο, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 8.4**.



Σχήμα 8.4: Πειραματική διάταξη για μέτρηση αντίστασης πόλωσης

#### Συσχέτιση των μετρήσεων γραμμικής πόλωσης με την κατάσταση του χάλυβα Ο.Σ

Το κριτήριο που παρουσιάζεται στον **Πίνακα 8.4** για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της γραμμικής πόλωσης αναπτύχθηκε με βάση εργαστηριακές δοκιμές. Δίνονται τιμές τόσο για το ρεύμα διάβρωσης όσο και για την αντίσταση πόλωσης συναρτήσει της κατάστασης του οπλισμού του σκυροδέματος.

**Πίνακας 8.4:** Συσχέτιση μεταξύ των τιμών της πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης χαλύβδινων οπλισμών σε σκυρόδεμα και της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα<sup>285</sup>

$i_{corr}$ ( $\mu\text{A cm}^{-2}$ )	$R_p$ ( $\text{k}\Omega\text{ cm}^2$ )	Κατάσταση Οπλισμού
<0,1	>260	Παθητική κατάσταση
0,1-0,5	52-260	Χαμηλός ως μέτριος ρυθμός διάβρωσης
0,5-1	26-52	Μέτριος ως υψηλός ρυθμός διάβρωσης
>1	<26	Υψηλός ρυθμός διάβρωσης

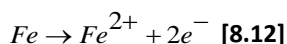
Άλλη συσχέτιση των αποτελεσμάτων της γραμμικής πόλωσης με την κατάσταση του χάλυβα Ο.Σ παρουσιάζεται στον **Πίνακας 8.5**, όπου δίνονται περισσότερες μακροχρόνιες προβλέψεις για την κατάσταση του οπλισμού. Οι μετρήσεις του ρυθμού διάβρωσης επηρεάζονται από τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία, οπότε οι συνθήκες στις οποίες πραγματοποιούνται οι μετρήσεις θα πρέπει να καθορίζονται όπου είναι εφικτό και να αναφέρονται.

**Πίνακας 8.5:** Συσχέτιση μεταξύ των τιμών της πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης χαλύβδινων οπλισμών σε σκυρόδεμα και της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα.

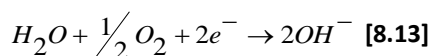
$i_{corr}$ ( $\mu\text{A cm}^{-2}$ )	Κατάσταση Οπλισμού
<0,2	Δεν αναμένονται φαινόμενα διάβρωσης
0,2-1,0	Πιθανότητα διάβρωσης σε 10-15 χρόνια
1,0- 10	Πιθανότητα διάβρωσης σε 2-10 χρόνια
>10	Πιθανότητα διάβρωσης σε 2 χρόνια ή λιγότερο

#### Προσδιορισμός του ρυθμού διάβρωσης μέσω της τεχνικής την Γραμμικής Πόλωσης (Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας)

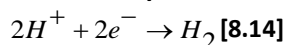
Γενικά, ένα μέταλλο το οποίο διαβρώνεται είναι ισοδύναμο με ένα κύκλωμα ή ένα κελί στο οποίο η κατανάλωση ενέργειας συμβαίνει με την παραγωγή των προϊόντων διάβρωσης. Ο ρυθμός διάβρωσης είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με ακρίβεια από τη μέτρηση της διαλυμένης ποσότητας του μετάλλου το οποίο καταναλώνεται στο μετασχηματισμό του σε οξείδιο (σκουριά). Αυτό μπορεί να γίνει άμεσα μετρώντας την πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο δημιουργείται από την ανοδική αντίδραση του σιδήρου:



και καταναλώνεται από την καθοδική αντίδραση:



ή



Μετατρέποντας τη ροή ηλεκτρονίων σε απώλεια μάζας με βάση τον νόμο του Faraday προκύπτουν τα ακόλουθα:

$$m = \frac{MIt}{zF} \quad [8.15]$$

**Όπου:**  $m$  η μάζα του μετάλλου που καταναλώνεται [g],  $I$  το ηλεκτρικό ρεύμα [A],  $t$  ο χρόνος [s],  $F$  η σταθερά Faraday [A s ή Cb/mol],  $z$  ο αριθμός ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων [ $z=2$  για την αντίδραση  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ] και  $M$  το ατομικό βάρος του μετάλλου [56 g για το Fe].

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι για πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης  $1\mu\text{A cm}^{-2}$  ισούται με απώλεια διατομής χάλυβα 11,6 $\mu\text{m}$ /έτος.

Ο ρυθμός διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα εκφράζεται σε μικρόμετρα ανά έτος [ $\mu\text{m}/\text{y}$ ], δηλαδή σε απομείωση διατομής οπλισμού. Ωστόσο πολλές φορές στη βιβλιογραφία ο ρυθμός διάβρωσης εκφράζεται δια μέσω της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος. Η

μετατροπή της απομείωσης της διατομής σε ένταση ρεύματος και αντίστροφα γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση

$$\text{Ρυθμός διάβρωσης} = \frac{i_{corr} \cdot t_a \cdot M_{Me}}{zF \cdot d_{Me}} \cdot 10^6 \quad [\mu\text{m/y}] \quad [8.16]$$

**Όπου :**  $i_{corr}$  η πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης [ $\text{A/m}^2$ ],  $t_a$  ο χρόνος έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον [s],  $M_{Me}$  το ατομικό βάρος του μετάλλου [για το Fe  $0,056\text{Kg/mol}$ ],  $z$  ο αριθμός ανταλλασόμενων ηλεκτρονίων [για το Fe,  $z=2$ ],  $F$  η σταθερά του Faraday [ $96485 \text{Cb/mol}$ ] και  $d_{Me}$ : η πυκνότητα του μετάλλου [για το Fe  $d_{Fe}=7860\text{Kg/m}^3$ ].

Πυκνότητα ρεύματος  $1\text{mA/m}^2$  επιφάνειας σιδήρου αντιστοιχεί με ρυθμό διάβρωσης  $1,16\mu\text{m/y}$ . Εάν οπλισμός ονομαστικής διαμέτρου  $16\text{mm}$  διαβρώνεται για 20 χρόνια με πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης  $100\text{mA/m}^2$ , τότε η απομείωση της διατομής του οπλισμού θα έφτανε τα  $11,4\text{mm}$ , με επακόλουθα στατικά προβλήματα της όλης κατασκευής.

## 8.2 Απώλεια Μάζας Χαλύβδινων Οπλισμών

Για τους υπολογισμούς της απώλειας μάζας των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος ως αρχικό βάρος λαμβάνεται το βάρος του δοκιμίου πριν την έκθεσή του στο διαβρωτικό περιβάλλον και ως τελικό βάρος λαμβάνεται το βάρος του οπλισμού μετά την έκθεσή του στο διαβρωτικό περιβάλλον αφού πρώτα απομακρυνθούν από αυτό υπολείμματα σκουριάς και εποξειδικών ρητινών. Η διαφορά βάρους προκύπτει από τη διαφορά της αρχικής μείον τη τελική τιμή μάζας του οπλισμού. Η εκτίμηση της διάβρωσης γίνεται με τον υπολογισμό του ποσοστού επί της εκατό της μεταβολής κατά βάρος των οπλισμών, καθώς επίσης και από τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης.

Το ποσοστό επί τοις εκατό μεταβολής κατά βάρος των οπλισμών δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta m(\%) = \frac{m_{\alpha\rho\chi} - m_{\tau\epsilon\lambda}}{m_{\alpha\rho\chi}} \cdot 100 \quad [8.17]$$

**όπου:**  $m_{\alpha\rho\chi}$  το αρχικό βάρος του οπλισμού πριν την έκθεσή του στο διαβρωτικό περιβάλλον και  $m_{\tau\epsilon\lambda}$  το τελικό βάρος του οπλισμού μετά την έκθεσή του διαβρωτικό περιβάλλον και τον καθαρισμό του.

Ο ρυθμός διάβρωσης του οπλισμού δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Ρυθμός Διάβρωσης } (\mu\text{m / year}) = \frac{8.76 \cdot 10^7 \cdot \Delta m}{A \cdot D \cdot T} \quad [8.18]$$

**Όπου:**  $\Delta m = m_{\alpha\rho\chi} - m_{\tau\epsilon\lambda}$  η διαφορά μάζας του οπλισμού [g],  $A$  η επιφάνεια του οπλισμού η οποία δίνεται από τον τύπο  $A = \pi d \left( h + \frac{d}{2} \right)$  [ $\text{cm}^2$ ],  $D$  η πυκνότητα δομικού χάλυβα ίση με  $7,8\text{g/cm}^3$ ,  $T$  ο χρόνος έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον [h].

Για τον προσδιορισμό της μάζας των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος πριν την έκθεσή τους στο περιβάλλον διάβρωσης, οι οπλισμοί καθαρίζονται με διάλυμα υδροχλωρικού οξέος που περιέχει αναστολέα διάβρωσης έτσι ώστε να απομακρυνθούν τυχόν οξείδια από την επιφάνειά τους. Στη συνέχεια οι οπλισμοί ξεπλένονται με απιονισμένο νερό και εμβαπτίζονται σε ακετόνη για την απομάκρυνση των λιπαρών ουσιών από την επιφάνειά τους. Τέλος ζυγίζονται με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου  $0,1\text{mg}$ . Η ίδια διαδικασία ακολουθείτε και μετά το σπάσιμο των δοκιμίων και τον απεγκιβωτισμό των χαλύβδινων οπλισμών.

### 8.3 Οπτικός Έλεγχος με Μικροσκοπία Οπτικών Ινών (Fiber Optic Microscopy, FOM)

Οι οπτικές επικοινωνίες χρησιμοποιούν φως αντί ηλεκτρικού ρεύματος ως φορέα των σημάτων και οπτικές ίνες αντί μεταλλικών αγωγών για τη μετάδοσή του. Το προς μετάδοση ηλεκτρικό σήμα (εικόνα, δεδομένα, κλπ) μετατρέπεται στο ένα άκρο της οπτικής ζεύξης σε ακολουθία ψηφιακών παλμών που διοχετεύονται στην οπτική ίνα. Στο άλλο άκρο της ζεύξης ανιχνεύονται οι παλμοί και μετατρέπονται στο αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα.

Η οπτική ίνα αποτελείται από υαλώδη κυλινδρικό πυρήνα και περίβλημα από το ίδιο το υλικό με ελαφρά μικρότερο δείκτη διάθλασης από αυτόν του πυρήνα. Αυτό έχει ως συνέπεια, όταν η ακτίνα φωτός εισέρχεται στην ίνα υπό κατάλληλη γωνία, να ανακλάται διαδοχικά στο περίβλημα και να μεταδίδεται παγιδευμένη στην ίνα. Σε μια οπτική ίνα η διάδοση της ενέργειας μπορεί να περιγραφεί από τη τιμή κανονικοποιημένης συχνότητας  $V$ :

$$V = 2\pi \left(\frac{a_1}{\lambda}\right) \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} = 2\pi A_n \frac{a_1}{\lambda} \quad [8.19]$$

**Όπου:**  $a_1$  η ακτίνα του πυρήνα,  $n_1$  και  $n_2$  δείκτες διάθλασης του πυρήνα και του περιβλήματος αντίστοιχα,  $\lambda$  το μήκος κύματος της φωτεινής πηγής και  $A_n$  το αριθμητικό διάφραγμα.

Το αριθμητικό διάφραγμα  $A_n$  αποτελεί μέτρο της ικανότητας συλλογής φωτός και είναι συνάρτηση του δείκτη διάθλασης του μέσου που παρεμβάλλεται ανάμεσα στο δείγμα και το φακό.

Η μικροσκοπία οπτικών ινών αποτελεί νέα μέθοδο για την εξέταση επιφανειών μεταλλικών και μη. Χρησιμοποιείται για την αναγνώριση και εκτίμηση των τύπων φθοράς, την εκτίμηση των αποτελεσμάτων εφαρμογών μεθόδων συντήρησης, καθαρισμού και προστασίας επιφανειών. Επίσης χρησιμοποιείται για την αρχική εκτίμηση της μικροδομής του υλικού (μεγέθυνση έως και  $\times 600$ ), την επί τόπου παρατήρηση συνθέτων υλικών όπως κονιάματα, μεταλλικά επιστρώματα κ.α., διεπιφανειακών φαινομένων, κ.λ.π. Ο συνδυασμός της μικροσκοπίας οπτικών ινών και της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας βοηθά τη χαρτογράφηση των φθορών και την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις κατασκευές<sup>286</sup>.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της μικροσκοπίας οπτικών ινών είναι ότι το μικροσκόπιο είναι φορητή διάταξη. Αυτό επιτρέπει την επί τόπου εξέταση των δειγμάτων ή ολόκληρης της επιφάνειας της υπό εξέταση κατασκευής. Επιπρόσθετα η μικροσκοπία οπτικών ινών είναι μια μη καταστροφική μέθοδος εφαρμόζεται χωρίς να απαιτείται προκατεργασία ή αλλοίωση των υπό εξέταση δειγμάτων ή της επιφάνειας.

Το σημαντικότερο τμήμα του μικροσκοπίου οπτικών ινών είναι οι φακοί των οπτικών ινών. Συγκεκριμένα χρησιμοποιεί και ως φωτεινή πηγή λευκό φως, ειδικότερα λάμπα αλογόνου. Το λευκό φως χαρακτηρίζεται από μήκη κύματος από 400nm έως 760nm περίπου. Επειδή τα χαρακτηριστικά μεγέθη του πλέγματος των κρυστάλλων του προς παρατήρηση υλικού κυμαίνονται από 0,15 μέχρι 2nm, είναι δηλαδή τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερα, οι κρύσταλλοι φαίνονται ως συνεχές μέσον όταν φωτίζονται από λευκό φως. Οι οπτικές ιδιότητες των άμορφων και των κρυσταλλικών σωμάτων οφείλονται στην αλληλεπίδραση τους με το προσπίπτον φως. Τα κύρια φαινόμενα που καθορίζουν αυτήν την αλληλεπίδραση είναι η ανάκλαση, η διάθλαση και η απορρόφηση. Τα φαινόμενα αυτά εξηγούνται στην



οπτική μικροσκοπία με βάση τις εξισώσεις του Maxwell για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Η φωτεινή πηγή περιγράφεται σαν ένας απλός αρμονικός ταλαντωτής που χαρακτηρίζεται από τις μεταβολές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου στο χώρο και στο χρόνο. Όλες οι σχέσεις που διέπουν την οπτική μικροσκοπία βασίζονται στην πόλωση του φωτός που επιτυγχάνεται με τα πρίσματα Nicols. Στη μικροσκοπία οπτικών ινών χρησιμοποιείται, όμως, λευκό φως που δεν είναι ούτε πολωμένο ούτε μονοχρωματικό, το γεγονός που κάνει αδύνατη την ποσοτικοποίηση των συμπερασμάτων που εξάγονται. Αυτό φυσικά δεν αναιρεί την ποιοτική σημασία των παρατηρήσεων.

Τα κυριότερα τμήματα της συσκευής είναι:

- ⊕ Λάμπα αλογόνου, Ισχύς λειτουργίας 100W.
- ⊕ Σύστημα ελέγχου έντασης φωτός. Η ποσότητα φωτός που ανακλάται από το αντικείμενο εξαρτάται από το χρώμα και το υλικό του δείγματος. Το μικροσκόπιο αυτόματα προσαρμόζει την ένταση του φωτός της λάμπας έτσι ώστε να υπάρχει ένα σταθερό πεδίο φωτεινότητας στη λαμβανόμενη εικόνα.
- ⊕ Σύστημα εστίασης.
- ⊕ Αντικειμενικοί φακοί. Οι φακοί συνδέονται στο σύστημα μετάδοσης εικόνας μέσω οπτικών ινών.

Κατά τη διαδικασία της μικροσκοπικής εξέτασης το φως πρέπει να πέφτει κατακόρυφα στην επιφάνεια του δείγματος και ανακλάται διαμέσου των αντικειμενικών φακών. Χαρακτηριστικά της επιφάνειας, σε θέσεις πλάγιες σχετικά με τη δέσμη φωτός εμφανίζουν μεγαλύτερη αντίθεση από την υπόλοιπη εικόνα.

Το μικροσκόπιο οπτικών ινών διαθέτει έξοδο τυποποιημένου βίντεο σήματος (PAL), που παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης με video, οθόνη (monitor), συσκευή εγγραφής (recorder). Οι εικόνες καταγράφονται σε μαγνητικό μέσο και έτσι μπορούν να αναπαραχθούν με ευκολία στο βίντεο. Η τυποποιημένη έξοδο σήματος επιτρέπει την εισαγωγή της εικόνας σε υπολογιστή και κατ' επέκταση σε σύστημα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, παρέχοντας περαιτέρω δυνατότητες επεξεργασίας<sup>287</sup>.

#### 8.4 Μέτρηση ιόντων χλωρίου στη μάζα των δοκιμίων

Η μέτρηση των ιόντων χλωρίου συνήθως επιτυγχάνετε με μεθόδους αργυρομετρίας, οι οποίες αποτελούν τις σπουδαιότερες ογκομετρικές μεθόδους καταβύθισης. Με τον όρο αργυρομετρία αναφέρονται στην Αναλυτική Χημεία όλες οι μέθοδοι τιτλοδότησης και καταβύθισης στις οποίες χρησιμοποιείται διάλυμα ιόντων αργύρου ( $\text{Ag}^+$ ). Είναι μέθοδοι ακριβής, απλές και οικονομικές και βρίσκουν ευρεία χρήση στη μέτρηση των ποσοστών των ιόντων χλωρίου. Διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες και οι σπουδαιότερες είναι: i) Μέθοδος Mohr, ii) Μέθοδος Volhard και iii) Μέθοδος Fajans. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή επιλέχθηκε η αποτίμηση των χλωριόντων με τη μέθοδο Mohr λόγω της ευκολίας της και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

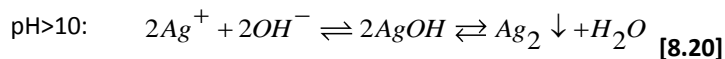
##### **Μέθοδος Mohr** (Σχηματισμός έγχρωμου ιζήματος)

Η μέθοδος Mohr αναπτύχθηκε το 1856 από το Γερμανό χημικό Karl Friedrich Mohr και εφαρμόζεται σε ουδέτερα ή ελαφρώς αλκαλικά διαλύματα. Είναι από τις πιο παλιές αναλυτικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται και σήμερα και αναφέρεται στον προσδιορισμό των  $\text{Cl}^-$  με πρότυπο διάλυμα νιτρικού αργύρου παρουσία μικρής αλλά καθορισμένης

ποσότητας  $K_2CrO_4$  (δείκτης). Ο  $AgCl$  είναι λιγότερο διαλυτός από τον  $Ag_2CrO_4$  γι' αυτό και τα  $Ag^+$  που προστίθενται καταβυθίζονται σαν  $AgCl$  μέχρι το ισοδύναμο σημείο (Ι.Σ.). Μετά το ισοδύναμο σημείο η περίσσεια  $Ag^+$  σχηματίζει  $Ag_2CrO_4$  που έχει χρώμα καστανοκόκκινο με αποτέλεσμα να αναγνωρίζεται το τελικό σημείο της ογκομέτρησης.

Η μέθοδος Mohr χρησιμοποιείται με τις εξής προϋποθέσεις:

- Η συγκέντρωση του δείκτη πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 0,0001 και 0,0003M.
- Το pH πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 6,3 και 10. Όταν το pH είναι εκτός των παραπάνω τιμών τότε:



Οπότε στο ισοδύναμο σημείο σχηματίζεται ευδιάλυτος  $Ag_2Cr_2O_7$  και γι' αυτό θα χρειαζόταν πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση  $Ag^+$  για τον σχηματισμό ιζήματος με αποτέλεσμα μεγαλύτερο σφάλμα ογκομέτρησης.

- Πολλά ξένα ιόντα παρεμποδίζουν τον προσδιορισμό γι' αυτό δεν πρέπει να υπάρχουν έγχρωμα κατιόντα (π.χ.  $Cu^{+2}$ ), κατιόντα που σχηματίζουν σύμπλοκα (π.χ.  $Sn^{+4}$ ) με τα  $Cl^-$  και ιόντα που ανάγουν το  $Ag^+$  σε  $Ag^0$  όπως π.χ. ο  $Fe^{+2}$ .

### 8.5 Αποτίμησης του Βάθους Ενανθράκωσης

Το βάθος ενανθράκωσης του σκυροδέματος εύκολα προσδιορίζεται με ψεκάσμο δοκιμίων σκυροδέματος με διάλυμα δείκτη φαινολοφθαλεΐνης σύμφωνα με τη μέθοδο **RILEM CPC-18**. Μαζί με το βάθος ενανθράκωσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και το πάχος επικάλυψης των οπλισμών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση του κατά πόσο το μέτωπο της ενανθράκωσης έχει φτάσει στην επιφάνεια των οπλισμών. Ο δείκτης φαινολοφθαλεΐνης παραμένει άχρωμος στην περίπτωση ενανθρακωμένου σκυροδέματος και παίρνει χρώμα ροζ όταν το σκυρόδεμα είναι ακόμα αλκαλικό. Ο καλύτερος δείκτης για τη μέγιστη χρωματική απόδοση στο σκυρόδεμα είναι διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης σε αλκοόλη και νερό. Συνήθως χρησιμοποιείται 1g δείκτη σε 100 ml αλκοόλης/ νερού (μίγμα 50:50) ή περισσότερη αλκοόλη από το νερό. Εάν το σκυρόδεμα βρίσκεται σε πολύ ξηρή κατάσταση τότε για καλύτερη χρωματική ένδειξη του δείκτη συνιστάται ελαφρά διαβροχή του σκυροδέματος. Επίσης θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην παιπάλη η οποία δημιουργείται κατά την κοπή δειγμάτων σκυροδέματος και για αυτό το λόγο συνιστάται απομάκρυνση της από την επιφάνεια του δοκιμίου. Άλλοι δείκτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ενανθράκωσης είναι η Alizarin κίτρινη. Ωστόσο ο δείκτης φαινολοφθαλεΐνης δίνει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Η αλλαγή του χρώματος του δείκτη φαινολοφθαλεΐνης πραγματοποιείται για pH ίσο με 9. Αυτό αποτελεί πολλές φορές μειονέκτημα στη χρήση του για την εκτίμηση του βαθμού ενανθράκωσης και αποπαθητικοποίησης λόγω του ότι το ο χάλυβας αποπαθητικοποιείται στο σκυρόδεμα για  $pH=9,5$ . Εάν το μέτωπο της ενανθράκωσης έχει πλάτος 5 έως 10mm, τότε ο χάλυβας μπορεί να έχει αποπαθητικοποιηθεί 5mm μακρύτερα από την αλλαγή του χρώματος του δείκτη. Επίσης τα αδρανή πολλές φορές μπερδεύουν την ένδειξη του δείκτη. Πολλά σκυροδέματα έχουν σκούρες αποχρώσεις, οπότε και πάλι ο προσδιορισμός του χρώματος γίνεται δύσκολος.



## 9. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι η μελέτη της ανθεκτικότητας των οργανικών επικαλύψεων ως προστατευτικά επιστρώματα σκυροδέματος μέσω της εκτίμησης βασικών φυσικοχημικών και μηχανικών παραμέτρων. Τόσο οι φυσικοχημικές όσο και οι μηχανικές ιδιότητες των χρωμάτων επηρεάζουν έμμεσα την προστατευτική τους ικανότητα απέναντι στη διάβρωση του οπλισμού και αποτελούν βασικούς παράγοντες στην διαδικασία επιλογής επιστρωμάτων για τις διάφορες κατασκευές από Ο.Σ.

### 9.1 Υλικά και Μέθοδοι Εκτίμησης

Όσον αφορά τις φυσικοχημικές ιδιότητες, προσδιορίστηκε η διαπερατότητα σε νερό, υδρατμούς και ιόντα χλωρίου και προσδιορίστηκε και ο συντελεστής διάχυσης σε CO<sub>2</sub> για όλα τα συστήματα των επικαλύψεων.

Αναφορικά με τις μηχανικές ιδιότητες, εξετάστηκε η πρόσφυση στην επιφάνεια του σκυροδέματος με τη μέθοδο της σταυροειδούς χάραξης και τη μέθοδο pull off καθώς και η αντοχή των επιστρωμάτων σε θάλαμο αλατονέφωσης.

Τα συστήματα επικαλύψεων που εκτιμήθηκαν ήταν: α) συμβατικά χρώματα, β) χρώματα ειδικών εφαρμογών και γ) χρώματα νανοτεχνολογίας. Για τον προσδιορισμό των φυσικοχημικών και μηχανικών ιδιοτήτων των χρωμάτων ακολουθήθηκαν τα αντίστοιχα πρότυπα και η πειραματική διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφ.7.

### 9.2 Μετρήσεις – Αποτελέσματα

#### 9.2.1 Υδατοπερατότητα

Η μέτρηση της υδατοπερατότητας των οργανικών επικαλύψεων έγινε σύμφωνα με το πρότυπο DIN EN 1062-3 (2008-04) όπου υπολογίζεται ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης της επίστρωσης  $w$  (kg/m<sup>2</sup>·√h), όπως περιγράφεται στην ενότητα 7.1.1.

Οι επικαλύψεις επιστρώθηκαν σε δοκίμια άοπλου τσιμεντοκονιάματος όπου οι ακριανές πλευρές είχαν αποκοπεί με σκοπό την αποφυγή του φαινομένου της συγκέντρωσης των αδρανών. Το πάχος του φιλμ των επικαλύψεων ήταν περίπου 200μm και για κάθε υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια όπως ορίζει το πρότυπο.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις συνθήκες που ορίζονται στο πρότυπο EN-1062-3 και ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης προσδιορίστηκε από τη διαφορά βάρους στους χρονικούς κύκλους των δοκιμών. Οι μέσοι όροι προέκυψαν από τη μέτρηση 6 δοκιμών για κάθε οργανική επικάλυψη και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες όπου δίνεται και η κατηγορία στην οποία κατατάσσετε η κάθε επίστρωση ανάλογα με την τιμή του συντελεστή υδατοαπορρόφησης.

Πίνακας 9.1: Μέσος όρων τιμών υδατοαπορρόφησης για συμβατικές οργανικές επικαλύψεις

Κατηγορία 1: Συμβατικές Οργανικές Επικαλύψεις			
Κωδικός Χρώματος	Συντελεστής υδατοαπορρόφησης w (kg/m <sup>2</sup> √h)	Μ.Ο. Συντελεστή υδατοαπορρόφησης w (kg/m <sup>2</sup> √h)	Κατηγορία υδατοπερατότητας με βάση το πρότυπο DIN EN 1062-3
Acr1_1	0,3816	0,3846±0,02	Κατηγορία II (μέτρια)
Acr1_2	0,3615		
Acr1_3	0,3739		
Acr1_4	0,3945		
Acr1_5	0,4151		
Acr1_6	0,3811		
Acr2_1	0,4592	0,4744±0,01	Κατηγορία I (υψηλή)
Acr2_2	0,4819		
Acr2_3	0,4599		
Acr2_4	0,4812		
Acr2_5	0,4842		
Acr2_6	0,4799		
Acr3_1	0,3749	0,3426±0,02	Κατηγορία II (μέτρια)
Acr3_2	0,3676		
Acr3_3	0,3217		
Acr3_4	0,3213		
Acr3_5	0,3402		
Acr3_6	0,3301		
Acr_sil_1	0,5399	0,5256±0,02	Κατηγορία I (υψηλή)
Acr_sil_2	0,5201		
Acr_sil_3	0,5365		
Acr_sil_4	0,5265		
Acr_sil_5	0,5438		
Acr_sil_6	0,4869		
Acr_glas_1	0,2509	0,2500±0,02	Κατηγορία II (μέτρια)
Acr_glas_2	0,2141		
Acr_glas_3	0,2782		
Acr_glas_4	0,2513		
Acr_glas_5	0,2608		
Acr_glas_6	0,2449		
Acr_cem_1	0,3122	0,3000±0,02	Κατηγορία II (μέτρια)
Acr_cem_2	0,3296		
Acr_cem_3	0,2875		
Acr_cem_4	0,2862		
Acr_cem_5	0,2835		
Acr_cem_6	0,3011		
Acr_rel_1	0,2468	0,2308±0,02	Κατηγορία II (μέτρια)
Acr_rel_2	0,222		
Acr_rel_3	0,2518		
Acr_rel_4	0,2076		
Acr_rel_5	0,2385		
Acr_rel_6	0,2181		
Elast_horz_1	0,2455	0,2487±0,01	Κατηγορία II (μέτρια)
Elast_horz_2	0,2381		
Elast_horz_3	0,2691		
Elast_horz_4	0,2572		
Elast_horz_5	0,2271		
Elast_horz_6	0,2551		
Elast_vert_1	0,1839	0,1731±0,02	Κατηγορία II (μέτρια)
Elast_vert_2	0,1964		
Elast_vert_3	0,1521		
Elast_vert_4	0,1677		
Elast_vert_5	0,1779		
Elast_vert_6	0,1603		
Plast1_1	0,2210	0,2033±0,02	Κατηγορία II (μέτρια)
Plast1_2	0,2301		
Plast1_3	0,1863		
Plast1_4	0,1933		
Plast1_5	0,2151		
Plast1_6	0,1737		
Plast2_1	0,2102	0,2000±0,01	Κατηγορία II (μέτρια)
Plast2_2	0,1988		
Plast2_3	0,2114		
Plast2_4	0,2044		
Plast2_5	0,1843		
Plast2_6	0,1912		

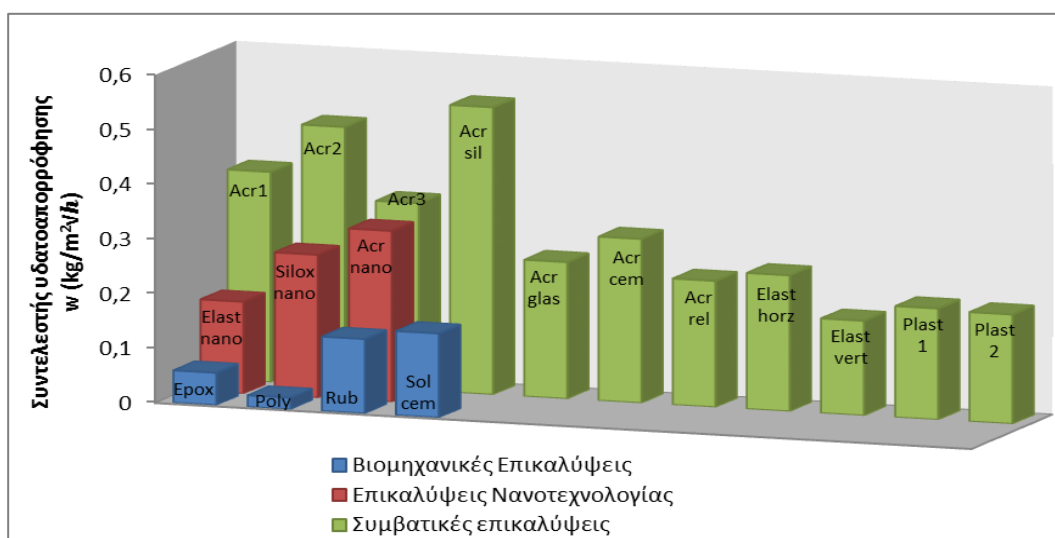
**Πίνακας 9.2:** Μέσος όρων τιμών υδατοαπορρόφησης για βιομηχανικές οργανικές επικαλύψεις

Κατηγορία 2:Επικαλύψεις Βιομηχανικών Εφαρμογών			
Κωδικός Χρώματος	Συντελεστής υδατοαπορρόφησης $w$ ( $\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{h}$ )	Μ.Ο Συντελεστή υδατοαπορρόφησης $w$ ( $\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{h}$ )	Κατηγορία υδατοπερατότητας με βάση το πρότυπο DIN EN 1062-3
Erox_1	0,055	0,0590±0,003	Κατηγορία III (χαμηλή)
Erox_2	0,061		
Erox_3	0,062		
Erox_4	0,057		
Erox_5	0,061		
Erox_6	0,058		
Poly_1	0,023	0,0210±0,002	Κατηγορία III (χαμηλή)
Poly_2	0,020		
Poly_3	0,019		
Poly_4	0,022		
Poly_5	0,021		
Poly_6	0,018		
Rub_1	0,138	0,1360±0,02	Κατηγορία II (μέτρια)
Rub_2	0,134		
Rub_3	0,140		
Rub_4	0,133		
Rub_5	0,135		
Rub_6	0,137		
Sol_cem_1	0,1823	0,1538±0,02	Κατηγορία II (μέτρια)
Sol_cem_2	0,1337		
Sol_cem_3	0,1472		
Sol_cem_4	0,1509		
Sol_cem_5	0,1391		
Sol_cem_6	0,1698		

**Πίνακας 9.3:** Μέσος όρων τιμών υδατοαπορρόφησης για οργανικές επικαλύψεις νανοτεχνολογίας

Κατηγορία 3:Επικαλύψεις με Προϊόντα Νανοτεχνολογίας			
Κωδικός Χρώματος	Συντελεστής υδατοαπορρόφησης $w$ ( $\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{h}$ )	Μ.Ο Συντελεστή υδατοαπορρόφησης $w$ ( $\text{kg}/\text{m}^2\sqrt{h}$ )	Κατηγορία υδατοπερατότητας με βάση το πρότυπο DIN EN 1062-3
Silox_nano_1	0,2745	0,2615±0,01	Κατηγορία II (μέτρια)
Silox_nano_2	0,2817		
Silox_nano_3	0,2581		
Silox_nano_4	0,2433		
Silox_nano_5	0,2578		
Silox_nano_6	0,2534		
Acr_nano_1	0,3198	0,3128±0,01	Κατηγορία II (μέτρια)
Acr_nano_2	0,3235		
Acr_nano_3	0,2981		
Acr_nano_4	0,3154		
Acr_nano_5	0,3155		
Acr_nano_6	0,3044		
Elast_nano_1	0,1633	0,1679±0,01	Κατηγορία II (μέτρια)
Elast_nano_2	0,1793		
Elast_nano_3	0,1891		
Elast_nano_4	0,1629		
Elast_nano_5	0,1544		
Elast_nano_6	0,1583		

Στο **Σχήμα 9.1** παρουσιάζετε η συγκριτική συμπεριφορά των επικαλύψεων αναφορικά με την υδατοπερατότητά τους. Όπως προκύπτει από τις τιμές του συντελεστή υδατοαπορρόφησης, οι περισσότερες οργανικές επικαλύψεις κατατάσσονται στην Κατηγορία II, είναι δηλαδή μετρίως υδατοαπορροφητικές με  $w$  μεταξύ 0,1 και 0,5  $\text{kg/m}^2\sqrt{h}$ , ενώ οι βιομηχανικές επικαλύψεις παρουσιάζουν αρκετά μικρότερες τιμές. Αναφορικά με τις επικαλύψεις νανοτεχνολογίας, παρατηρείται ότι κατατάσσονται στην Κατηγορία II (μετρίως υδατοαπορροφητικές) και ότι τα νανο-χρώματα επιδεικνύουν χαμηλότερες τιμές από τις αντίστοιχες συμβατικές επικαλύψεις, δηλαδή το ακρυλικό νανοτεχνολογίας έχει μικρότερο συντελεστή υδατοαπορρόφησης από το αντίστοιχο συμβατικό ακρυλικό, όπως και η ελαστομερής επικάλυψη με σύστημα νανοτεχνολογίας να παρουσιάζει μικρότερη τιμή από την συμβατική ελαστομερή επικάλυψη. Η υδατοπερατότητα αποτελεί μία σημαντική παράμετρο για τις οργανικές επικαλύψεις όσον αφορά την προστατευτική τους επίδραση καθώς όπως είναι γνωστό χωρίς την παρουσία του νερού διάβρωση σημαντική δεν υπάρχει.



**Σχήμα 9.1:** Συγκριτικό διάγραμμα μέσω όρων συντελεστή υδατοαπορρόφησης  $w$  για όλες τις επικαλύψεις ανά κατηγορία

### 9.2.2 Υδρατμοπερατότητα

Η διαπερατότητα σε υδρατμούς προσδιορίστηκε σύμφωνα με το πρότυπο DIN EN ISO 7783-2, όπου υπολογίζεται ο ρυθμός υδρατμοπερατότητας  $V$  ( $\text{g/m}^2\cdot\text{d}$ ), όπως περιγράφεται στην παράγραφο 7.1.2.

Οι επικαλύψεις επιστρώθηκαν σε πορώδες υπόστρωμα και για κάθε επικάλυψη χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια όπως ορίζει το πρότυπο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις συνθήκες που ορίζονται στο πρότυπο DIN EN ISO 7783-2 και ο ρυθμός υδρατμοπερατότητας προσδιορίστηκε από την αύξηση βάρους στους χρονικούς κύκλους των δοκιμών. Οι μέσοι όροι που προέκυψαν παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες όπου δίνεται και η κατηγορία στην οποία κατατάσσετε η κάθε επίστρωση ανάλογα με το ρυθμό υδρατμοπερατότητας. Δίνεται επίσης η τιμή του ισοδύναμου πάχους αέρα των χρωμάτων,  $S_d$  (m), εφόσον αποτελεί σημαντική παράμετρο για τον χαρακτηρισμό των χρωμάτων.



Πίνακας 9.4: Μέσος όρος ρυθμού υδρατμοπερατότητας συμβατικών οργανικών επικαλύψεων

Κατηγορία 1: Συμβατικές Οργανικές Επικαλύψεις				
Κωδικός Χρώματος	Ρυθμός υδρατμοπερατότητας $V$ [ $g/(m^2 \cdot d)$ ]	Μ.Ο. Ρυθμού υδρατμοπερατότητας $V$ [ $g/(m^2 \cdot d)$ ]	Ισοδύναμο πάχος αέρα $S_d$ (m)	Κατηγορία υδρατμοπερατότητας με βάση το πρότυπο DIN EN ISO 7783-2
Acr1_1	187,4722	174,9545±12,52	0,12	Κατηγορία I (υψηλή)
Acr1_2	166,9564			
Acr1_3	153,8427			
Acr1_4	184,2921			
Acr1_5	179,8856			
Acr1_6	177,2780			
Acr2_1	471,9432	450,0682±19,15	0,05	Κατηγορία I (υψηλή)
Acr2_2	442,5496			
Acr2_3	458,1299			
Acr2_4	461,5575			
Acr2_5	449,3480			
Acr2_6	416,8810			
Acr3_1	129,8433	122,3875±10,67	0,17	Κατηγορία II (μέτρια)
Acr3_2	112,8700			
Acr3_3	132,6477			
Acr3_4	111,6455			
Acr3_5	113,6736			
Acr3_6	133,6449			
Acr_sil_1	331,8543	319,7500±15,96	0,07	Κατηγορία I (υψηλή)
Acr_sil_2	308,6635			
Acr_sil_3	317,5322			
Acr_sil_4	295,4812			
Acr_sil_5	339,0362			
Acr_sil_6	325,9326			
Acr_glas_1	31,4562	28,0531±4,29	0,75	Κατηγορία II (μέτρια)
Acr_glas_2	23,9712			
Acr_glas_3	22,8779			
Acr_glas_4	27,0166			
Acr_glas_5	29,0455			
Acr_glas_6	33,9512			
Acr_cem_1	144,4569	143,8636±3,21	0,15	Κατηγορία II (μέτρια)
Acr_cem_2	145,8560			
Acr_cem_3	148,9225			
Acr_cem_4	140,3364			
Acr_cem_5	142,3811			
Acr_cem_6	141,2287			
Acr_rel_1	56,9225	53,3409±4,12	0,39	Κατηγορία II (μέτρια)
Acr_rel_2	59,7241			
Acr_rel_3	52,6501			
Acr_rel_4	51,4104			
Acr_rel_5	50,0043			
Acr_rel_6	49,3340			
Elast_horz_1	239,0056	215,8864±18,94	0,10	Κατηγορία I (υψηλή)
Elast_horz_2	190,9466			
Elast_horz_3	213,8474			
Elast_horz_4	232,8439			
Elast_horz_5	197,9329			
Elast_horz_6	220,7420			
Elast_vert_1	168,4922	171,6364±3,12	0,12	Κατηγορία I (υψηλή)
Elast_vert_2	172,5530			
Elast_vert_3	172,3386			
Elast_vert_4	169,8341			
Elast_vert_5	169,5006			
Elast_vert_6	177,0999			
Plast1_1	101,7399	116,5200±10,06	0,18	Κατηγορία II (μέτρια)
Plast1_2	127,9422			
Plast1_3	125,0000			
Plast1_4	110,7418			
Plast1_5	121,9422			
Plast1_6	111,7539			
Plast2_1	233,7544	231,0700±14,30	0,09	Κατηγορία I (υψηλή)
Plast2_2	240,4117			

Plast2_3	218,6400			
Plast2_4	212,8320			
Plast2_5	228,8370			
Plast2_6	251,9449			

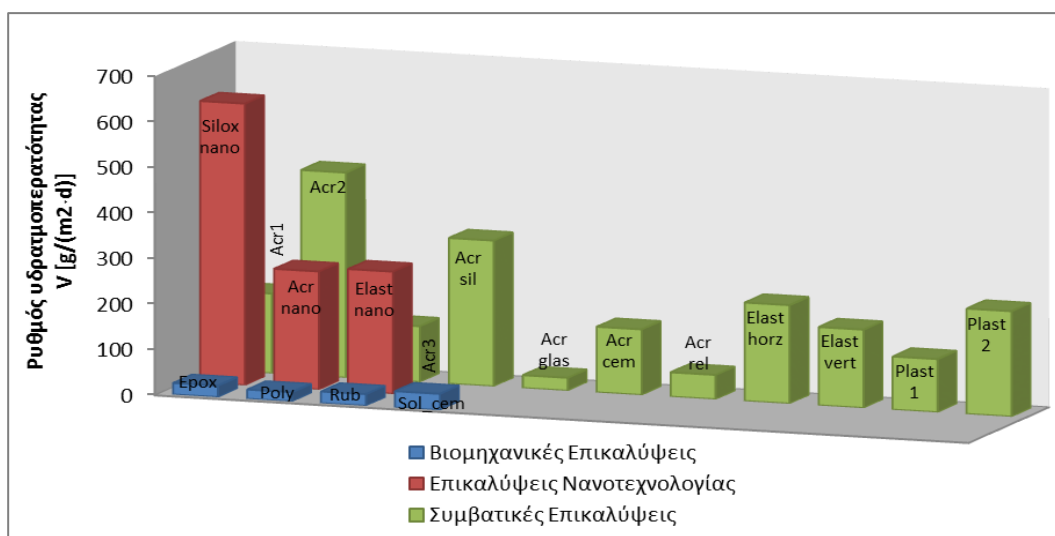
Πίνακας 9.5: Μέσος όρος ρυθμού υδρατμοπερατότητας βιομηχανικών οργανικών επικαλύψεων

Κατηγορία 2:Επικαλύψεις Βιομηχανικών Εφαρμογών				
Κωδικός Χρώματος	Ρυθμός υδρατμοπερατότητας V [g/(m <sup>2</sup> ·d)]	Μ.Ο. Ρυθμού υδρατμοπερατότητας V [g/(m <sup>2</sup> ·d)]	Ισοδύναμο πάχος αέρα S <sub>d</sub> (m)	Κατηγορία υδρατμοπερατότητας με βάση το πρότυπο DIN EN ISO 7783-2
Erox_1	30,3100	25,1801±3,84	0,83	Κατηγορία II (μέτρια)
Erox_2	20,5289			
Erox_3	29,3711			
Erox_4	22,8430			
Erox_5	24,1277			
Erox_6	23,8999			
Poly_1	22,8154	20,1914±1,80	1,04	Κατηγορία II (μέτρια)
Poly_2	20,0144			
Poly_3	17,7166			
Poly_4	19,3277			
Poly_5	19,6210			
Poly_6	21,6533			
Rub_1	25,9722	25,3363±3,06	0,83	Κατηγορία II (μέτρια)
Rub_2	24,0156			
Rub_3	22,7644			
Rub_4	23,3194			
Rub_5	24,8110			
Rub_6	31,1352			
Solv_cem_1	36,9925	35,4773±1,57	0,59	Κατηγορία II (μέτρια)
Solv_cem_2	34,9029			
Solv_cem_3	33,7522			
Solv_cem_4	34,6833			
Solv_cem_5	37,8210			
Solv_cem_6	34,7119			

Πίνακας 9.6: Μέσος όρος ρυθμού υδρατμοπερατότητας οργανικών επικαλύψεων νανοτεχνολογίας

Κατηγορία 3:Επικαλύψεις με Προϊόντα Νανοτεχνολογίας				
Κωδικός Χρώματος	Ρυθμός υδρατμοπερατότητας V [g/(m <sup>2</sup> ·d)]	Μ.Ο. Ρυθμού υδρατμοπερατότητας V [g/(m <sup>2</sup> ·d)]	Ισοδύναμο πάχος αέρα S <sub>d</sub> (m)	Κατηγορία υδρατμοπερατότητας με βάση το πρότυπο DIN EN ISO 7783-2
Silox_nano_1	622,6501	618,0000±5,74	0,03	Κατηγορία I (υψηλή)
Silox_nano_2	617,5403			
Silox_nano_3	607,4677			
Silox_nano_4	622,8846			
Silox_nano_5	620,6355			
Silox_nano_6	616,8218			
Acr_nano_1	257,8333	259,0764±2,91	0,08	Κατηγορία I (υψηλή)
Acr_nano_2	260,4400			
Acr_nano_3	262,0166			
Acr_nano_4	254,0702			
Acr_nano_5	258,7710			
Acr_nano_6	261,3273			
Elast_nano_1	263,5357	268,1075±2,74	0,08	Κατηγορία I (υψηλή)
Elast_nano_2	270,5440			
Elast_nano_3	270,7122			
Elast_nano_4	269,5410			
Elast_nano_5	266,8789			
Elast_nano_6	267,4332			

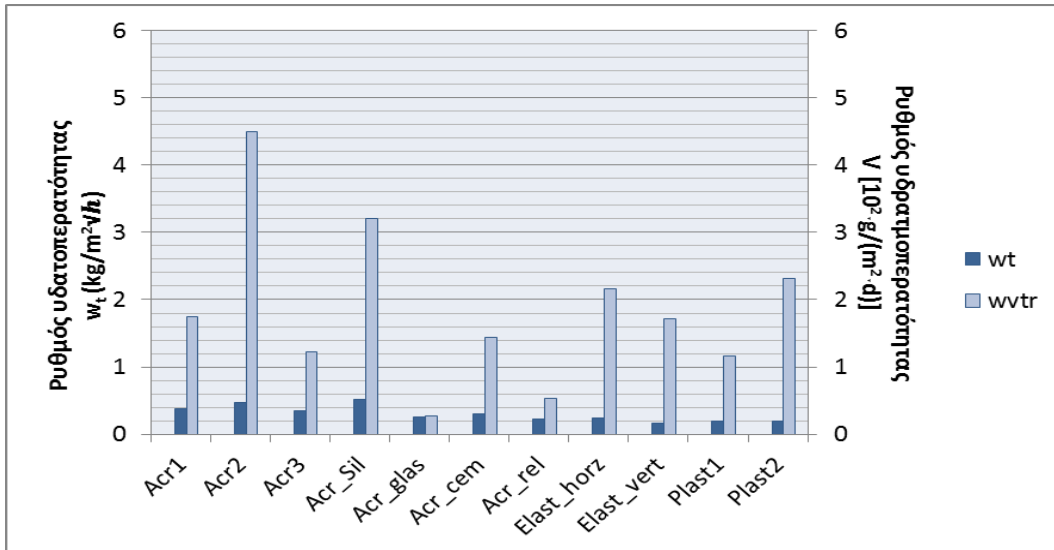
Στο **Σχήμα 9.2** παρουσιάζετε η συγκριτική συμπεριφορά των επικαλύψεων αναφορικά με την υδρατμοπερατότητά τους. Όπως προκύπτει από τις τιμές του ρυθμού υδρατμοπερατότητας όλες οι οργανικές επικαλύψεις κατατάσσονται στην Κατηγορία I και II, είναι δηλαδή από υψηλά έως μετρίως υδρατμοπερατές, με τιμές ρυθμούς υδρατμοπερατότητας  $V$  μεταξύ 20-600  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ . Όλες οι βιομηχανικές επικαλύψεις παρουσιάζουν μικρή υδρατμοπερατότητα, ενώ όλες οι επικαλύψεις νανοτεχνολογίας επιδεικνύουν υψηλότερους ρυθμούς.



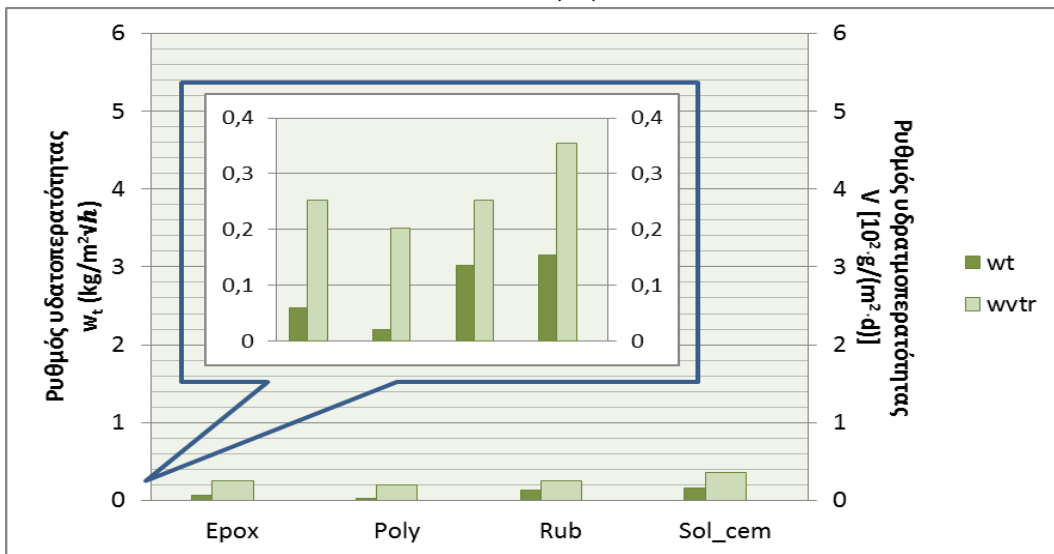
**Σχήμα 9.2:** Συγκριτικό διάγραμμα ρυθμού υδρατμοπερατότητας  $V$  [ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ] για όλες τις οργανικές επικαλύψεις

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η βέλτιστη συμπεριφορά για μια οργανική επικάλυψη όσων αφορά τους φυσικοχημικούς παράγοντες, είναι η ταυτόχρονη επίτευξη υψηλής υδρατμοπερατότητας και χαμηλής υδατοπερατότητας. Επικαλύψεις με αυτές τις ιδιότητες αποτρέπουν την είσοδο του νερού και όλων των παραγόντων που το νερό αποτελεί φορέα και παράλληλα επιτρέπουν την διαφυγή των υδρατμών από το εσωτερικό της τοιχοποιίας δημιουργώντας μια σφραγιστική μεμβράνη που “αναπνέει”.

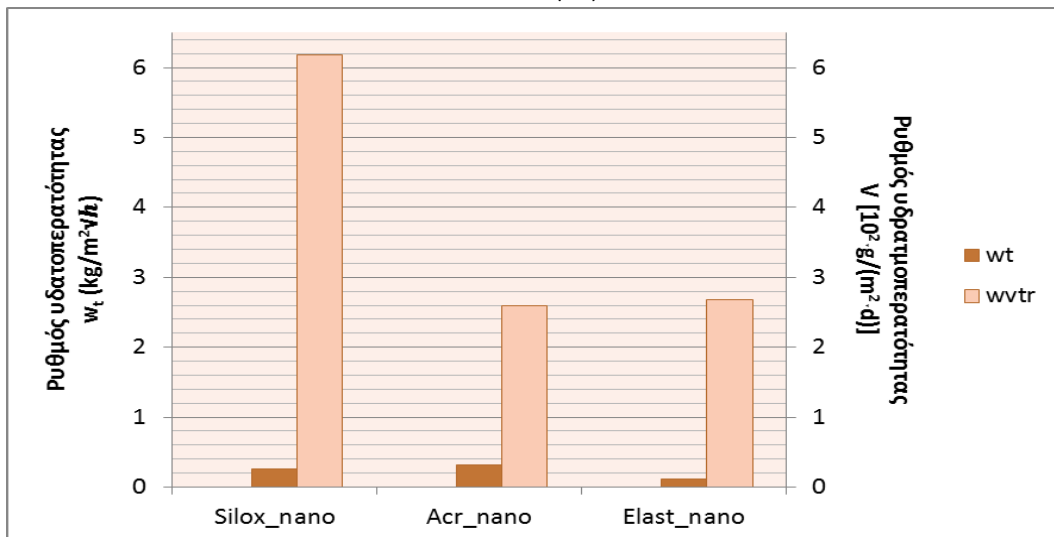
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι ρυθμοί υδρατμοπερατότητας και υδατοαπορρόφησης για κάθε ομάδα επικαλύψεων με σκοπό να είναι περισσότερο ευκρινής η επίτευξη του διπλού στόχου, χαμηλής περατότητας σε νερό και υψηλής σε υδρατμούς. Για όλες τις επικαλύψεις παρατηρείτε πως η ταχύτητα διάδοσης των υδρατμών είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα απορρόφησης νερού η διαφορά όμως είναι εντονότερη στις επικαλύψεις νανοτεχνολογίας γεγονός που αποδεικνύει την καταλληλότητα της χρήσης των επιστρωμάτων αυτών σαν χρώματα εσωτερικής και εξωτερικής τοιχοποιίας. Τη μικρότερη διαφορά στις δύο τιμές παρουσιάζουν οι βιομηχανικές επικαλύψεις όπου ενώ επιδεικνύουν πολύ χαμηλές τιμές περατότητας σε νερό, οι τιμές της διαπερατότητας των υδρατμών δεν είναι ικανοποιητικές με αποτέλεσμα τα χρώματα αυτά να μην έχουν τη δυνατότητα της διαπνοής.



Σχήμα 9.3: Συγκριτικό διάγραμμα Μ.Ο. υδατοαπορροφητικότητας και υδρατμοπερατότητας για συμβατικές επικαλύψεις

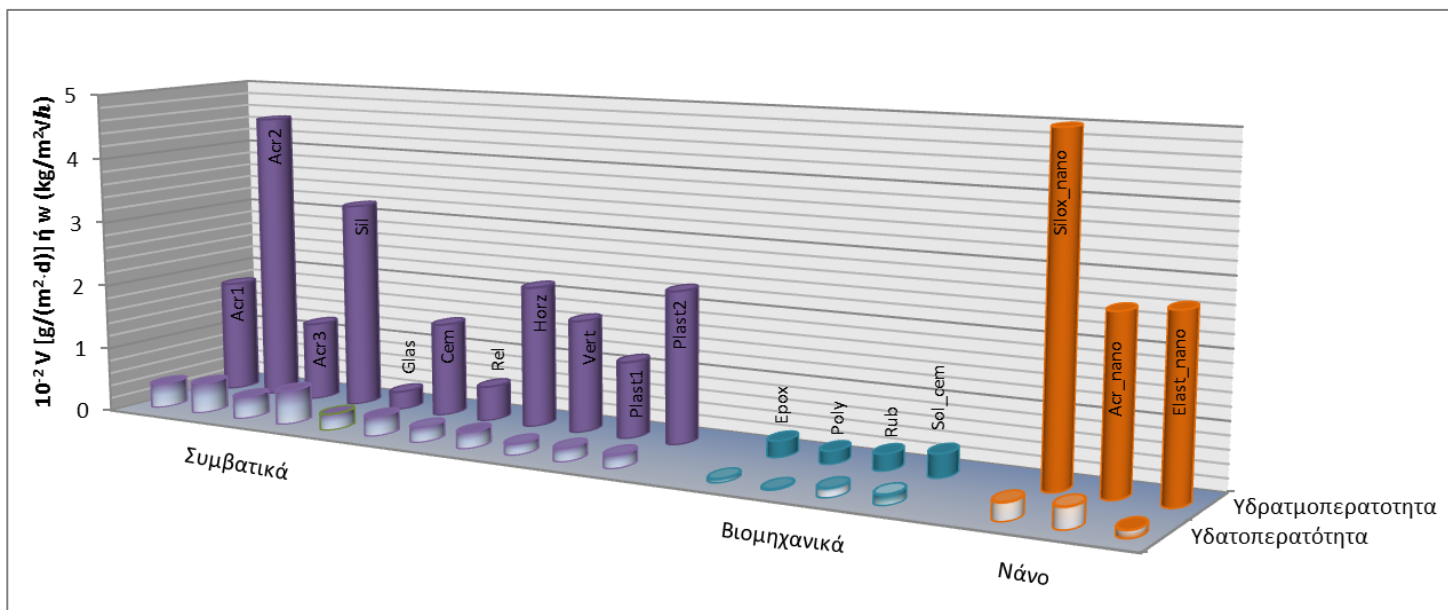


Σχήμα 9.4: Συγκριτικό διάγραμμα Μ.Ο. υδατοαπορροφητικότητας και υδρατμοπερατότητας για βιομηχανικές επικαλύψεις



Σχήμα 9.5: Συγκριτικό διάγραμμα Μ.Ο. υδατοαπορροφητικότητας και υδρατμοπερατότητας για επικαλύψεις νανοτεχνολογίας

Στο **Σχήμα 9.6** δίνονται σε κοινό διάγραμμα όλοι οι ρυθμοί περατότητας νερού και υδρατμών για όλες τις κατηγορίες των επικαλύψεων. Είναι εμφανές πως ο βέλτιστος συνδυασμός ιδιοτήτων παρατηρείται στα προϊόντα νανοτεχνολογίας, όπου οι ρυθμοί διάχυσης των υδρατμών είναι υψηλότεροι από όλες τις άλλες επικαλύψεις και ταυτόχρονα η απορρόφηση του νερού κρατείτε σε χαμηλά επίπεδα.



**Σχήμα 9.6:** Συγκεντρικό διάγραμμα ρυθμών διαπερατότητας ατμών και νερού για όλες τις κατηγορίες χρωμάτων

### 9.2.3 Διαπερατότητα σε Χλωριόντα

#### 9.2.3.1 Διαπερατότητα Χλωριόντων Συναρτήσεσι του Χρόνου

Για την μέτρηση της διαπερατότητας σε χλωριόντα χρησιμοποιήθηκε διπλό κελί που χωριζόταν από την μεμβράνη που έφερε το υπό εξέταση χρώμα. Η πρώτη κυψέλη περιείχε διάλυμα 2,0% w/v NaCl και η δεύτερη απιονισμένο νερό. Τα ιόντα χλωρίου μεταφέρονταν διαμέσου της μεμβράνης του χρώματος από το διάλυμα του άλατος στο απιονισμένο νερό. Η συγκέντρωση χλωριόντων στο κελί που λαμβάνονταν οι μετρήσεις (κελί απιονισμένου ύδατος) επετεύχθη έμμεσα, μετρώντας την αγωγιμότητα του διαλύματος και μετατρέποντάς την σε όρους συγκέντρωσης, με βάση τον **Πίνακα 9.7**. Η αναλυτική πειραματική διαδικασία περιγράφεται στην §7.1.3.1.

**Πίνακας 9.7:** Πίνακας βαθμονόμησης αγωγιμότητας-συγκέντρωσης NaCl

%w/v NaCl	Αγωγιμότητα (μS/cm)	%w/v NaCl	Αγωγιμότητα (μS/cm)	%w/v NaCl	Αγωγιμότητα (μS/cm)	%w/v NaCl	Αγωγιμότητα (μS/cm)
0,01	1000	0,06	1767	0,20	12390	1,20	20900
0,02	1118	0,07	2010	0,40	14710	1,40	23600
0,03	1249	0,08	2310	0,60	15520	1,60	26300
0,04	1406	0,09	2570	0,80	17180	1,80	29200
0,05	1574	0,10	2900	1,00	19020	2,00	32100

Μετά από 15 ημέρες ο ρυθμός αύξησης της συγκέντρωσης του άλατος σταθεροποιήθηκε και το πείραμα έληξε. Οι αναλυτικές μετρήσεις για κάθε χρώμα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες όπου δίνονται οι τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης για όλες τις επικαλύψεις και για τις 15 ημέρες της διάρκειας του πειράματος.

## Κεφάλαιο 9: Εκτίμηση Ιδιοτήτων Οργανικών Επικαλύψεων

**Πίνακας 9.8:** Μ.Ο. τιμών αγωγιμότητας και συγκέντρωσης NaCl για συμβατικές επικαλύψεις

Χρόνος (ημέρες)	Acr3			Acr_sil			Elast_vert			Plast1		
	Αγωγιμότη-τα (μS/cm)	Μ.Ο. Αγωγιμότη-τας (μS/cm)	% κ.β. NaCl	Αγωγιμότη-τα (μS/cm)	Μ.Ο. Αγωγιμότη-τας (μS/cm)	% κ.β. NaCl	Αγωγιμότη-τα (μS/cm)	Μ.Ο. Αγωγιμότη-τας (μS/cm)	% κ.β. NaCl	Αγωγιμότη-τα (μS/cm)	Μ.Ο. Αγωγιμότη-τας (μS/cm)	% κ.β. NaCl
0	5,43	5,5661±0,12	0,013165	3,87	4,06±0,17	0,013121	4,90	5,13±0,20	0,013153	3,75	3,78±0,12	0,013113
	5,60			4,21			5,28			3,92		
	5,66			4,10			5,21			3,67		
1	4281	4100±237	0,152810	3367	3250±324,71	0,121062	1329	1343±50	0,055093	2694	2649±66,19	0,099487
	4190			3500			1399			2680		
	3831			2883			1301			2573		
2	6100	6118±228	0,23396	6587	6420±145,35	0,246816	2482	2440±44	0,092153	4737	4722±27,73	0,176957
	6355			6351			2394			4739		
	5899			6322			2444			4690		
3	8400	8380±20	0,334624	7106	7030±69,39	0,273320	3276	3320±61	0,123622	5145	5160±101,33	0,249476
	8380			7014			3390			5268		
	8360			6970			3294			5067		
4	10582	10532±137	0,439883	7610	7670±122,56	0,301928	3899	3798±99	0,141364	5797	5810±187,83	0,194400
	10377			7589			3700			6004		
	10637			7811			3795			5629		
5	11832	11904±122	0,511825	9018	8987±122,5	0,363376	4003	3945±83	0,146913	6231	6482±220,25	0,221000
	11834			8852			3850			6572		
	12046			9091			3982			6643		
6	12262	12313±83	0,534021	9963	9843±137,47	0,405174	4197	4128±111	0,153880	7382	7392±126,29	0,289401
	12410			9693			4187			7271		
	12268			9873			4000			7523		
7	12864	12915±75	0,567280	11065	10964±93,66	0,462129	4458	4399±144	0,164321	7932	8023±84,87	0,318058
	13002			10880			4504			8100		
	12880			10947			4235			8037		
8	12995	13117±162	0,578610	11523	11445±149,17	0,487338	4700	4791±80	0,179683	9067	9123±70,37	0,369919
	13302			11273			4851			9100		
	13056			11539			4822			9202		
9	13341	13320±101	0,590022	11875	11837±48,04	0,508224	4765	4807±42	0,180317	9280	9234±44,13	0,375286
	13210			11853			4849			9192		
	13409			11783			4807			9230		
10	13422	13522±139	0,601515	11947	12034±78,63	0,518837	4980	4989±30	0,187560	9433	9494±63,64	0,387956
	13681			12100			5023			9489		
	13463			12055			4964			9560		
11	13674	13824±161	0,618846	12303	12299±43,13	0,533235	5000	5081±73	0,191246	9488	9563±65,00	0,391340
	13995			12340			5143			9598		
	13804			12254			5100			9603		
12	13995	14026±89	0,630543	12463	12476±51,73	0,542930	5099	5112±22	0,192492	9703	9843±135,27	0,405174
	14128			12533			5138			9853		

	13956			12432			5099			9973		
<b>13</b>	14183	14128±116	0,636486	12524	12559±33,18	0,547498	5220	5123±95	0,192935	10005	10098±97,24	0,417909
	13995			12590			5120			10199		
	14208			12563			5029			10090		
	14116			12622			5027			10212		
<b>14</b>	14266	14231±102	0,642451	12601	12605±15,39	0,550036	5275	5204±154	0,196201	10154	10189±30,80	0,422485
	14311			12592			5310			10201		
	1418			12850			5300			10304		
<b>15</b>	14590	14333±223	0,648436	12792	12817±29,81	0,561785	5226	5282±49	0,199359	10238	10295±53,07	0,427837
	14222			12809			5320			10343		

**Πίνακας 9.9:** Μ.Ο. τιμών αγωγιμότητας και συγκέντρωσης NaCl για βιομηχανικές επικαλύψεις

Χρόνος (ημέρες)	Erox			Poly			Rub			Sol_cem		
	Αγωγιμότη-τα (μS/cm)	Μ.Ο. Αγωγιμότη-τας (μS/cm)	% κ.β. NaCl	Αγωγιμότη-τα (μS/cm)	Μ.Ο. Αγωγιμότη-τας (μS/cm)	% κ.β. NaCl	Αγωγιμότη-τα (μS/cm)	Μ.Ο. Αγωγιμότη- τας (μS/cm)	% κ.β. NaCl	Αγωγιμότη-τα (μS/cm)	Μ.Ο. Αγωγιμότη- τας (μS/cm)	% κ.β. NaCl
<b>0</b>	5,77	5,93± 0,22	0,013177	3,27	3,17± 0,14	0,013095	9,66	9,12±0,48	0,013273	225,91	221,26±9,22	0,019686
	6,19			3,23			8,99			227,23		
	5,83			3,01			8,71			210,62		
<b>1</b>	6,42	6,37±0,17	0,013191	3,22	3,31±0,19	0,013099	223,84	220,83±3,45	0,019673	475,00	468,66±7,09	0,027279
	6,51			3,18			221,60			460,99		
	6,18			3,53			217,05			469,99		
<b>2</b>	14,99	15,24±1,39	0,013457	4,03	3,99±0,15	0,013119	385,40	380,58±4,27	0,024562	699,26	689,22±18,21	0,034151
	13,99			4,12			379,09			700,21		
	16,74			3,82			377,24			668,19		
<b>3</b>	18,99	19,33±1,54	0,013580	4,73	4,64±0,08	0,013139	565,77	559,83±7,93	0,03010	1763,09	1758,49±7,36	0,068847
	21,01			4,58			562,90			1749,99		
	17,99			4,61			550,82			1762,39		
<b>4</b>	20,91	22,12±,504	0,013664	4,85	4,93±0,10	0,013147	1658,01	1645,16±11,65	0,065061	2146,43	2124,32±19,15	0,081242
	20,45			5,05			1642,21			2112,8		
	25,00			4,89			1635,26			2113,73		
<b>5</b>	57,90	56,11±1,69	0,014686	5,82	5,78±0,13	0,013173	1670,05	1666,91±5,02	0,065785	2548,26	2553,68±7,15	0,096132
	55,91			5,63			1661,11			2550,99		
	54,52			5,89			1669,57			2561,79		
<b>6</b>	70,05	69,01±3,54	0,015075	6,39	6,29±0,12	0,01318	1695,55	1689,44±6,27	0,066537	3105,88	3079±33,91	0,11485
	71,92			6,15			1683,01			3040,9		
	65,06			6,33			1689,76			3090,22		
<b>7</b>	74,39	75,77±1,85	0,015278	6,85	6,91±0,08	0,013207	1708,64	1701,12±8,03	0,066927	3294,72	3281,8±11,26	0,122224
	77,88			6,88			1692,66			3276,66		
	75,05			7,00			1702,06			3274,02		
<b>8</b>	79,21	81,43±2,48	0,015449	7,32	7,33±0,03	0,013219	1942,92	1935,82±10,45	0,074822	3601,8	3590,79±12,63	0,133617
	84,12			7,31			1923,82			3576,99		
	80,96			7,36			1940,72			3593,58		
<b>9</b>	89,30	89,24±1,12	0,015685	7,75	7,88±0,13	0,013236	2150,82	2134,84±21,26	0,081602	3900,02	3895,69±14,97	0,145047



10	88,09	98,53±1,75	0,015965	7,89	8,29±0,07	0,013248	2143	2349,09±12,13	0,088990	3879,03	4100,99±85,04	0,152848
	90,33			8,00			2110,7			3908,02		
	100,00			8,30			2360,92			4191,23		
	99,00			8,36			2336,67			4089,42		
	96,59			8,21			2349,68			4022,32		
11	116,28	114,8±1,58	0,016477	9,17	9,00±0,16	0,013270	2570	2556,51±23,35	0,096231	4341,56	4310,06±92,52	0,160878
	115,00			8,84			2569,99			4205,9		
	113,12			8,99			2529,54			4382,72		
12	127,92	126,12±1,67	0,016799	9,54	9,56±0,03	0,013286	2655,41	2664,8±21,22	0,100045	4504,62	4514,76±70,80	0,168826
	125,83			9,54			2649,89			4590,09		
	124,61			9,60			2689,1			4449,57		
13	140,00	137,43±3,40	0,017141	10,21	10,11±0,11	0,013303	2767,3	2773,14±6,57	0,103884	4829,64	4720,42±64,78	0,176895
	138,72			9,99			2780,26			4792		
	133,57			10,13			2771,86			4539,62		
14	151,83	148,76±2,84	0,017484	10,43	10,67±0,24	0,013320	2969,97	2981,47±10,13	0,111333	4730,8	4723,53±99,78	0,177018
	148,22			10,66			2985,33			4819,48		
	146,23			10,92			2989,11			4620,31		
15	163,56	160,07±3,76	0,017827	11,24	11,23±0,07	0,013337	3099,03	3089,75±9,28	0,115239	4788,57	4732,92±182,16	0,177388
	156,09			11,30			3080,46			4880,77		
	160,56			11,15			3089,76			4529,42		

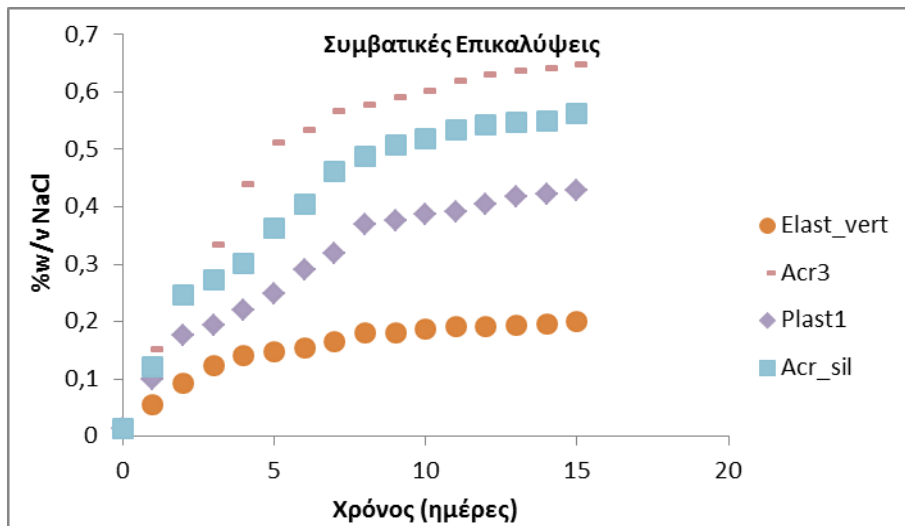
Πίνακας 9.10: Μ.Ο. τιμών αγωγιμότητας και συγκέντρωσης NaCl για επικαλύψεις νανοτεχνολογίας

Χρόνος (ημέρες)	Elast_nano			Acr_nano			Silox_nano		
	Αγωγιμότητα (μS/cm)	Μ.Ο. Αγωγιμότητας (μS/cm)	% κ.β. NaCl	Αγωγιμότητα (μS/cm)	Μ.Ο. Αγωγιμότητας (μS/cm)	% κ.β. NaCl	Αγωγιμότητα (μS/cm)	Μ.Ο. Αγωγιμότητας (μS/cm)	% κ.β. NaCl
0	7,52	7,53±0,12	0,013225	888	831±70	0,038620	141	144±4,36	0,017340
	7,66			852			149		
	7,41			753			142		
1	498	468±34,04	0,027259	3703	3888±160	0,144756	3273	3259±78	0,121391
	431			3977			3329		
	475			3984			3175		
2	1944	1743±177,45	0,068328	4200	4174±162	0,155642	3329	3745±857	0,139375
	1608			4000			3175		
	1677			4322			3273		
3	2902	2920±137,88	0,109120	4364	4281±87	0,159756	3874	3916±120	0,145815
	3066			4190			3822		
	2792			4289			4052		
4	3450	3396±83,35	0,126412	4901	4977±66	0,187080	4899	4810±84	0,180436
	3438			5021			4800		
	3300			5009			4731		
5	3504	3496±56,42	0,130102	5278	5504±204	0,208414	5093	5182±77	0,195313
	3436			5559			5220		
	3548			5675			5233		

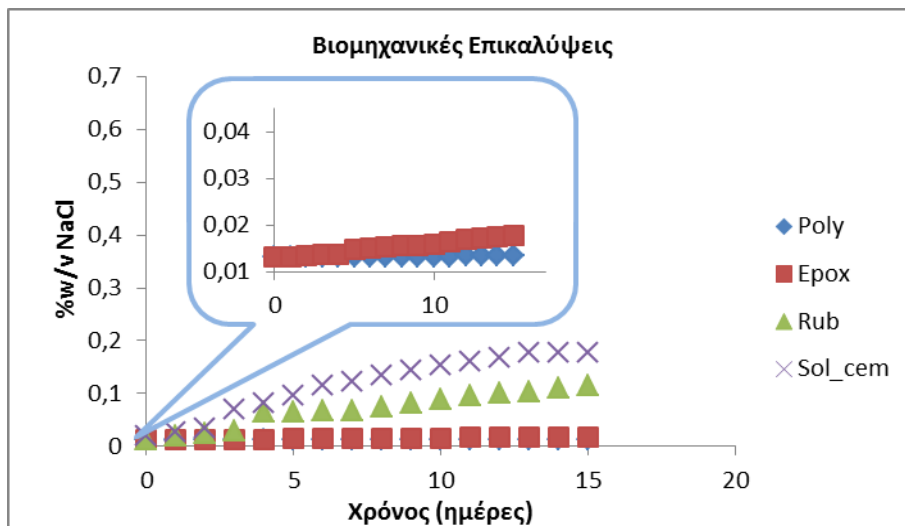
Κεφάλαιο 9: Εκτίμηση Ιδιοτήτων Οργανικών Επικαλύψεων

6	3539	3583±40,95	0,133327	6502	6392±104	0,245617	5410	5392±23	0,203833
	3620			6380			5400		
	3590			6294			5366		
7	3800	3701±158,66	0,137727	6984	7023±88	0,273012	5917	6023±125	0,229966
	3518			7124			5990		
	3785			6961			6162		
8	3811	3927±106,38	0,146231	7144	7123±113	0,277427	6183	6123±100	0,234181
	3950			7000			6007		
	4020			7225			6179		
9	4100	4195±116,51	0,156448	7103	7234±113	0,282350	6205	6234±112	0,238882
	4325			7300			6358		
	4160			7299			6139		
10	4120	4232±97,32	0,157869	7574	7494±81	0,293980	6432	6494±157	0,249943
	4280			7411			6673		
	4296			7497			6377		
11	4487	4389±93,82	0,1639331	7952	7963±104	0,315299	7045	6988±166	0,271472
	4380			8073			6800		
	4300			7864			7119		
12	4430	4402±66,57	0,164437	7942	8043±95	0,318979	7122	7043±100	0,273893
	4450			8055			7077		
	4326			8132			6930		
13	4489	4503±15,71	0,168367	8141	8098±100	0,321517	7177	7098±80	0,276321
	4520			7983			7100		
	4500			8170			7017		
14	4540	4566±22,53	0,170828	8206	8189±76	0,325729	7117	7189±67	0,280351
	4580			8256			7200		
	4578			8105			7250		
15	4630	4608±21,07	0,172473	8242	8295±47	0,330657	7200	7295±123	0,285067
	4606			8310			7435		
	4588			8333			7250		

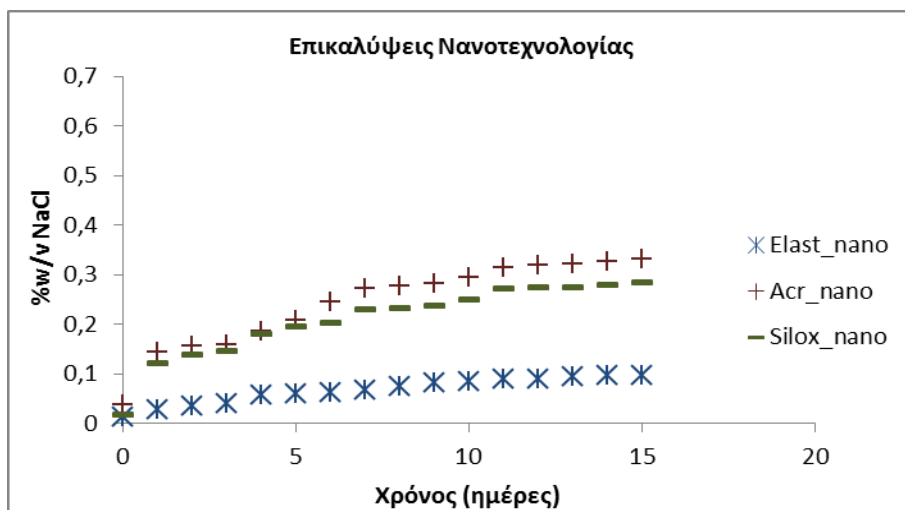
Τα αποτελέσματα για τη διαπερατότητα των χλωριόντων παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα, όπου δίνεται η συγκέντρωση του NaCl συναρτήσει του χρόνου για κάθε κατηγορία επικαλύψεων.



Σχήμα 9.7: Συγκέντρωση NaCl συναρτήσει του χρόνου για συμβατικές επικαλύψεις

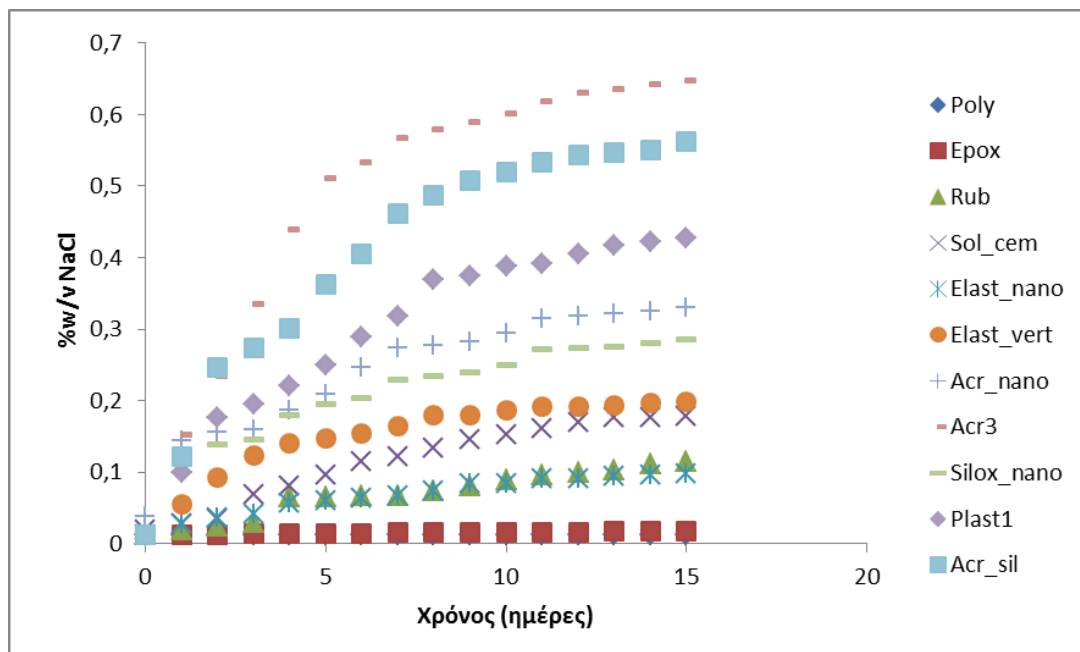


Σχήμα 9.8: Συγκέντρωση NaCl συναρτήσει του χρόνου για βιομηχανικές επικαλύψεις



Σχήμα 9.9: Συγκέντρωση NaCl συναρτήσει του χρόνου για επικαλύψεις нанοτεχνολογίας

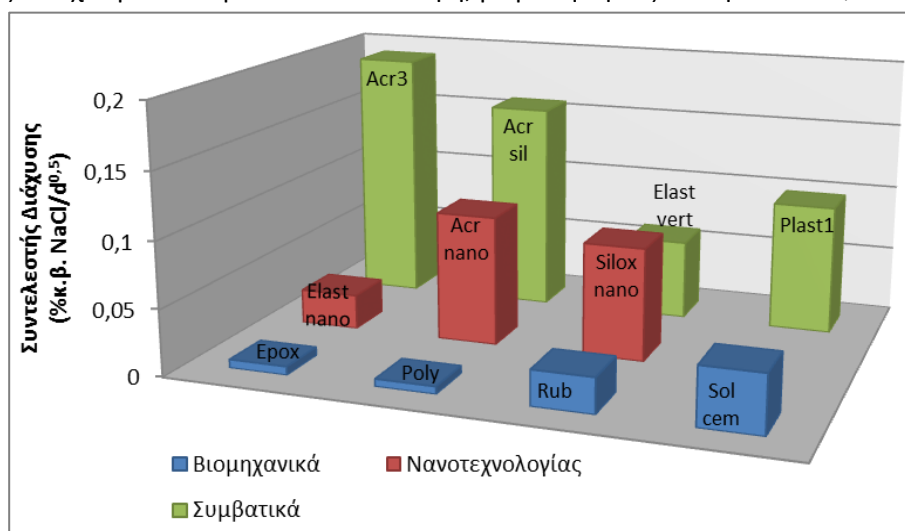
Για λόγους σύγκρισης παρατίθεται το **Σχήμα 9.10** όπου δίνονται όλα τα πειραματικά δεδομένα συγκεντρωμένα. Οι μετρήσεις για την διαπερατότητα των χλωριόντων συνάδουν με τα αποτελέσματα της υδατοπερατότητας, γεγονός που οφείλετε στο ότι κύριος παράγοντας της μεταφοράς των ιόντων χλωρίου είναι το νερό. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές για τις βιομηχανικές επικαλύψεις Epox και Poly είναι μια τάξη μεγέθους χαμηλότερες συγκριτικά με αυτές των υπολοίπων επικαλύψεων.



**Σχήμα 9.10:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα διαπερατότητας χλωριόντων για όλες τις επικαλύψεις

Ενώ η υπεροχή των βιομηχανικών χρωμάτων Epox και Poly στην παρεμπόδιση διείσδυσης χλωριόντων είναι φανερή, δεν παρουσιάζεται η ανάλογη συμπεριφορά για τα άλλα δύο βιομηχανικά χρώματα. Τα χρώματα νανοτεχνολογίας εμφανίζουν πολύ ικανοποιητική συμπεριφορά υπερέχοντας των συμβατικών ενώ από τις συμβατικές επικαλύψεις ξεχωρίζει η ελαστομερής επικάλυψη για κάθετες επιφάνειες.

Για την επιβεβαίωση των παραπάνω, παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα ο συντελεστής διάχυσης των χλωριόντων για κάθε επικάλυψη, με βάση την εξίσωση  $x = K \cdot \sqrt{t}$ .



**Σχήμα 9.11:** Συντελεστές διάχυσης οργανικών επικαλύψεων έναντι χλωριόντων

### 9.2.3.2 Διαπερατότητα Χλωριόντων με Μέτρηση του Ηλεκτρικού Φορτίου

Με τη μέθοδο που περιγράφεται στο Πρότυπο ASTM C1202 – 12 μετράτε το ηλεκτρικό φορτίο που διέρχεται από δοκίμιο άοπλου σκυροδέματος όταν αυτό βρίσκεται ανάμεσα σε διαλύματα NaCl και NaOH γνωστής συγκέντρωσης και εξωτερικά επιβάλλετε ρεύμα τάσης 60V. Η μεθοδολογία της πειραματικής διαδικασίας αναλύεται στην §7.1.3.2.

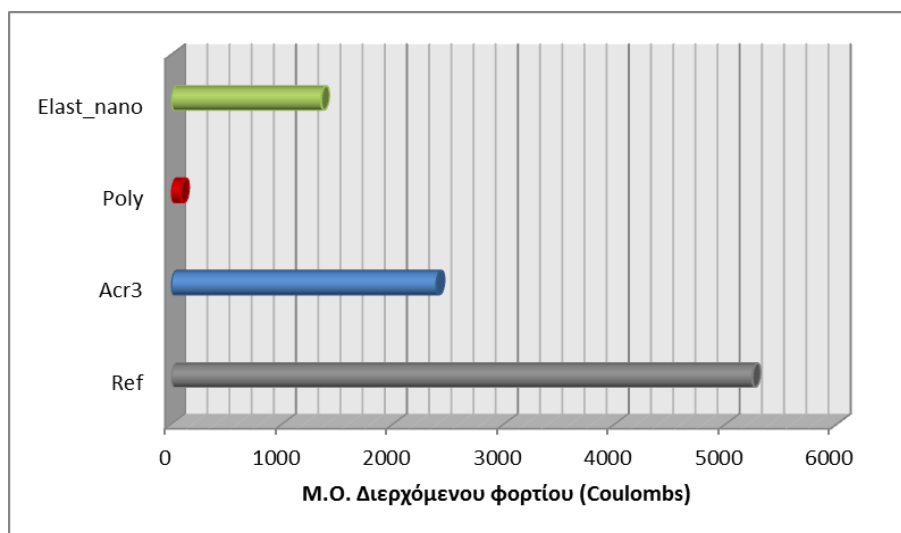
Η μέθοδος χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό διαφόρων ειδών σκυροδεμάτων, αλλά αν το υπόστρωμα διατηρηθεί σταθερό, τότε οι τυχόν αλλαγές στην κατηγοριοποίηση του δείγματος θα οφείλονται στην επικάλυψη που χρησιμοποιήθηκε. Τρεις οργανικές επικαλύψεις ελέγχθηκαν με την παραπάνω μέθοδο-μία από κάθε κατηγορία- και ταυτόχρονα ελήφθησαν μετρήσεις και για ακάλυπτο δοκίμιο άοπλου σκυροδέματος υψηλής διαπερατότητας. Για κάθε κατηγορία μετρήθηκαν έξι δείγματα και οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στον **Πίνακας 9.11**.

**Πίνακας 9.11:** Διερχόμενο φορτίο ρεύματος για οργανικές επικαλύψεις

Είδος Επικάλυψης		Μ.Ο. Διερχόμενου φορτίου (Coulomb)	Διαπερατότητα χλωριόντων
Αναφοράς_1	5330	5239± 231	Υψηλή
Αναφοράς_2	5563		
Αναφοράς_3	5412		
Αναφοράς_4	5021		
Αναφοράς_5	5116		
Αναφοράς_6	4992		
Poly_1	85	88±8	Αμελητέα
Poly_2	81		
Poly_3	78		
Poly_4	101		
Poly_5	93		
Poly_6	90		
Acr3_1	2253	2391±157	Μέτρια
Acr3_2	2532		
Acr3_3	2364		
Acr3_4	2544		
Acr3_5	2165		
Acr3_6	2488		
Elast_nano_1	1206	1352±155	Χαμηλή
Elast_nano_2	1569		
Elast_nano_3	1165		
Elast_nano_4	1420		
Elast_nano_5	1453		
Elast_nano_6	1299		

Το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή του παραπάνω πειράματος ήταν σκυρόδεμα με υψηλή διαπερατότητα σε χλωριόντα. Όπως φαίνεται και από το **Σχήμα 9.12** η επικάλυψη του δείγματος με το χρώμα πολουρεθάνης δημιούργησε μια μεμβράνη με αμελητέα διαπερατότητα σε χλωριόντα, ενώ το συμβατικό και το χρώμα νανοτεχνολογίας δημιούργησαν μια μέτρια και χαμηλά διαπερατή επικάλυψη αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα και των δύο μεθόδων μέτρησης της διαπερατότητας των χλωριόντων συνάδουν, δίνοντας χαμηλότερες τιμές διαπερατότητας στα βιομηχανικά χρώματα, ενώ η διαπερατότητα στα ιόντα χλωρίου των νανοχρωμάτων παρουσιάζεται βελτιωμένη συγκριτικά με αυτή των συμβατικών επικαλύψεων.



Σχήμα 9.12: Μ.Ο. Διερχόμενου φορτίου για κάθε επικάλυψη μετά από τη δοκιμή Rapid Permeability Test

#### 9.2.4 Συντελεστής Διάχυσης CO<sub>2</sub>

Σε δοκίμια άοπλου τσιμεντοκονιάματος εφαρμόστηκαν διάφορα συστήματα οργανικών επικαλύσεων και το πάχος τους μετρήθηκε με παχύμετρο τύπου eban 2000 Mk2 σύμφωνα με το αντίστοιχο πρότυπο<sup>288</sup>. Τα βαμμένα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ενανθράκωσης με συγκέντρωση 1% κ.ο σε CO<sub>2</sub> για χρονικό διάστημα 2 εβδομάδων. Μετά το τέλος του πειράματος τα επικαλυμμένα δοκίμια απομακρύνθηκαν από το θάλαμο και σπάστηκαν, όπου το βάθος ενανθράκωσης μετρήθηκε σε φρέσκιες τομές με χρήση του δείκτη φαινολοφθαλεΐνης. Για κάθε οργανική επικάλυψη χρησιμοποιήθηκαν 6 δοκίμια και χρησιμοποιήθηκαν επίσης και άβαφα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος ως αναφορά.

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή διάχυσης  $d$  [m/s] κάθε χρώματος χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση:

$$d = \frac{2 \cdot D \cdot x}{x_0^2 - x^2} \quad [9.1]$$

Όπου:  $x_0$ ,  $x$  τα βάθη ενανθράκωσης [cm] για μη επικαλυμμένα και επικαλυμμένα δοκίμια αντίστοιχα και  $D$  η σταθερά διάχυσης των ενανθρακωμένων δοκιμίων η οποία επιλέχθηκε<sup>289</sup> ίση με  $2,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Το “ισοδύναμο πάχος αέρα”,  $S_d$  [m], για κάθε επικάλυψη υπολογίστηκε από την εξίσωση:

$$S_d = \frac{D_{air}}{d} \quad [9.2]$$

Όπου:  $D_{air}$  είναι ο συντελεστής διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα στον αέρα και ισούται με  $153 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Ο παράγοντας αντίστασης διάχυσης  $\mu$  [αδιάστατο μέγεθος] υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$S_d = \mu \cdot S \quad [9.3]$$

Όπου:  $S$  είναι το πάχος της επικάλυψης [m].

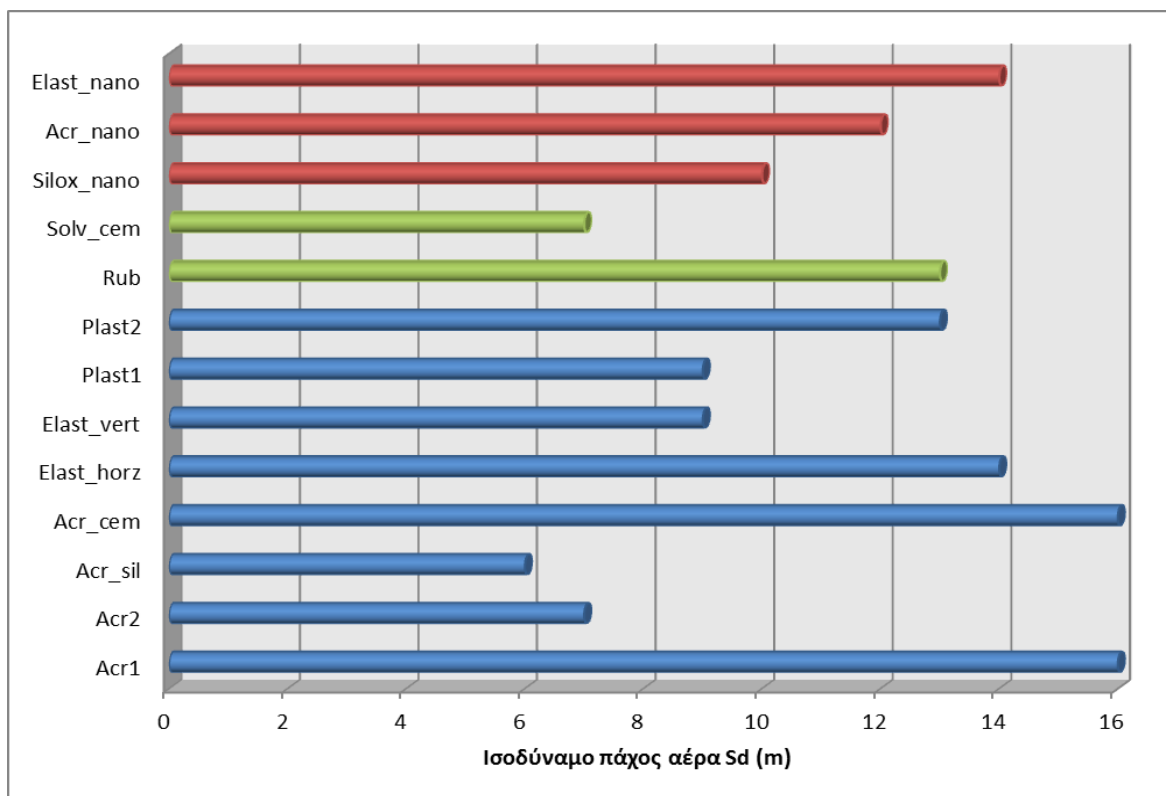
Τα αποτελέσματα του βάθους ενανθράκωσης και του συντελεστή διάχυσης παρατίθενται στον Πίνακα 9.12, όπου δίνονται και τα ισοδύναμα πάχη αέρα.

Πίνακας 9.12: Ισοδύναμα πάχη αέρα και συντελεστές διάχυσης για τις οργανικές επικαλύψεις

Κατηγορία 1: Συμβατικές Οργανικές Επικαλύψεις							
Κωδικός Χρώματος	x(mm)	$x_{aver}$	$x_o$ (mm)	d (m/s)	S(μm)	μ	$S_d$ (m)
Acr1_1	1,1	1,1	8,0	$0,84 \cdot 10^{-6}$	300	63000	19
Acr1_2	1,1						
Acr1_3	1,1						
Acr2_1	2,5	2,6	8,0	$2,18 \cdot 10^{-6}$	220	33000	7
Acr2_2	2,5						
Acr2_3	2,8						
Acr_sil_1	3,0	2,9	8,0	$2,50 \cdot 10^{-6}$	200	32000	6
Acr_sil_2	3,0						
Acr_sil_3	2,8						
Acr_cem_1	1,0	1,3	8,0	$1,00 \cdot 10^{-6}$	280	57000	16
Acr_cem_2	1,5						
Acr_cem_3	1,5						
Elast_horz_1	1,5	1,5	8,0	$1,1710^{-6}$	270	51000	14
Elast_horz_2	1,5						
Elast_horz_3	1,5						
Elast_vert_1	2,0	2,1	8,0	$1,6910^{-6}$	240	39000	9
Elast_vert_2	2,0						
Elast_vert_3	2,3						
Plast1_1	2,5	2,3	8,0	$1,88 \cdot 10^{-6}$	230	37000	9
Plast1_2	2,5						
Plast1_3	2,0						
Plast2_1	1,5	1,6	8,0	$1,25 \cdot 10^{-6}$	250	51000	13
Plast2_2	2,0						
Plast2_3	1,5						
Κατηγορία 2:Επικαλύψεις Βιομηχανικών Εφαρμογών							
Κωδικός Χρώματος	x(mm)	$x_{aver}$	$x_o$ (mm)	d (m/s)	S(μm)	μ	$S_d$ (m)
Erox_1	0	0	8,0	-	350	-	-
Erox_2	0						
Erox_3	0						
Poly_1	0	0	8,0	-	400	-	-
Poly_2	0						
Poly_3	0						
Rub_1	1,5	1,5	8,0	$1,17 \cdot 10^{-6}$	250	55000	13
Rub_2	1,5						
Rub_3	1,5						
Solv_cem_1	1,5	1,6	8,0	$1,25 \cdot 10^{-6}$	220	58000	13
Solv_cem_2	1,5						
Solv_cem_3	2						
Κατηγορία 3:Επικαλύψεις με Προϊόντα Νανοτεχνολογίας							
Κωδικός Χρώματος	x(mm)	$x_{aver}$	$x_o$ (mm)	d (m/s)	S(μm)	μ	$S_d$ (m)
Silox_nano_1	2,0	2,0	8,0	$1,60 \cdot 10^{-6}$	200	50000	10
Silox_nano_2	2,0						
Silox_nano_3	2,0						
Acr_nano_1	1,5	1,7	8,0	$1,33 \cdot 10^{-6}$	200	60000	12
Acr_nano_2	1,5						
Acr_nano_3	2,0						
Elast_nano_1	1,5	1,5	8,0	$1,17 \cdot 10^{-6}$	200	69000	14
Elast_nano_2	1,5						
Elast_nano_3	1,5						



Στο **Σχήμα 9.13**, δίνεται το ισοδύναμο πάχος αέρα των επικαλύψεων όπως υπολογίστηκε μετά τον θάλαμο ενανθράκωσης. Τόσο το εποξειδικό χρώμα όσο και η επίστρωση πολυουρεθάνης δεν παρουσίασαν βάθος ενανθράκωσης και κατά συνέπεια δεν ήταν δυνατός ο υπολογισμός των επιμέρους παραμέτρων.



**Σχήμα 9.13:** Συγκριτικό διάγραμμα ισοδύναμου πάχους αέρα επικαλύψεων

Αναφορικά με τα αποτελέσματα πρέπει να σημειωθεί ότι τα χρώματα που υπερτερούσαν και επέδειξαν υψηλό ισοδύναμο πάχος αέρα, πέραν του εποξειδικού χρώματος και του χρώματος πολυουρεθάνης, ήταν ένα καθαρά ακρυλικό χρώμα και το ακρυλικό τσιμεντόχρωμα νερού. Από τα χρώματα νανοτεχνολογίας αυτό που ξεχωρίζει είναι το Elast\_nano, η τιμή του όμως είναι αρκετά μικρότερη από τα καλύτερα ακρυλικά συμβατικά χρώματα, παραμένει όμως μεγαλύτερη από τα αντίστοιχα συμβατικά ελαστομερή χρώματα. Από τα υπόλοιπα βιομηχανικά χρώματα, η επικάλυψη του ρευστού καουτσούκ είναι αυτή που υπερτερεί σε σχέση με το τσιμεντόχρωμα διαλύτη χωρίς όμως η τιμή της να υπερβαίνει τα συμβατικά συστήματα (ακρυλικά και ελαστομερή).

### 9.2.5 Προσδιορισμός της Πρόσφυσης μέσω της Ελάχιστης Εφελκυστικής Τάσης Αποκόλλησης (Pull-off test)

Ο προσδιορισμός της πρόσφυσης των επικαλύψεων με τη μέθοδο Pull-off πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 24624:1993/ BS EN ISO 4624:2003 και το πρότυπο ASTM D4541 - 09e1 όπως περιγράφεται στην §7.2.1 της εργασίας αυτής. Η πρόσφυση εκτιμήθηκε για όλες τις οργανικές επικαλύψεις από κάθε κατηγορία χρωμάτων, 30 ημέρες μετά την εφαρμογή κάθε επικάλυψης. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν φέτες σκυροδέματος πάχους 50mm και διαμέτρου 150mm, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 9.14**.



**Σχήμα 9.14:** Δοκίμια σκυροδέματος τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση pull-off

Σε κάθε δοκίμιο είχε εφαρμοσθεί το κατάλληλο αστάρι και έπειτα δύο στρώματα βαφής. Το συνολικό πάχος της επικάλυψης (*Dry Film Thickness, DFT*) μετρήθηκε με παχύμετρο τύπου eban 2000 Mk2 σύμφωνα με το αντίστοιχο πρότυπο. Για τη μέτρηση της αντοχής σε πρόσφυση χρησιμοποιήθηκε ειδική συσκευή Elcometer Model 106 Adhesion Tester με την οποία ασκήθηκε κάθετη προς την επιφάνεια του δοκιμίου εφελκυστική τάση μέχρι αποκόλλησης των κυλίνδρων (**Σχήμα 7.5**). Η εκτίμηση των αποτελεσμάτων προκύπτει μέσω του **Πίνακας 9.13** (Πίνακας 7.4) σύμφωνα με το προαναφερθέν πρότυπο.

**Πίνακας 9.13:** Κατάταξη αποτελεσμάτων δοκιμής pull-off σε επιστρώσεις

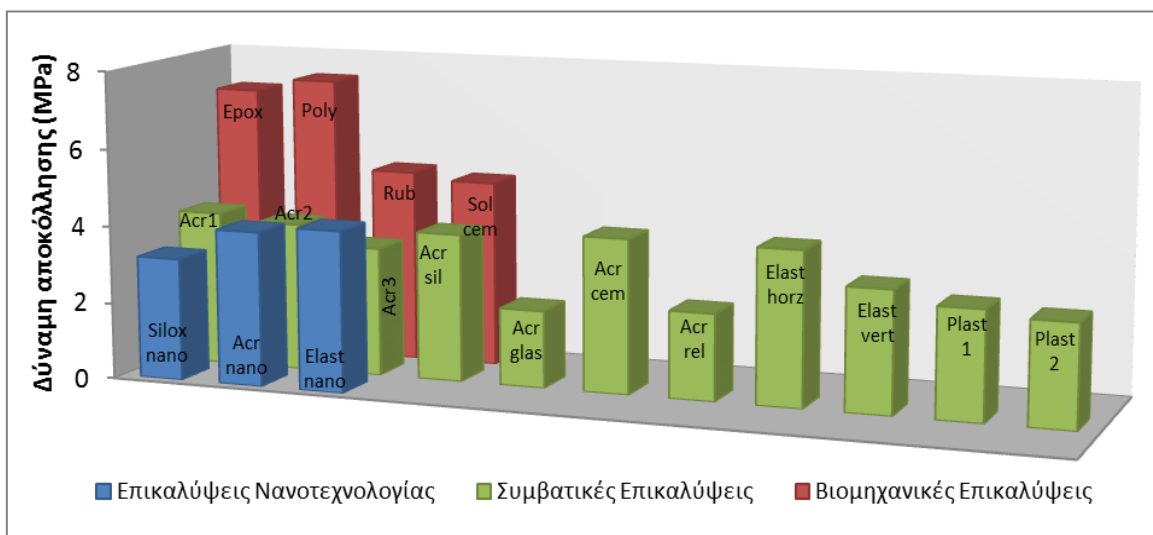
Τάξη	Αποτέλεσμα	
<b>A</b>	Ρήξη συνοχής του δοκιμίου	Cohesive failure of substrate
<b>A/B</b>	Ρήξη πρόσφυσης μεταξύ δοκιμίου /πρώτης στρώσης επιχρίσματος	Adhesive failure between substrate and first coat
<b>B</b>	Ρήξη συνοχής πρώτης στρώσης	Cohesive failure of first coat
<b>B/C</b>	Ρήξη πρόσφυσης μεταξύ πρώτης / δεύτερης στρώσης	Adhesive failure between first and second coats
<b>-/Y</b>	Ρήξη πρόσφυσης μεταξύ τελικής στρώσης και κόλλας	Adhesive failure between final coat and adhesive
<b>Y</b>	Ρήξη συνοχής της κόλλας	Cohesive failure of adhesive
<b>Y/Z</b>	Ρήξη πρόσφυσης μεταξύ κόλλας και κυλίνδρου	Adhesive failure between adhesive and test cylinder

Στον **Πίνακας 9.14** δίνονται τα αποτελέσματα για κάθε κατηγορία επικαλύψεων καθώς και η κατάταξη ανάλογα με το αντίστοιχο πρότυπο. Τα αποτελέσματα εκφράζονται σαν % ποσοστό της περιοχής ρήξης και η μορφή ρήξης χαρακτηρίζεται ως ρήξη πρόσφυσης, ρήξη συνοχής ή ρήξη πρόσφυσης/συνοχής ανάμεσα στα στρώματα.

Πίνακας 9.14: Αντοχή σε πρόσφυση επικαλύψεων σύμφωνα με το πρότυπο BS EN ISO 4624:2003

Κατηγορία 1: Συμβατικές Οργανικές Επικαλύψεις				
Κωδικός Χρώματος	Δύναμης αποκόλλησης (MPa)	Μ.Ο Δύναμης αποκόλλησης (MPa)	Πάχος Επικάλυψης (S, DFT, μm)	Αξιολόγηση σύμφωνα με το πρότυπο BS EN ISO 4624:2003
Acr1_1	4	4	250	A/B 95%
Acr1_2	4			
Acr1_3	4			
Acr2_1	4	3,83±0,29	220	A/B 95%
Acr2_2	4			
Acr2_3	3,5			
Acr3_1	3	3,33±0,29	220	A/B 95%
Acr3_2	3,5			
Acr3_3	3,5			
Acr_sil_1	4	3,83±0,29	210	A/B 70%
Acr_sil_2	3,5			
Acr_sil_3	4			
Acr_glas_1	2	2	250	A/B 95%
Acr_glas_2	2			
Acr_glas_3	2			
Acr_cem_1	4	4	280	A/B 95%
Acr_cem_2	4			
Acr_cem_3	4			
Acr_rel_1	2,5	2,25±0,35	300	A/B 95%
Acr_rel_2	2			
Acr_rel_3	2			
Elast_horz_1	4	4	250	A/B 90%
Elast_horz_2	4			
Elast_horz_3	4			
Elast_vert_1	3,5	3,17±0,29	240	A/B 95%
Elast_vert_2	3			
Elast_vert_3	3			
Plast1_1	2,5	2,83±0,29	240	A/B 95%
Plast1_2	3			
Plast1_3	3			
Plast2_1	2,5	2,67±0,29	250	A/B 95%
Plast2_2	3			
Plast2_3	2,5			
Κατηγορία 2:Επικαλύψεις Βιομηχανικών Εφαρμογών				
Κωδικός Χρώματος	Δύναμης αποκόλλησης (MPa)	Μ.Ο Δύναμης αποκόλλησης (MPa)	Πάχος Επικάλυψης (S, DFT, μm)	Αξιολόγηση σύμφωνα με το πρότυπο BS EN ISO 4624:2003
Epoх_1	7	7	350	A
Epoх_2	7			
Epoх_3	7			
Poly_1	7	7,33±0,29	400	A
Poly_2	7,5			
Poly_3	7,5			
Rub_1	5	5	280	A/B 80%
Rub_2	5			
Rub_3	5			
Solv_cem_1	5	3,17±0,29	220	A/B 40%
Solv_cem_2	4,5			
Solv_cem_3	5			
Κατηγορία 3:Επικαλύψεις με Προϊόντα Νανοτεχνολογίας				
Κωδικός Χρώματος	Δύναμης αποκόλλησης (MPa)	Μ.Ο Δύναμης αποκόλλησης (MPa)	Πάχος Επικάλυψης (S, DFT, μm)	Αξιολόγηση σύμφωνα με το πρότυπο BS EN ISO 4624:2003
Silox_nano_1	3	3,17±0,29	200	A/B 70%
Silox_nano_2	3			
Silox_nano_3	3,5			
Acr_nano_1	4	4	200	A/B 90%
Acr_nano_2	4			
Acr_nano_3	4			
Elast_nano_1	4	4,17±0,29	200	A/B 90%
Elast_nano_2	4			
Elast_nano_3	4,5			












Για λόγους σύγκρισης παρατίθεται το **Σχήμα 9.15** όπου απεικονίζεται η αντοχή A/B σε πρόσφυση όλων των επικαλύψεων. Τα βιομηχανικά χρώματα υπερτερούν όσον αφορά την εφελκυστική τάση που ασκείτε, ενώ τα χρώματα νανοτεχνολογίας και τα συμβατικά χρώματα παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι τα χρώματα νανοτεχνολογίας είναι καλύτερα από αρκετά σύνθετα ακρυλικά χρώματα καθώς και το πλαστικό χρώμα, ενώ οι επιδόσεις των νανοχρωμάτων είναι ίδιες ή και καλύτερες από κάθε αντίστοιχη συμβατική κατηγορία (καθαρά ακρυλικά συμβατικά χρώματα απαιτούν 3-4MPa για να αποκολληθούν ενώ το ακρυλικό νανόχρωμα απαιτεί τάση 4MPa).



**Σχήμα 9.15:** Αντοχή σε πρόσφυση με τη μέθοδο pull-off

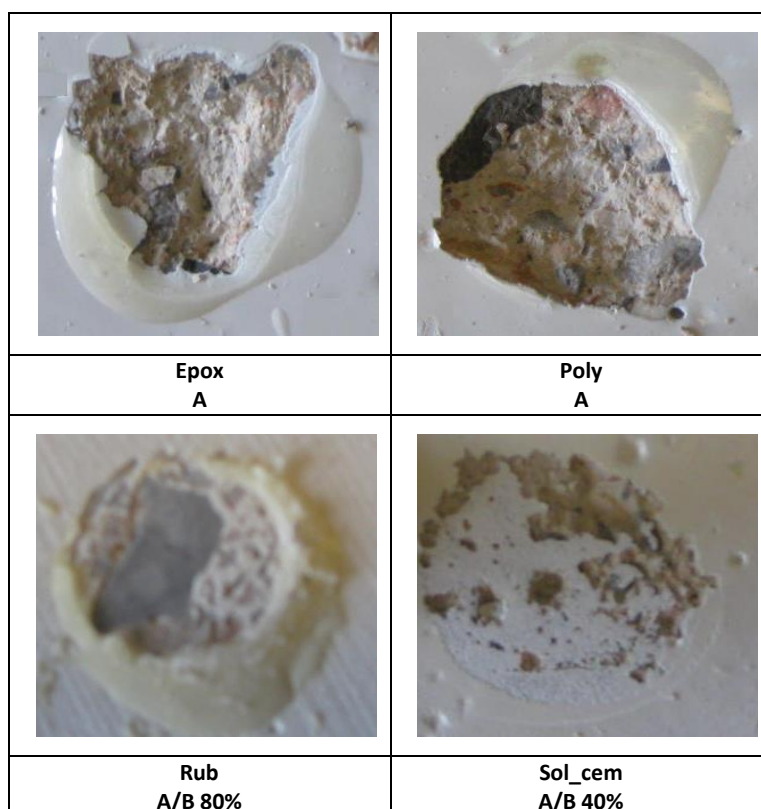
Τα ποσοστά αποκόλλησης και ρήξης συνοχής παρουσιάζουν επίσης διακυμάνσεις. Στο εποξειδικό και στο χρώμα πολυουρεθάνης παρουσιάζεται ρήξη της συνοχής του δοκιμίου ενώ σε όλα τα υπόλοιπα χρώματα όλων των κατηγοριών παρατηρείται ρήξη ανάμεσα στο δοκίμιο και στο πρώτο στρώμα του επιχρίσματος. Τα ποσοστά είναι παρόμοια σε όλα τα δοκίμια που εφαρμόστηκαν συμβατικές επικαλύψεις με μόνη εξαίρεση το σιλικονούχο ακρυλικό χρώμα. Από βιομηχανικά χρώματα και στο καουτσουκικής βάσης επίχρισμα και στο τσιμεντόχρωμα διαλύτη παρουσιάζεται μικρότερη ρήξη της συνοχής από τις ακρυλικές διασπορές. Τέλος τα χρώματα νανοτεχνολογίας παρουσιάζουν ελαφρά βελτιωμένη ρήξη της συνοχής με το χρώμα σιλοξανικής βάσης να ξεχωρίζει. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως να οφείλεται αφενός στα μικρότερα πάχη των φιλμ που απαιτούνται και αφετέρου στο ότι η διεσπαρμένη φάση της τάξεως των  $10^{-9}$ m προσκολλάται καλύτερα στην επιφάνεια του υποστρώματος δημιουργώντας ισχυρότερους δεσμούς συνάφειας.

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται ενδεικτικές φωτογραφίες των δοκιμίων μετά από την δοκιμή της αποκόλλησης για όλες τις επικαλύψεις με το αντίστοιχο ποσοστό και τάξη αποκόλλησης.

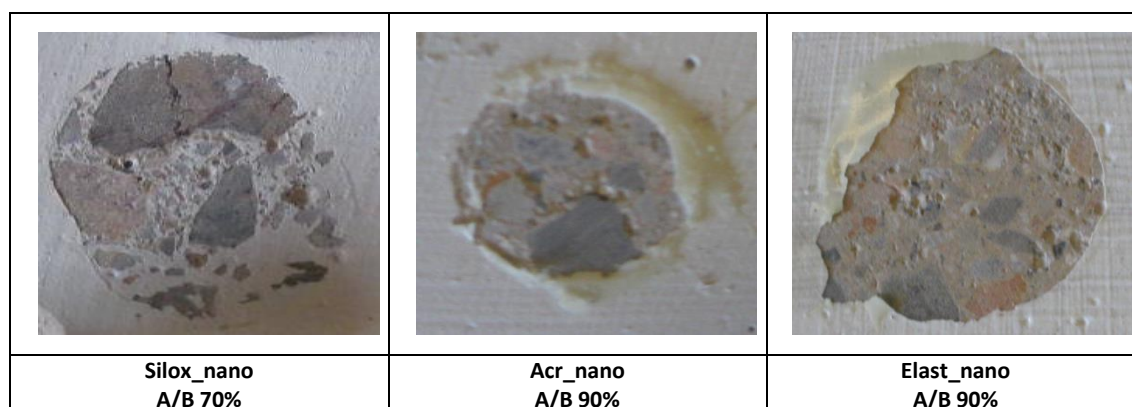
		
<b>Acr1</b> A/B 95%	<b>Acr2</b> A/B 95%	<b>Acr3</b> A/B 95%
		
<b>Acr_sil</b> A/B 70%	<b>Acr_glas</b> A/B 95%	<b>Acr_cem</b> A/B 95%
		
<b>Acr_rel</b> A/B 95%	<b>Elast_horz</b> A/B 90%	<b>Elast_vert</b> A/B 95%
		
<b>Plast1</b> A/B 95%	<b>Acr_styr</b> A/B 95%	

Σχήμα 9.16: Ενδεικτικές φωτογραφίες των αποτελεσμάτων της δοκιμής pull-off για συμβατικές επικαλύψεις





**Σχήμα 9.17:** Ενδεικτικές φωτογραφίες των αποτελεσμάτων της δοκιμής pull-off για βιομηχανικές επικαλύψεις







**Σχήμα 9.18:** Ενδεικτικές φωτογραφίες των αποτελεσμάτων της δοκιμής pull-off για επικαλύψεις νανοτεχνολογία

### 9.2.6 Προσδιορισμός της Πρόσφυσης του Επιστρώματος με τη Δοκιμή της Σταυροειδούς Χάραξης (Cross Cut Test)

Η δοκιμή της σταυροειδούς χάραξης για την εκτίμηση της πρόσφυσης της επικάλυψης στο υπόστρωμα πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ISO 2409: 1992(E) όπως περιγράφεται αναλυτικά στην §7.2.2. Η πρόσφυση εκτιμήθηκε για όλες τις οργανικές επικαλύψεις από κάθε κατηγορία χρωμάτων, 30 ημέρες μετά την εφαρμογή κάθε επικάλυψης. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν φέτες σκυροδέματος πάχους 50mm και διαμέτρου 150mm, ίδια με τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση pull-off (Σχήμα 9.14). Σε κάθε δοκίμιο είχε εφαρμοσθεί το κατάλληλο αστάρι και έπειτα δύο στρώματα βαφής. Το συνολικό πάχος της επικάλυψης (*Dry Film Thickness, DFT*) μετρήθηκε με παχύμετρο τύπου eban 2000 Mk2 σύμφωνα με το αντίστοιχο πρότυπο.

Για τη χάραξη χρησιμοποιήθηκε ειδικό όργανο της εταιρείας Erichsen (model 295/I, D-5870 Hemer) που φέρει κοπτικούς τροχούς με μεταξύ τους απόσταση από 1 έως 4 mm. Δεδομένου ότι για πάχος επιστρώματος 121μm-250μm και υπόστρωμα σκυρόδεμα, η απόσταση των κοπτικών τροχών που προτείνεται είναι ίση προς 3mm, στις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη απόσταση για τις επικαλύψεις. Στα δοκίμια πραγματοποιήθηκε και η επιπρόσθετη δοκιμή της αποκόλλησης διαφανούς ταινίας. Και στις δύο περιπτώσεις ακολούθησε έλεγχος της εμφάνισης της επιφάνειας και σύγκριση με την κατάταξη του πρότυπου που δίνεται στον Πίνακας 9.15 (Πίνακας 7.5).

Πίνακας 9.15: Κατάταξη για τη δοκιμή σταυροειδούς χάραξης σε επιστρώσεις

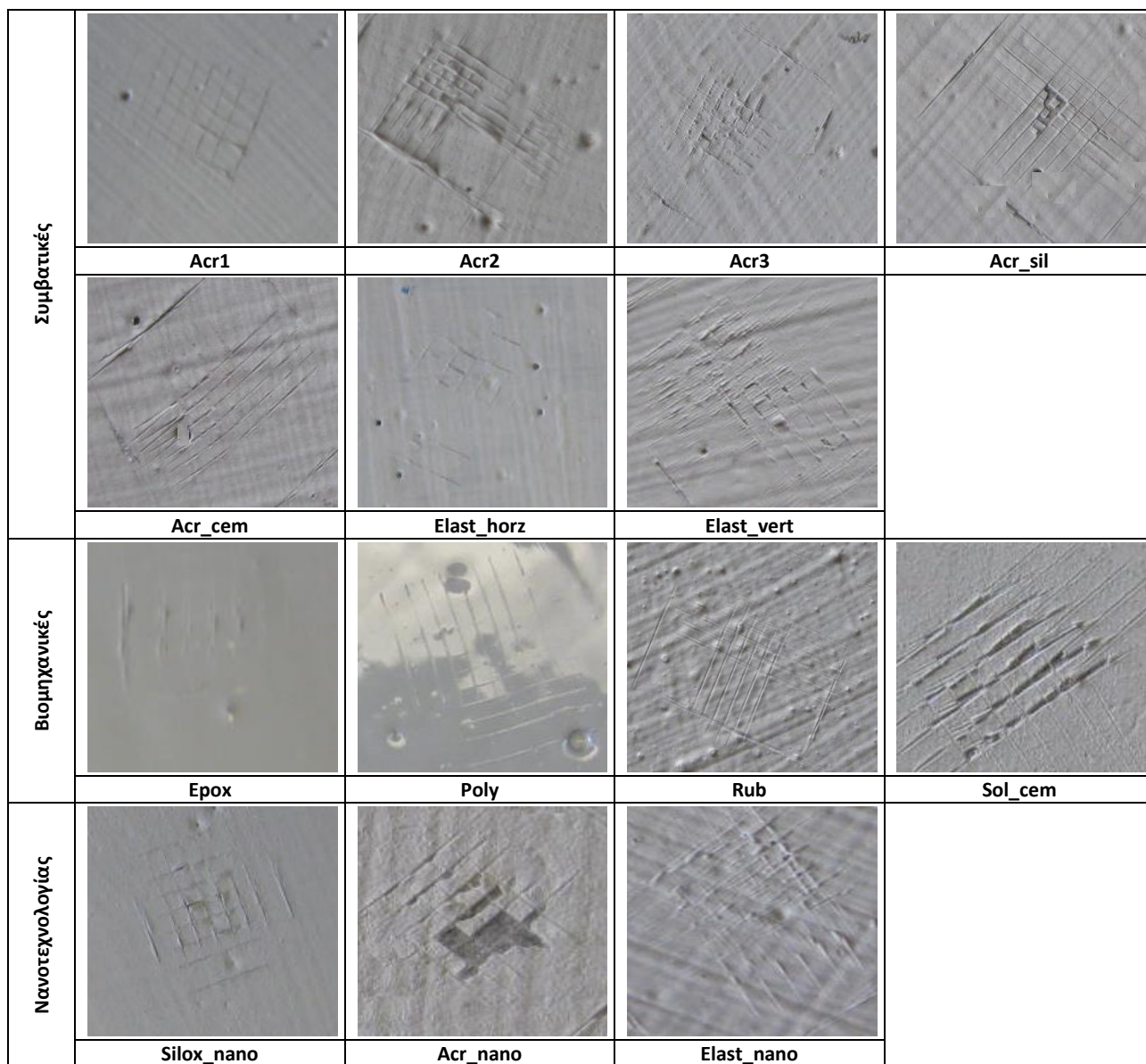
Κατάταξη	Περιγραφή	Εμφάνιση της επιφάνειας της σταυροειδούς περιοχής από την οποία προήλθε η απολέπιση.
0	Κανένα από τα τετράγωνα του δικτύματος δεν έχει αποσπαστεί.	—
1	Απόσπαση μικρών νιφάδων της επικάλυψης στις τομές των χαραγών. Επηρεάζεται μια περιοχή του δικτύματος όχι μεγαλύτερη από 5%.	
2	Η επικάλυψη έχει απολεπιδωθεί στις άκρες ή/και στα σημεία τομής των χαραγών. Επηρεάζεται μια περιοχή από 5-15%.	
3	Η επικάλυψη εμφανίζει αποφλοίωση στις άκρες των χαραγών εν μέρει ή ολοκληρωτικά σε μεγάλες ταινίες, ή/και εμφανίζει αποφλοίωση εν μέρει ή ολοκληρωτικά σε διαφορετικά σημεία των τετραγώνων. Επηρεάζεται ένα ποσοστό 15-35% της επιφάνειας.	
4	Η επικάλυψη εμφανίζει αποφλοίωση στις άκρες των χαραγών σε μεγάλες ταινίες ή/και κάποια τετράγωνα έχουν επηρεαστεί μερικώς ή εξ' ολοκλήρου. Επηρεάζεται ποσοστό της επιφάνειας 35-65%.	
5	Κάθε επίπεδο αποφλοίωσης που δεν εντάσσεται στην κατηγορία 4.	

Τα αποτελέσματα της δοκιμής σταυροειδούς χάραξης δίνονται στον παρακάτω πίνακα όπου γίνεται και η αντίστοιχη κατάταξη των επικαλύψεων πριν και μετά την εφαρμογή της ταινίας σύμφωνα με τον αντίστοιχο πρότυπο. Ακολουθούν κάποιες χαρακτηριστικές εικόνες των δοκιμών.



**Πίνακας 9.16:** Αποτελέσματα δοκιμής σταυροειδούς χάραξης για συμβατικές επικαλύψεις

	Επικάλυψη	Πάχος Επικάλυψης (S, DFT, μm)	Κατάταξη σύμφωνα με τον Πίνακα 9.15, πριν την εφαρμογή ταινίας	Κατάταξη σύμφωνα με τον Πίνακα 9.15, μετά την εφαρμογή ταινίας
Συμβατικές	Acr1	220	1	2
	Acr2	230	2	3
	Acr3	230	2	3
	Acr_sil	220	4	5
	Acr_cem	250	1	2
	Elast_horz	250	0	1
	Elast_vert	250	2	3
Βιομηχανικές	Epox	300	0	0
	Poly	350	0	0
	Rub	280	0	0
	Sol_cem	250	3	4
Νάνο	Silox_nano	200	1	2
	Acr_nano	210	4	5
	Elast_nano	200	1	2



**Σχήμα 9.19:** Ενδεικτικές φωτογραφίες κατά τη δοκιμή αποκόλλησης, πριν την εφαρμογή ταινίας

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη δοκιμή αποκόλλησης κατά “cross-cut” είναι σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις αποκόλλησης με τη μέθοδο “pull-off”, δίνοντας μικρότερες τιμές αποκόλλησης στα βιομηχανικά χρώματα **Epoxy**, **Poly** και **Rub**, πριν και μετά την εφαρμογή της ταινίας. Τη χειρότερη συμπεριφορά παρουσιάζουν τα ακρυλικά χρώματα τόσο τα συμβατικά όσο και τα νανοτεχνολογίας αλλά και το τιμμεντόχρωμα διαλύτη (βιομηχανική επικάλυψη). Βελτιωμένη όψη επέδειξαν τα ελαστομερή χρώματα και το σιλοξανικό νανόχρωμα. Γενικά η σταυροειδής χάραξη είναι μια εύκολη και δημοφιλής μέθοδος εκτίμησης της συνάφειας αλλά είναι λιγότερο ακριβής. Σε συνδυασμό με την προηγούμενη μέθοδο αποτίμησης της πρόσφυσης δίνει μια πιο σαφή εικόνα της συμπεριφοράς των επικαλύψεων.

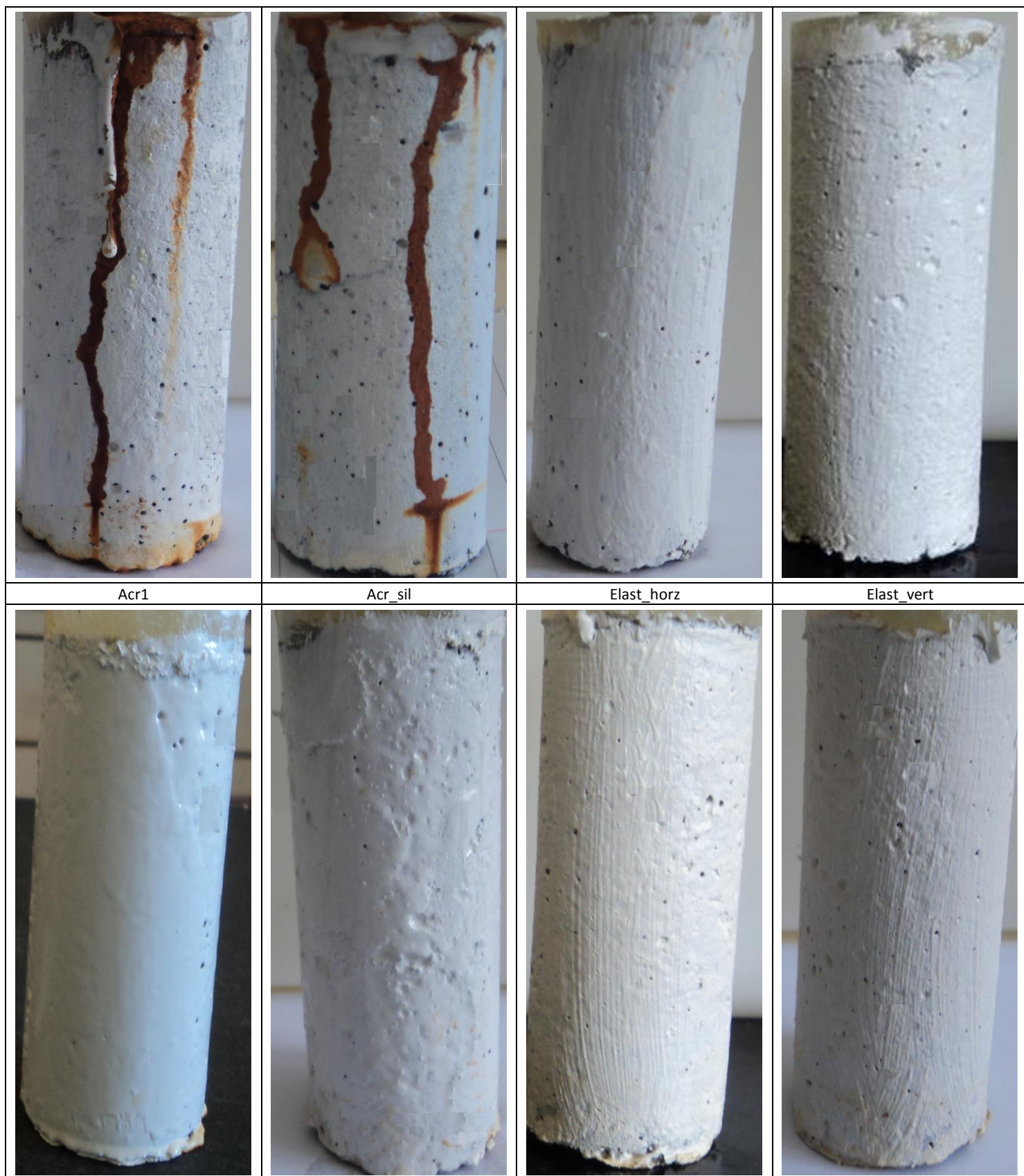
### 9.2.7 Αντοχή σε Θάλαμο Αλατονέφωσης

Για τον προσδιορισμό της αντοχής των οργανικών επικαλύψεων στον θάλαμο αλατονέφωσης δοκίμια οπλισμένου τιμμεντοκονιάματος στα οποία είχαν εφαρμοστεί τα χρώματα παρέμειναν για 1000hrs σε ατμόσφαιρα 5% κ.β. NaCl και σε θερμοκρασία 35+1,1-1,7°C. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα πρότυπα ASTM D610-07<sup>290</sup> και ASTM D714 - 02(2009)<sup>291</sup>, όπου αποτιμούν το βαθμό σκωρίασης των δοκιμίων και την εμφάνιση φουσκαλών στην επιφάνεια του δοκιμίου αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της αντοχής σε αλατονέφωση δίνονται στον **Πίνακα 9.17** και στο τέλος παρατίθενται ενδεικτικές φωτογραφίες των δοκιμίων.

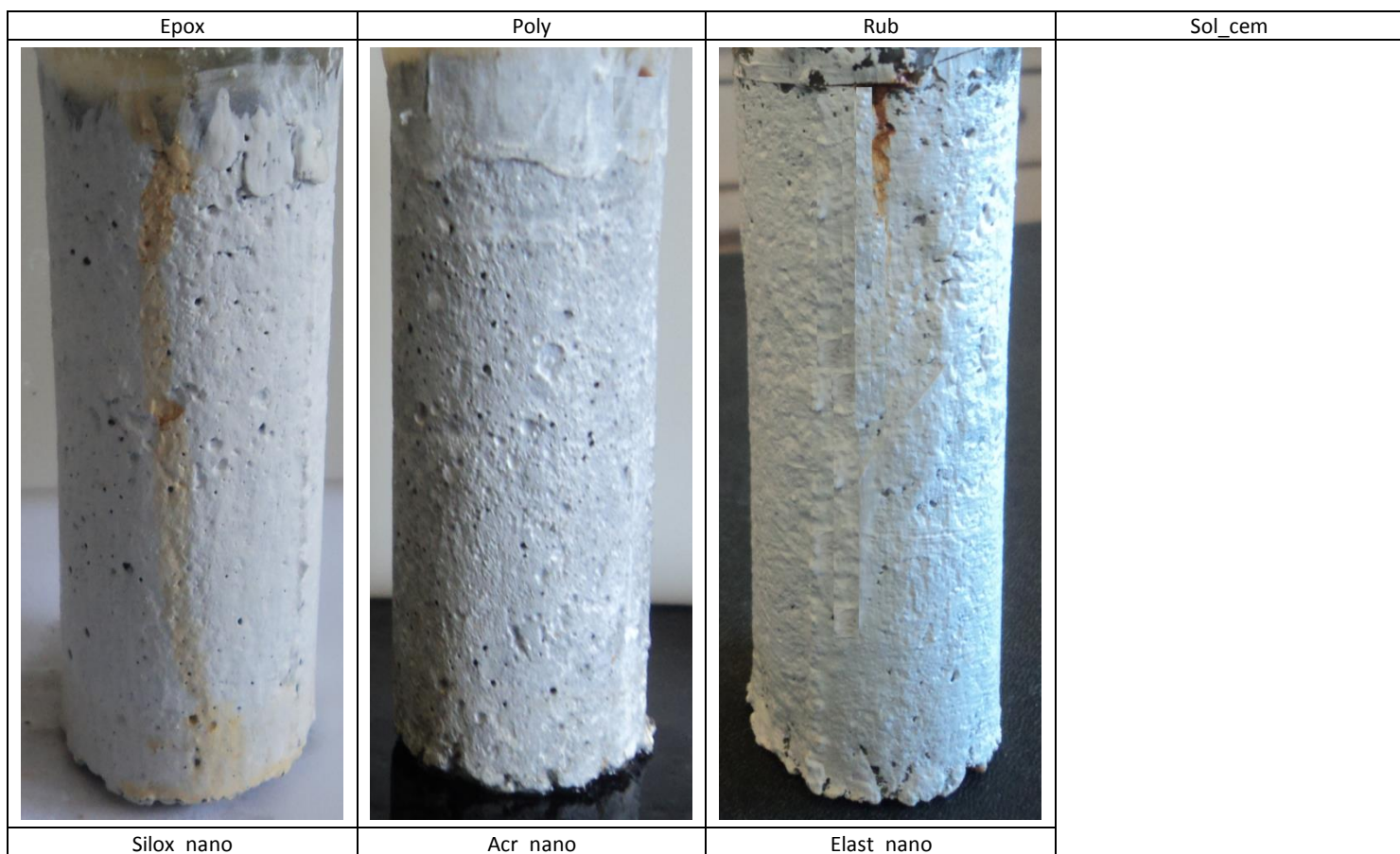
**Πίνακας 9.17:** Αποτίμηση βαθμού σκωρίασης μετά από 1000hrs σε θάλαμο αλατονέφωσης

	Επικάλυψη	Κατάταξη σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D610-07	Κατάταξη σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D714 - 02
Συμβατικές Επικαλύψεις	Acr1_1	4	#6 medium
	Acr1_2	4	#6 medium
	Acr1_3	5	#6 medium dense
	Acr_sil_1	5	#6 medium dense
	Acr_sil_2	5	#6 medium dense
	Acr_sil_3	5	#6 medium
	Elast_horz_1	10	#6 few
	Elast_horz_2	10	#6 medium
	Elast_horz_3	9	#6 few
	Elast_vert_1	10	#6 few
	Elast_vert_2	10	#6 few
	Elast_vert_3	10	#6 few
Βιομηχανικές Επικαλύψεις	Epoxy_1	10	#8 few
	Epoxy_2	10	#8 few
	Epoxy_3	10	#8 few
	Poly_1	10	#8 few
	Poly_2	10	#8 few
	Poly_3	10	#8 few
	Rub_1	10	#8 few
	Rub_2	9	#8 medium
	Rub_3	10	#8 medium
	Sol_cem_1	10	#8 medium dense
	Sol_cem_2	9	#8 medium dense
	Sol_cem_3	9	#8 medium dense
Επικαλύψεις Νανοτεχνολογίας	Silox_nano_1	8	#6 few
	Silox_nano_2	7	#6 medium
	Silox_nano_3	7	#6 few
	Acr_nano_1	10	#6 medium
	Acr_nano_2	10	#6medium
	Acr_nano_3	10	#6 few
	Elast_nano_1	10	#6 few
	Elast_nano_2	10	#6 few
Elast_nano_3	10	#6 few	

Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικές φωτογραφίες των δοκιμίων μετά την παραμονή τους σε θάλαμο αλατόνεφωσης.







**Σχήμα 9.20:** Ενδεικτικές φωτογραφίες δοκιμών μετά από 1000hrs σε θάλαμο αλατονέφωσης

Όπως φαίνεται, τα ακρυλικά χρώματα – τόσο το καθαρό ακρυλικό όσο και το σιλικονούχο – παρουσιάζουν την χειρότερη συμπεριφορά με εμφανή τα προϊόντα διάβρωσης στην επιφάνειά τους. Αντίθετα, τα ελαστομερή συμβατικά χρώματα επιδεικνύουν καλύτερη συμπεριφορά με μικρή εμφάνιση σκουριάς στα δοκίμια που ελέχθησαν. Όλες οι βιομηχανικές επικαλύψεις επέδειξαν άριστη συμπεριφορά με την όψη των δοκιμών να παρουσιάζεται ελεύθερη προϊόντων διάβρωσης. Αναφορικά με τις επικαλύψεις νανοτεχνολογίας, η συμπεριφορά τους είναι καλύτερη από των αντίστοιχων συμβατικών και γενικά και ανά συγκεκριμένη κατηγορία. Πρέπει όμως να τονιστεί πως το ακρυλικό χρώμα νανοτεχνολογίας ενώ δεν επέδειξε προϊόντα διάβρωσης στην επιφάνειά του, παρουσίασε μεγάλο βαθμό αποχρωματισμού και ξεθωριάσματος.



## 10. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Αντικείμενο της ενότητας αυτής είναι η μελέτη των αντιδιαβρωτικών ιδιοτήτων των επικαλύψεων και ο βαθμός της προσφερόμενης προστασίας μετά την έκθεσή τους σε διαφορετικά διαβρωτικά περιβάλλοντα. Ο βαθμός προστασίας έναντι της διάβρωσης εκτιμήθηκε με προσδιορισμό της απώλειας μάζας των επικαλυμμένων δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου έκθεσής τους στις διάφορες συνθήκες. Οι αντιδιαβρωτικές ιδιότητες των επικαλύψεων εκτιμήθηκαν με ηλεκτροχημικές μεθόδους και συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν η Τεχνική της Γραμμικής Πόλωσης για τη μέτρηση της αντίστασης πόλωσης  $R_p$  και εξετάστηκε η μεταβολή του δυναμικού διάβρωσης σε συνάρτηση με το χρόνο έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον των επικαλυμμένων δοκιμίων.

Μια σειρά από άλλες μεθόδους επίσης εφαρμόσθηκαν ώστε να είναι πλήρης η σύγκριση των χρησιμοποιούμενων επικαλύψεων. Ειδικότερα, χάλυβες όλων των κατηγοριών εξετάσθηκαν με Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών και δείγματα από τα δοκίμια ογκομετρήθηκαν με σκοπό την εύρεση της συγκέντρωσης των διαχεόμενων χλωριόντων στη μάζα των δοκιμίων μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας.

Η μελέτη των επικαλύψεων έναντι της διάβρωσης περιελάμβανε έκθεση των δοκιμίων σε 3 διαφορετικά διαβρωτικά περιβάλλοντα.

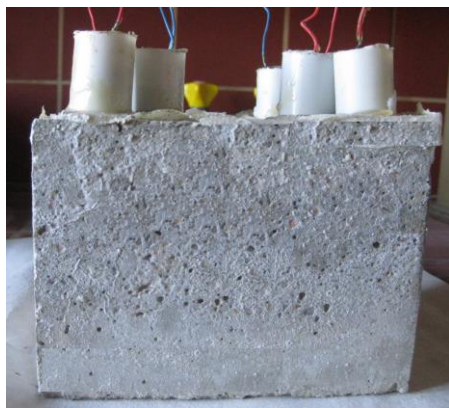
- **Διάβρωση μακράς διάρκειας:** Οπλισμένα δοκίμια σκυροδέματος και τσιμεντοκονιάματος εκτέθηκαν για διάστημα 36 μηνών σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl προσομοιάζοντας το θαλάσσιο περιβάλλον.
- **Επιταχυνόμενη διάβρωση:** Οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα διατηρήθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης με 5% κ.β. NaCl για διάστημα 6 εβδομάδων με σκοπό τον έλεγχο της επίδοσης των επιστρωμάτων σε επιταχυνόμενες συνθήκες.
- **Εναλλασσόμενοι κύκλοι ύγρυνασης-ξηράνσης:** Οπλισμένα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος εκτέθηκαν σε διαδοχικούς κύκλους ανά 24 ώρες σε υγρό και ξηρό υδατικό περιβάλλον εναλλάξ. Το περιβάλλον προσομοιάζει συνθήκες που επικρατούν σε περιοχές με το φαινόμενο της παλίρροιας-άμπωτης όπως βάρθρα γεφυρών και λιμενικά έργα.

### 10.1 Διάβρωση Μακράς Διαρκείας

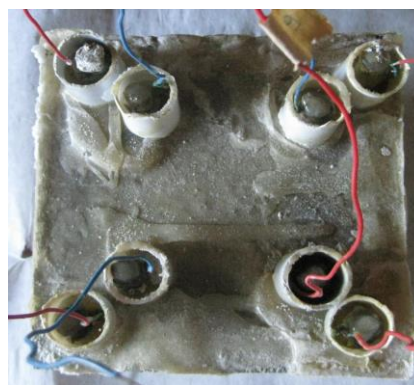
Δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος και δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος διατηρήθηκαν μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 1500 και 600 ημερών αντίστοιχα σε συνθήκες εργαστηρίου. Τα διαφορετικά υποστρώματα σκυροδέματος και τσιμεντοκονιάματος χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό την μελέτη τυχόν διαφορών στη συμπεριφορά των επικαλύψεων όταν εκτίθενται σε παραθαλάσσιο περιβάλλον.

#### 10.1.1 Δοκίμια Οπλισμένου Σκυροδέματος

Τα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος ήταν κυβικά με διαστάσεις 15x15x15cm και σε κάθε ένα από αυτά ήταν τοποθετημένοι 8 οπλισμοί, 4 οπλισμοί σε απόσταση 2cm από κάθε ακμή του κύβου και 4 οπλισμοί σε απόσταση 4cm από κάθε ακμή του κύβου.



α



β

**Σχήμα 10.1:** (α) Κάτοψη και (β) πλαινή όψη δοκιμίων οπλισμένου σκυροδέματος που εκτέθηκαν σε διάβρωση μακράς διαρκείας, διαστάσεις 100x100x100mm

### 10.1.1.1 Χρονική Εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης των Χαλύβων

Η μεθοδολογία αποτίμησης του βαθμού διάβρωσης λόγω της παρουσίας ιόντων χλωρίου περιελάμβανε μη καταστρεπτικές μεθόδους όπως την χρονική καταγραφή του ελεύθερου δυναμικού διάβρωσης συναρτήσεως του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87. Οι τιμές του μετρούμενου δυναμικού διάβρωσης, αποτελούν ένδειξη για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο οπλισμός στο σκυρόδεμα και για την περίπτωση ηλεκτροδίου κεκορεσμένου καλομέλανα οι τιμές διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον **Πίνακας 10.1 (Πίνακας 8.3)**

**Πίνακας 10.1:** Πιθανότητα διάβρωσης ανάλογα με την τιμή του δυναμικού διάβρωσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87

Δυναμικό διάβρωσης (mV) vs. SCE	Πιθανότητα διάβρωσης
>-126	Παθητική κατάσταση (90% πιθανότητα, ο οπλισμός δε διαβρώνεται)
-126 έως -276	Ασαφής κατάσταση
<-276	Υψηλή (90% κίνδυνος διάβρωσης)
<-426	Διάβρωση σε εκτεταμένο βαθμό

Το δυναμικό διάβρωσης ή δυναμικό ανοικτού κυκλώματος ( $E_{corr}$  ή  $E_{ocp}$ ) μετρήθηκε τακτικά σε όλους τους οπλισμούς ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς κορεσμένου καλομέλανα SCE και τα αποτελέσματα εκφράζονται στον **Πίνακας 10.2**. Οι τιμές αναφέρονται στους μέσους όρους των τεσσάρων οπλισμών και η σύντμηση «ΕΣ» χρησιμοποιείται για τους εσωτερικούς οπλισμούς ενώ η «ΕΞ» για τους εξωτερικούς.

Όλα τα χρώματα που ελέχθησαν σε αυτό το περιβάλλον με αυτό το υπόστρωμα ανήκουν στην κατηγορία των συμβατικών επικαλύψεων εκτός από την επικάλυψη Sol\_cem που ανήκει στα βιομηχανικά χρώματα.



## Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης

**Πίνακας 10.2:** Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης για οπλισμένα σκυροδέματα μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 1500 ημερών

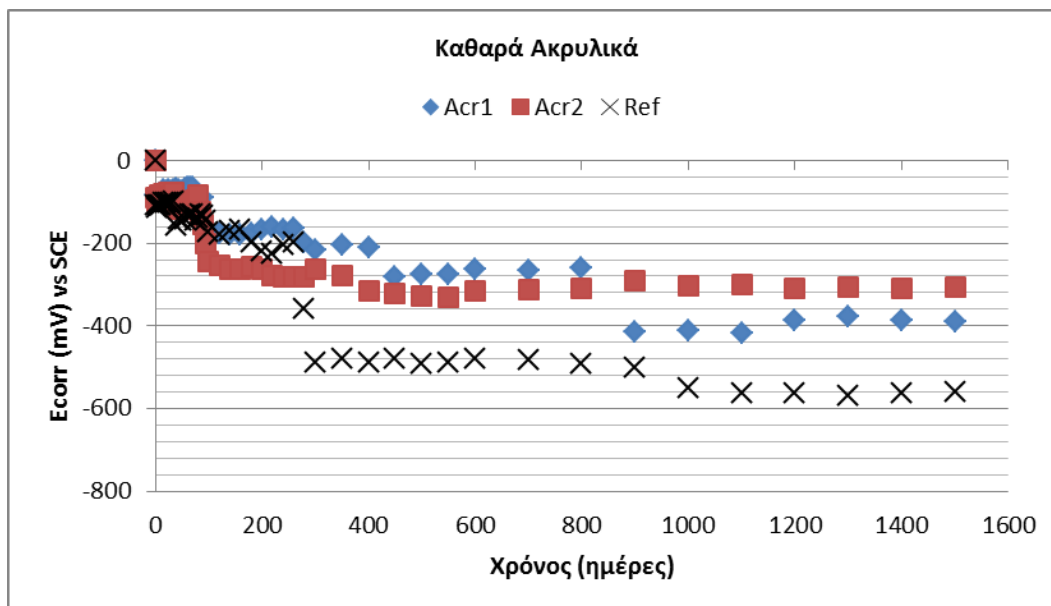
Χρόνος (ημέρες)	$E_{corr}$ (mV) vs SCE																	
	Acr1		Acr2		Acr_sil		Acr_cem		Acr_rel		Elast_horz		Elast_ver		Sol_cem		Ref	
	ΕΣ.	ΕΞ.	ΕΣ.	ΕΞ.	ΕΣ.	ΕΞ.	ΕΣ.	ΕΞ.	ΕΣ.	ΕΞ.	ΕΣ.	ΕΞ.	ΕΣ.	ΕΞ.	ΕΣ.	ΕΞ.	ΕΣ.	ΕΞ.
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-83	-268	-89	-389	-78	-354,8	-95,5	-337,5	-159	-377,8	-122	-310	-52,2	-86,3	-57,8	-164,4	-107	-448,8
4	-89	-276	-98	-389	-91	-349	-106	-430	-93,8	-444,5	-124	-307,4	-67,2	-109,3	-81,5	-166,2	-116	-457,2
6	-86	-271	-89	-435	-84	-403,1	-99,1	-428,5	-89,7	-455	-116	-298,8	-59,1	-104,8	-69,4	-192,9	-108	-462,8
8	-81	-265	-85	-440	-81	-468,5	-96,9	-429,4	-86,7	-447,7	-109	-302,6	-56,1	-103,3	-65,8	-162,7	-107	-473,7
10	-80	-264	-84	-436	-80	-464,2	-96,3	-439,2	-86,3	-456,1	-106	-295,8	-55,9	-108,1	-65,4	-211,7	-108	-476,5
15	-71	-258	-79	-427	-76	-466,4	-92,5	-445,4	-83,3	-449,6	-98,1	-288,5	-52	-101,5	-60,6	-162,1	-102	-488
20	-73	-258	-79	-433	-79	-469,1	-93,1	-448,2	-87,4	-451,7	-101	-325,2	-52,3	-101,2	-64	-161,1	-103	-491
25	-71	-256	-76	-434	-75	-467,2	-89,9	-447,9	-82,9	-448,7	-98,3	-334,3	-50,7	-106	-59	-164,3	-102	-526
30	-75	-256	-88	-443	-85	-471,9	-97,6	-452,1	-88,6	-459,2	-101	-344,6	-60,4	-110,3	-70,8	-206,6	-103	-556
35	-72	-319	-78	-442	-78	-475,5	-88,9	-449,7	-91	-469,7	-95,3	-344,8	-49,4	-95,4	-58,9	-203,4	-97,7	-585
40	-68	-337	-104	-446	-99	-470,1	-86	-466,6	-84,2	-489	-93,5	-453,2	-54,7	-228,3	-62,4	-233,4	-157	-586,9
45	-71	-348	-117	-440	-104	-465,7	-90,7	-461,2	-88,5	-497,6	-95,1	-451,3	-49,1	-214,3	-64,6	-225,2	-142	-577,7
50	-73	-335	-119	-441	-104	-467,6	-94,1	-462,2	-90,5	-499,4	-90,9	-443,3	-48,3	-199	-62,8	-221,4	-147	-579,6
55	-68	-333	-112	-451	-99	-464,5	-90,8	-460,3	-89,3	-496,4	-85,6	-439	-44,5	-183,5	-59,8	-215,5	-143	-574,8
60	-63	-343	-103	-451	-96	-465,5	-85,4	-456,1	-84,7	-504,2	-81,4	-440,1	-44,8	-192,4	-53,3	-208,1	-133	-574
65	-64	-348	-99	-449	-96	-467,2	-85,8	-457,2	-84,9	-501,9	-82,4	-440,8	-39	-164,1	-48,9	-204,7	-131	-575,1
70	-64	-352	-98	-448	-99	-469,8	-88,3	-462,1	-153	-501,8	-163	-440,9	-39	-182,2	-52,1	-204,6	-130	-580,8
75	-106	-400	-96	-450	-104	-479,4	-91	-468,1	-165	-511,7	-162	-463,2	-41	-192,1	-57	-203,4	-147	-583
80	-93	-410	-83	-513	-90,9	-527,4	-82,3	-521,3	-161	-540,8	-152	-461,8	-47,7	-234,9	-51,8	-214,3	-139	-620,6
85	-89	-424	-125	-498	-93	-540	-81,4	-513,6	-180	-538,2	-151	-463,2	-52,9	-303,3	-52,3	-229,4	-131	-612,1
90	-91	-440	-155	-540	-93,8	-542,3	-93,7	-536,5	-158	-549,3	-145	-464,5	-44,2	-313,2	-64,5	-246,4	-133	-630,3
95	-172	-484	-202	-553	-98,3	-543,4	-155	-552	-138	-566,4	-161	-465,7	-56,3	-316,8	-68,8	-307,8	-147	-641,7
100	-189	-500	-245	-559	-184	-550,2	-148	-556,5	-136	-570,4	-166	-476,8	-62,4	-317,3	-89,6	-341,5	-174	-639
120	-176	-497	-253	-558	-185	-545,8	-144	-550,7	-130	-567,9	-162	-473,9	-59,9	-307,7	-73,4	-323,2	-179	-634,2
140	-181	-521	-262	-564	-201	-547	-202	-543	-158	-569,1	-167	-475	-64	-315	-79	-336	-170	-638
160	-178	-515	-263	-562	-197	-541	-198	-534	-161	-565,2	-164	-500	-39	-281	-64	-324	-167	-628
180	-175	-528	-258	-560	-223	-547	-208	-549	-155	-563	-169	-509	-42,2	-280	-64	-332	-199	-641
200	-168	-527	-263	-545	-230	-544	-251	-540	-149	-553	-167	-509	-40,8	-284	-63	-348	-220	-637
220	-160	-525	-280	-551	-259	-549	-260	-561	-232	-558	-174	-495	-53,8	-369	-66	-422	-225	-609
240	-168	-526	-283	-552	-259	-538	-364	-547	-221	-555	-173	-497	-64,7	-363	-67	-420	-204	-632
260	-165	-529	-283	-549	-266	-534	-363	-547	-218	-548	-169	-495	-55,7	-362	-57	-419	-197	-635

Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης

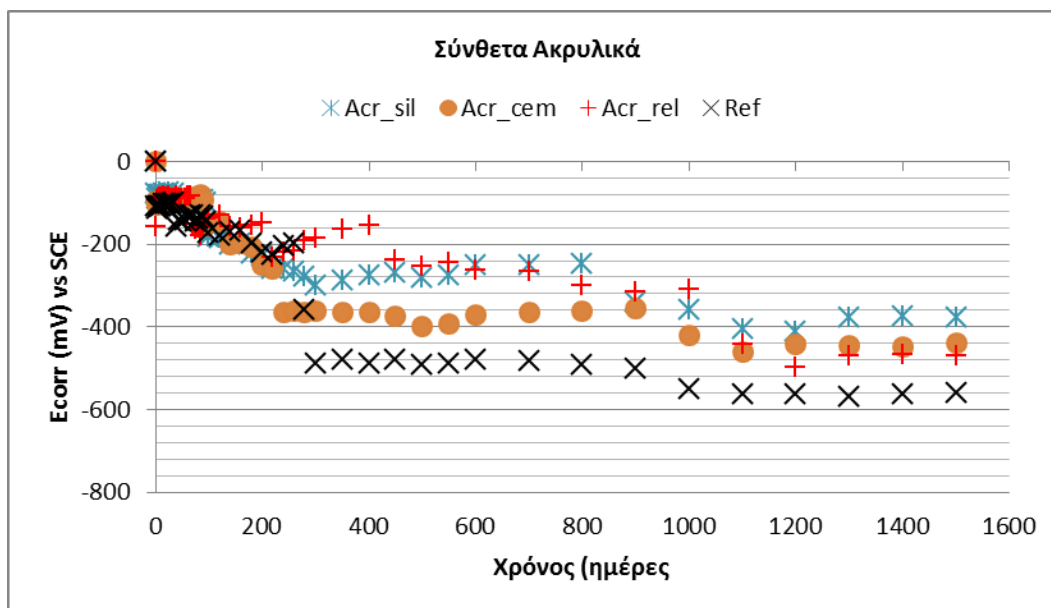
<b>280</b>	-197	-533	-282	-523	-278	-527	-364	-539	-192	-530	-121	-493	-54,5	-343	-54	-421	-360	-631
<b>300</b>	-218	-510	-262	-505	-300	-504	-361	-519	-187	-535	-118	-478	-45,8	-353	-61	-415	-488	-634
<b>350</b>	-203	-507	-280	-518	-287	-518	-365	-536	-163	-525	-110	-467	-44,8	-344	-64	-419	-481	-619
<b>400</b>	-209	-511	-317	-514	-275	-517	-365	-534	-156	-521	-112	-465	-67,8	-357	-110	-422	-489	-632
<b>450</b>	-283	-483	-321	-511	-270	-519	-373	-514	-238	-505	-128	-458	-68,8	-348	-145	-436	-480	-627
<b>500</b>	-276	-479	-327	-500	-281	-527	-399	-534	-253	-521	-154	-458	-74,3	-350	-180	-449	-491	-641
<b>550</b>	-274	-478	-331	-502	-276	-527	-394	-531	-245	-522	-155	-463	-67,3	-332	-177	-452	-489	-639
<b>600</b>	-264	-469	-316	-506	-250	-518	-372	-536	-264	-508	-154	-452	-55,3	-320	-167	-447	-479	-632
<b>700</b>	-266	-467	-311	-489	-250	-512	-366	-540	-266	-511	-172	-468	-62,8	-300	-164	-483	-482	-658
<b>800</b>	-260	-459	-309	-482	-248	-515	-333	-544	-299	-515	-173	-469	-51	-334	-141	-480	-492	-652
<b>900</b>	-416	-470	-291	-502	-341	-532	-356	-559	-316	-543	-164	-490	-47	-410	-147	-523	-502	-641
<b>1000</b>	-410	-466	-304	-502	-358	-550	-420	-551	-309	-573	-234	-532	-143	-459	-165	-568	-552	-692
<b>1100</b>	-417	-463	-301	-505	-404	-550	-460	-550	-441	-578	-310	-558	-192	-452	-295	-565	-564	-699
<b>1200</b>	-388	-484	-309	-503	-412	-554	-444	-552	-497	-582	-309	-564	-197	-445	-291	-571	-562	-688
<b>1300</b>	-377	-486	-306	-504	-376	-527	-447	-558	-470	-588	-304	-560	-194	-450	-296	-569	-569	-688
<b>1400</b>	-388	-485	-310	-507	-375	-549	-450	-554	-467	-583	-308	-555	-197	-452	-291	-567	-564	-694
<b>1500</b>	-391	-488	-305	-509	-377	-551	-438	-557	-471	-584	-304	-561	-194	-458	-293	-565	-561	-684

## Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης

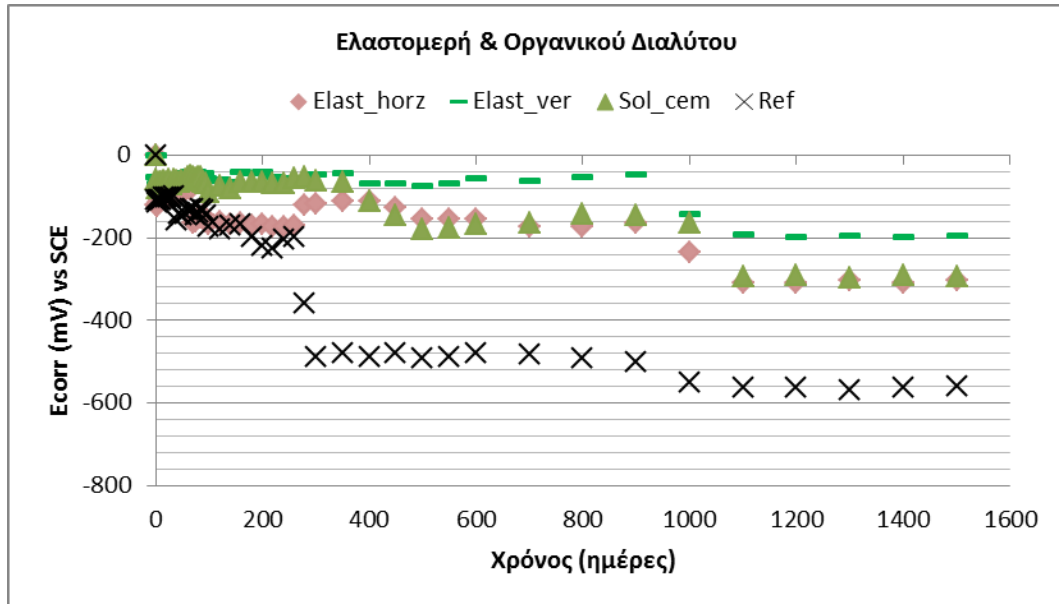
Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι γραφικές παραστάσεις του δυναμικού ανοικτού κυκλώματος συναρτήσει του χρόνου για τους **εσωτερικούς** χάλυβες των δοκιμίων. Όλες οι επικαλύψεις εκτός από την επικάλυψη οργανικού διαλύτου (Sol\_cem) ανήκουν στην κατηγορία των συμβατικών επικαλύψεων αλλά για λόγους ευκρίνειας χωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες και συγκρίνονται με τα δοκίμια αναφοράς. Το συγκεντρωτικό διάγραμμα παρατίθεται στο τέλος και αφορά τους 4 **εσωτερικούς** χάλυβες που ήταν τοποθετημένοι 4cm από κάθε ακμή του κυβικού δοκιμίου.



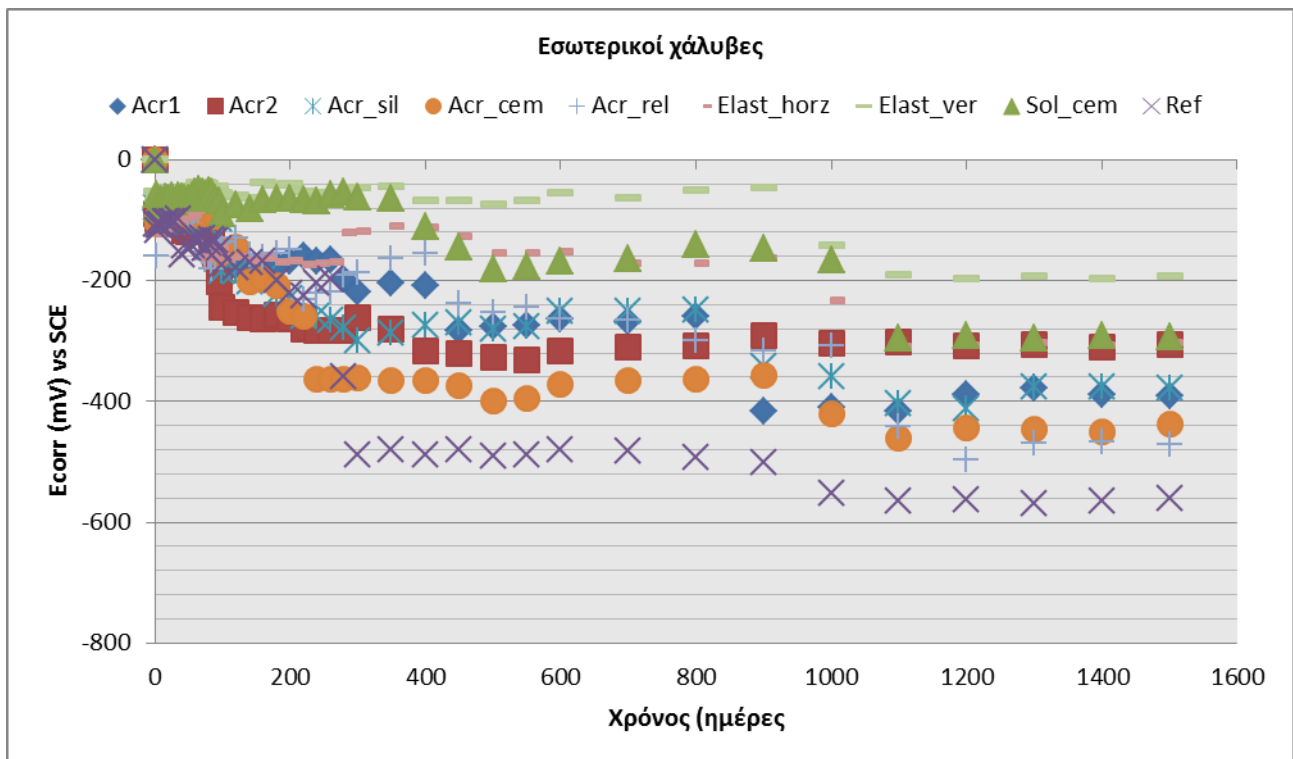
**Σχήμα 10.2:** Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για **εσωτερικούς** χάλυβες σε δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος επικαλυμμένα με καθαρά ακρυλικά χρώματα μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 1500 ημερών



**Σχήμα 10.3:** Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για εσωτερικούς χάλυβες σε δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος επικαλυμμένα με σύνθετα ακρυλικά χρώματα μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 1500 ημερών



**Σχήμα 10.4:** Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για εσωτερικούς χάλυβες σε οπλισμένο σκυροδέματος δοκίμια επικαλυμμένα με ελαστομερή και χρώματα οργανικού διαλύτου μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 1500 ημερών



**Σχήμα 10.5:** Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για εσωτερικούς χάλυβες οπλισμένου σκυροδέματος σε επικαλυμμένα δοκίμια μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 1500 ημερών

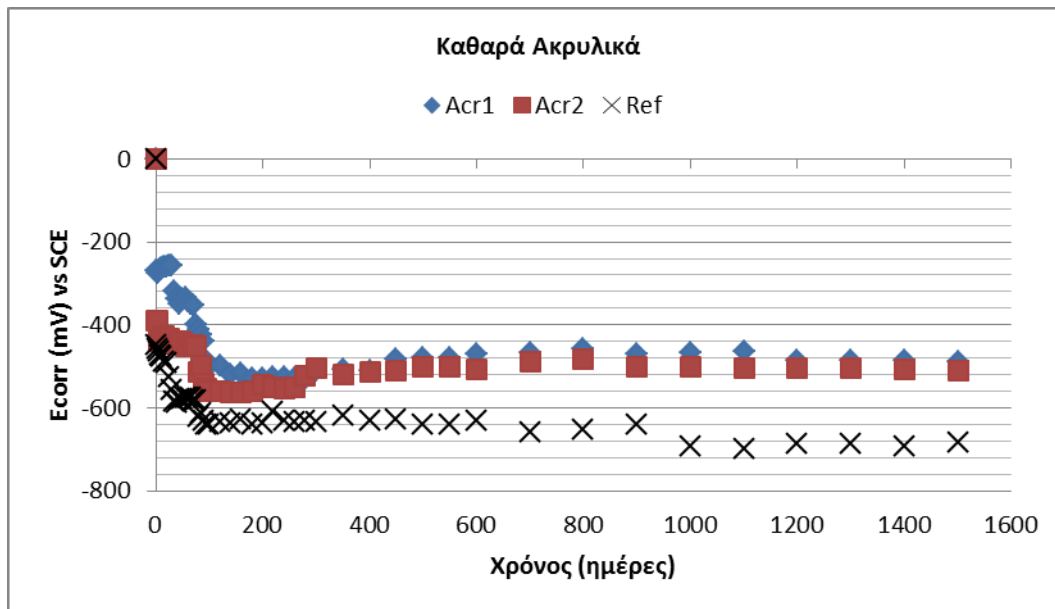
Τα καθαρά ακρυλικά γαλακτώματα τις πρώτες 100 μέρες παρουσιάζουν τιμές δυναμικού έως  $-100\text{mV}$  που χαρακτηρίζουν παθητική κατάσταση του οπλισμού σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87. Έπειτα το χρώμα Acr1 υποχωρεί σταδιακά μέχρι την 800<sup>η</sup> μέρα σε τιμές έως και  $-260\text{mV}$ , που υποδεικνύουν υψηλή πιθανότητα διάβρωσης και από εκεί και έπειτα μέχρι το τέλος του πειράματος παρουσιάζει τιμές δυναμικού που χαρακτηρίζουν

εκτεταμένη διάβρωση. Το χρώμα με τα ακρωνύμιο Acr2 από την 100<sup>η</sup> μέρα και μέχρι και το τέλος της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζει δυναμικά μέχρι και χαμηλότερα από -350mV, όπου οι τιμές αυτές αποδεικνύουν υψηλή πιθανότητα διάβρωσης του οπλισμού.

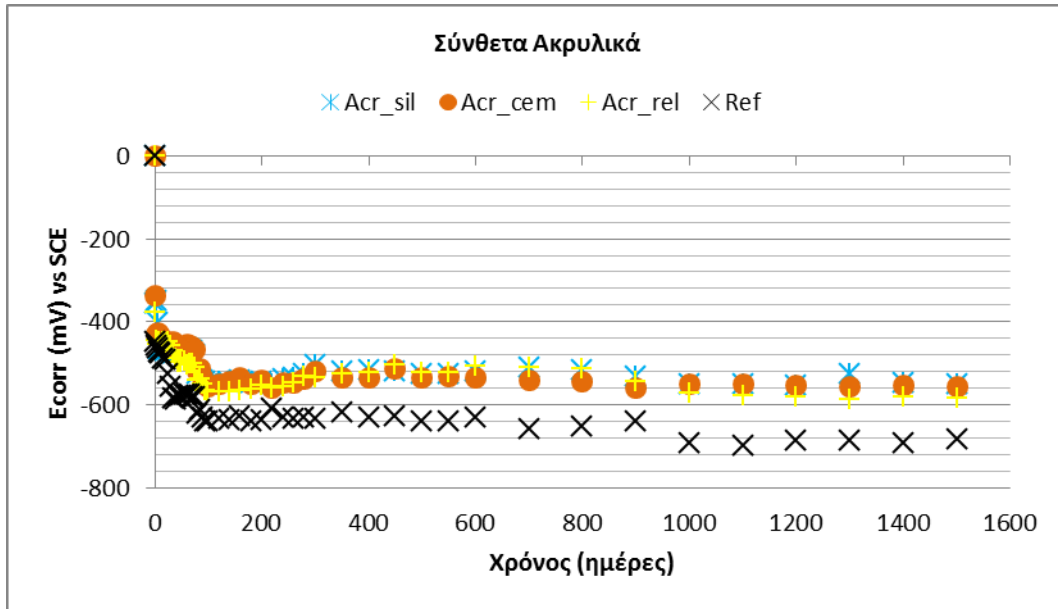
Τα σύνθετα ακρυλικά χρώματα σιλικόνης και τσιμεντόχρωμα νερού παραμένουν σε παθητική κατάσταση για τις πρώτες 100 μέρες του πειράματος ενώ το χρώμα *Acr\_rel* βρίσκεται στην ίδια κατάσταση για τις πρώτες 60 μέρες. Από και έπειτα το χρώμα *Acr\_rel* βρίσκεται ασαφή κατάσταση μέχρι και την 700<sup>η</sup> μέρα όπου η διάβρωση πλέον είναι εκτεταμένη. Το τσιμεντόχρωμα νερού παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές δυναμικού παραμένοντας όμως και κατάσταση υψηλής πιθανότητας διάβρωσης. Εκτεταμένη διάβρωση επιδεικνύει από την 1000<sup>η</sup> μέρα και έπειτα. Τέλος το σιλικονούχο ακρυλικό χρώμα παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το ακρυλικό χρώμα τύπου ρελιέφ.

Το ελαστομερές χρώμα για οριζόντιες επιφάνειες παραμένει σε παθητική κατάσταση για 65 περίπου ημέρες ενώ το ελαστομερές για κάθετες επιφάνειες και το τσιμεντόχρωμα διαλύτη για 900 και 400 ημέρες αντίστοιχα. Τα δύο τελευταία χρώματα από εκεί και έπειτα μέχρι το τέλος της περιόδου έκθεσης παρουσιάζουν ασαφή κατάσταση του οπλισμού. Το ίδιο συμβαίνει και για το ελαστομερές οριζοντίων επιφανειών μέχρι την 1000<sup>η</sup> ημέρα αλλά από εκεί και έπειτα η κατάσταση των οπλισμών παρουσιάζει μεγάλη πιθανότητα διάβρωσης(>90%).

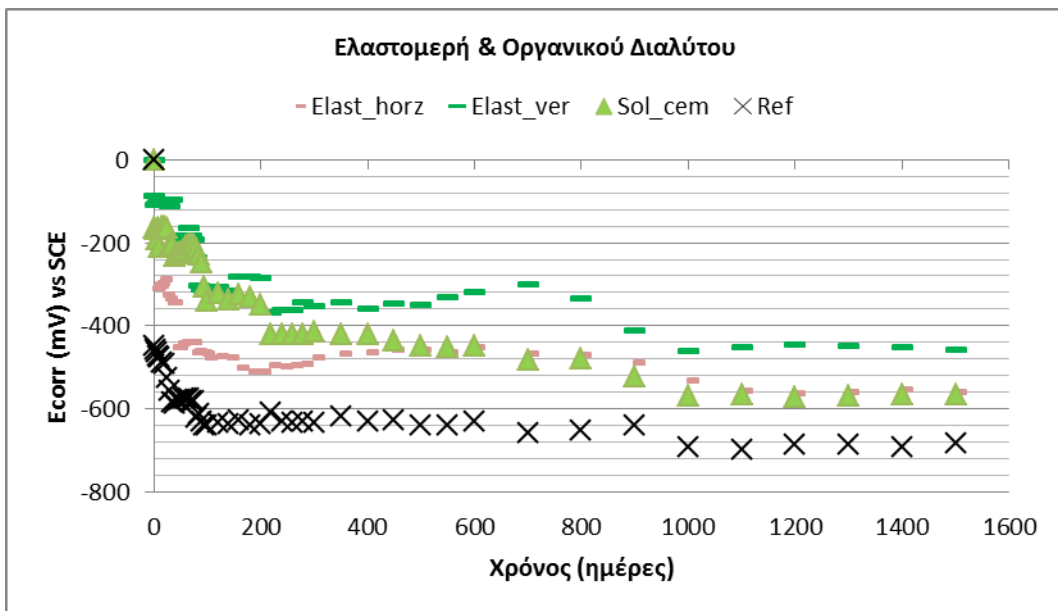
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τους *εξωτερικούς* χάλυβες των οπλισμένων σκυροδεμάτων που ήταν τοποθετημένοι 2cm από κάθε ακμή του κυβικού δοκιμίου.



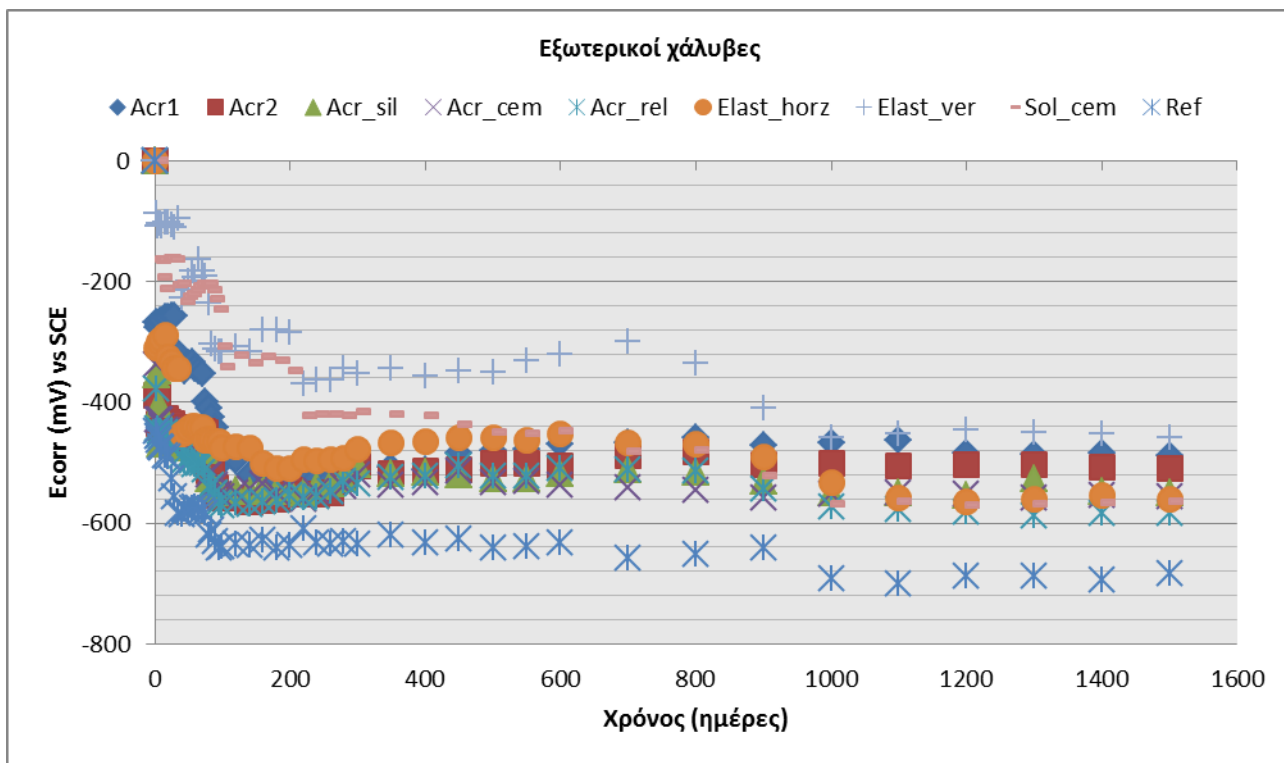
Σχήμα 10.6: Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσεως του χρόνου έκθεσης για εξωτερικούς χάλυβες σε δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος επικαλυμμένα με καθαρά ακρυλικά χρώματα μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 1500 ημερών



**Σχήμα 10.7:** Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για εξωτερικούς χάλυβες σε δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος επικαλυμμένα με σύνθετα ακρυλικά χρώματα μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 1500 ημερών



**Σχήμα 10.8:** Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για εξωτερικούς χάλυβες σε οπλισμένο σκυροδέματος δοκίμια επικαλυμμένα με ελαστομερή και χρώματα οργανικού διαλύτου μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 1500 ημερών



**Σχήμα 10.9:** Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσεως του χρόνου έκθεσης για εξωτερικούς χάλυβες οπλισμένου σκυροδέματος σε επικαλυμμένα δοκίμια μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 1500 ημερών

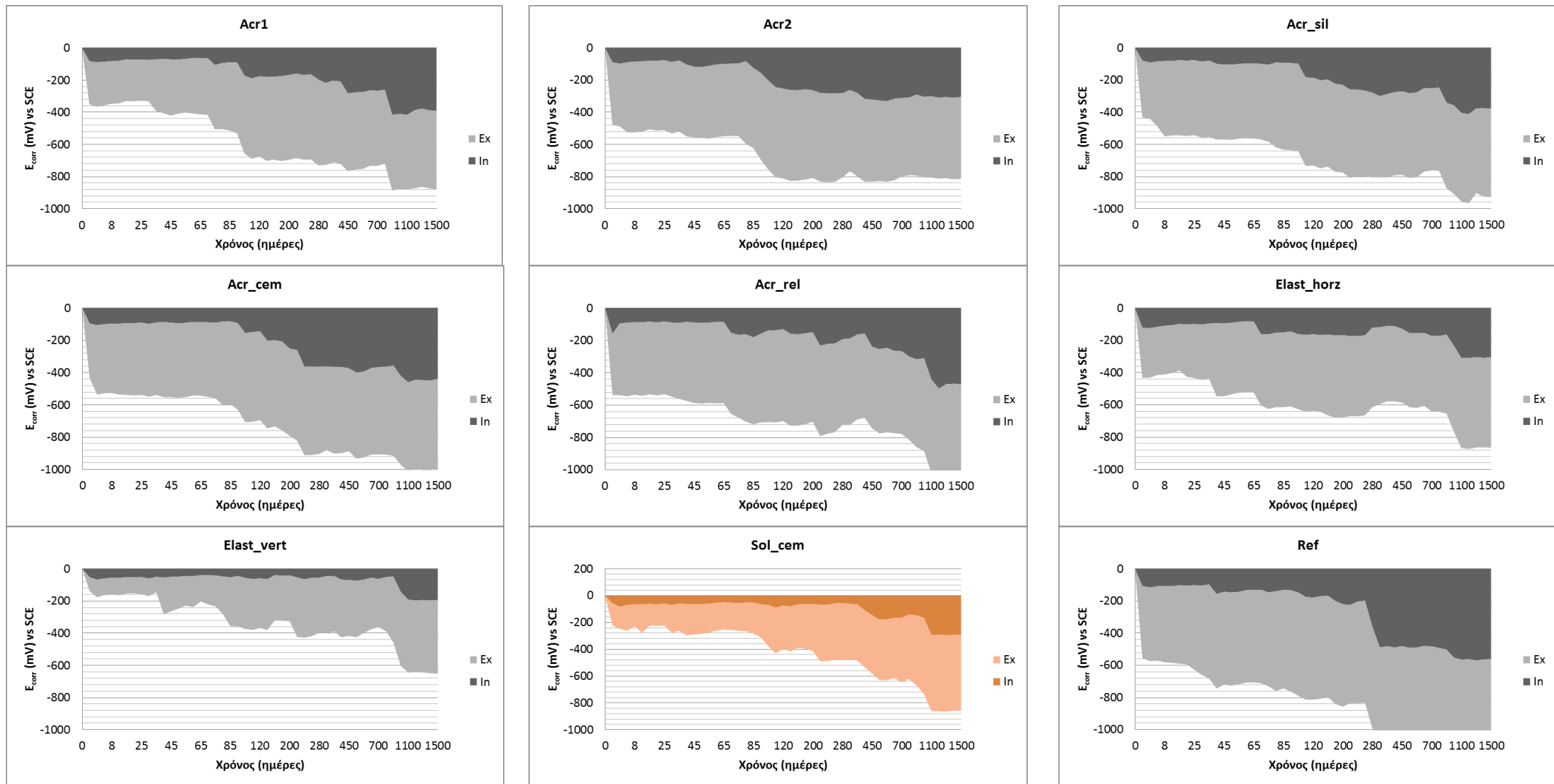
Τα καθαρά ακρυλικά γαλακτώματα, τα σύνθετα ακρυλικά χρώματα και το ελαστομερές οριζοντίων επιφανειών παρουσιάζουν υψηλή πιθανότητα διάβρωσης από την αρχή της περιόδου έκθεσης και πολύ σύντομα η διάβρωση των χαλύβων είναι εκτεταμένη για όλους τους τύπους των ακρυλικών χρωμάτων. Εξαιρεση παρουσιάζει το πρώτο ακρυλικό χρώμα όπου εκτεταμένη διάβρωση παρατηρείται από την 80<sup>η</sup> μέρα και έπειτα.

Το ελαστομερές χρώμα κάθετων επιφανειών βρίσκεται σε παθητική κατάσταση μέχρι την 35<sup>η</sup> ημέρα μερικής εμβάπτισης και μέχρι την 80<sup>η</sup> μέρα βρίσκεται σε ασαφή κατάσταση διάβρωσης. Το τσιμεντόχρωμα διαλύτη παρουσιάζει ασαφή κατάσταση από την αρχή της έκθεσης μέχρι την 90<sup>η</sup> ημέρα. Εκτεταμένη διάβρωση για το τσιμεντόχρωμα διαλύτη παρουσιάζεται από την 450<sup>η</sup> μέρα ενώ για το ελαστομερές χρώμα μέχρι και την 1000<sup>η</sup> μέρα παρουσιάζει υψηλή πιθανότητα διάβρωσης.

Η επίδραση του πάχους επικάλυψης φαίνεται στο **Σχήμα 10.10** όπου είναι εμφανές πως οι τιμές του δυναμικού διάβρωσης για τους εξωτερικούς χάλυβες που είχαν πάχος επικάλυψης 2cm είναι πολύ μικρότερες από τις τιμές που επιδεικνύονται από τους εσωτερικούς χάλυβες με πάχος επικάλυψης 4cm, καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος και για όλους τους τύπους οργανικών επικαλύψεων που ελέχθησαν.



## Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύσεων έναντι Διάβρωσης



**Σχήμα 10.10:** Επίδραση πάχους επικάλυψης σε δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος για μερική εμβάπτιση 1500 ημερών

Το πάχος επικάλυψης των οπλισμών είναι από τις σημαντικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν την διάβρωσή τους και αποτελεί βασικό παράγοντα σχεδιασμού των κατασκευών από Ο.Σ. Σχετικές έρευνες<sup>292</sup> αποδεικνύουν ότι ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης τριπλασιάζεται για αύξηση του πάχους επικάλυψης από 30mm σε 50mm σε σκυρόδεμα με λόγο νερού προς τσιμέντο 0,40. Επίσης όταν το πάχος επικάλυψης των οπλισμών είναι μικρό τότε οι επεμβατικές μέθοδοι έχουν μικρή σημασία καθώς η συνεισφορά τους στην προστασία του οπλισμού είναι εμφανής σε μεγαλύτερα πάχη επικάλυψης<sup>293</sup>. Τέλος το πάχος επικάλυψης πρέπει να αποφασίζεται σε συνάρτηση με λοιπούς παράγοντες καθώς η μεγάλη του αύξηση μπορεί να προκαλέσει αύξηση της πυκνότητας και του μεγέθους των ρωγμών στο σκυρόδεμα<sup>294</sup>.

Η επίδρασή του είναι εμφανής στο δοκίμιο αναφορά όπου οι εσωτερικοί χάλυβες με πάχος επικάλυψης 4cm παρουσιάζουν τις πρώτες 35 ημέρες παθητική συμπεριφορά και εκτεταμένη διάβρωση από την 280<sup>η</sup> ημέρα και έπειτα, ενώ οι εξωτερικοί χάλυβες με 2cm αντίστοιχο πάχος παρουσιάζουν εξαρχής εκτεταμένη διάβρωση. Το πάχος επικάλυψης είναι ιδιαίτερα σημαντικό και σε συνδυασμό με την κατάλληλη οργανική επικάλυψη μπορεί να μειώσει την διάβρωση του χάλυβα σε σημαντικά επίπεδα. Έτσι, οι εξωτερικοί χάλυβες του δοκιμίου με την ελαστομερή επικάλυψη για κάθετες επιφάνειες παρουσιάζουν εκτεταμένη διάβρωση από την 280<sup>η</sup> ημέρα και οι εσωτερικοί χάλυβες βρίσκονται σχεδόν σε όλη τη διάρκεια του πειράματος σε παθητική κατάσταση.

#### 10.1.1.2 Προσδιορισμός Πυκνότητας Ρεύματος Διάβρωσης

Η αποτελεσματικότητα και ο προσφερόμενος βαθμός προστασίας από τις διάφορες οργανικές επικαλύψεις εξετάστηκε ηλεκτροχημικά με την τεχνική της γραμμικής πόλωσης (LPR). Οι εγκιβωτισμένοι χάλυβες των οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων ήταν τύπου B500C και είχαν 100mm μήκος και 10mm (Φ10) διάμετρο. Η επιφάνεια εγκιβωτισμού των χαλύβων 25,13cm<sup>2</sup>, το ισοδύναμο βάρος χάλυβα 55,85g και η πυκνότητα 7,95g/cm<sup>2</sup>.

Η πειραματική διάταξη για τη διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών μετρήσεων περιελάμβανε Ποτενσιοστάτη/ γαλβανοστάτη της E.G & Model 263 συνδεδεμένο με υπολογιστή για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων. Για την επεξεργασία των ηλεκτροχημικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε λογισμικό Power Suite της εταιρίας E.G & G Princeton Research.

Οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε κελί ηλεκτρόλυσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος T=25±1°C. Η διάταξη ήταν τριών ηλεκτροδίων:

- Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο κεκορεσμένου καλομέλανα SCE.
- Ως ηλεκτρόδιο εργασίας είναι το υπό εξέταση χάλυβας Ο.Σ
- Ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκε ράβδος άνθρακα διαστάσεων: 100mm μήκος και 10mm διάμετρο.

Το διάλυμα (ηλεκτρολύτης) που χρησιμοποιήθηκε ήταν υδατικό διαλύματα χλωριούχου νατρίου σταθερής συγκέντρωσης χλωριόντων 3,5% κ.β NaCl).

Η περιοχή πόλωσης του χάλυβα Ο.Σ. ήταν ± 10mV από το δυναμικό διάβρωσης ( $E_{corr}$ ) του υπό εξέταση χάλυβα Ο.Σ και το βήμα σάρωσης (*Scan rate*) του δυναμικού ήταν 0,1mV/sec.

Η αντίσταση πόλωσης  $R_p$  υπολογίστηκε από την κλίση της καμπύλης της έντασης του ρεύματος συναρτήσει των δυναμικών σάρωσης του χάλυβα Ο.Σ. (διαγράμματα E-I), σύμφωνα με τη σχέση:

$$R_p = \frac{dE}{di} \quad [10.1]$$

Η ένταση του ρεύματος διάβρωσης υπολογίστηκε από τη σχέση:

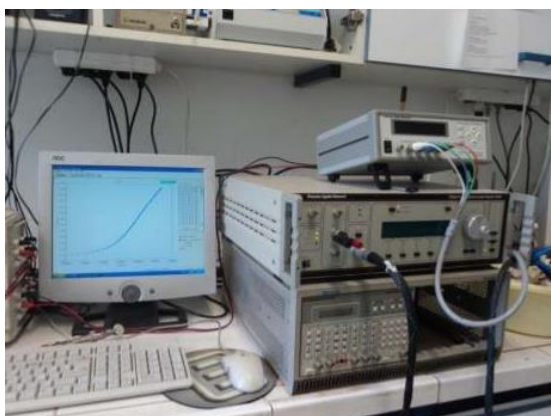
$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad [10.2]$$

Όπου,  $B$  σταθερά Tafel ίση με  $B=0,026mV$ .

Από τον νόμο του Faraday και με γνωστή τη πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης  $i_{corr}$  υπολογίστηκε ο ρυθμός διάβρωσης του χάλυβα Ο.Σ. σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\text{Ρυθμός Διάβρωσης } (\mu m/y) = \frac{3.27 \cdot i_{corr} \cdot E.W}{d} \quad [10.3]$$

Όπου:  $i_{corr}$  πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης [ $\mu A/cm^2$ ],  $E.W$ . ισοδύναμο βάρος σε g (για τον χάλυβα  $E.W=55,85g$ ),  $d$  πυκνότητα χάλυβα σε  $g/cm^3$  ( $7,95g/cm^3$ ).



Σχήμα 10.11: Συνολική διάταξη γραμμικής πόλωσης

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της γραμμικής πόλωσης πραγματοποιείται με βάση τον Πίνακα 8.4 όπου οι αναγραφόμενες τιμές έχουν προκύψει με εργαστηριακές δοκιμές. Δίνονται τιμές τόσο για το ρεύμα διάβρωσης όσο και για την αντίσταση πόλωσης συναρτήσει της κατάστασης του σπλισμού του σκυροδέματος.

Πίνακας 10.3: Συσχέτιση μεταξύ των τιμών της πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης χαλύβδινων σπλισμών σε σκυρόδεμα και της κατάστασης του σπλισμού στο σκυρόδεμα<sup>295</sup>

$i_{corr}$ ( $\mu A cm^{-2}$ )	$R_p$ ( $k\Omega cm^2$ )	Κατάσταση Σπλισμού
<0,1	>260	Παθητική κατάσταση
0,1-0,5	52-260	Χαμηλός ως μέτριος ρυθμός διάβρωσης
0,5-1	26-52	Μέτριος ως υψηλός ρυθμός διάβρωσης
>1	<26	Υψηλός ρυθμός διάβρωσης

Στον Πίνακα 10.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών μετρήσεων για τους εξωτερικούς χάλυβες των σπλισμένων σκυροδεμάτων. Οι τιμές προκύπτουν από το μέσο όρο των 4 εξωτερικών χαλύβων που ήταν τοποθετημένοι 2cm από την ακμή κάθε κυβικού δοκιμίου.

## Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης

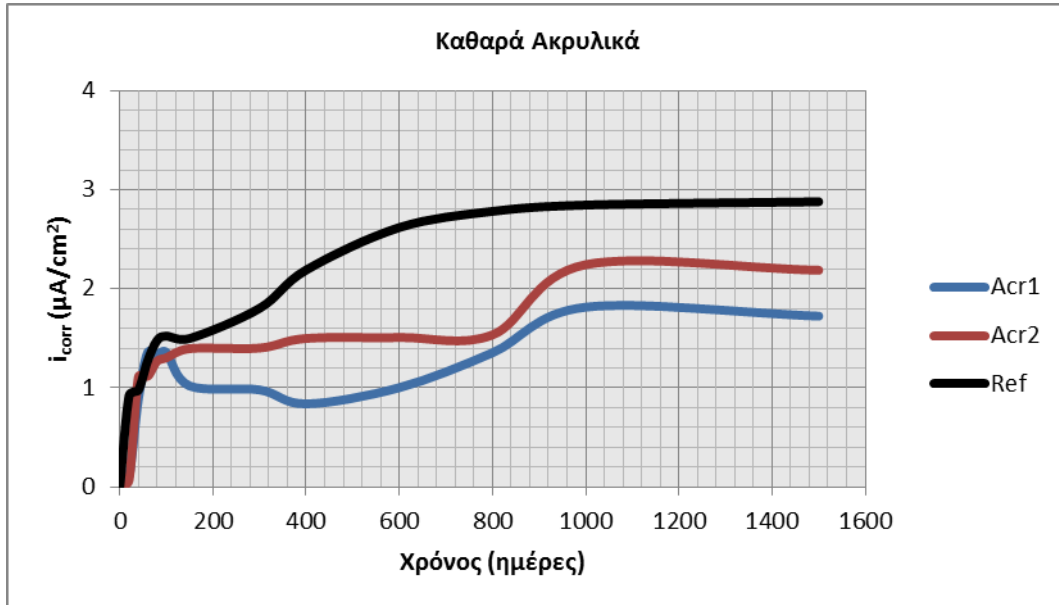
**Πίνακας 10.4:** Ηλεκτροχημικές παράμετροι για δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος εμβαπτισμένα μερικώς σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl. Οι τιμές αφορούν τους μέσους όρους από 4 χάλυβες τοποθετημένους 2cm από την ακμή κάθε κυβικού δοκιμίου (*εξωτερικοί* χάλυβες).

Χρόνος (ημέρες)	Acr1					Acr2					Acr_sil				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	-0,09	-92	0,1108	234633	2,5456	-0,046	-45	0,0670	388271	1,5383	-0,065	-69	0,0805	323090	1,8486
40	-0,488	-489	0,8902	29208	20,4490	-0,532	-533	1,1077	23471	25,4470	-0,404	-403	0,2323	111935	5,3359
60	-0,558	-557	1,3578	19149,1	31,1910	-0,584	-584	1,1173	23270	25,6670	-0,503	-505	0,5614	46315,2	12,8960
80	-0,566	-567	1,3384	19425,5	30,7470	-0,577	-579	1,2697	20477	29,1670	-0,513	-517	0,6536	39778,9	15,0150
100	-0,559	-561	1,3578	19149,1	31,1910	-0,576	-578	1,3030	19953	29,9340	-0,552	-556	0,8860	29344,4	20,3540
150	-0,549	-550	1,0192	25510,9	23,4130	-0,583	-584	1,3962	18621	32,0750	-0,574	-575	1,1394	22818	26,1760
300	-0,543	-544	0,9795	26544,2	22,5010	-0,579	-580	1,4019	18545	32,2050	-0,595	-598	1,3631	19073	31,3140
400	-0,548	-548	0,8381	31021,5	19,2540	-0,577	-579	1,4989	17346	34,4320	-0,607	-608	1,4593	17817	33,5230
600	-0,517	-517	1,002	25947,7	23,0190	-0,543	-542	1,5084	17236	34,6520	-0,554	-557	1,6714	15555	38,3970
800	-0,522	-523	1,3542	19199,3	31,1090	-0,528	-529	1,5350	16937	35,2630	-0,542	-544	1,6345	15907	37,5470
1000	-0,537	-538	1,8151	14324	41,6970	-0,579	-581	2,2443	11584	51,5570	-0,551	-552	2,0986	12389	48,2100
1500	-0,512	-512	1,7244	15078	39,6130	-0,577	-577	2,1874	11886	50,2490	-0,561	-560	2,2992	11308	52,8170
Χρόνος (ημέρες)	Acr_cem					Acr_rel					Elast_horz				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	-0,075	-78	0,1012	256978	2,3242	-0,072	-78	0,0955	272282	2,1936	-0,053	-59	0,0710	365946	1,6322
40	-0,323	-324	0,2502	103897	5,7487	-0,510	-59	0,8404	30938	19,3050	-0,321	-322	0,1610	161498	3,6984
60	-0,37	-371	0,4495	57836	10,327	-0,527	-530	0,7983	32571	18,3380	-0,460	-49	0,4958	52442	11,3890
80	-0,488	-488	0,758	34300	17,413	-0,534	-534	0,7337	35435	16,8550	-0,533	-533	0,5624	46230	12,9190
100	-0,518	-520	0,9685	26845	22,249	-0,535	-535	0,7495	34689	17,2180	-0,536	-538	1,4750	17627	33,8840

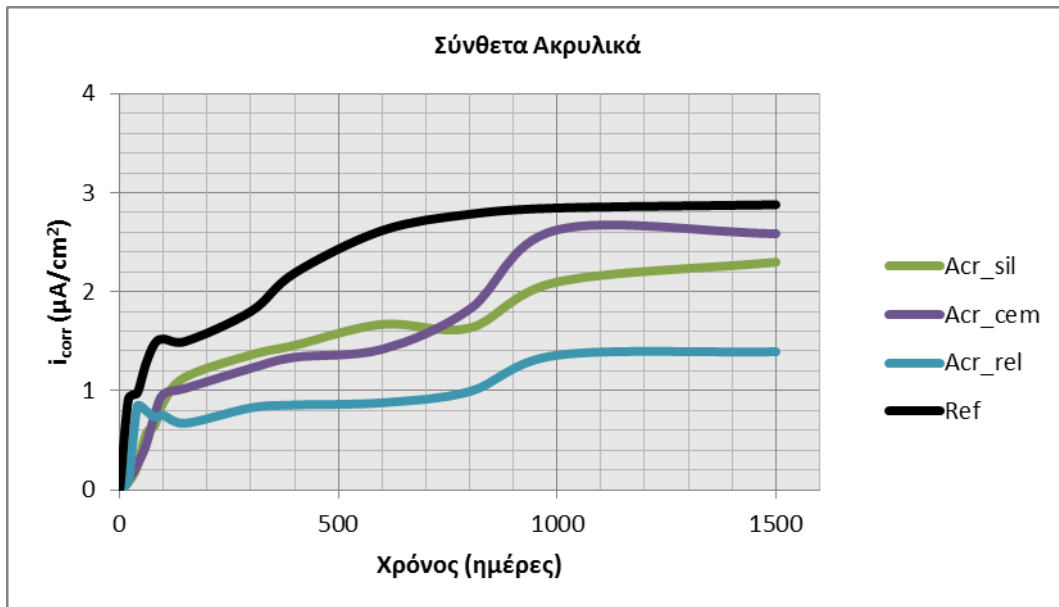
<b>150</b>	-0,525	-526	1,0255	25354	23,557	-0,531	-531	0,6717	38707	15,4300	-0,535	-537	1,4552	17867	33,4290
<b>300</b>	-0,56	-561	1,2273	21184	28,194	-0,575	-576	0,8287	31374	19,0370	-0,480	-482	0,7385	35206	16,9650
<b>400</b>	-0,581	-581	1,3384	19425	30,747	-0,574	-575	0,8566	30353	19,6780	-0,482	-483	0,6837	38030	15,7050
<b>600</b>	-0,541	-543	1,4192	18320	32,603	-0,525	-528	0,8793	29568	20,2000	-0,312	-316	0,5464	47584	12,5520
<b>800</b>	-0,538	-539	1,8247	14248	41,918	-0,527	-528	0,9927	26191	22,8040	-0,474	-476	1,0481	24807	24,0770
<b>1000</b>	-0,588	-589	2,6257	9902	60,319	-0,460	-460	1,3596	19123	31,2320	-0,496	-497	1,0895	23863	25,0290
<b>1500</b>	-0,563	-562	2,5865	10052	59,419	-0,462	-460	1,3944	18646	32,0320	-0,500	-500	1,0722	24248	24,6320
Χρόνος (ημέρες)	Elast_vert					Sol_cem					Ref				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )
<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>20</b>	-0,085	-88	0,1651	157442	3,7936	-0,071	-72	0,1131	229899	2,598	2,598	-69	0,9184	28310	21,0970
<b>40</b>	-0,523	-523	0,8969	28988	20,604	-0,486	-487	0,8590	30268	19,733	19,733	-403	0,9757	26647	22,4140
<b>60</b>	-0,552	-552	0,8364	31084	19,2150	-0,574	-573	1,3314	19528	30,585	30,585	-535	1,2745	20399	29,2790
<b>80</b>	-0,538	-539	0,5943	43751	13,6520	-0,561	-561	1,1334	22939	26,037	26,037	-537	1,4774	17598	33,9390
<b>100</b>	-0,517	-518	0,6017	43213	13,8220	-0,562	-563	1,4954	17386	34,354	34,354	-567	1,5228	17074	34,9810
<b>150</b>	-0,552	-552	0,6097	42646	14,0050	-0,573	-574	1,5753	16505	36,188	36,188	-558	1,4987	17348	34,4290
<b>300</b>	-0,576	-575	0,7364	35305	16,9180	-0,566	-568	1,3941	18649	32,026	32,026	-549	1,8026	14423	41,4100
<b>400</b>	-0,573	-573	0,6451	40306	14,8180	-0,566	-566	0,8538	30452	19,613	19,613	-545	2,1895	11874	50,2990
<b>600</b>	-0,539	-545	0,8632	30120	19,8300	-0,494	-494	0,8570	30336	19,688	19,688	-511	2,6189	9927	60,1610
<b>800</b>	-0,524	-525	0,7521	34571	17,2770	-0,497	-498	0,9319	27900	21,407	21,407	-522	2,7829	9342	63,9300
<b>1000</b>	-0,551	-552	0,6367	40835	14,6270	-0,534	-536	0,9850	26396	22,627	22,627	-516	2,8460	9135	65,3800
<b>1500</b>	-0,563	-562	0,6466	40208	14,8550	-0,537	-538	0,9633	26989	22,13	22,13	-600	2,8796	9029	66,1500

## Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης

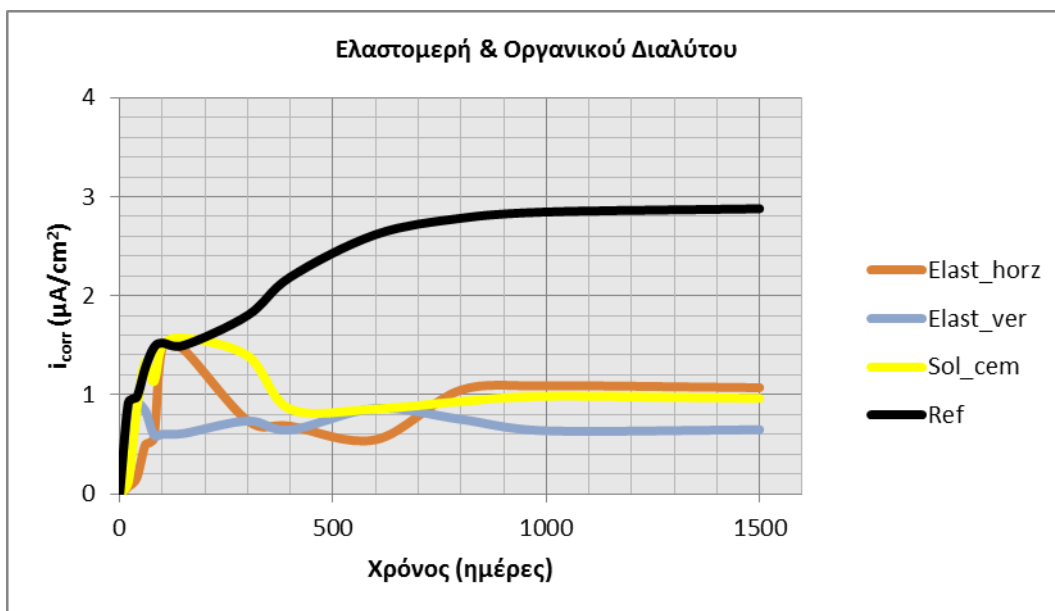
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις για τους **εξωτερικούς** χάλυβες των οπλισμένων σκυροδεμάτων. Για να είναι πιο ευκρινή τα αποτελέσματα εκτός από το συνολικό διάγραμμα δίνονται οι επιμέρους συναρτήσεις ανά κατηγορία χρωμάτων.



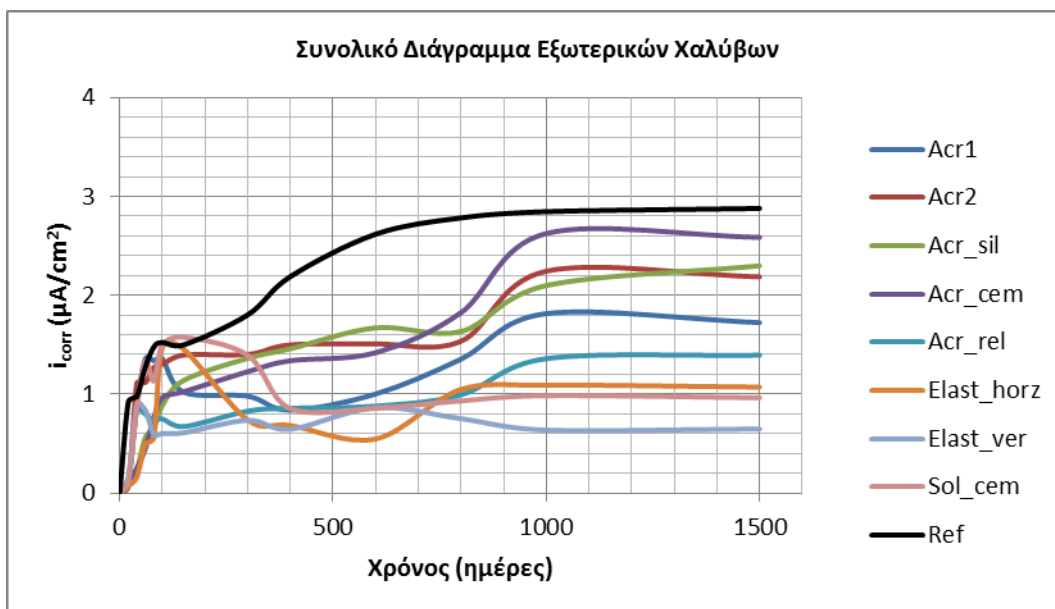
Σχήμα 10.12: Πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για **εξωτερικούς** χάλυβες οπλισμένων σκυροδεμάτων επικαλυμμένων με καθαρά ακρυλικά χρώματα



Σχήμα 10.13: Πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για **εξωτερικούς** χάλυβες οπλισμένων σκυροδεμάτων επικαλυμμένων με σύνθετα ακρυλικά χρώματα



Σχήμα 10.14: Πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για **εξωτερικούς** χάλυβες οπλισμένων σκυροδεμάτων επικαλυμμένων με ελαστομερή και χρώματα οργανικού διαλύτου



Σχήμα 10.15: Συνολικό διάγραμμα πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης για **εξωτερικούς** χάλυβες οπλισμένων σκυροδεμάτων συναρτήσει του χρόνου έκθεσης

Σύμφωνα με τον Πίνακα 10.4 το πρώτο ακρυλικό χρώμα παρουσιάζει μέτριο προς υψηλό ρυθμό διάβρωσης από την 40<sup>η</sup> ημέρα, ενώ το δεύτερο παρουσιάζει υψηλό ρυθμό διάβρωσης εξαρχής. Το τσιμεντόχρωμα νερού επιδεικνύει υψηλές τιμές από την 150<sup>η</sup> ημέρα του πειράματος. Το σιλικονούχο ακρυλικό χρώμα παρουσιάζει υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης από την 100<sup>η</sup> μέρα και το ίδιο συμβαίνει και για το ακρυλικό τύπου ρελιέφ τις τελευταίες 200 μέρες. Το ελαστομερές καθέτων επιφανειών επιδεικνύει μέτριους προς υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης ενώ το τσιμεντόχρωμα διαλύτη μετά από μια αρχική περίοδο υψηλού ρυθμού διάβρωσης εμφανίζει τελικά μέτριες προς υψηλές τιμές. Το ελαστομερές

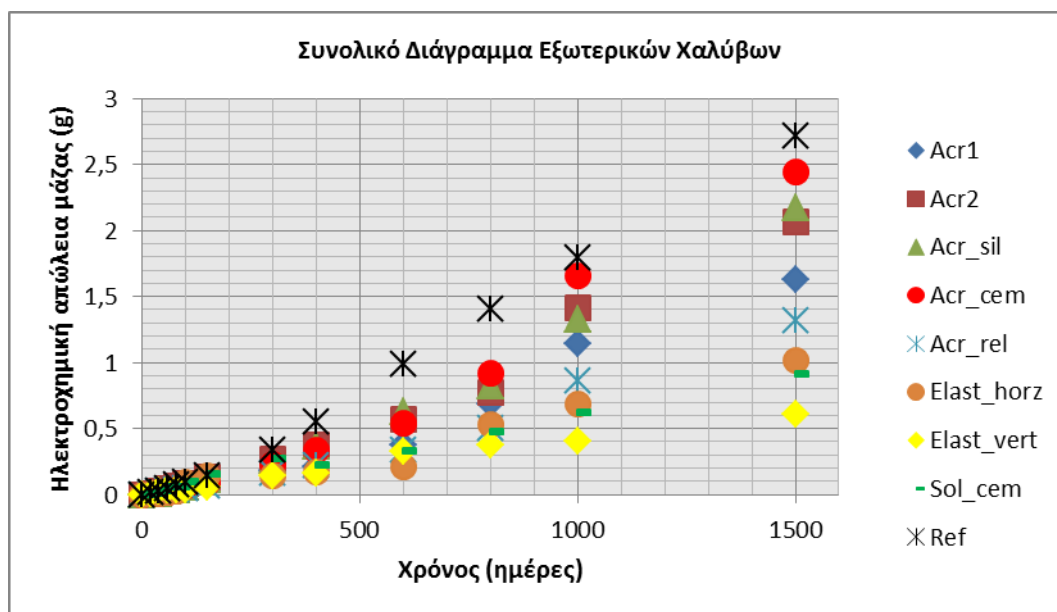


χρώμα για οριζόντιες επιφάνειες κινείται ανάμεσα σε υψηλούς και μέτριους προς υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης για όλη την περίοδο εξέλιξης του πειράματος.

Για την ασφαλέστερη διεξαγωγή συμπερασμάτων και δεδομένου ότι το διάγραμμα  $i_{corr}=f(t)$  δεν παρουσιάζει σαφή εικόνα της συμπεριφοράς των οργανικών επικαλύψεων προσδιορίστηκε η ηλεκτροχημική απώλεια μάζας των χαλύβων με χρήση του νόμου του Faraday:

$$m = \frac{MIt}{zF} \quad [10.4]$$

Όπου:  $m$  η μάζα του μετάλλου που καταναλώνεται [g],  $I$  το ηλεκτρικό ρεύμα [A],  $t$  ο χρόνος [s],  $F$  η σταθερά Faraday [A·s ή Cb/mol],  $z$  ο αριθμός ανταλασσομένων ηλεκτρονίων ( $z=2$  για την αντίδραση  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ ) και  $M$  το Ατομικό βάρος μετάλλου [56g για το Fe]. Τα αποτελέσματα της υπολογιζόμενης απώλειας μάζας για τους **εξωτερικούς** χάλυβες δίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 10.16: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας για **εξωτερικούς** χάλυβες οπλισμένων σκυροδεμάτων μερικά εμβαπτισμένων σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 1500 ημέρες

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα η υπολογιζόμενη απώλεια μάζας είναι μεγαλύτερη στα ακρυλικά χρώματα, τόσο στα καθαρά ακρυλικά όσο και στα σύνθετα ακρυλικά συγκριτικά με την απώλεια μάζας των ελαστομερικών χρωμάτων και του χρώματος του οργανικού διαλύτου. Συγκεκριμένα την μικρότερη απώλεια μάζας παρουσιάζει το ελαστομερές χρώμα για κάθετες επιφάνειες με μικρή διαφορά από το βιομηχανικό χρώμα Sol\_cem.

Στον Πίνακα 10.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών μετρήσεων για τους **εσωτερικούς** χάλυβες των οπλισμένων σκυροδεμάτων. Οι τιμές προκύπτουν από το μέσο όρο των 4 εσωτερικών χαλύβων που ήταν τοποθετημένοι 4cm από την ακμή κάθε κυβικού δοκιμίου.

Στο Σχήμα 10.20 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις για τους **εσωτερικούς** χάλυβες των οπλισμένων σκυροδεμάτων, ανά κατηγορία χρωμάτων.

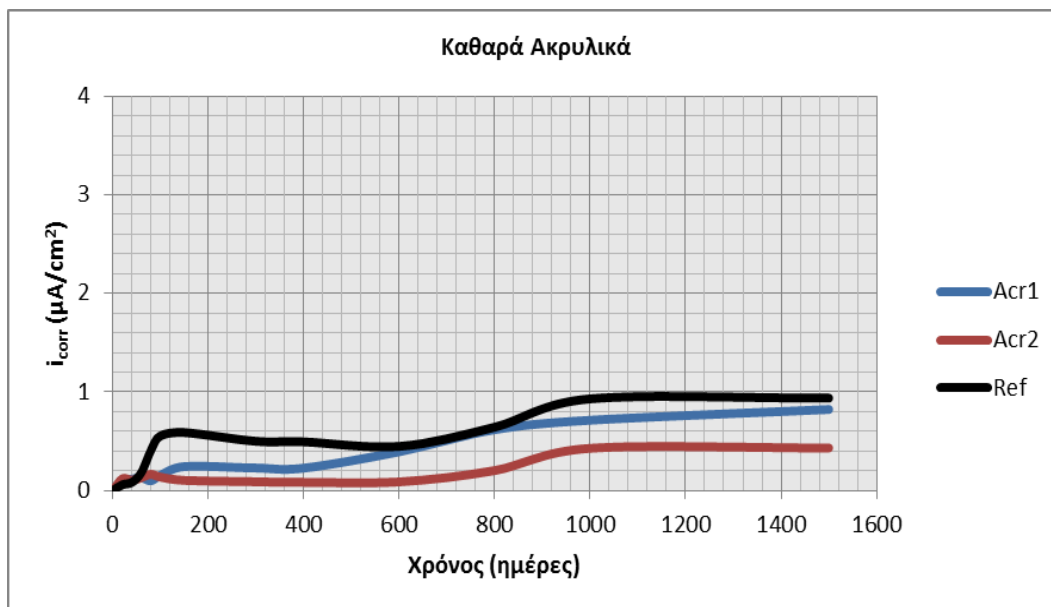
## Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης

**Πίνακας 10.5:** Ηλεκτροχημικές παράμετροι για δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος εμβαπτισμένα μερικώς σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl. Οι τιμές αφορούν τους μέσους όρους από 4 χάλυβες τοποθετημένους 4cm από την ακμή κάθε κυβικού δοκιμίου (εσωτερικοί χάλυβες)

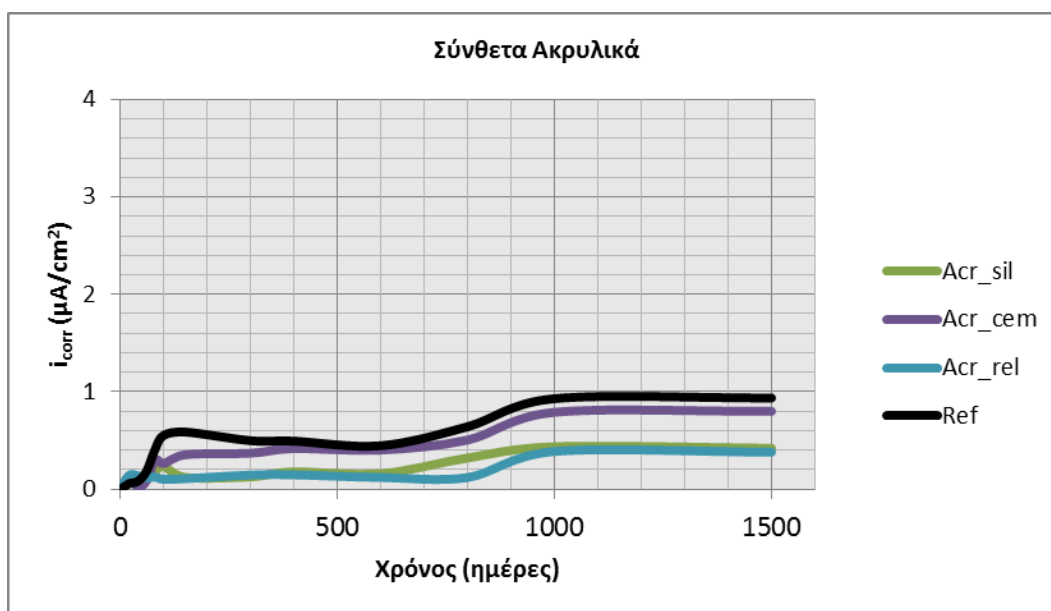
Χρόνος (ημέρες)	Acr1					Acr2					Acr_sil				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	-0,061	-69	0,1025	253711	2,3542	-0,081	-87	0,1188	218787	2,73	-0,07	-75	0,1152	225636	2,6471
40	-0,073	-76	0,1147	226624	2,6355	-0,070	-75	0,1041	249816	2,3909	-0,074	-78	0,0345	754289	0,7918
60	-0,077	-81	0,1294	200992	2,9717	-0,097	-101	0,1296	200612	2,9773	-0,080	-87	0,1292	201227	2,9682
80	-0,083	-87	0,0983	264381	2,2592	-0,279	-279	0,1644	158186	3,7758	-0,290	-292	0,1851	140495	4,2512
100	-0,082	-88	0,1540	168802	3,5383	-0,284	-286	0,1353	192129	3,1087	-0,326	-328	0,2347	110759	5,3926
150	-0,328	-329	0,2427	107113	5,5761	-0,234	-238	0,1025	253764	2,3537	-0,239	-242	0,1222	212701	2,8081
300	-0,356	-358	0,2278	114155	5,2322	-0,226	-231	0,0881	295242	2,023	-0,264	-267	0,1284	202508	2,9494
400	-0,376	-377	0,2272	114426	5,2198	-0,206	-211	0,0826	314888	1,8968	-0,360	-361	0,1790	145218	4,1130
600	-0,408	-408	0,3933	66113	9,0341	-0,145	-151	0,0876	296969	2,0112	-0,333	-334	0,1603	162207	3,6822
800	-0,427	-428	0,6178	42082	14,1930	-0,303	-304	0,2024	128475	4,6490	-0,375	-376	0,3218	80797	7,3923
1000	-0,460	-463	0,7127	36481	16,3720	-0,372	-374	0,4279	60754	9,8310	-0,355	-357	0,4364	59579	10,025
1500	-0,465	-465	0,8224	31616	18,8910	-0,376	-376	0,4313	60286	9,9073	-0,360	-360	0,4221	61593	9,6971
Χρόνος (ημέρες)	Acr_cem					Acr_rel					Elast_horz				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	-0,216	-220	0,1292	201266	2,9676	-0,053	-55	0,1424	182541	3,2720	-0,204	-203	0,1180	220340	2,7107
40	-0,085	-92	0,0232	1119389	0,5336	-0,110	-115	0,1408	184704	3,2337	-0,208	-210	0,0474	548853	1,0882
60	-0,166	-170	0,0843	308416	1,9366	-0,112	-116	0,1176	221023	2,7023	-0,175	-175	0,0832	312589	1,9107
80	-0,347	-349	0,3023	86020	6,9435	-0,199	-200	0,1260	206388	2,8940	-0,168	-167	0,0827	314577	1,8987
100	-0,343	-346	0,2657	97856,2	6,1036	-0,220	-224	0,1020	254799	2,3441	-0,151	-157	0,0888	292893	2,0392

<b>150</b>	-0,369	-370	0,3549	73254	8,1535	-0,269	-272	0,1095	237360	2,5163	-0,133	-141	0,1210	214939	2,7788
<b>300</b>	-0,317	-318	0,3710	70072	8,5237	-0,369	-372	0,1467	177177	3,3711	-0,193	-199	0,0728	357308	1,6716
<b>400</b>	-0,412	-412	0,4177	62247	9,5953	-0,331	-332	0,1483	175289	3,4074	-0,247	-251	0,0736	353123	1,6914
<b>600</b>	-0,375	-375	0,4034	64458	9,2661	-0,311	-313	0,1217	213716	2,7947	-0,193	-199	0,0870	298807	1,9989
<b>800</b>	-0,385	-386	0,5054	51441	11,6110	-0,333	-334	0,1209	215001	2,7780	-0,179	-182	0,0872	298085	2,0037
<b>1000</b>	-0,449	-450	0,7904	32895	18,1570	-0,474	-474	0,3883	66950	8,9213	-0,46	-461	0,4262	60999,6	9,7915
<b>1500</b>	-459	-459	0,8002	32493,1	18,382	-0,49	-490,5	0,3808	68278,2	8,7477	-0,44	-440	0,4333	60010,4	9,9529
Χρόνος (ημέρες)	Elast_ver					Sol_cem					Ref				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )
<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>20</b>	-0,088	-91	0,1113	233704	2,5557	-0,181	-184	0,0816	318627	1,8745	-0,126	-128	0,0578	449927	1,3275
<b>40</b>	-0,372	-375	0,0384	677864	0,8811	-0,103	-105	0,0197	1318052	0,4532	-0,084	-86	0,0820	317219	1,8829
<b>60</b>	-0,417	-420	0,1754	148230	4,0294	-0,093	-95	0,1136	228815	2,6103	-0,132	-132	0,1828	142263	4,1984
<b>80</b>	-0,338	-339	0,1202	216239	2,7621	-0,118	-123	0,1775	146489	4,0773	-0,255	-260	0,4082	63700	9,3763
<b>100</b>	-0,493	-495	0,1519	171213	3,4885	-0,175	-182	0,0979	265473	2,2499	-0,294	-294	0,5543	46903	12,7340
<b>150</b>	-0,553	-554	0,1622	160342	3,7250	-0,151	-159	0,1043	249162	2,3971	-0,247	-250	0,5874	44259	13,4950
<b>300</b>	-0,488	-489	0,1344	193502	3,0867	-0,134	-140	0,1064	244319	2,4447	-0,361	-362	0,4993	52073	11,4700
<b>400</b>	-0,500	-501	0,1644	158109	3,7777	-0,105	-107	0,125	207918	2,8727	-0,357	-358	0,4937	52660	11,3402
<b>600</b>	-0,493	-497	0,2359	110211	5,4194	-0,09	-97	0,1329	195615	3,0533	-0,362	-365	0,4472	58144	10,2720
<b>800</b>	-0,531	-532	0,2263	114914	5,1976	-0,084	-90	0,1034	251541	2,3745	-0,349	-351	0,6426	40459	14,7620
<b>1000</b>	-0,530	-532	0,2555	101758	5,8696	-0,297	-298	0,3563	72966	8,1857	-0,420	-420	0,9303	27947	21,3701
<b>1500</b>	-0,555	-554	0,2585	100570	5,9389	-0,301	-301	0,3569	72851	8,1985	-0,370	-371	0,9372	27743	21,5209

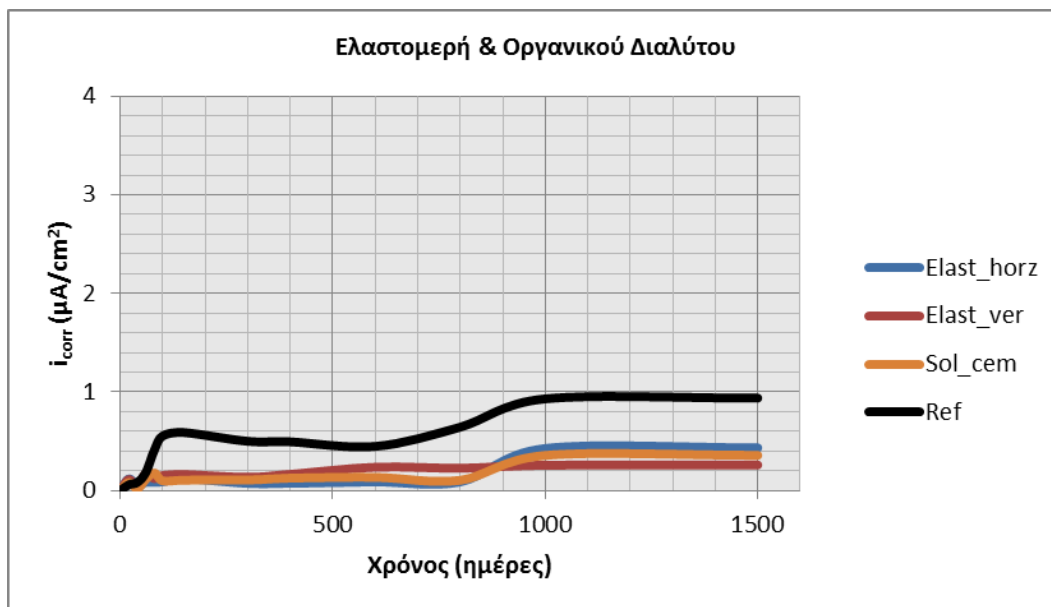
## Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης



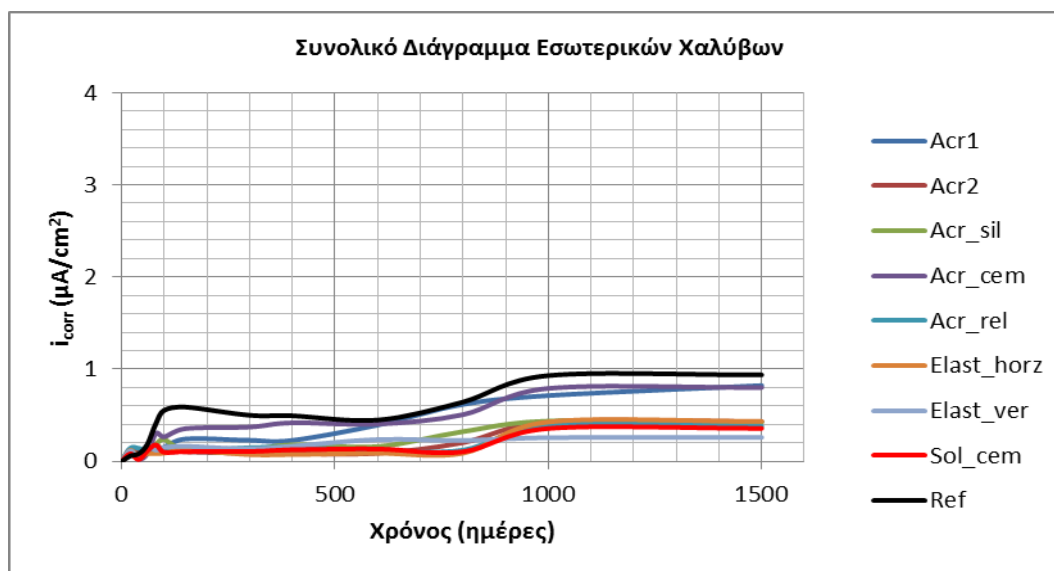
Σχήμα 10.17: Πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για **εσωτερικούς** χάλυβες οπλισμένων σκυροδεμάτων επικαλυμμένων με καθαρά ακρυλικά χρώματα



Σχήμα 10.18: Πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για **εσωτερικούς** χάλυβες οπλισμένων σκυροδεμάτων επικαλυμμένων με σύνθετα ακρυλικά χρώματα



Σχήμα 10.19: Πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για **εσωτερικούς** χάλυβες σπλισμένων σκυροδεμάτων επικαλυμμένων με ελαστομερή και χρώματα οργανικού διαλύτου

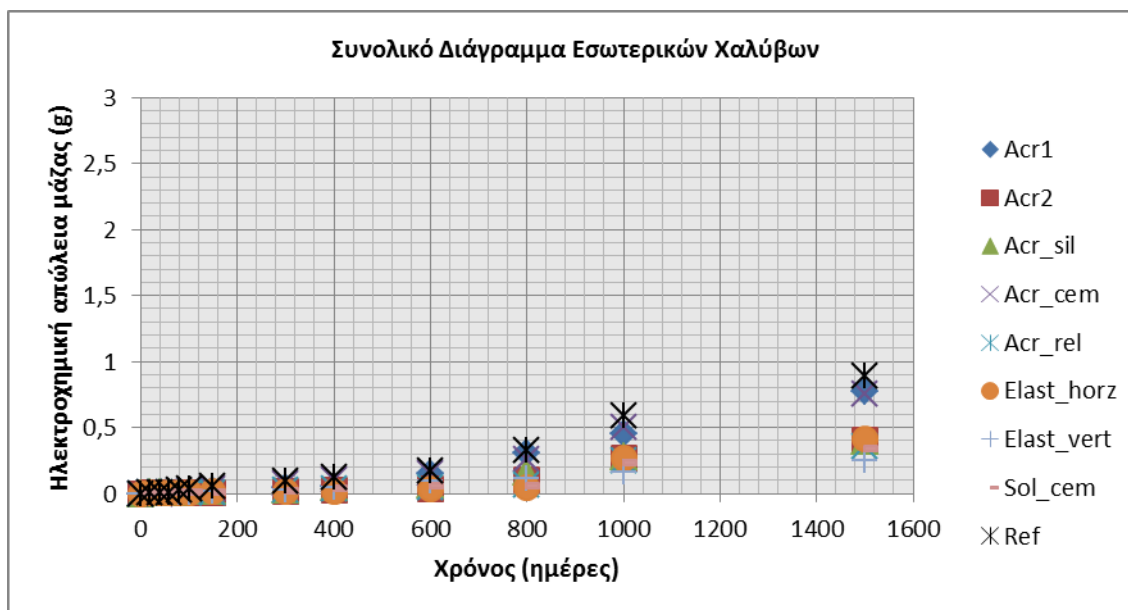


Σχήμα 10.20: Συνολικό διάγραμμα πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης για **εσωτερικούς** χάλυβες σπλισμένων σκυροδεμάτων συναρτήσει του χρόνου έκθεσης

Οι εσωτερικοί χάλυβες των δοκιμών με την ακρυλική επικάλυψη Acr1 παρουσίασαν χαμηλό έως μέτριο ρυθμού διάβρωσης τις πρώτες 600 μέρες και μετά επέδειξαν μέτριο προς υψηλό ρυθμό. Αντίθετα η επικάλυψη Acr2 μέχρι την 300<sup>η</sup> μέρα είχε χαμηλό έως μέτριο ρυθμό διάβρωσης και έπειτα για άλλες 500 μέρες παθητικοποιήθηκε. Από την 800<sup>η</sup> μέρα μέχρι το τέλος του πειράματος ο ρυθμός διάβρωσης ήταν χαμηλός έως μέτριος. Η σιλικονούχα ακρυλική επικάλυψη, το χρώμα τύπου ρελιέφ, η ελαστομερής επικάλυψη για κάθετες επιφάνειες και το τσιμεντόχρωμα διαλύτη παρέμειναν καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος σε τιμές ενδεικτικές χαμηλού έως μέτριου ρυθμού διάβρωσης. Αντίθετα το τσιμεντόχρωμα νερού από την 600<sup>η</sup> ημέρα και έπειτα απέκτησε μέτριο έως υψηλό ρυθμό διάβρωσης. Τέλος η ελαστομερής επικάλυψη για οριζόντιες επιφάνειες

βρισκόταν σε παθητική κατάσταση για τις πρώτες 800 μέρες του πειράματος και έπειτα παρουσίασε χαμηλό έως μέτριο ρυθμό διάβρωσης.

Για όλους τους εσωτερικούς χάλυβες υπολογίστηκε η ηλεκτροχημική απώλεια μάζας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 10.21**.



**Σχήμα 10.21:** Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας για εσωτερικούς χάλυβες οπλισμένων σκυροδεμάτων μερικά εμβαπτισμένους σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 1500 ημέρες

Οι ηλεκτροχημικές απώλειες μάζας των εσωτερικών χάλυβων παρουσιάζονται πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες των εξωτερικών όπως είναι και αναμενόμενο. Όπως και για τους εξωτερικούς χάλυβες οι μικρότερες τιμές δίνονται από τα δοκίμια που ήταν επικαλυμμένα με τις ελαστομερής επικαλύψεις και με το χρώμα του εξωτερικού διαλύτου.

### 10.1.1.3 Απώλεια Μάζας Χαλύβων

Μετά το τέλος της πειραματικής διαδικασίας όλοι οι χάλυβες των δοκιμών αποσπάρθηκαν για τον προσδιορισμό της απώλειας βάρους και την % απώλεια μάζας των οπλισμών. Για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης των οπλισμών χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

$$\text{Ρυθμός Διάβρωσης (}\mu\text{m/year)} = \frac{8.76 \cdot 10^7 \cdot \Delta m}{A \cdot D \cdot T} \quad [10.5]$$

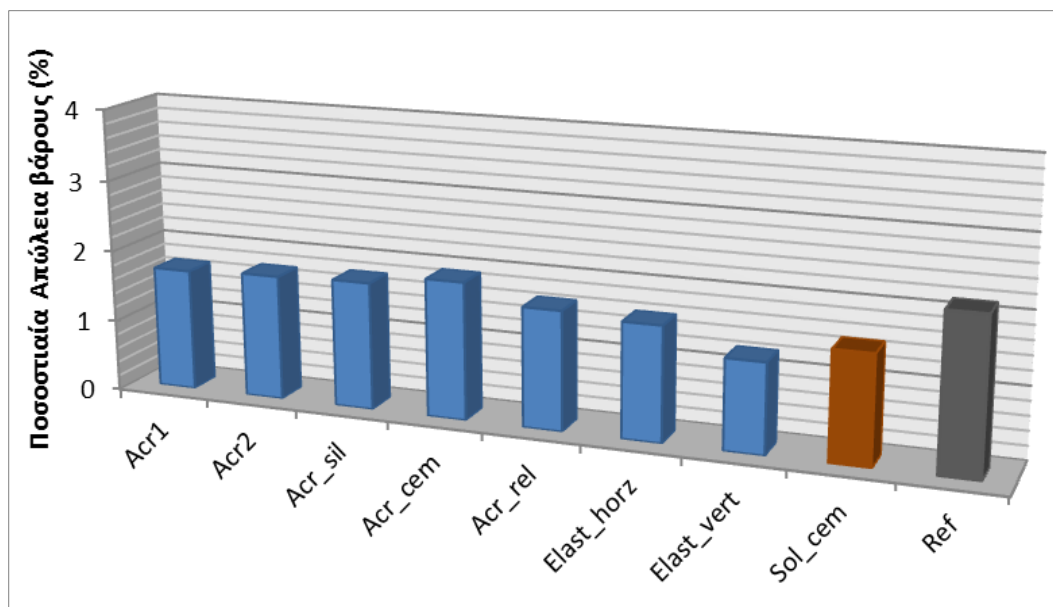
**Όπου:**  $\Delta m = m_{\text{αρχ}} - m_{\text{τελ}}$  η διαφορά μάζας του οπλισμού [g],  $A$  η επιφάνεια του οπλισμού η οποία δίνεται από τον τύπο  $A = \pi d \left( h + \frac{d}{2} \right)$  [cm<sup>2</sup>],  $D$  η πυκνότητα δομικού χάλυβα ίση με 7,8g/cm<sup>3</sup>,  $T$  ο χρόνος έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον [h].

Τα αποτελέσματα δίνονται στον **Πίνακα 10.6** και στην συνέχεια παρατίθενται και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

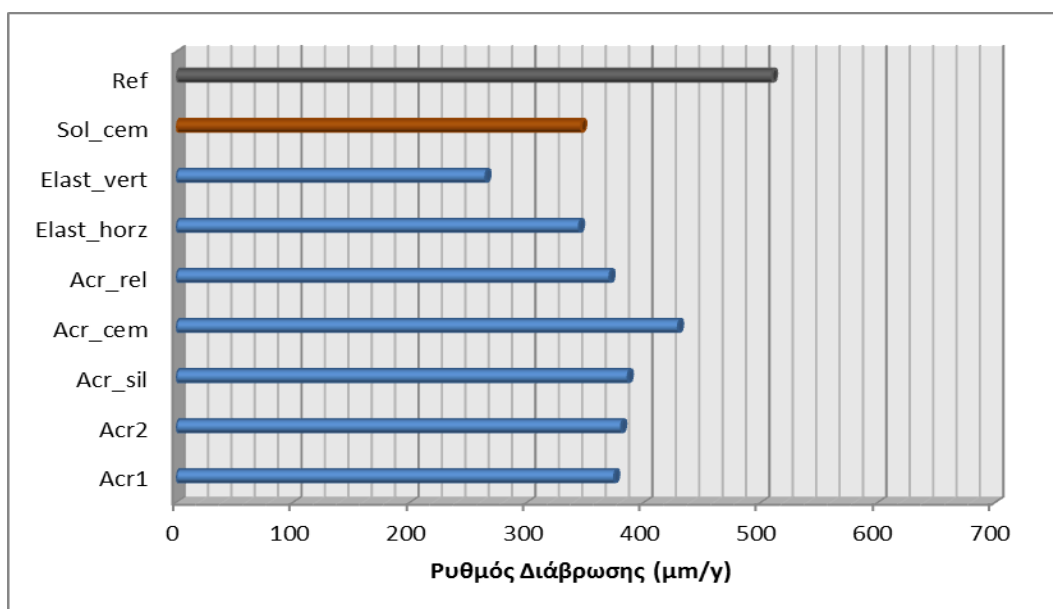
Πίνακας 10.6: Απώλεια βάρους για **εσωτερικούς** χάλυβες οπλισμένων σκυροδεμάτων μετά από μερική εμφύσηση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 1500 ημερών

Εσωτερικοί χάλυβες					
Χρώμα	Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια βάρους (g)	Απώλεια βάρους (%)	Ρυθμός διάβρωσης (μm/year)
Acr1_1	61,5757	60,5194	1,0563	1,7155	374,4764
Acr1_2	58,8901	57,8917	0,9984	1,6953	353,9266
Acr1_3	60,7639	59,7256	1,0383	1,7087	368,0746
Acr1_4	61,1570	60,1126	1,0444	1,7078	370,2566
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>1,0563</b>	<b>1,7068</b>	<b>374,4764</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0251</b>	<b>±0,0084</b>	<b>±8,9101</b>
Acr2_1	61,3476	60,2744	1,0732	1,7494	380,4683
Acr2_2	56,4952	55,5062	0,989	1,7506	350,5988
Acr2_3	58,6751	57,6533	1,0218	1,7415	362,234
Acr2_4	60,7429	59,6726	1,0703	1,7619	379,4125
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>1,0386</b>	<b>1,7508</b>	<b>380,4683</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0406</b>	<b>±0,0084</b>	<b>±14,3947</b>
Acr_sil_1	61,2311	60,1418	1,0893	1,779	386,1645
Acr_sil_2	61,9859	60,8768	1,1091	1,7893	393,1881
Acr_sil_3	65,1267	63,9627	1,164	1,7873	412,6491
Acr_sil_4	62,2898	61,179	1,1108	1,7833	393,7818
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>1,1183</b>	<b>1,7847</b>	<b>386,1645</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,032</b>	<b>±0,0046</b>	<b>±11,3425</b>
Acr_cem_1	62,9138	61,7034	1,2104	1,9239	429,0898
Acr_cem_2	62,4899	61,2943	1,1956	1,9132	423,835
Acr_cem_3	62,4743	61,2737	1,2006	1,9217	425,6095
Acr_cem_4	61,3135	60,1298	1,1837	1,9305	419,619
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>1,1975</b>	<b>1,9223</b>	<b>429,0898</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0111</b>	<b>±0,0071</b>	<b>±3,9394</b>
Acr_rel_1	62,5093	61,4641	1,0452	1,6721	370,5367
Acr_rel_2	59,6675	58,6724	0,9951	1,6678	352,7754
Acr_rel_3	60,3155	59,3184	0,9971	1,6532	353,4912
Acr_rel_4	65,7889	64,692	1,0969	1,6672	388,8439
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>1,0336</b>	<b>1,6651</b>	<b>370,5367</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0481</b>	<b>±0,0082</b>	<b>±17,0597</b>
Elast_horz_1	60,9361	59,9646	0,9715	1,5943	344,4047
Elast_horz_2	61,4163	60,4221	0,9942	1,6188	352,453
Elast_horz_3	65,5022	64,4476	1,0546	1,61	373,8668
Elast_horz_4	62,7733	61,7771	0,9962	1,5869	353,1519
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>1,0041</b>	<b>1,6025</b>	<b>344,4047</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0355</b>	<b>±0,0145</b>	<b>±12,5746</b>
Elast_vert_1	59,0177	58,2717	0,746	1,264	264,4562
Elast_vert_2	68,5557	67,6951	0,8606	1,2553	305,0812
Elast_vert_3	65,4555	64,6372	0,8183	1,2501	290,0783
Elast_vert_4	61,3223	60,557	0,7653	1,248	271,309
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,7975</b>	<b>1,2544</b>	<b>264,4562</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,052</b>	<b>±0,0071</b>	<b>±18,4205</b>
Sol_cem_1	64,8392	63,8623	0,9769	1,5067	346,3289
Sol_cem_2	61,9433	61,0053	0,938	1,5143	332,5298
Sol_cem_3	59,0088	58,1132	0,8956	1,5177	317,4878
Sol_cem_4	62,7199	61,7644	0,9555	1,5234	338,7222
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,9415</b>	<b>1,5155</b>	<b>346,3289</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0345</b>	<b>±0,007</b>	<b>±12,2324</b>
Ref_1	66,74	65,303	1,437	2,1532	509,4422
Ref_2	64,921	63,5159	1,4051	2,1643	498,112
Ref_3	63,9011	62,5166	1,3845	2,1666	490,8077
Ref_4	66,932	65,4834	1,4486	2,1643	513,5416
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>1,4188</b>	<b>2,1621</b>	<b>509,4422</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0294</b>	<b>±0,006</b>	<b>±10,4110</b>





**Σχήμα 10.22:** Μέσοι όροι ποσοστιαίας απώλειας βάρους (%) χαλύβων οπλισμένων σκυροδεμάτων με οργανικές επικαλύψεις μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5 % κ.β. NaCl για 1500 ημέρες – *εσωτερικοί* χάλυβες

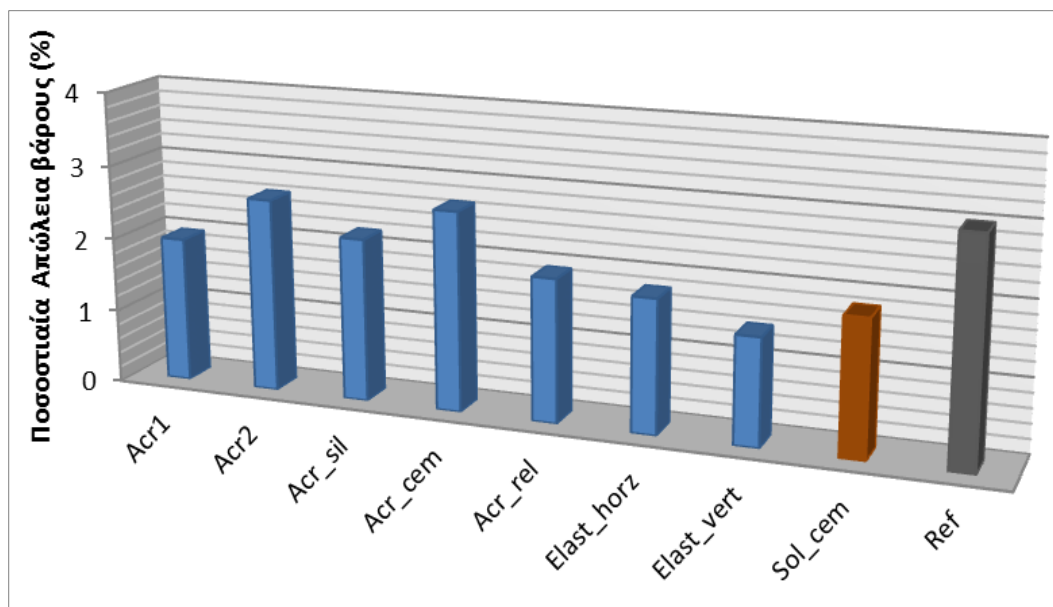


**Σχήμα 10.23:** Ρυθμός διάβρωσης χαλύβων οπλισμένων σκυροδεμάτων με οργανικές επικαλύψεις μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5 % κ.β. NaCl για 1500 ημέρες – *εσωτερικοί* χάλυβες

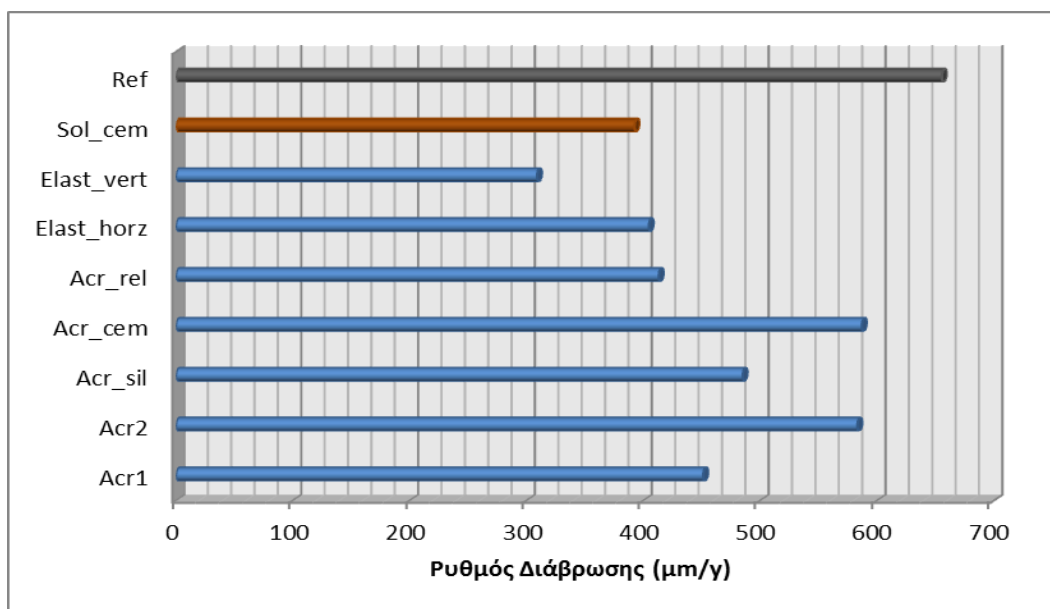
Τόσο η απώλεια μάζας των χαλύβων όσο και ο ρυθμός διάβρωσής τους δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις για όλα τα χρώματα πλην του χρώματος οργανικού διαλύτου και του ελαστομερούς για κάθετες επιφάνειες όπου οι τιμές είναι αρκετά χαμηλότερες.

Πίνακας 10.7: Απώλεια βάρους για **εξωτερικούς** χάλυβες οπλισμένων σκυροδεμάτων μετά από μερική εμφύσηση σε 3,5% κ.β. NaCl για 1500 ημέρες

Εξωτερικοί χάλυβες					
Χρώμα	Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια βάρους (g)	Απώλεια βάρους (%)	Ρυθμός διάβρωσης (μm/year)
Acr1_1	60,8188	59,6187	1,2000	1,9732	425,4350
Acr1_2	68,3418	66,9962	1,3455	1,9688	476,9933
Acr1_3	66,1289	64,8305	1,2983	1,9634	460,2824
Acr1_4	63,2045	61,9580	1,2464	1,9721	441,8836
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>1,2000</b>	<b>1,9694</b>	<b>451,1486</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0630</b>	<b>±0,0044</b>	<b>±22,3487</b>
Acr2_1	63,9274	62,2528	1,6745	2,6194	593,6263
Acr2_2	59,2798	57,7282	1,5515	2,6174	550,0487
Acr2_3	65,7328	64,0081	1,7246	2,6238	611,4095
Acr2_4	61,9005	60,2725	1,6273	2,6299	577,1048
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>1,6446</b>	<b>2,6226</b>	<b>583,0473</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0735</b>	<b>±0,0055</b>	<b>±26,0803</b>
Acr_sil_1	63,9274	62,2528	1,6745	2,6194	593,6263
Acr_sil_2	59,2798	57,7282	1,5515	2,6174	550,0487
Acr_sil_3	65,7328	64,0081	1,7246	2,6238	611,4095
Acr_sil_4	61,9005	60,2725	1,6279	2,6299	577,1048
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>1,6446</b>	<b>2,6226</b>	<b>583,0473</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0735</b>	<b>±0,0055</b>	<b>±26,0803</b>
Acr_cem_1	61,3605	59,7126	1,6478	0,026856	2,6856
Acr_cem_2	60,3388	58,71623	1,6225	0,026891	2,6891
Acr_cem_3	62,5753	60,8855	1,6897	0,0270	2,7004
Acr_cem_4	61,4295	59,7683	1,6611	0,0270	2,7041
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>1,6557</b>	<b>2,6948</b>	<b>586,8317</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0279</b>	<b>±0,0089</b>	<b>±9,9202</b>
Acr_rel_1	58,5873	57,45744	1,1298	1,9285	400,5414
Acr_rel_2	61,9987	60,80039	1,1983	1,9328	424,8091
Acr_rel_3	60,9132	59,73624	1,1769	1,9322	417,2418
Acr_rel_4	59,6646	58,50887	1,1557	1,9371	409,7153
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>1,1652</b>	<b>1,9326</b>	<b>413,0769</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0292</b>	<b>±0,0035</b>	<b>±10,3831</b>
Elast_horz_1	62,4612	61,33046	1,1307	1,8103	400,8530
Elast_horz_2	61,898	60,78818	1,1098	1,793	393,4402
Elast_horz_3	65,548	64,35791	1,1900	1,8156	421,8945
Elast_horz_4	62,8676	61,73379	1,1338	1,8035	401,9418
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>1,1411</b>	<b>1,8056</b>	<b>404,5324</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0343</b>	<b>±0,0098</b>	<b>±12,1755</b>
Elast_vert_1	62,7939	61,88496	0,9089	1,4475	322,2258
Elast_vert_2	57,4974	56,65869	0,8387	1,4587	297,3298
Elast_vert_3	64,7319	63,7951	0,9368	1,4472	332,1018
Elast_vert_4	55,7657	54,96522	0,8004	1,4354	283,7742
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,8712</b>	<b>1,4472</b>	<b>308,857</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0626</b>	<b>±0,0095</b>	<b>±22,2191</b>
Sol_cem_1	58,0192	56,95942	1,0597	1,8266	375,6985
Sol_cem_2	61,5613	60,429	1,1322	1,8393	401,4067
Sol_cem_3	59,5818	58,49348	1,0883	1,8266	385,8170
Sol_cem_4	62,5639	61,41786	1,1460	1,8318	406,279
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>1,106</b>	<b>1,8311</b>	<b>392,3005</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0397</b>	<b>±0,006</b>	<b>±14,0949</b>
Ref_1	62,5576	60,67458	1,8830	3,0101	667,5443
Ref_2	66,9138	64,91094	2,0028	2,9932	710,0284
Ref_3	57,5218	55,79687	1,7249	2,9987	611,4973
Ref_4	59,2733	57,48956	1,7837	3,0094	632,3488
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>1,8486</b>	<b>3,0028</b>	<b>655,3547</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,1217</b>	<b>±0,0083</b>	<b>±43,1684</b>



**Σχήμα 10.24:** Μέσοι όροι ποσοστιαίας απώλειας βάρους (%) χάλυβων οπλισμένων σκυροδεμάτων με οργανικές επικαλύψεις μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5 % κ.β. NaCl για 1500 ημέρες – *εξωτερικοί* χάλυβες



**Σχήμα 10.25:** Ρυθμός διάβρωσης χάλυβων οπλισμένων σκυροδεμάτων με οργανικές επικαλύψεις μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5 % κ.β. NaCl για 1500 ημέρες – *εξωτερικοί* χάλυβες

Οι ρυθμοί διάβρωσης καθώς και οι απώλειες μάζας αυξάνονται συγκριτικά με τους εσωτερικούς χάλυβες. Και πάλι παρατηρείται πως το τιμεντόχρωμα διαλύτη και το ελαστομερές χρώμα εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά.

#### 10.1.1.4 Οπτικές Παρατηρήσεις

##### *Μακροσκοπικές Παρατηρήσεις*

Σε όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας λαμβάνονταν φωτογραφίες της επιφάνειας των οπλισμένων σκυροδεμάτων με σκοπό τη μεταξύ τους σύγκριση. Οι φωτογραφίες των δοκιμών παρατίθενται στον **Πίνακα 10.8** όπου απεικονίζεται η όψη των δοκιμών οπλισμένου σκυροδέματος μετά από 100, 200, 500 και 1000 ημέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

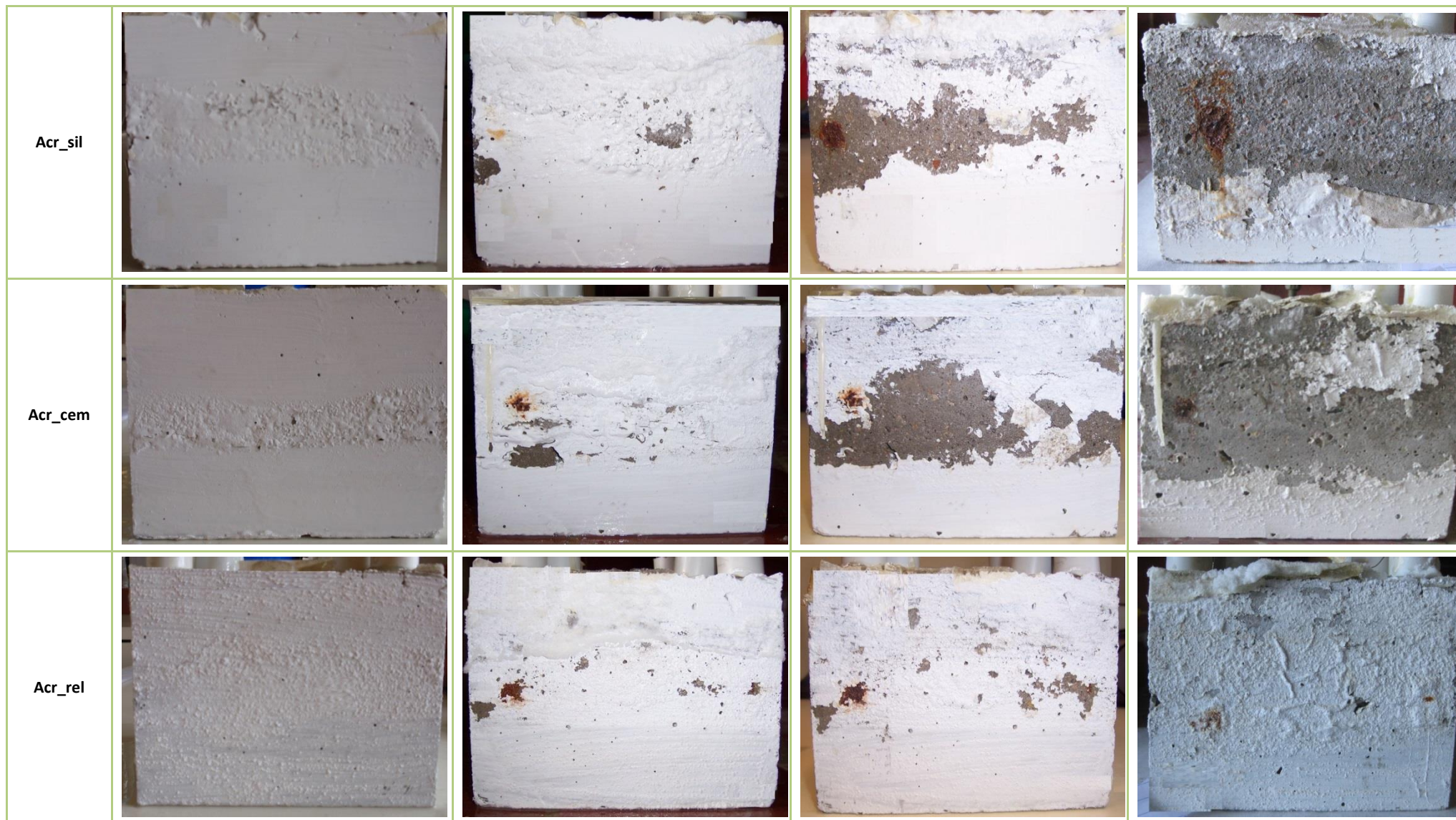
Όπως είναι εμφανές τα ελαστομερή χρώματα και το τσιμεντόχρωμα διαλύτη έχουν την καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τα υπόλοιπα χρώματα με το πέρασ του χρόνου. Συγκεκριμένα το ελαστομερές καθέτων επιφανειών δεν δείχνει σημάδια αστοχίας ούτε έπειτα από 1000 ημέρες στο διαβρωτικό περιβάλλον και μετά από 600 ημέρες παρουσιάζονται μικρές μη εκτεταμένες αποκολλήσεις του χρώματος. Το τσιμεντόχρωμα διαλύτη παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το προαναφερθέν χρώμα απλά οι αποκολλήσεις που εμφανίζονται είναι λίγο περισσότερο εκτεταμένες σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Το ελαστομερικό χρώμα οριζοντίων επιφανειών παρουσιάζει μικρότερες φθορές από τα υπόλοιπα ακρυλικά χρώματα αλλά περιορισμένα σημάδια αστοχίας είναι εμφανή από τις πρώτες 100 ημέρες. Από τα δύο καθαρά ακρυλικά χρώματα το πρώτο είναι αυτό που υπερτερεί γιατί οι αποκολλήσεις και τα φουσκώματα στην επιφάνεια του σκυροδέματος είναι πολύ λιγότερο εμφανή. Τα υπόλοιπα χρώματα αστοχούν σταδιακά με την πάροδο του χρόνου με αποτέλεσμα σε πολλές περιπτώσεις η επιφάνεια να καταλήγει σχεδόν ακάλυπτη.

Τα αποτελέσματα των μακροσκοπικών παρατηρήσεων έρχονται σε συμφωνία με τις ηλεκτροχημικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης και του δυναμικού διάβρωσης. Τόσο οι εξωτερικοί όσο και οι εσωτερικοί χάλυβες των δοκιμών με τις ελαστομερικές επικαλύψεις και με το τσιμεντόχρωμα διαλύτη εμφανίζουν τις μικρότερες τιμές του ρεύματος διάβρωσης και αντίστοιχα βρίσκονται σε πιο ηλεκτροθετικά δυναμικά.

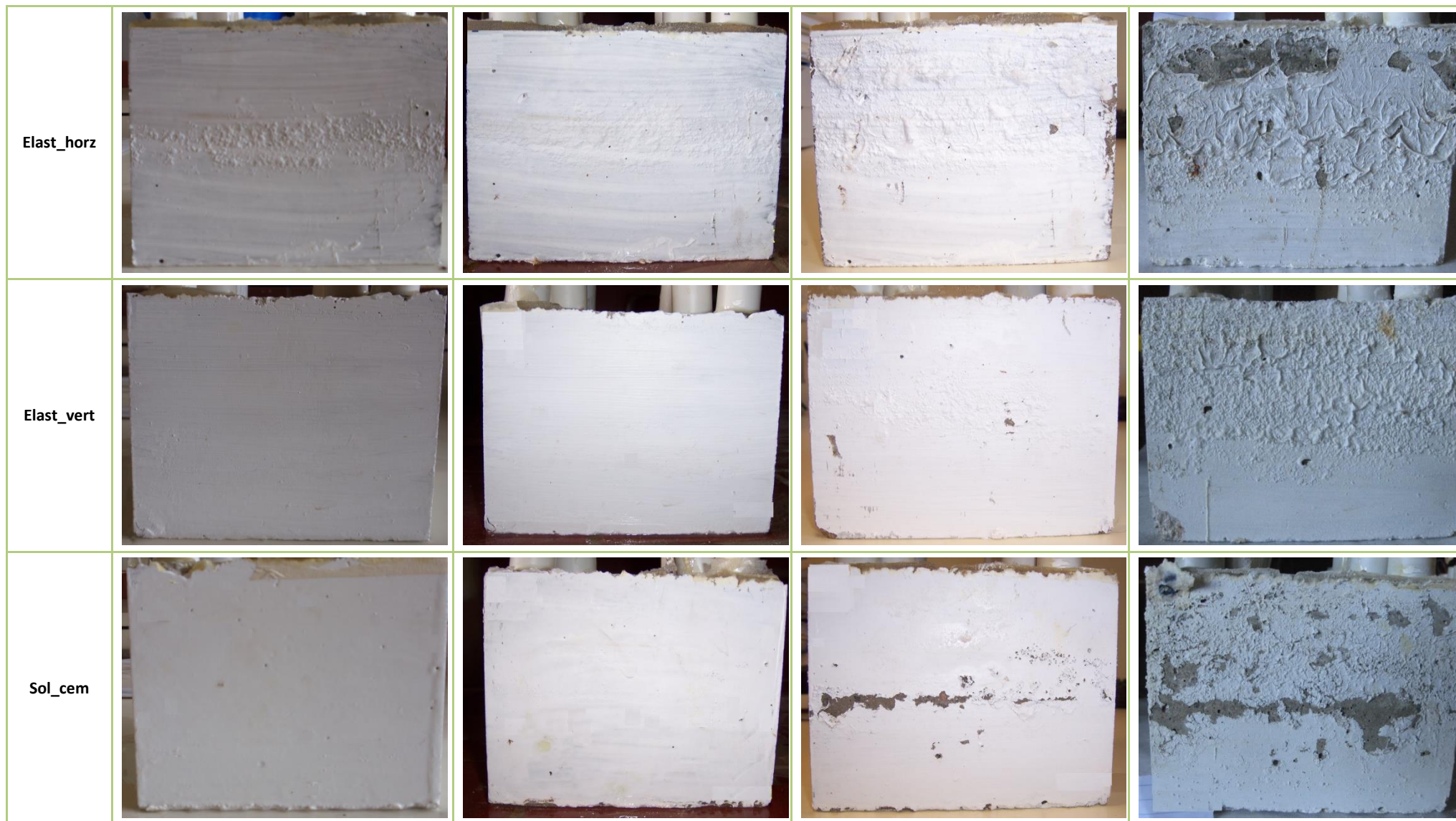
Πίνακας 10.8: Δοκίμια σπλισμένου σκυροδέματος με συμβατικές και βιομηχανικές επικαλύψεις συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl

	100 ημέρες	200 ημέρες	500 ημέρες	1000 ημέρες
Acr1				
Acr2				





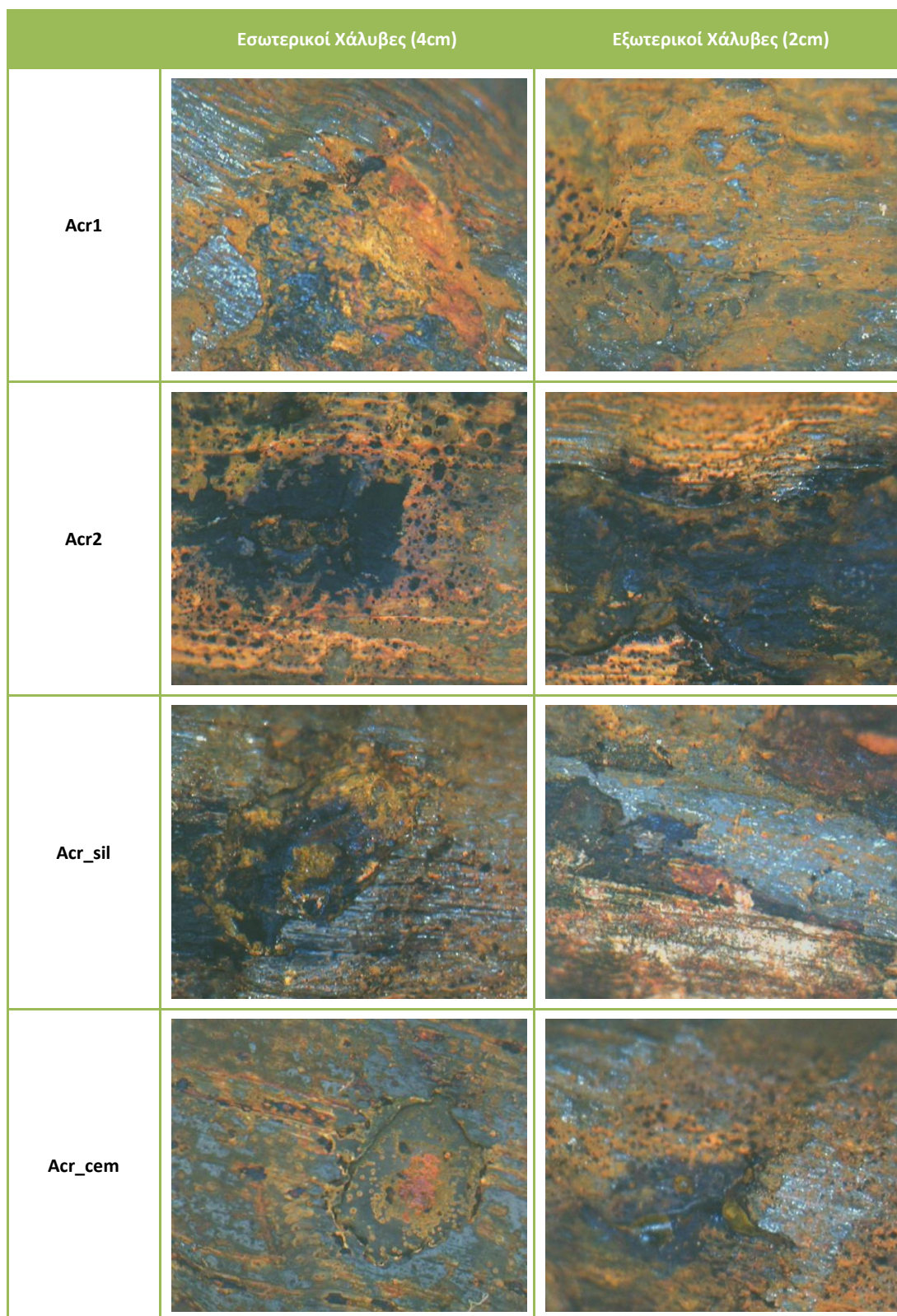




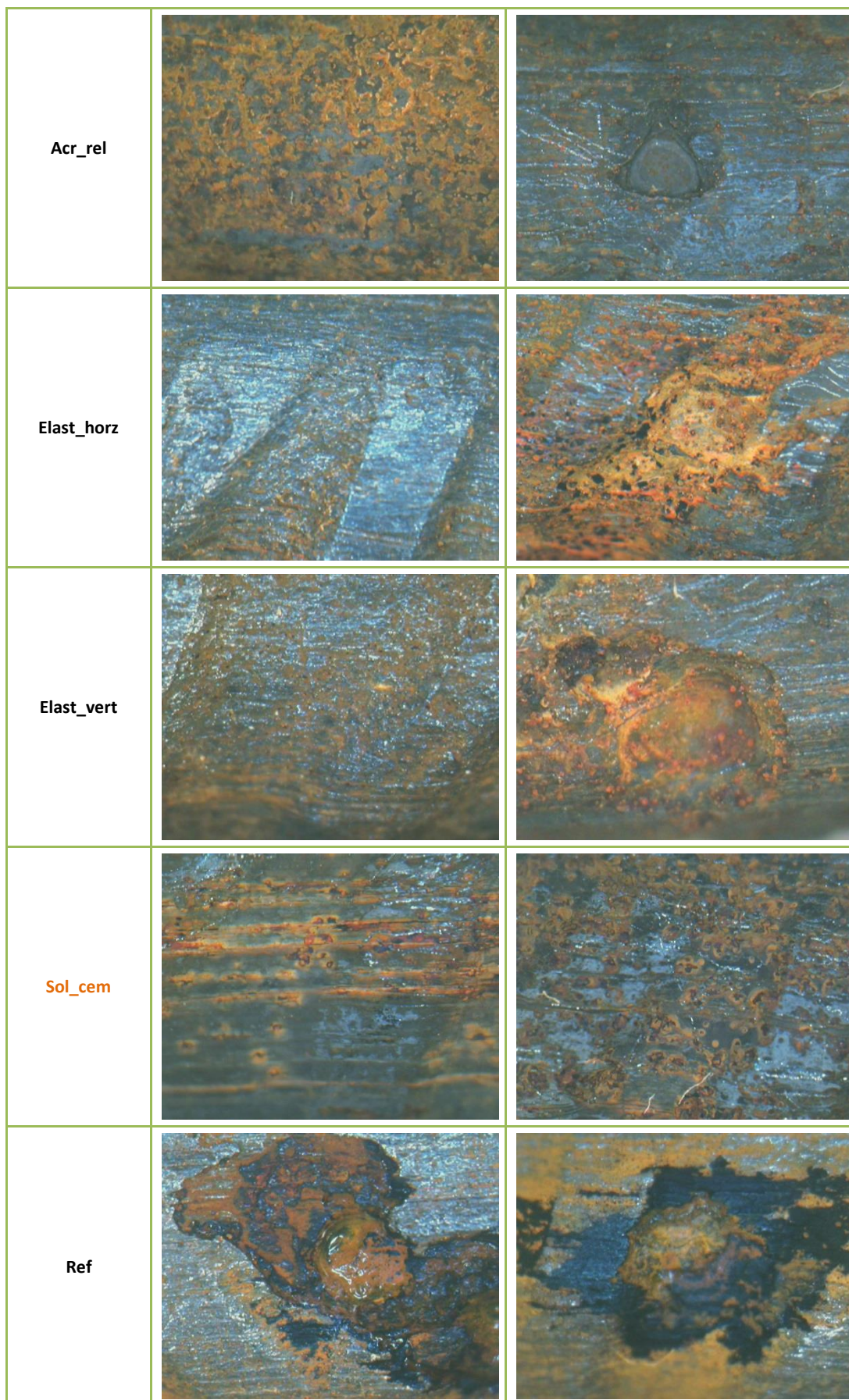


*Παρατηρήσεις με Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών*

Μετά την απομάκρυνση των σπλισμών από τα δοκίμια σκυροδέματος και τον καθαρισμό τους εξετάστηκε η μορφολογία της διάβρωσης σε μικροσκόπιο οπτικών ινών και οι φωτογραφίες που προέκυψαν απεικονίζονται στο **Σχήμα 10.26**.







**Σχήμα 10.26:** Μορφολογία διάβρωσης χαλύβων Ο.Σ. για διάφορες οργανικές επικαλύψεις, περιβάλλον διάβρωσης: μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 1500 μέρες, μεγέθυνση (50X)

Όπως προκύπτει από τις παραπάνω εικόνες, οι εσωτερικοί χάλυβες σχεδόν όλων των δοκιμίων έδειξαν μικρότερα σημάδια διάβρωσης από τους εξωτερικούς γεγονός που οφείλεται στο μεγαλύτερο πάχος επικάλυψης. Για τα δοκίμια που ήταν επικαλυμμένα με τις ελαστομερικές επικαλύψεις και το τιμμεντόχρωμα διαλύτη οι εσωτερικοί χάλυβες δείχνουν μειωμένα σημάδια διάβρωσης και πόρους μικρότερης διαμέτρου. Για τις υπόλοιπες επικαλύψεις παρατηρείται έντονη διάβρωση όπου τα προϊόντα καλύπτουν όλη την επιφάνεια του χάλυβα και η μικροδομή τους είναι πορώδης. Η διάβρωση είναι κατά κύριο λόγο διάβρωση με βελονισμούς, καθώς έχουμε έντονη τη δημιουργία τοπικών κρατήρων στην επιφάνεια των χαλύβων Ο.Σ. Η διάβρωση με βελονισμούς εμφανίζεται κυρίως στη βάση των νευρώσεων του χάλυβα όπου παρατηρείται συγκράτηση σταγονιδίων νερού.

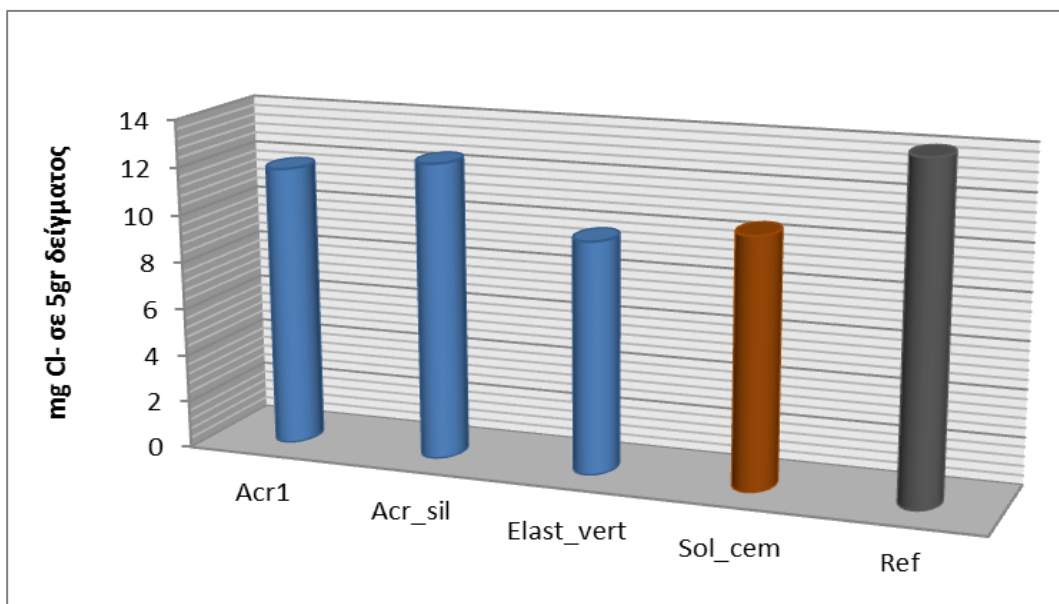
#### 10.1.1.5 Μέτρηση Χλωριόντων με Μέθοδο Mohr

Για την αποτίμηση των ιόντων χλωρίου που βρίσκονται στη μάζα του σκυροδέματος λαμβάνεται δείγμα 5gr από περιοχή κοντά στον οπλισμό και λειοτριβείται μέχρι να γίνει λεπτή σκόνη. Το λειοτριβημένο δείγμα τοποθετείται σε κωνική φιάλη των 250ml όπου προστίθενται 50ml διαλύματος  $\text{HNO}_3$  1N και 200ml απιονισμένο νερό. Το διάλυμα αφήνεται σε ηρεμία για διάστημα μιας ημέρας και στη συνέχεια λαμβάνονται 10ml δείγματος όπου αραιώνονται σε 90ml απιονισμένου νερού. Στη συνέχεια προστίθενται υδατικό διάλυμα  $\text{NaOH}$  0,1N μέχρι το pH να γίνει 7 καθώς και 3-4 σταγόνες δείκτη χρωμικού καλίου. Τέλος διενεργείται η τιτλοδότηση με διάλυμα  $\text{AgNO}_3$  1N για τον προσδιορισμό του όγκου του διαλύματος που απαιτείται ώστε να επιτευχθεί η αλλαγή χρώματος. Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης χλωριόντων γίνεται βάση του τύπου:

$$c = 8,8625 \cdot A \quad [10.6]$$

**Όπου:**  $c$  είναι η συγκέντρωση των χλωριόντων στο δείγμα που ελέγχθη [mg/5gr δείγματος] και  $A$  τα ml διαλύματος  $\text{AgNO}_3$  που καταναλώθηκαν για τον χρωματισμό του δείγματος.

Τα αποτελέσματα από τη μέτρηση των χλωριόντων με τη μέθοδο Mohr δίνονται στον παρακάτω πίνακα και ακολουθεί και το διάγραμμα των μέσων τιμών. Για κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκαν 3 δοκιμές με σκοπό την ακριβέστερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων.



**Σχήμα 10.27:** Τιτλοδότηση κατά Mohr σε επικαλυμμένα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος μετά από μερική εμβάπτιση για διάστημα 1500 ημερών σε υδατικό διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl

**Πίνακας 10.9:** Αποτελέσματα μεθόδου Mohr για την αποτίμηση των χλωριόντων σε δείγμα οπλισμένων σκυροδεμάτων επικαλυμμένων με οργανικές επικαλύψεις μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β NaCl για 1500 ημέρες

	ml AgNO <sub>3</sub> που απαιτούνται για την αλλαγή χρώματος	mg Cl <sup>-</sup> που καταβυθίστηκαν	mg Cl <sup>-</sup> στα 5gr δείγματος
Acr1_1	1,35	0,4786	11,9644
Acr1_2	1,33	0,4715	11,7871
Acr1_3	1,32	0,4679	11,6985
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>1,3333</b>	<b>0,4727</b>	<b>11,8167</b>
Τυπική Απόκλιση	±0,0153	±0,0054	±0,13538
Acr_sil_1	1,42	0,5034	12,5848
Acr_sil_2	1,4	0,4963	12,4075
Acr_sil_3	1,4	0,4963	12,4075
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>1,4067</b>	<b>0,4987</b>	<b>12,4666</b>
Τυπική Απόκλιση	±0,0115	±0,0041	±0,1023
Elast_vert_1	1,1	0,39	9,7487
Elast_vert_2	1,1	0,39	9,7487
Elast_vert_3	1,1	0,39	9,7487
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>1,1</b>	<b>0,39</b>	<b>9,7487</b>
Τυπική Απόκλιση	0	0	0
Sol_cem_1	1,19	0,4219	10,5464
Sol_cem_2	1,18	0,4183	10,4578
Sol_cem_3	1,18	0,4183	10,4578
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>1,1833</b>	<b>0,4195</b>	<b>10,4873</b>
Τυπική Απόκλιση	±0,0058	±0,002	±0,0511
Ref_1	1,79	0,6346	15,8639
Ref_2	1,81	0,6416	16,0411
Ref_3	1,81	0,6416	16,0411
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>1,8033</b>	<b>0,6393</b>	<b>15,982</b>
Τυπική Απόκλιση	±0,0115	±0,0041	±0,1023

Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου παρουσιάζεται μικρότερη στα δοκίμια που ήταν επικαλυμμένα με την ελαστομερική επικάλυψη και στα δοκίμια του χρώματος του οργανικού διαλύτου. Τα χρώματα αυτά παρουσίασαν και τις μικρότερες απώλειες μάζας αλλά και τα χαμηλότερα ρεύματα διάβρωσης κατά τις μετρήσεις της Γραμμικής Πόλωσης τόσο για τους εξωτερικούς όσο και για τους εσωτερικούς χάλυβες.

### 10.1.2 Δοκίμια Οπλισμένου Τσιμεντοκονιάματος

Τα δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος κατασκευάστηκαν κυλινδρικά και οπλίστηκαν ομοαξονικά με χάλυβα τύπου B500C. Επιχρίστηκαν με συμβατικές, βιομηχανικές και επικαλύψεις ναυτοτεχνολογίας και παρέμειναν μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 600 ημερών. Στο **Σχήμα 10.28** απεικονίζεται ένα δοκίμιο οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος πριν από την εμβάπτιση.



**Σχήμα 10.28:** Δοκίμιο οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος

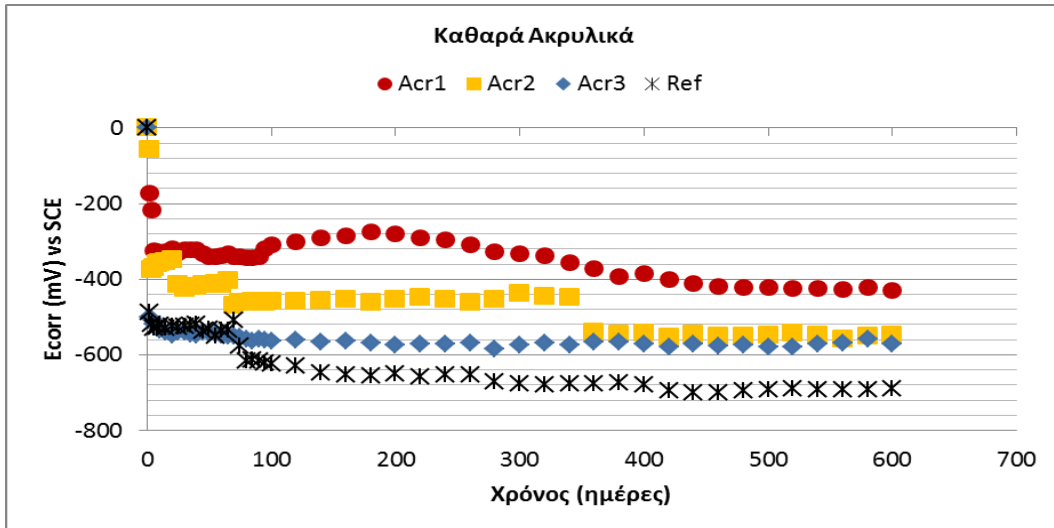


### 10.1.2.1 Χρονική Εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης των Χαλύβων

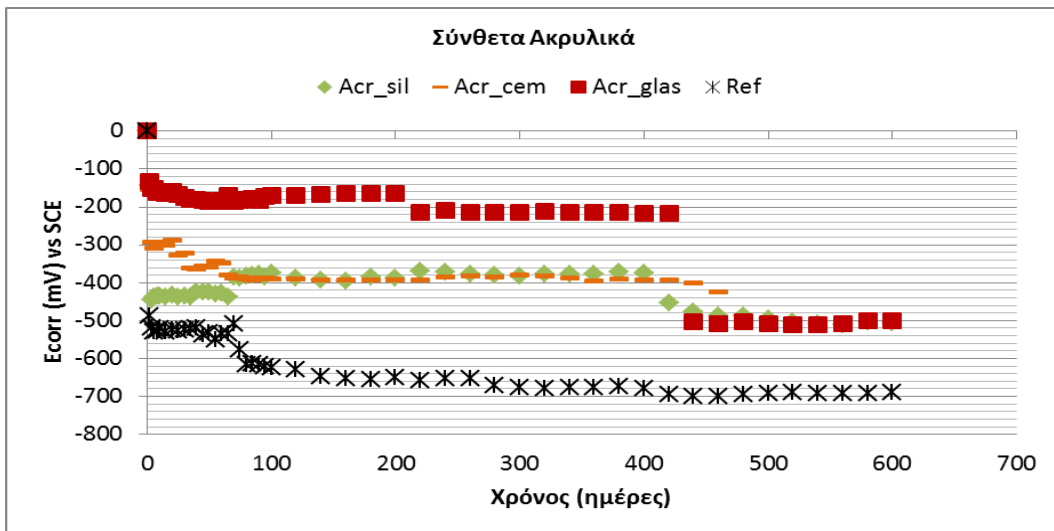
Το δυναμικό διάβρωσης μετρήθηκε ανά τακτά χρονικά διαστήματα ως προς ηλεκτρόδιο καλομέλινα και τα αποτελέσματα από το μέσο όρο 6 δοκιμών παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες ανά κατηγορία επικαλύψεων. Για την περίπτωση των συμβατικών επικαλύψεων γίνεται επιμέρους διαχωρισμός σε καθαρά ακρυλικές, σύνθετες ακρυλικές, ελαστομερές και πλαστικές επικαλύψεις με σκοπό την ευκολότερη αποσαφήνιση των ηλεκτροχημικών παραμέτρων.

**Πίνακας 10.10:** Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης για σπλισμένα τσιμεντοκονιάματα επικαλυμμένα με συμβατικές επικαλύψεις και μερικούς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 600 ημερών

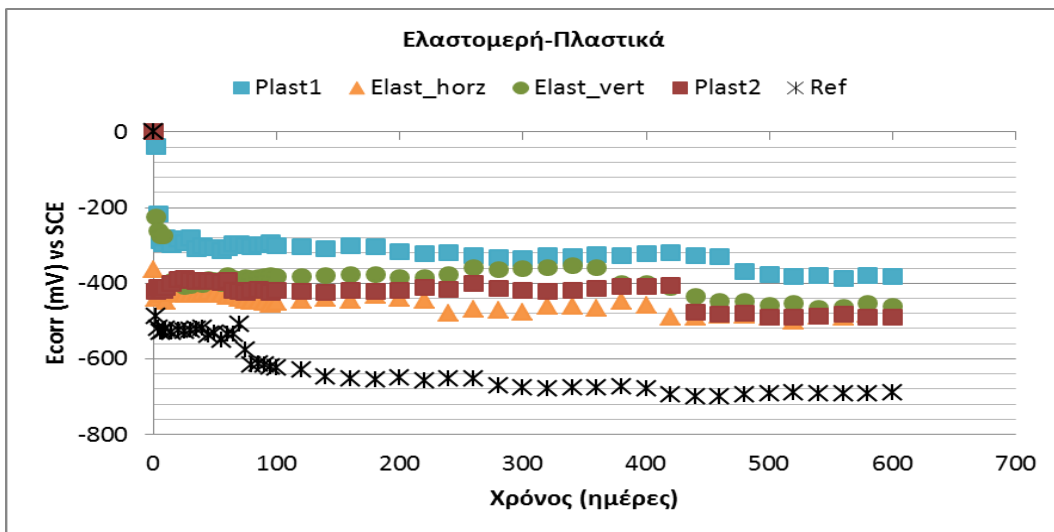
Χρόνος (ημέρες)	$E_{corr}$ (mV) vs SCE για Συμβατικές Επικαλύψεις										
	Acr1	Acr2	Acr3	Acr_sil	Acr_glas	Acr_cem	Elast_horz	Elast_vert	Plast1	Plast2	Ref
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-173	-57	-500	-143	-133	-155	-365	-226	-38,2	-423	-488
4	-218	-375	-506	-446	-153	-293	-440	-261	-217	-412	-519
6	-324	-369	-520	-438	-153	-309	-441	-275	-289	-416	-529
8	-327	-358	-530	-435	-161	-294	-430	-275	-296	-418	-526
10	-329	-357	-536	-434	-163	-295	-429	-418	-280	-411	-522
15	-327	-353	-540	-437	-165	-302	-447	-395	-297	-401	-529
20	-320	-348	-547	-431	-159	-289	-427	-393	-282	-390	-524
25	-330	-415	-541	-438	-168	-327	-427	-410	-292	-387	-527
30	-323	-424	-541	-436	-175	-323	-429	-407	-281	-392	-523
35	-321	-419	-545	-437	-179	-360	-430	-400	-309	-396	-521
40	-322	-420	-547	-423	-181	-363	-429	-402	-300	-392	-520
45	-333	-415	-541	-424	-183	-357	-424	-390	-307	-395	-536
50	-340	-413	-543	-425	-185	-359	-421	-393	-307	-394	-532
55	-341	-411	-545	-429	-187	-343	-429	-400	-313	-397	-549
60	-338	-415	-547	-426	-183	-349	-430	-380	-306	-393	-535
65	-332	-403	-549	-438	-171	-380	-436	-389	-295	-419	-535
70	-339	-469	-550	-386	-186	-386	-431	-390	-296	-422	-507
75	-340	-462	-552	-388	-183	-386	-440	-385	-301	-423	-577
80	-342	-460	-558	-381	-180	-391	-446	-388	-304	-418	-616
85	-344	-458	-562	-379	-177	-394	-449	-386	-298	-417	-613
90	-339	-459	-557	-377	-182	-387	-447	-383	-299	-419	-616
95	-320	-461	-561	-384	-173	-388	-450	-380	-293	-424	-620
100	-310	-458	-563	-375	-170	-391	-455	-382	-300	-418	-624
120	-300	-458	-561	-388	-171	-390	-450	-381	-304	-421	-630
140	-290	-457	-567	-394	-168	-394	-445	-379	-309	-423	-648
160	-285	-454	-563	-396	-165	-392	-440	-378	-302	-420	-653
180	-274	-461	-568	-386	-164	-394	-445	-378	-303	-422	-655
200	-279	-454	-575	-388	-164	-394	-432	-386	-317	-418	-651
220	-291	-448	-572	-368	-213	-393	-439	-386	-321	-411	-659
240	-296	-452	-570	-372	-208	-385	-444	-378	-320	-416	-653
260	-308	-461	-569	-376	-214	-382	-479	-358	-328	-401	-652
280	-327	-453	-585	-379	-215	-385	-468	-363	-333	-413	-671
300	-332	-438	-573	-381	-213	-380	-471	-361	-334	-420	-677
320	-338	-444	-568	-377	-212	-381	-477	-359	-328	-420	-680
340	-357	-447	-573	-377	-214	-388	-461	-353	-330	-419	-675
360	-371	-541	-567	-376	-213	-396	-462	-358	-325	-413	-675
380	-394	-545	-566	-372	-215	-390	-467	-400	-328	-409	-673
400	-384	-542	-571	-375	-217	-392	-449	-401	-321	-408	-678
420	-400	-553	-578	-454	-218	-393	-458	-411	-320	-405	-696
440	-410	-546	-570	-476	-503	-400	-489	-436	-327	-477	-700
460	-418	-549	-576	-488	-509	-424	-491	-448	-330	-481	-699
480	-422	-550	-573	-486	-503	-499	-485	-449	-368	-479	-695
500	-421	-547	-580	-494	-507	-501	-485	-458	-376	-489	-692
520	-425	-543	-578	-504	-510	-505	-489	-452	-381	-491	-689
540	-425	-547	-571	-509	-512	-503	-501	-466	-380	-486	-691
560	-426	-558	-569	-510	-508	-507	-486	-464	-388	-482	-692
580	-422	-551	-559	-503	-501	-499	-489	-453	-380	-489	-693
600	-430	-547	-571	-505	-500	-500	-483	-462	-381	-490	-690



Σχήμα 10.29: Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης για σπλισμένα τσιμεντοκονιάματα με καθαρά ακρυλικές επικαλύψεις



Σχήμα 10.30: Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης για σπλισμένα τσιμεντοκονιάματα με σύνθετες ακρυλικές επικαλύψεις

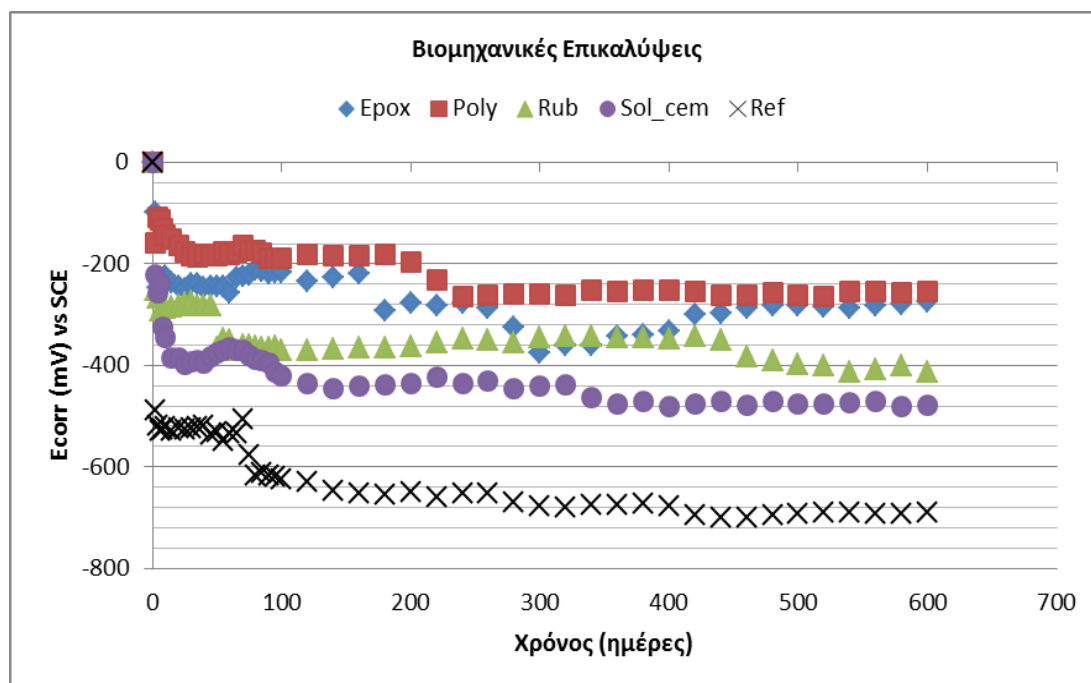


Σχήμα 10.31: Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης για σπλισμένα τσιμεντοκονιάματα με ελαστομερές και πλαστικές επικαλύψεις. Όλες οι συμβατικές επικαλύψεις παρουσιάζουν 90% πιθανότητα διάβρωσης. Εξάιρεση αποτελούν το τρίτο ακρυλικό χρώμα όπου οι χάλυβες διαβρώνονται εκτεταμένα καθώς και το ακρυλικό χρώμα ενισχυμένο με ίνες (Acr\_glas) όπου η κατάσταση των χαλύβων χαρακτηρίζεται ασαφής.

**Πίνακας 10.11:** Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης για οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα επικαλυμμένα με βιομηχανικές επικαλύψεις και μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 600 ημερών

Χρόνος (ημέρες)	$E_{corr}$ (mV) vs SCE για Βιομηχανικές Επικαλύψεις			
	Εροχ	Poly	Rub	Sol_cem
0	0	0	0	0
2	-99	-160	-253	-223
4	-246	-109	-268	-256
6	-243	-113	-291	-240
8	-235	-132	-281	-325
10	-223	-143	-288	-346
15	-237	-151	-285	-386
20	-245	-163	-283	-384
25	-249	-176	-276	-397
30	-240	-183	-274	-394
35	-240	-185	-281	-390
40	-248	-182	-283	-394
45	-245	-183	-283	-383
50	-244	-184	-365	-376
55	-245	-177	-347	-370
60	-257	-182	-351	-366
65	-227	-176	-371	-370
70	-223	-163	-360	-370
75	-222	-174	-361	-381
80	-213	-174	-363	-388
85	-215	-179	-365	-391
90	-218	-190	-364	-395
95	-216	-190	-362	-412
100	-217	-190	-370	-421
120	-235	-181	-371	-435
140	-227	-183	-368	-445
160	-219	-184	-365	-440
180	-293	-181	-364	-438
200	-278	-197	-364	-435
220	-283	-231	-355	-423
240	-277	-264	-347	-435
260	-286	-263	-350	-430
280	-326	-260	-354	-446
300	-376	-259	-344	-440
320	-361	-261	-342	-439
340	-360	-252	-344	-464
360	-343	-255	-345	-475
380	-339	-253	-345	-471
400	-333	-252	-348	-481
420	-300	-255	-343	-475
440	-296	-261	-349	-472
460	-287	-263	-384	-478
480	-282	-258	-391	-470
500	-283	-262	-399	-477
520	-285	-264	-400	-475
540	-287	-255	-414	-473
560	-281	-254	-409	-472
580	-280	-258	-400	-482
600	-275	-255	-413	-478



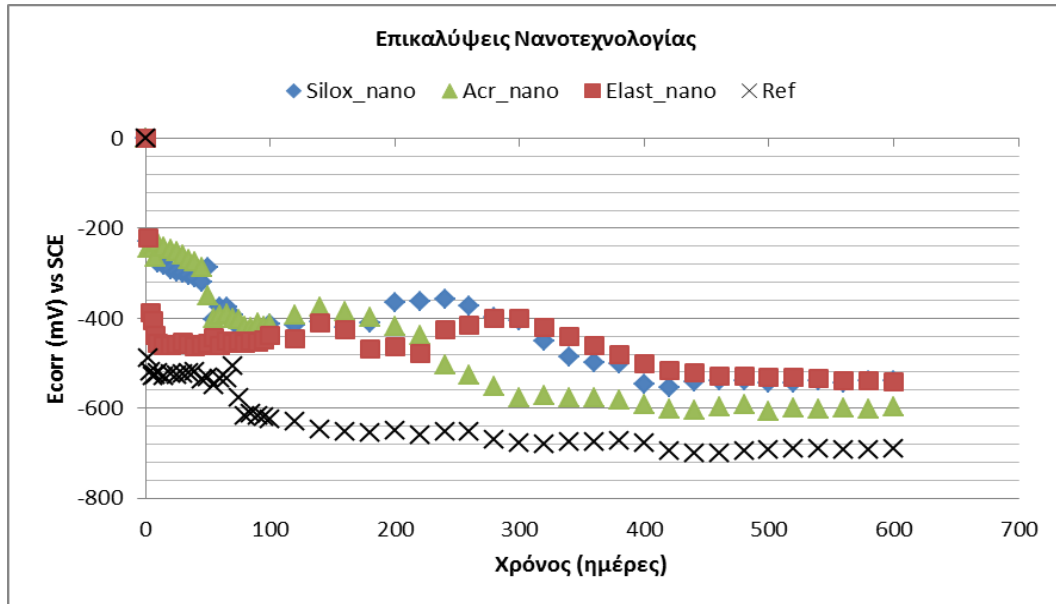


**Σχήμα 10.32:** Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσεϊ του χρόνου έκθεσης για σπλισμένα τσιμεντοκονιάματα με βιομηχανικές επικαλύψεις

Τόσο η εποξειδική όσο και η επικάλυψη πολυουρεθάνης διατηρούνται καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος σε τιμές δυναμικού που είναι ενδεικτικές ασαφούς κατάστασης των χαλύβων, ενώ το τσιμεντόχρωμα διαλύτη και η επικάλυψη χλωριωμένου καουτσούκ παρουσιάζουν πιθανότητα διάβρωσης 90% σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87.

**Πίνακας 10.12:** Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης για οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα επικαλυμμένα με βιομηχανικές επικαλύψεις και μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 600 ημερών

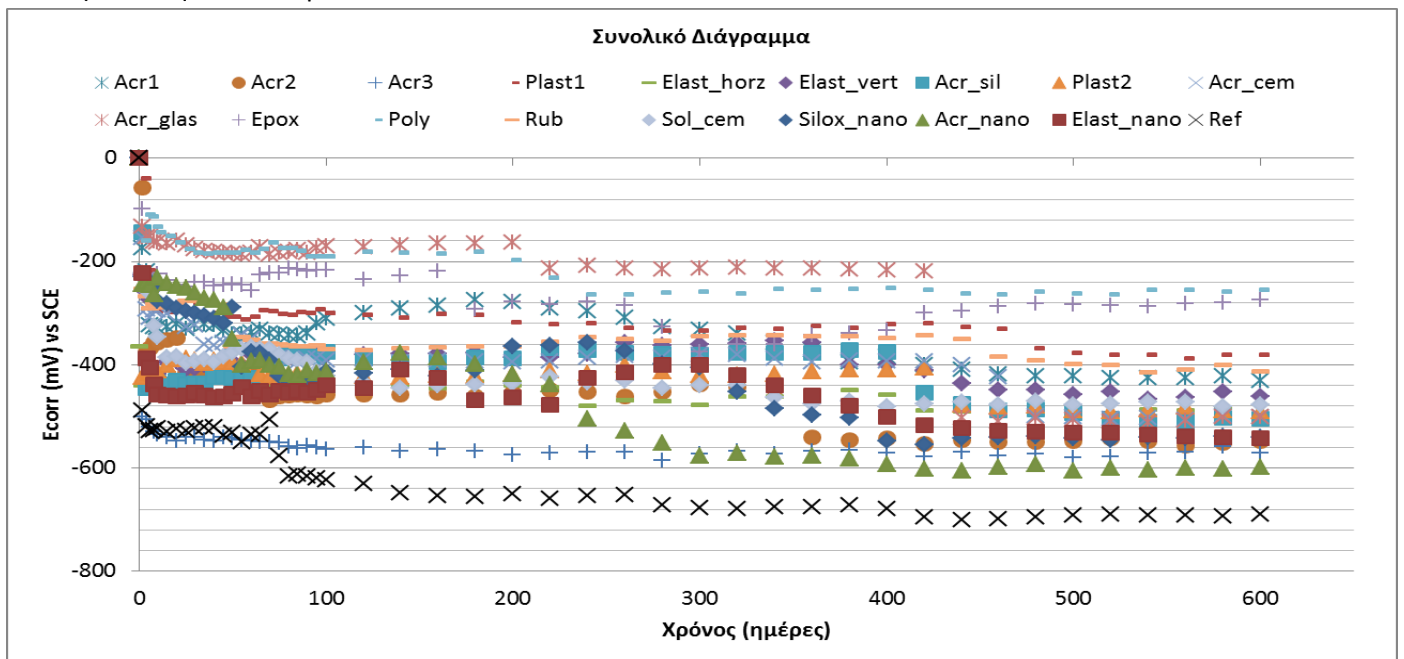
Χρόνος (ημέρες)	$E_{corr}$ (mV) vs SCE για Επικαλύψεις Νανοτεχνολογίας		
	Silox_nano	Acr_nano	Elast_nano
0	0	0	0
2	-229	-244	-222
4	-234	-238	-387
6	-241	-245	-405
8	-253	-264	-438
10	-277	-232	-457
15	-282	-242	-460
20	-291	-248	-461
25	-296	-251	-459
30	-299	-260	-454
35	-305	-270	-459
40	-310	-275	-463
45	-319	-288	-462
50	-288	-350	-456
55	-403	-401	-443
60	-375	-393	-462
65	-376	-391	-450
70	-392	-400	-457
75	-421	-403	-450
80	-432	-418	-455
85	-433	-420	-451
90	-429	-411	-454
95	-425	-417	-449
100	-412	-412	-439
120	-416	-394	-445
140	-409	-376	-410
160	-421	-385	-425
180	-411	-399	-468
200	-365	-419	-463
220	-363	-438	-478
240	-357	-504	-425
260	-373	-527	-415
280	-398	-552	-400
300	-405	-577	-400
320	-452	-571	-420
340	-485	-578	-440
360	-498	-576	-460
380	-502	-581	-480
400	-547	-592	-500
420	-555	-601	-517
440	-542	-605	-522
460	-540	-598	-528
480	-538	-592	-530
500	-543	-606	-531
520	-545	-600	-532
540	-540	-603	-535
560	-543	-599	-538
580	-539	-602	-540
600	-540	-598	-542



Σχήμα 10.33: Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα με επικαλύψεις νανοτεχνολογίας

Για τις επικαλύψεις νανοτεχνολογίας βλέπουμε πως η σιλοξανική και η ακρυλική επικάλυψη παρουσιάζουν 90% πιθανότητα διάβρωσης και από τη 320<sup>η</sup> και 220<sup>η</sup> ημέρα αντίστοιχα εμφανίζουν εκτεταμένη διάβρωση. Η ελαστομερής επικάλυψη νανοτεχνολογίας βρίσκεται σε κατάσταση εκτεταμένης διάβρωσης σε όλη τη διάρκεια του πειράματος.

Το συνολικό διάγραμμα όλων των οργανικών επικαλύψεων παρουσιάζεται παρακάτω, όπου παρατηρείται πως οι τιμές του δυναμικού διάβρωσης των οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων είναι ιδιαίτερα χαμηλές από την αρχή της έκθεσης των δοκιμών και παρουσιάζονται πιο ηλεκτροαρνητικές από τις αντίστοιχες τιμές των οπλισμένων σκυροδεμάτων, γεγονός που οφείλεται στο διαφορετικό υπόστρωμα όπου η αύξηση του πορώδους στα κονιάματα επιταχύνει την πτώση του δυναμικού.



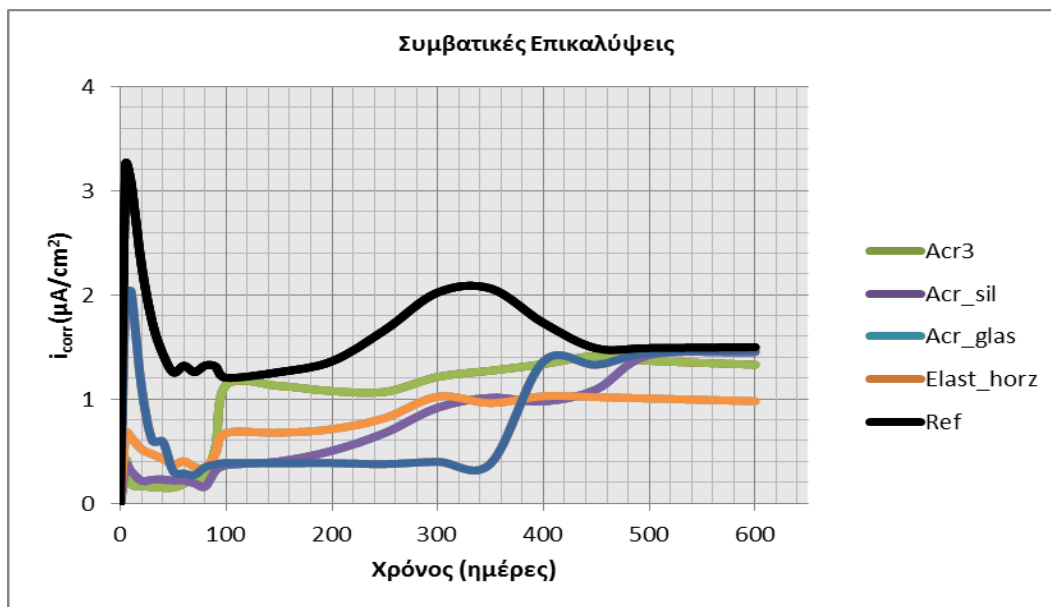
Σχήμα 10.34: Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 600 ημέρες

### 10.1.2.2 Προσδιορισμός Πυκνότητας Ρεύματος Διάβρωσης

Μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ρεύματος διάβρωσης ελήφθησαν τακτικά και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες ανά κατηγορίες επικαλύψεων. Μετά από κάθε πίνακα αποτελεσμάτων παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης-χρόνου ανά κατηγορία χρωμάτων και στο τέλος παρουσιάζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα. Οι τιμές που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν το μέσο όρο 6 δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν από κάθε επικάλυψη.

**Πίνακας 10.13:** Μ.Ο. ηλεκτροχημικών παραμέτρων για οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα με συμβατικές επικαλύψεις, μερικές εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 600 ημέρες

Χρόνος (ημέρες)	Acr3					Acr_sil				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	-0,438	-440,466	0,4142	62774	9,5148	-0,435	-437,845	0,3670	70853	8,4299
10	-0,427	-429,822	0,1882	138164	4,3230	-0,431	-435,733	0,3066	84789	7,0443
20	-0,425	-427,84	0,1657	156954	3,8054	-0,428	-430,482	0,2135	121780	4,9046
30	-0,425	-429,839	0,1537	169200	3,5300	-0,436	-438,881	0,2258	115171	5,1860
40	-0,429	-429,152	0,1484	175206	3,4090	-0,420	-427,221	0,2291	113512	5,2618
50	-0,421	-425,173	0,1495	173941	3,4338	-0,421	-427,991	0,2156	120599	4,9526
60	-0,427	-431,454	0,1882	138164	4,3230	-0,422	-422,855	0,2177	119434	5,0009
70	-0,429	-431,663	0,2352	110522	5,4042	-0,381	-384,111	0,1922	135300	4,4145
80	-0,437	-446,046	0,2682	96948	6,1608	-0,377	-3879,42	0,1605	161988	3,6872
90	-0,445	-445,712	0,5432	47867	12,478	-0,371	-377,646	0,3159	82297	7,2576
100	-0,451	-455,432	1,1368	22871	26,115	-0,370	-375,945	0,3660	71046	8,4069
150	-0,442	-445,766	1,1267	23077	25,882	-0,390	-394,701	0,4023	64634	9,2409
200	-0,430	-432,663	1,0771	24139	24,743	-0,387	-389,004	0,5042	51568	11,582
250	-0,473	-474,128	1,0691	24320	24,559	-0,371	-374,833	0,6753	38499	15,514
300	-0,467	-471,651	1,2133	21429	27,873	-0,380	-381,762	0,9180	28322	21,089
350	-0,46	-462,529	1,2727	20429	29,237	-0,375	-376,283	1,0133	25658	23,279
400	-0,446	-449,234	1,3363	19457	30,698	-0,374	-375,954	0,9773	26604	22,45
450	-0,487	-491,643	1,4134	18395	32,469	-0,485	-488,897	1,0933	23781	25,115
500	-0,483	-485,937	1,3676	19012	31,416	-0,493	-494,163	1,4209	18298	32,642
600	-0,481	-483,778	1,3298	19551	30,55	-0,503	-505,139	1,4508	17921	33,329
Χρόνος (ημέρες)	Elast_horz					Acr_glas				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	-0,438	-440,466	2,0224	12845	46,4545	-0,148	-159,665	0,6783	38328	15,5831
10	-0,427	-429,822	2,0366	12766	46,786	-0,159	-163,332	0,6315	41172	14,5067
20	-0,425	-427,84	1,1077	23471	25,447	-0,156	-159,767	0,5187	50121	11,9167
30	-0,425	-429,839	0,6046	43005	13,889	-0,173	-175,112	0,4714	55156	10,8289
40	-0,429	-429,152	0,593	43842	13,623	-0,178	-181,784	0,4269	60899	9,80768
50	-0,421	-425,173	0,3039	85549	6,9817	-0,182	-185,331	0,3700	70274	8,49924
60	-0,427	-431,454	0,2855	91064	6,5589	-0,181	-183,903	0,4035	64441	9,2685
70	-0,429	-431,663	0,2724	95438	6,2583	-0,182	-186,646	0,3501	74256	8,04348
80	-0,437	-446,046	0,3469	74944	7,9697	-0,177	-180,115	0,3409	76276	7,83044
90	-0,445	-445,712	0,3740	69527	8,5906	-0,178	-181,422	0,4779	54404	10,9784
100	-0,451	-455,432	0,3868	67223	8,8851	-0,168	-170,409	0,6749	38524	15,504
150	-0,442	-445,766	0,3841	67694	8,8232	-0,165	-168,185	0,6763	38443	15,5368
200	-0,430	-432,663	0,3851	67516	8,8465	-0,163	-164,934	0,7116	36536	16,3477
250	-0,473	-474,128	0,3761	69125	8,6405	-0,211	-214,021	0,8186	31761	18,8051
300	-0,467	-471,651	0,3981	65314	9,1447	-0,212	-213,992	1,0238	25395	23,5193
350	-0,46	-462,529	0,3817	68124	8,7675	-0,210	-213,72	0,9626	27010	22,1127
400	-0,446	-449,234	1,3625	19082	31,301	-0,215	-217,869	1,0276	25301	23,6068
450	-0,487	-491,643	1,3295	19557	30,541	-0,501	-506,285	1,0195	25503	23,4199
500	-0,483	-485,937	1,4431	18017	33,151	-0,505	-507,359	1,0055	25857	23,099
600	-0,481	-483,778	1,4710	17675	33,793	-0,498	-500,111	0,9801	26528	22,5143

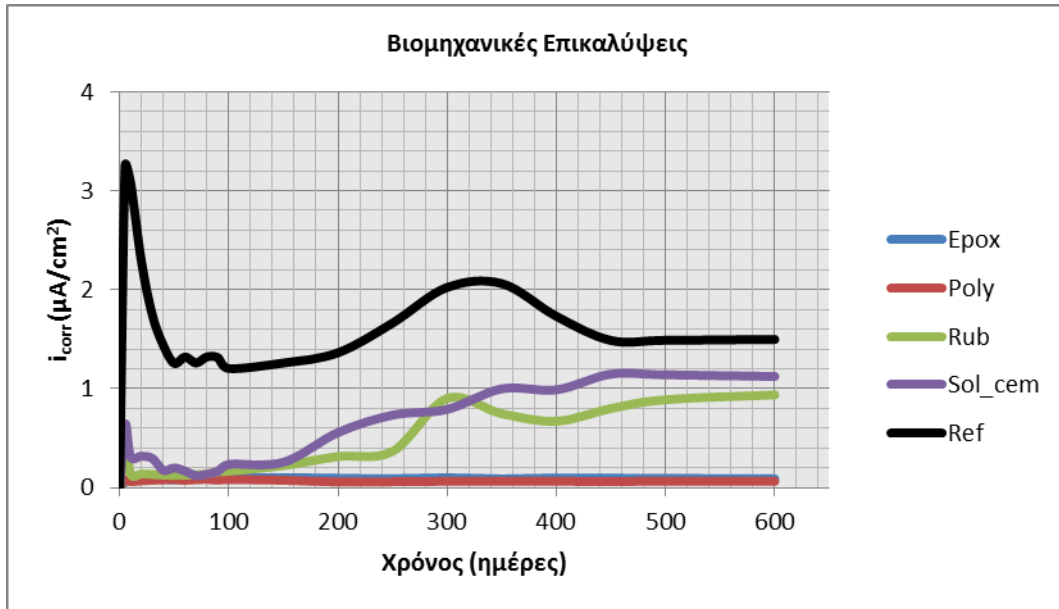


**Σχήμα 10.35:** Μ.Ο. Πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης συναρτήσεως του χρόνου για δοκίμια σπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικές επικαλύψεις και μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 600 ημέρες

Το καθαρό ακρυλικό χρώμα Acr3 εμφανίζει χαμηλό έως μέτριο ρυθμό διάβρωσης μόνο για τις 100 πρώτες μέρες και μετά ο ρυθμός διάβρωσής του είναι υψηλός. Το σιλικονούχο ακρυλικό χρώμα τις πρώτες 200 μέρες μερικής εμβάπτισης εμφανίζει χαμηλό έως μέτριο ρυθμό, στη συνέχεια ο ρυθμός γίνεται μέτριος έως υψηλός και τις τελευταίες 150 ημέρες εμφανίζει υψηλό ρυθμό διάβρωσης. Το ακρυλικό χρώμα ενισχυμένο με ίνες για το πρώτο μισό του χρόνου έκθεσης εμφανίζει σταδιακά από χαμηλό έως μέτριο και μέτριο προς υψηλό βαθμό ενώ για το υπόλοιπο μισό ο ρυθμός διάβρωσης είναι υψηλός. Το ελαστομερές χρώμα για οριζόντιες επιφάνειες τις 20 πρώτες μέρες του πειράματος παρουσιάζει υψηλό ρυθμό διάβρωσης και μετά μέχρι την 400<sup>η</sup> ημέρα ο ρυθμός είναι χαμηλός έως μέτριος. Από την 400<sup>η</sup> ημέρα και μέχρι το τέλος του πειράματος ο ρυθμός διάβρωσης είναι και πάλι υψηλός.

**Πίνακας 10.14:** Μ.Ο. ηλεκτροχημικών παραμέτρων για δοκίμια οπλισμένου τιμεντοκονιάματος με βιομηχανικές επικαλύψεις και μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 600 ημέρες

Χρόνος (ημέρες)	Erox					Poly				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	-0,210	-210,663	0,0587	442871	1,3487	-0,150	-152,582	0,0785	331240	1,8032
10	-0,219	-223,889	0,0855	304124	1,9639	-0,163	-163,08	0,0608	427939	1,3957
20	-0,225	-230,622	0,0961	270600	2,2072	-0,160	-165,896	0,069	376915	1,5847
30	-0,276	-278,967	0,0920	282644	2,1132	-0,224	-230,489	0,0751	346374	1,7244
40	-0,258	-262,547	0,0850	305907	1,9525	-0,208	-211,67	0,0787	330568	1,8068
50	-0,279	-284,228	0,0807	322064	1,8545	-0,222	-229,694	0,0810	321095	1,8601
60	-0,261	-265,666	0,0892	291463	2,0492	-0,221	-226,828	0,0742	350618	1,7035
70	-0,238	-242,218	0,0892	291634	2,0480	-0,210	-212,146	0,0814	319431	1,8698
80	-0,277	-282,889	0,0923	281755	2,1199	-0,230	-234,62	0,0835	311368	1,9182
90	-0,359	-362,996	0,0840	309552	1,9295	-0,279	-282,388	0,0760	342189	1,7455
100	-0,275	-282,674	0,0951	273264	2,1857	-0,265	-268,429	0,0819	317417	1,8817
150	-0,299	-299,392	0,1007	258252	2,3128	-0,257	-259,599	0,0744	349395	1,7095
200	-0,314	-318,482	0,0951	273264	2,1857	-0,275	-273,993	0,0572	454840	1,3132
250	-0,328	-330,733	0,0900	288975	2,0669	-0,288	-290,600	0,0593	438087	1,3634
300	-0,302	-308,609	0,1001	259661	2,3002	-0,291	-291,445	0,0633	410445	1,4552
350	-0,349	-351,833	0,0882	294702	2,0267	-0,301	-305,934	0,0649	400472	1,4914
400	-0,376	-377,739	0,0979	265699	2,2479	-0,319	-321,775	0,0634	410155	1,4562
450	-0,356	-357,367	0,0954	272560	2,1914	-0,323	-325,885	0,0614	423295	1,4110
500	-0,366	-367,283	0,0938	277310	2,1538	-0,305	-310,757	0,0643	404668	1,4760
600	-0,358	-358,377	0,0888	292815	2,0398	-0,333	-334,774	0,0638	407634	1,4652
Χρόνος (ημέρες)	Rub					Sol_cem				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	-0,288	-291,633	0,5332	48760	12,2490	-0,238	-240,43	0,6398	40640	14,6966
10	-0,285	-288,123	0,1343	193652	3,0843	-0,341	-346,33	0,3100	83866	7,12182
20	-0,279	-283,545	0,1391	186917	3,1954	-0,279	-382,64	0,3183	81696	7,31102
30	-0,272	-274,233	0,1336	194555	3,0700	-0,393	-393,82	0,2951	88110	6,77876
40	-0,28	-283,091	0,1265	205570	2,9055	-0,394	-395,22	0,1748	148755	4,01519
50	-0,36	-365,656	0,1233	210790	2,8335	-0,373	-376,9	0,1994	130393	4,58061
60	-0,348	-351,555	0,1261	206239	2,8961	-0,363	-366,61	0,1667	155987	3,82903
70	-0,358	-360,743	0,129	201593	2,9628	-0,368	-370,67	0,1208	215230	2,77507
80	-0,361	-363,121	0,1374	189279	3,1555	-0,385	-387,23	0,1364	190561	3,13432
90	-0,36	-364,443	0,1592	163320	3,6571	-0,362	-365,93	0,1666	156104	3,82615
100	-0,368	-370,665	0,1663	156309	3,8212	-0,368	-370,84	0,2354	110440	5,40818
150	-0,361	-365,902	0,2233	116427	5,1301	-0,364	-367,43	0,2567	101279	5,89735
200	-0,359	-364,654	0,3141	82778	7,2154	-0,461	-363,86	0,5567	46708	12,7876
250	-0,342	-350,154	0,367	70841	8,4312	-0,465	-366,65	0,7333	35454	16,8465
300	-0,339	-344,667	0,9015	28841	20,7090	-0,469	-373,85	0,7911	32866	18,1730
350	-0,338	-342,741	0,747	34805	17,1610	-0,472	-374,72	0,9988	26031	22,9450
400	-0,346	-348,932	0,6712	38734	15,4200	-0,469	-371,85	0,9884	26305	22,7063
450	-0,381	-384,255	0,7996	32518	18,3680	-0,468	-370,73	1,1470	22669	26,3482
500	-0,293	-399,521	0,8881	29276	20,4010	-0,465	-370,95	1,1395	22818	26,1763
600	-0,412	-413,883	0,9372	27744	21,5290	-0,467	-370,56	1,1234	23145	25,8062

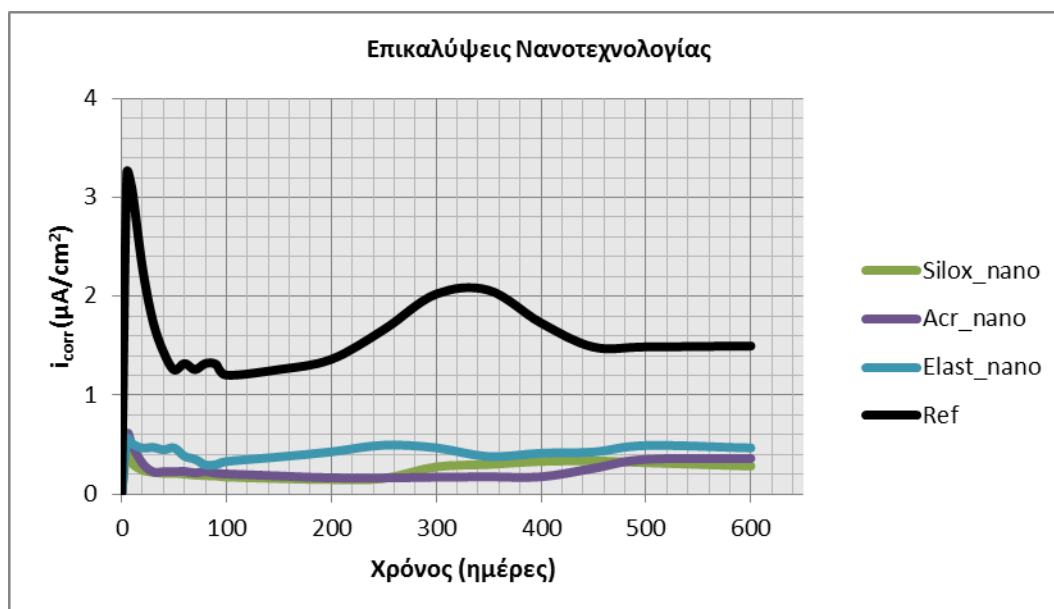


**Σχήμα 10.36:** Μ.Ο. Πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου για δοκίμια σπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με βιομηχανικές επικαλύψεις και μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 600 ημέρες. Το εποξειδικό χρώμα και η επικάλυψη πολυουρεθάνης για όλο το χρονικό διάστημα της έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον βρίσκονται σε παθητική κατάσταση. Αντίθετα το χρώμα χλωριωμένου καουτσούκ παρουσιάζει χαμηλό έως μέτριο ρυθμό διάβρωσης για τις πρώτες 250 ημέρες και έπειτα ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται σε μέτριο με υψηλό. Τέλος το τσιμεντόχρωμα διαλύτη ενώ ξεκινάει με χαμηλούς έως μέτριους ρυθμούς διάβρωσης, καταλήγει μετά την 400η ημέρα με υψηλό ρυθμό διαβρωτικής διαδικασίας.



**Πίνακας 10.15:** Μ.Ο. ηλεκτροχημικών παραμέτρων για δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με επικαλύψεις νανοτεχνολογίας και μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 600 ημέρες

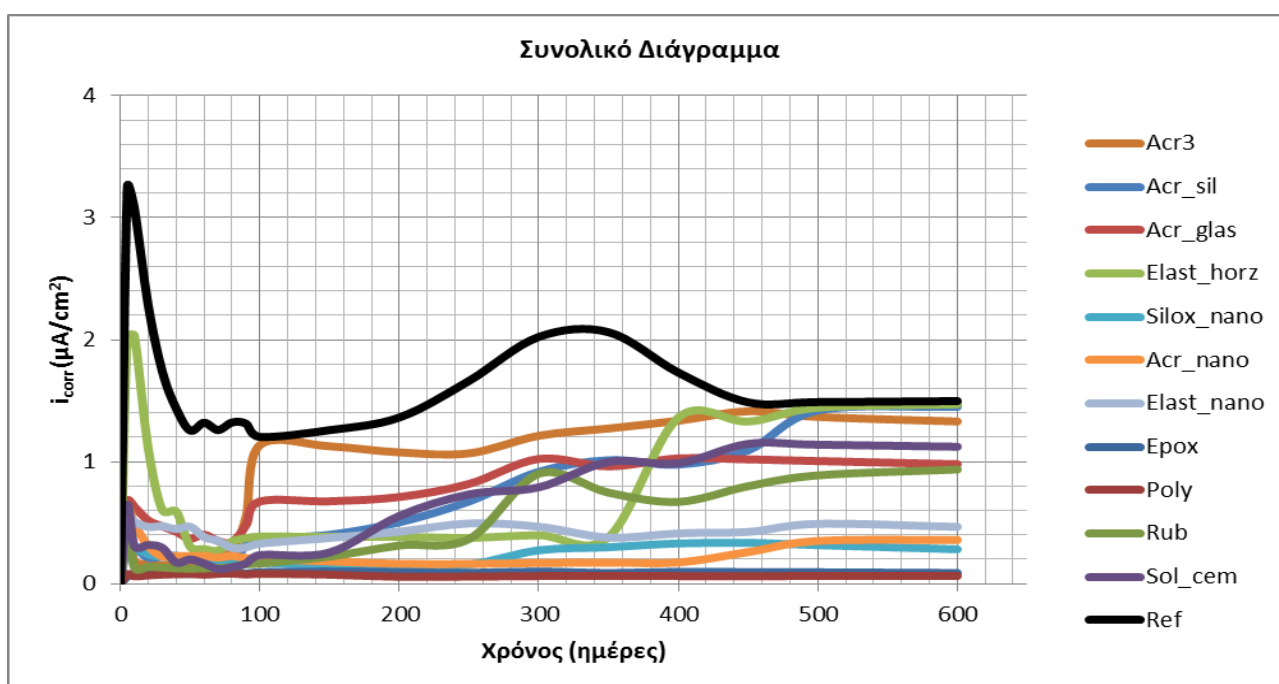
Χρόνος (ημέρες)	Silox_nano					Acr_nano				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	-238	-241,332	0,4338	59938	9,965	-243	-246,65	0,6034	43089	13,8616
10	-274	-277,974	0,3109	83633	7,1417	-232	-234,823	0,4909	52964	11,2771
20	-290	-293,721	0,2415	107682	5,5467	-245	-245,803	0,3091	84104	7,10169
30	-293	-299,002	0,221	117624	5,0779	-259	-260,993	0,2244	115886	5,15404
40	-306	-308,345	0,2109	123282	4,8448	-273	-275,004	0,2262	114942	5,19636
50	-283	-284,221	0,2119	122723	4,8669	-349	-352,898	0,2262	114940	5,19645
60	-374	-377,772	0,2028	128205	4,6588	-392	-393,767	0,2291	113504	5,26218
70	-390	-392,114	0,1928	134823	4,4301	-396	-400,551	0,2148	121027	4,93507
80	-428	-432,164	0,1868	139217	4,2903	-419	-421,335	0,2283	113889	5,24439
90	-426	-429,834	0,1831	141975	4,2069	-410	-413,867	0,2113	123036	4,85449
100	-409	-412,543	0,1732	150130	3,9784	-409	-412,311	0,2039	127523	4,6837
150	-418	-421,868	0,1569	165699	3,6046	-377	-379,235	0,1837	141557	4,21935
200	-363	-365,831	0,1469	177031	3,3739	-417	-419,117	0,1639	158677	3,76412
250	-370	-373,003	0,1582	164300	3,6353	-526	-529,54	0,163	159471	3,74538
300	-402	-405,53	0,2750	94541	6,3177	-574	-577,134	0,1706	152411	3,91888
350	-481	-485,782	0,2995	86821	6,8795	-573	-576,274	0,1743	149138	4,00488
400	-546	-547,337	0,3307	78628	7,5963	-59	-592,645	0,1746	148941	4,01016
450	-538	-541,632	0,3353	77551	7,7017	-598	-599,094	0,2602	99916	5,97781
500	-540	-543,873	0,3169	82046	7,2798	-603	-606,034	0,351	74083	8,06227
600	-538	-540,213	0,2827	91967	6,4945	-598	-599,539	0,3598	72269	8,26462
Χρόνος (ημέρες)	Elast_nano					Ref				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	-385	-388,88	0,5557	46791	12,7650	-516	-519,777	3,2512	7997	74,6879
10	-456	-459,12	0,508	51180	11,6700	-520	-524,823	3,0795	8443	70,7425
20	-462	-466,22	0,4658	55819	10,7000	-523	-525,711	2,2795	11406	52,3653
30	-453	-458,23	0,4724	55041	10,8520	-525	-529,901	1,7420	14925	40,0187
40	-462	-463,84	0,4485	57966	10,3040	-530	-533,453	1,4360	18106	32,9879
50	-455	-456,04	0,4673	55643	10,7340	-540	-545,902	1,2559	20703	28,8499
60	-461	-462,48	0,3824	67992	8,7846	-554	-560,700	1,3199	19699	30,3203
70	-455	-457,27	0,3519	73881	8,0843	-565	-567,955	1,2597	20640	28,9379
80	-452	-453,89	0,2945	88291	6,7649	-600	-606,000	1,3215	19675	30,3572
90	-450	-454,1	0,2977	87338	6,8387	-620	-621,132	1,3127	19806	30,1565
100	-432	-434,21	0,3292	78970	7,5633	-631	-633,362	1,2040	20967	28,4866
150	-405	-408,44	0,3756	69222	8,6285	-643	-644,431	1,2594	20644	28,9323
200	-460	-463,57	0,4272	60858	9,8143	-650	-651,823	1,3628	19079	31,3056
250	-422	-425,79	0,4948	52547	11,367	-660	-664,511	1,6636	15629	38,2161
300	-398	-400,02	0,4677	55594	10,744	-669	-670,411	2,0237	12848	46,4881
350	-441	-444,81	0,3789	68619	8,7043	-681	-682,932	2,0620	12609	47,3692
400	-503	-509	0,4134	62892	9,4969	-676	-678,821	1,7304	15025	39,7523
450	-525	-526,66	0,4253	61135	9,7698	-701	-704,448	1,4869	17486	34,1575
500	-540	-541,73	0,491	52949	11,28	-699	-700,312	1,4889	17463	34,2025
600	-539	-542,73	0,4667	55713	10,721	-700	-701,444	1,4974	17363	34,3995



**Σχήμα 10.37:** Μ.Ο. Πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης συναρτήσεϊ του χρόνου για σπλισμένα τσιμεντοκονιάματα με επικαλύψεις νανοτεχνολογίας, μερικώς εμβαπτισμένα σε 3,5% κ.β. NaCl για 600 ημέρες

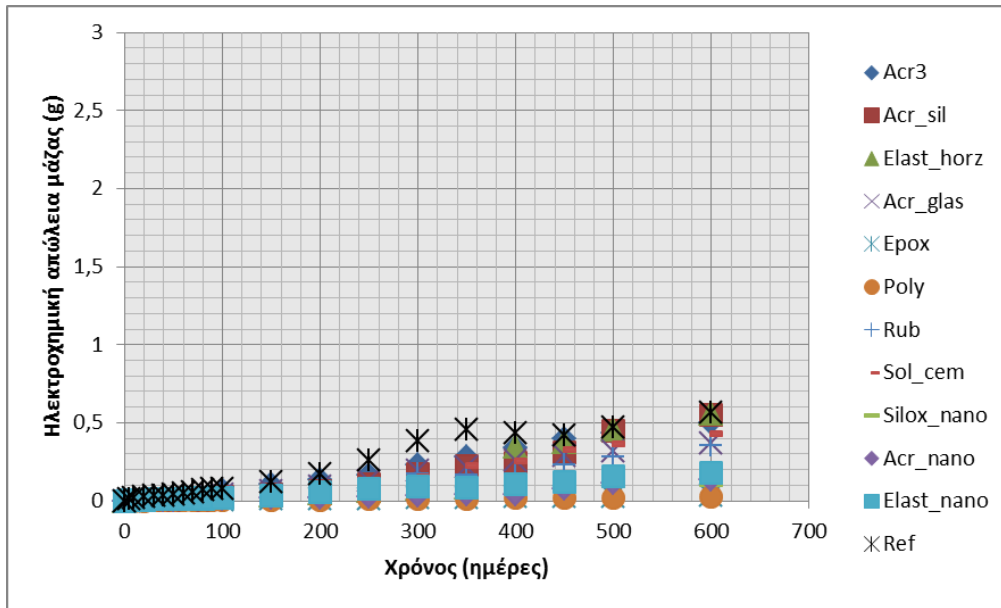
Και οι τρεις επικαλύψεις νανοτεχνολογίας παρουσιάζουν χαμηλούς έως μέτριους ρυθμούς διάβρωσης σε όλη τη διάρκεια του πειράματος με την ελαστομερή επικάλυψη να εμφανίζει ελαφρώς πιο αυξημένες τιμές.

Το συνολικό διάγραμμα όλων των επικαλύψεων από τις μετρήσεις τις γραμμικής πόλωσης παρουσιάζεται στο **Σχήμα 10.38**. Οι βιομηχανικές επικαλύψεις πολυουρεθάνης και εποξειδικού χρώματος επιδεικνύουν τις μικρότερες τιμές πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης αυτό όμως που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι οι επικαλύψεις νανοτεχνολογίας εμφανίζουν χαμηλότερους ρυθμούς διάβρωσης από όλα τα συμβατικά χρώματα καθώς και από τις βιομηχανικές επικαλύψεις χλωριωμένου καουτσούκ και τσιμεντοχρώματος διαλύτη.



**Σχήμα 10.38:** Μ.Ο. Πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης συναρτήσεϊ του χρόνου για δοκίμια σπλισμένου τσιμεντοκονιάματος μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 600 ημέρες

Για τα οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα προσδιορίστηκε και η ηλεκτροχημική απώλεια μάζας με σκοπό την αποσαφήνιση της συμπεριφορά των οργανικών επικαλύψεων αναφορικά με τις ηλεκτροχημικές μετρήσεις προσδιορισμού του ρεύματος διάβρωσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 10.39**.



**Σχήμα 10.39:** Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων με οργανικές επικαλύψεις μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl

Όπως δείχνεται οι βιομηχανικές επικαλύψεις πολυουρεθάνης και εποξειδικού χρώματος παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές. Τα χρώματα με προϊόντα νανοτεχνολογίας ακολουθούν παρουσιάζοντας βελτιωμένη συμπεριφορά συγκριτικά και με τα συμβατικά χρώματα αλλά και σε σχέση με τις βιομηχανικές επικαλύψεις οργανικού διαλύτη και χλωριωμένου καουτσούκ.

### 10.1.2.3 Απώλεια Μάζας Χαλύβων

Μετά το τέλος του πειράματος οι χάλυβες απομακρύνθηκαν από τα δοκίμια, καθαρίστηκαν και ζυγίστηκαν.

Το ποσοστό επί τοις εκατό μεταβολής κατά βάρος των οπλισμών δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta m(\%) = \frac{m_{\alpha\rho\chi} - m_{\tau\epsilon\lambda}}{m_{\alpha\rho\chi}} \cdot 100 \quad [10.7]$$

**όπου:**  $m_{\alpha\rho\chi}$  το αρχικό βάρος του οπλισμού πριν την έκθεσή του στο διαβρωτικό περιβάλλον και  $m_{\tau\epsilon\lambda}$  το τελικό βάρος του οπλισμού μετά την έκθεσή του διαβρωτικό περιβάλλον και τον καθαρισμό του.

Ο ρυθμός διάβρωσης του οπλισμού δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Ρυθμός Διάβρωσης } (\mu\text{m} / \text{year}) = \frac{8.76 \cdot 10^7 \cdot \Delta m}{A \cdot D \cdot T} \quad [10.8]$$

**Όπου:**  $\Delta m = m_{\alpha\rho\chi} - m_{\tau\epsilon\lambda}$  η διαφορά μάζας του οπλισμού [g],  $A$  η επιφάνεια του οπλισμού η οποία δίνεται από τον τύπο  $A = \pi d \left( h + \frac{d}{2} \right)$  [cm<sup>2</sup>],  $D$  η πυκνότητα δομικού χάλυβα ίση με 7,8g/cm<sup>3</sup>,  $T$  ο χρόνος έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον [h].

Τα αποτελέσματα για τις απώλειες μάζας των οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες ανά κατηγορία επικαλύψεων και στο **Σχήμα 10.40** δίνονται οι μέσοι όροι

της ποσοστιαίας απώλειας βάρους των χαλύβδινων οπλισμών. Στο **Σχήμα 10.41** δίνονται οι ρυθμοί διάβρωσης των χαλύβδινων οπλισμών όπως υπολογίστηκαν από τις αντίστοιχες απώλειες μάζας.

**Πίνακας 10.16:** Απώλεια βάρους για δοκίμια με συμβατικές επικαλύψεις μερικών εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 600 ημερών

Κατηγορία 1: Συμβατικές Οργανικές Επικαλύψεις					
Κωδικός Χρώματος	Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια βάρους (g)	Απώλεια βάρους (%)	Ρυθμός διάβρωσης $\mu\text{m}/\text{year}$
Acr1_1	60,8437	60,0950	0,7483	1,2300	265,2940
Acr1_2	59,3606	58,6360	0,7250	1,2214	257,0226
Acr1_3	60,4995	59,7570	0,7425	1,2273	263,2302
Acr1_4	61,4772	60,7250	0,7523	1,2238	266,7093
Acr1_5	60,3422	59,5950	0,7475	1,2387	264,9893
Acr1_6	59,2278	58,5060	0,7220	1,2190	255,9554
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,7396</b>	<b>1,2267</b>	<b>262,2001</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b><math>\pm 0,0129</math></b>	<b><math>\pm 0,0071</math></b>	<b><math>\pm 4,5727</math></b>
Acr2_1	60,1665	59,5580	0,6089	1,0121	215,8751
Acr2_2	60,2189	59,6140	0,6054	1,0053	214,6114
Acr2_3	61,0992	60,4860	0,6129	1,0032	217,2938
Acr2_4	61,0309	60,4250	0,6062	0,9932	214,8873
Acr2_5	59,1760	58,5830	0,5926	1,0014	210,0786
Acr2_6	59,9963	59,4060	0,5904	0,9840	209,2858
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,6027</b>	<b>0,9999</b>	<b>213,6720</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b><math>\pm 0,0091</math></b>	<b><math>\pm 0,0099</math></b>	<b><math>\pm 3,2398</math></b>
Acr3_1	62,2820	61,4530	0,8288	1,3307	293,816
Acr3_2	60,0587	59,2670	0,7922	1,3190	280,8295
Acr3_3	61,2714	60,4630	0,8080	1,3188	286,4524
Acr3_4	60,1487	59,3490	0,7993	1,3289	283,3611
Acr3_5	61,9834	61,1580	0,8256	1,3320	292,6785
Acr3_6	59,1337	58,3380	0,7954	1,3451	281,9747
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,8082</b>	<b>1,3291</b>	<b>286,5187</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b><math>\pm 0,0157</math></b>	<b><math>\pm 0,0097</math></b>	<b><math>\pm 5,553081</math></b>
Acr_sil_1	60,5127	59,8150	0,6978	1,1532	247,3862
Acr_sil_2	60,1144	59,4140	0,7003	1,1649	248,2513
Acr_sil_3	59,6032	58,9060	0,6969	1,1693	247,0699
Acr_sil_4	60,9964	60,2890	0,7071	1,1592	250,6697
Acr_sil_5	59,4494	58,7690	0,6803	1,1444	241,1846
Acr_sil_6	61,5033	60,7900	0,7132	1,1596	252,8264
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,6993</b>	<b>1,1584</b>	<b>247,8980</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b><math>\pm 0,0111</math></b>	<b><math>\pm 0,0088</math></b>	<b><math>\pm 3,9525</math></b>
Acr_glas_1	60,8788	60,3380	0,5407	0,8882	191,6908
Acr_glas_2	61,4765	60,9410	0,5356	0,8712	189,8678
Acr_glas_3	62,0084	61,4660	0,5429	0,8755	192,4558
Acr_glas_4	59,9301	59,3980	0,5318	0,8874	188,5336
Acr_glas_5	61,3024	60,7620	0,5407	0,8821	191,6882
Acr_glas_6	60,5818	60,0520	0,5298	0,8745	187,8222
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,5363</b>	<b>0,8799</b>	<b>190,1249</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b><math>\pm 0,0065</math></b>	<b><math>\pm 0,006</math></b>	<b><math>\pm 1,8944</math></b>
Acr_cem_1	61,1175	60,4820	0,6350	1,0390	225,1155
Acr_cem_2	61,0706	60,4300	0,6406	1,0490	227,1078
Acr_cem_3	60,7036	60,0730	0,6304	1,0384	223,4705
Acr_cem_4	61,0987	60,4630	0,6360	1,0410	225,4795
Acr_cem_5	60,6113	59,9820	0,6291	1,0380	223,0362
Acr_cem_6	61,2649	60,6140	0,6514	1,0632	230,9087
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,6371</b>	<b>1,0448</b>	<b>225,853</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>0,0081</b>	<b>0,0099</b>	<b><math>\pm 2,8784</math></b>
Elast_horz_1	61,1213	60,7830	0,3383	0,5535	119,9251
Elast_horz_2	60,6316	60,2970	0,3346	0,5518	118,6137
Elast_horz_3	60,1440	59,8250	0,3193	0,5309	113,1940
Elast_horz_4	60,8855	60,5550	0,3304	0,5427	117,1290
Elast_horz_5	59,9095	59,5750	0,3342	0,5578	118,4677
Elast_horz_6	60,4588	60,1250	0,3338	0,5522	118,3508
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,3318</b>	<b>0,5481</b>	<b>117,6134</b>

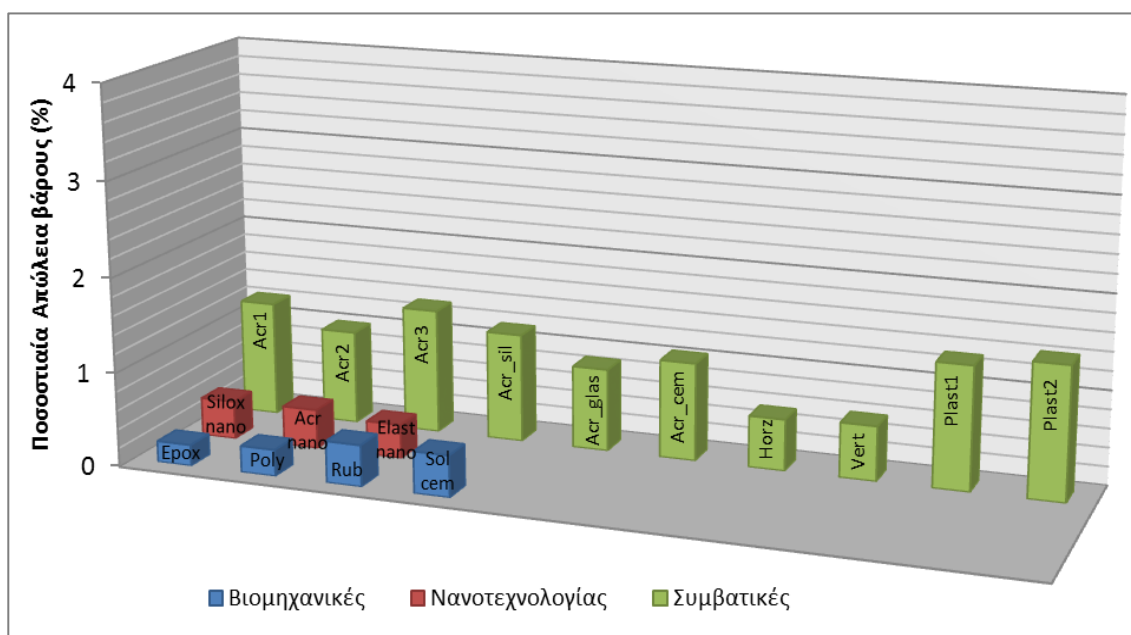
Τυπική Απόκλιση			±0,0066	±0,0098	±2,3402
Elast_vert_1	60,9333	60,58	0,3534	0,5799	125,2657
Elast_vert_2	61,1281	60,768	0,3602	0,5893	127,7032
Elast_vert_3	59,5236	59,184	0,34	0,5712	120,5318
Elast_vert_4	61,4821	61,126	0,3562	0,5793	126,2631
Elast_vert_5	59,2340	58,88	0,3539	0,5974	125,4471
Elast_vert_6	60,2953	59,945	0,3499	0,5804	124,0573
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,3523</b>	<b>0,5829</b>	<b>124,878</b>
Τυπική Απόκλιση			±0,0069	±0,0091	±2,44692
Plast1_1	61,2449	60,4450	0,8002	1,3065	283,6636
Plast1_2	61,5464	60,7320	0,8143	1,3231	288,6820
Plast1_3	61,7923	60,9660	0,8263	1,3372	292,9241
Plast1_4	62,4285	61,6040	0,8246	1,3209	292,3261
Plast1_5	61,5337	60,7230	0,8106	1,3173	287,3631
Plast1_6	60,2185	59,4300	0,7886	1,3096	279,5707
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,8108</b>	<b>1,3191</b>	<b>287,4216</b>
Τυπική Απόκλιση			±0,0145	±0,0109	±5,1319
Plast2_1	62,1406	61,6330	0,5074	0,8166	179,8909
Plast2_2	61,1222	60,6250	0,4967	0,8126	176,0868
Plast2_3	60,9047	60,4120	0,4928	0,8091	174,6959
Plast2_4	61,4111	60,9220	0,4890	0,7963	173,3596
Plast2_5	61,2754	60,7860	0,4891	0,7981	173,3719
Plast2_6	60,7780	60,2930	0,4847	0,7974	171,8195
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,4933</b>	<b>0,805</b>	<b>174,8708</b>
Τυπική Απόκλιση			±0,008	±0,0088	±2,8478

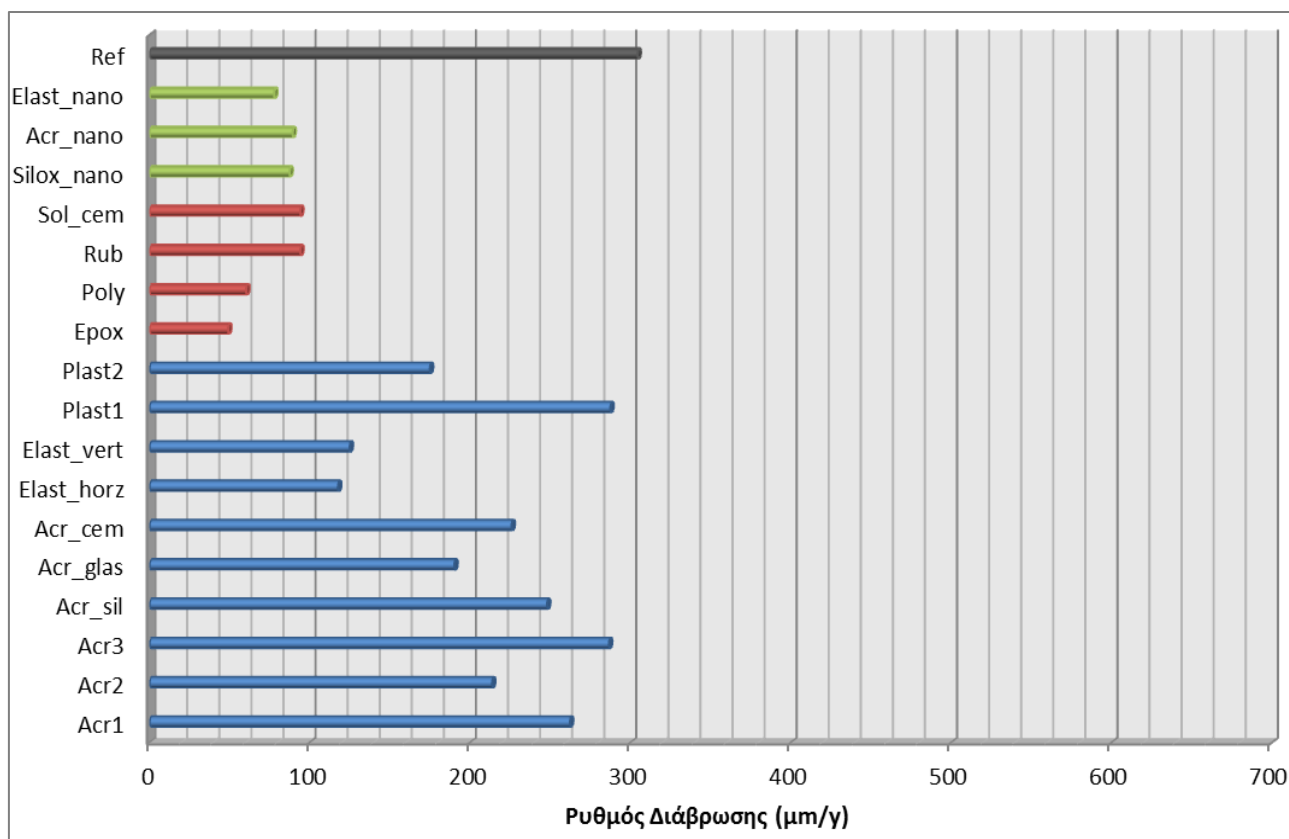
Πίνακας 10.17: Απώλεια βάρους για δοκίμια με βιομηχανικές επικαλύψεις μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 600 ημερών

Κατηγορία 2: Βιομηχανικές Επικαλύψεις					
Κωδικός Χρώματος	Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια βάρους (g)	Απώλεια βάρους (%)	Ρυθμός διάβρωσης μμ/year
Erox_1	63,8424	63,7050	0,1377	0,2157	48,8140
Erox_2	61,8232	61,6850	0,1381	0,2234	48,9619
Erox_3	60,1114	59,9750	0,1361	0,2264	48,2455
Erox_4	61,7438	61,6130	0,1305	0,2114	46,2724
Erox_5	62,1480	62,0000	0,1482	0,2384	52,5239
Erox_6	63,6244	63,4850	0,1398	0,2197	49,5515
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,1384</b>	<b>0,2225</b>	<b>49,0616</b>
Τυπική Απόκλιση			±0,0057	±0,0094	±2,0368
Poly_1	61,7057	61,5400	0,1653	0,2678	58,5880
Poly_2	60,7425	60,5720	0,1709	0,2813	60,5676
Poly_3	61,4036	61,2350	0,1686	0,2746	59,7698
Poly_4	60,5563	60,3850	0,1711	0,2825	60,6560
Poly_5	60,4542	60,2790	0,1756	0,2904	62,2432
Poly_6	61,7183	61,5490	0,1696	0,2747	60,1069
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,1702</b>	<b>0,2786</b>	<b>60,3219</b>
Τυπική Απόκλιση			±0,0034	±0,0079	±1,2017
Rub_1	62,0072	61,7450	0,2626	0,4235	93,0936
Rub_2	61,1836	60,9090	0,2748	0,4492	97,4314
Rub_3	60,3730	60,1100	0,2627	0,4351	93,1228
Rub_4	59,6624	59,4000	0,2629	0,4406	93,1900
Rub_5	60,6964	60,4360	0,2607	0,4295	92,4166
Rub_6	60,3910	60,1220	0,2689	0,4452	95,3177
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,2654</b>	<b>0,4372</b>	<b>94,0953</b>
Τυπική Απόκλιση			±0,0054	±0,0097	±1,9084
Sol_cem_1	60,9960	60,7280	0,2684	0,4400	95,1433
Sol_cem_2	60,4300	60,1640	0,2655	0,4394	94,1319
Sol_cem_3	61,4220	61,1610	0,2614	0,4255	92,6505
Sol_cem_4	60,6955	60,4260	0,2690	0,4432	95,3631
Sol_cem_5	59,4455	59,1790	0,2669	0,4490	94,6214
Sol_cem_6	59,4399	59,1800	0,2597	0,4368	92,0502
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,2651</b>	<b>0,4390</b>	<b>93,9934</b>
Τυπική Απόκλιση			±0,0038	±0,0078	±1,3558

**Πίνακας 10.18:** Απώλεια βάρους για δοκίμια με επικαλύψεις нанοτεχνολογίας μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 600 ημερών

Κατηγορία 3: Οργανικές Επικαλύψεις Νανοτεχνολογίας					
Κωδικός Χρώματος	Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια βάρους (g)	Απώλεια βάρους (%)	Ρυθμός διάβρωσης $\mu\text{m}/\text{year}$
Silox_nano_1	60,7563	60,5190	0,2374	0,3908	84,1676
Silox_nano_2	59,2526	59,0140	0,2390	0,4033	84,7096
Silox_nano_3	60,9797	60,7280	0,2515	0,4125	89,1727
Silox_nano_4	60,8342	60,5880	0,2467	0,4055	87,4401
Silox_nano_5	60,1837	59,9350	0,2491	0,4139	88,3070
Silox_nano_6	61,8222	61,5670	0,2555	0,4133	90,5853
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,2465</b>	<b>0,4065</b>	<b>87,3972</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b><math>\pm 0,0071</math></b>	<b><math>\pm 0,0089</math></b>	<b><math>\pm 2,5219</math></b>
Acr_nano_1	60,7474	60,4920	0,2558	0,4212	90,6985
Acr_nano_2	60,0133	59,7630	0,2502	0,4169	88,6923
Acr_nano_3	60,2443	59,9980	0,2465	0,4091	87,3757
Acr_nano_4	59,8323	59,5750	0,2569	0,4294	91,0861
Acr_nano_5	61,5322	61,2840	0,2482	0,4033	87,9741
Acr_nano_6	60,9406	60,6870	0,2534	0,4157	89,8172
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,2518</b>	<b>0,4159</b>	<b>89,2740</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b><math>\pm 0,0042</math></b>	<b><math>\pm 0,0091</math></b>	<b><math>\pm 1,4993</math></b>
Elast_nano_1	62,1103	61,8930	0,2168	0,3491	76,8666
Elast_nano_2	60,6444	60,4250	0,2195	0,3620	77,8258
Elast_nano_3	60,2038	59,9900	0,2143	0,3559	75,9584
Elast_nano_4	60,966	60,7420	0,2245	0,3682	79,5785
Elast_nano_5	60,7902	60,5710	0,2195	0,3611	77,8189
Elast_nano_6	61,4399	61,2180	0,2218	0,3610	78,6374
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,2194</b>	<b>0,3596</b>	<b>77,7809</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b><math>\pm 0,0036</math></b>	<b><math>\pm 0,0064</math></b>	<b><math>\pm 1,2748</math></b>
<b>Δοκίμια Αναφοράς</b>					
Ref_1	58,8321	57,9890	0,8431	1,4331	332,8954
Ref_2	59,0945	58,2608	0,8337	1,4108	336,9591
Ref_3	61,9954	61,1157	0,8797	1,4189	355,8027
Ref_4	60,4599	59,5969	0,863	1,4275	342,6661
Ref_5	60,4777	59,6249	0,8528	1,4102	343,3651
Ref_6	61,8400	60,9608	0,8792	1,4218	350,4771
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,8586</b>	<b>1,4204</b>	<b>304,3801</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b><math>\pm 0,0189</math></b>	<b><math>\pm 0,0091</math></b>	<b><math>\pm 6,6912</math></b>


**Σχήμα 10.40:** Μέσοι όροι ποσοστιαίας απώλειας βάρους (%) χαλύβων οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων με οργανικές επικαλύψεις μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5 % κ.β. NaCl για 600 ημέρες



**Σχήμα 10.41:** Ρυθμός διάβρωσης χαλύβων σπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων με οργανικές επικαλύψεις μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5 % κ.β. NaCl για 600 ημέρες

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανής η υπεροχή των βιομηχανικών χρωμάτων αλλά και των χρωμάτων με προϊόντα νανοτεχνολογίας αναφορικά με το πείραμα διάβρωσης μακράς διάρκειας. Για τις συμβατικές επικαλύψεις πρέπει να τονιστεί ότι τα ελαστομερή χρώματα παρουσιάζουν βελτιωμένη συμπεριφορά συγκριτικά με τα ακρυλικά χρώματα.

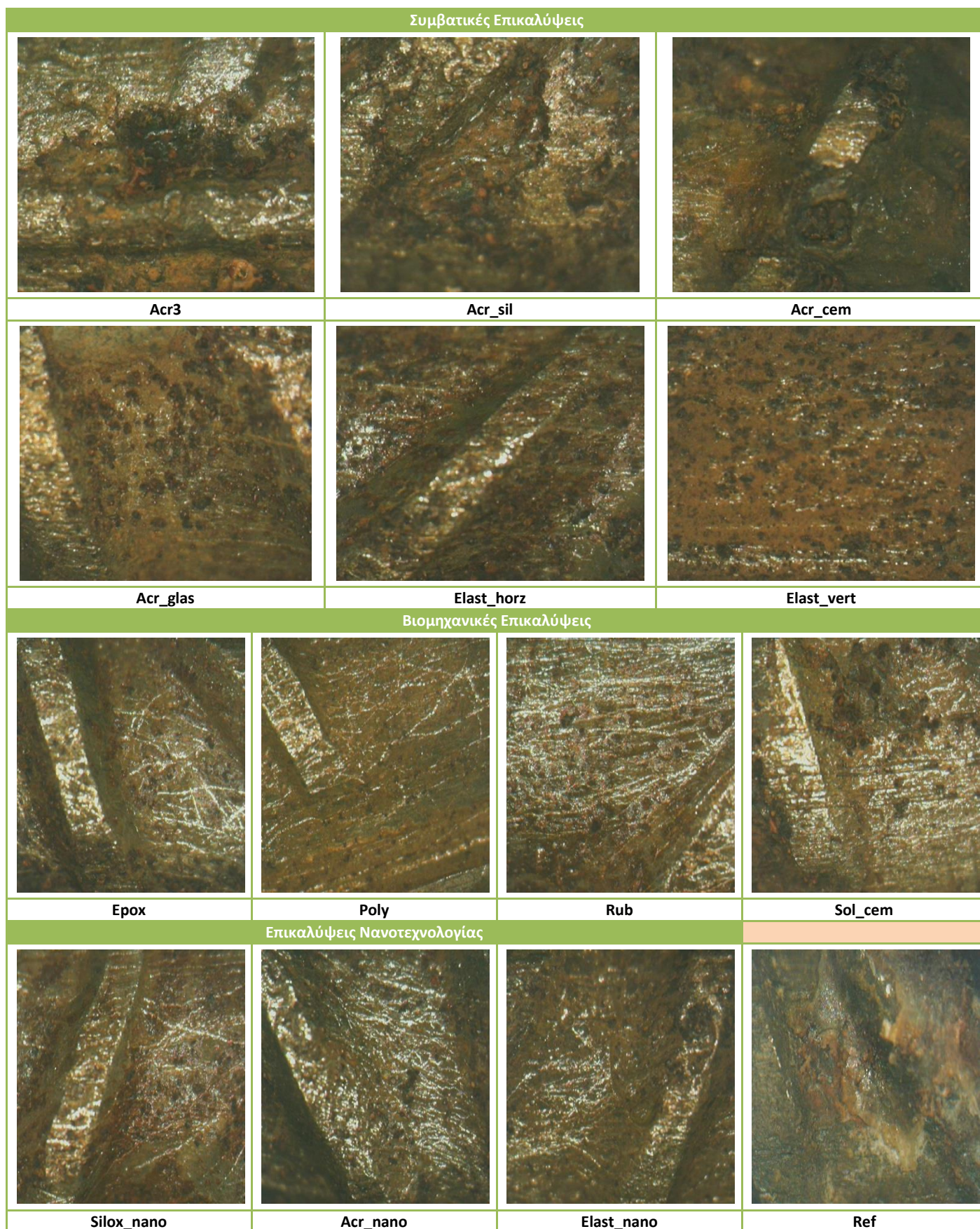
#### 10.1.2.4 Οπτική Παρατήρηση με Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών (FOM)

Στο **Σχήμα 10.42** εμφανίζονται φωτογραφίες χαλύβδινων σπλισμών από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο οπτικών ινών μετά τον απεγκλιβτισμό τους από δοκίμια τσιμεντοκονιάματος τα οποία παρέμειναν μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5 κ.β. % NaCl για διάστημα 600 ημερών.

Αρχικά παρουσιάζονται οι εικόνες για τους χάλυβες των δοκιμών που ήταν επικαλυμμένα με συμβατικές επικαλύψεις και όπως φαίνεται όλα τα δοκίμια παρουσιάζουν έντονη διάβρωση με βελονισμούς όπου τα σχηματιζόμενα οξειδία είναι πορώδους δομής και εύκολα αποσπώμενα από τη μεταλλική επιφάνεια. Η διάβρωση είναι εκτεταμένη για όλες τις επικαλύψεις με αλλοίωση της χαλύβδινης επιφάνειας σε όλα τα ακρυλικά επιχρίσματα. Ελαφρά βελτιωμένη είναι η επιφάνεια των χαλύβων των ελαστομερικών επιχρισμάτων.

Η μικροσκοπική εξέταση των χαλύβων των τσιμεντοκονιαμάτων που ήταν επικαλυμμένα με τα βιομηχανικά χρώματα και τα χρώματα νανοτεχνολογίας έδειξε σαφώς μικρότερο βαθμό διάβρωσης και μικρότερο πάχος οξειδίων. Η επικρατούσα μορφή διάβρωσης είναι και σε αυτήν την περίπτωση οι βελονισμοί οι οποίοι εντοπίζονται στην περιοχή των νευρώσεων.





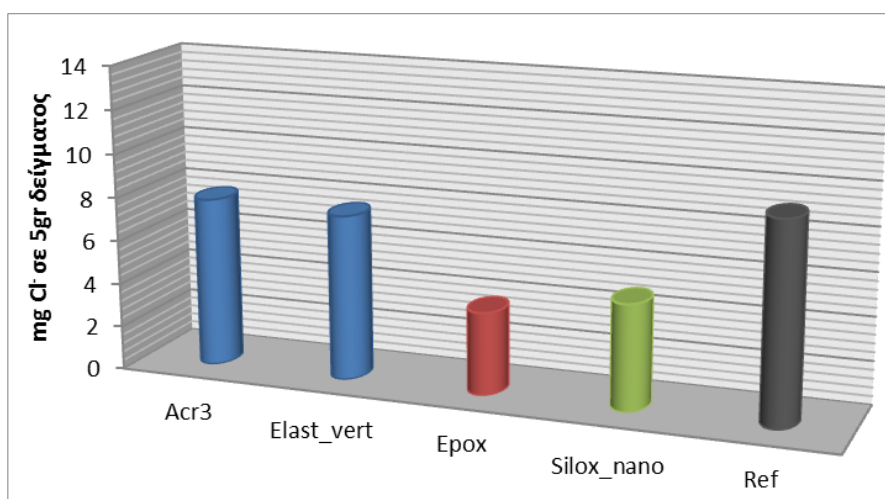
**Σχήμα 10.42:** Μακροσκοπική εξέταση των προϊόντων διάβρωσης δομικών χαλύβων με μικροσκόπιο οπτικών ινών. Περιβάλλον διάβρωσης: μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5 % κ.β. NaCl για διάστημα 600 ημερών σπλισμένων δοκιμών τιμεντοκονιάματος με οργανικές επικαλύψεις. Για όλες τις φωτογραφίες η μεγέθυνση είναι x50.

### 10.1.2.5 Μέτρηση Χλωριόντων με Μέθοδο Mohr

Μετά τον απεγκλιβτισμό των χαλύβων μετρήθηκε η περιεκτικότητα των τσιμεντοκονιαμάτων σε ιόντα χλωρίου με τη λήψη δείγματος από περιοχή κοντά στον σπλισμό. Η τιτλοδότηση πραγματοποιήθηκε κατά Mohr και τα αποτελέσματα δίνονται στον παρακάτω πίνακα. Ακολουθεί διάγραμμα με τους μέσους όρους των τιμών. Για κάθε ομάδα επικαλύψεων πρέπει να σημειωθεί ότι επιλέχθηκε ένα αντιπροσωπευτικό χρώμα.

**Πίνακας 10.19:** : Αποτελέσματα μεθόδου Mohr για την αποτίμηση των υδατοδιαλυτών χλωριόντων σε σπλισμένα τσιμεντοκονιάματα επικαλυμμένα με οργανικές επικαλύψεις μετά από μερική εμβάπτιση σε 3,5% κ.β NaCl

	ml AgNO <sub>3</sub> που απαιτούνται για την αλλαγή χρώματος	mg Cl <sup>-</sup> που καταβυθίστηκαν	mg Cl <sup>-</sup> στα 5gr δείγματος
Acr3_1	0,87	0,3084	7,7104
Acr3_2	0,89	0,3155	7,8876
Acr3_3	0,87	0,3084	7,7104
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>0,8767</b>	<b>0,3108</b>	<b>7,7695</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	<b>±0,0115</b>	<b>±0,0041</b>	<b>±0,1023</b>
Elast_vert_1	0,85	0,3013	7,5331
Elast_vert_2	0,86	0,3049	7,6218
Elast_vert_3	0,85	0,3013	7,5331
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>0,8533</b>	<b>0,3025</b>	<b>7,5627</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	<b>±0,0058</b>	<b>±0,002</b>	<b>±0,0512</b>
Erox_1	0,43	0,1524	3,8109
Erox_2	0,42	0,1489	3,7223
Erox_3	0,43	0,1524	3,8109
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>0,4267</b>	<b>0,1513</b>	<b>3,7813</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	<b>±0,0058</b>	<b>±0,002</b>	<b>±0,0512</b>
Silox_nano_1	0,55	0,195	4,8744
Silox_nano_2	0,54	0,1914	4,7858
Silox_nano_3	0,55	0,195	4,8744
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>0,5467</b>	<b>0,1938</b>	<b>4,8448</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	<b>±0,0058</b>	<b>±0,002</b>	<b>±0,0512</b>
Ref_1	1,00	0,3545	8,8625
Ref_2	1,10	0,39	9,7488
Ref_3	1,00	0,3545	8,8625
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>±1,0333</b>	<b>0,3663</b>	<b>9,1579</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	<b>0,0577</b>	<b>±0,0205</b>	<b>±0,5117</b>



**Σχήμα 10.43:** Τιτλοδότηση κατά Mohr σε επικαλυμμένα δοκίμια σπλισμένου τσιμεντοκονιάματος μετά από μερική εμβάπτιση για διάστημα 600 ημερών σε υδατικό διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl

Τα δοκίμια που ήταν επικαλυμμένα με συμβατικά χρώματα παρουσιάζουν σχεδόν διπλάσια συγκέντρωση χλωριόντων από τα δοκίμια που είχαν επικάλυψη εποξειδικών ρητινών. Τα νανοχρώματα εμφανίζουν βελτιωμένη συμπεριφορά συγκριτικά με τα δοκίμια συμβατικών επικαλύψεων και συναγωνίζονται τις βιομηχανικές επικαλύψεις.

## **10.2 Επιταχυνόμενη Διάβρωση**

Δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος εκτέθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης σε ατμόσφαιρα 5% κ.β. NaCl και θερμοκρασία 35±1,1-1,7°C για χρονικό διάστημα 6 εβδομάδων. Ο θάλαμος λειτουργούσε συνεχόμενα υπό σταθερές συνθήκες και ανά τακτά χρονικά διαστήματα τα δοκίμια απομακρύνονταν από το θάλαμο, σκουπίζονταν με προσοχή και τοποθετούνταν σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 30 λεπτά ώστε να επέλθει ισορροπία. Στη συνέχεια λαμβάνονταν ηλεκτροχημικές μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης και αντίστασης πόλωσης.

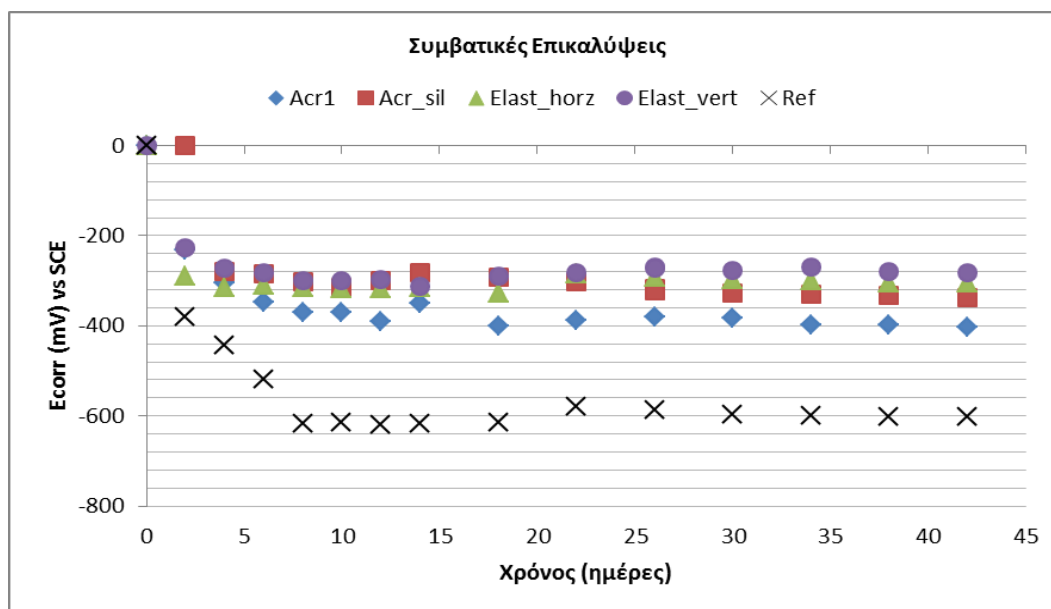
### **10.2.1 Χρονική Εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης των Χαλύβων**

Η τιμή του δυναμικού διάβρωσης μετρήθηκε ως προς ηλεκτρόδιο κεκορεσμένου καλομέλανα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, όπου αναφέρονται οι μέσοι όροι 6 δοκιμίων για κάθε επικάλυψη. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα δυναμικού διάβρωσης-χρόνου για όλες τις επικαλύψεις συνολικά αλλά και για κάθε κατηγορία επικαλύψεων με σκοπό την ασφαλέστερη διεξαγωγή συγκρίσεων στην επίδοση των οργανικών επικαλύψεων.



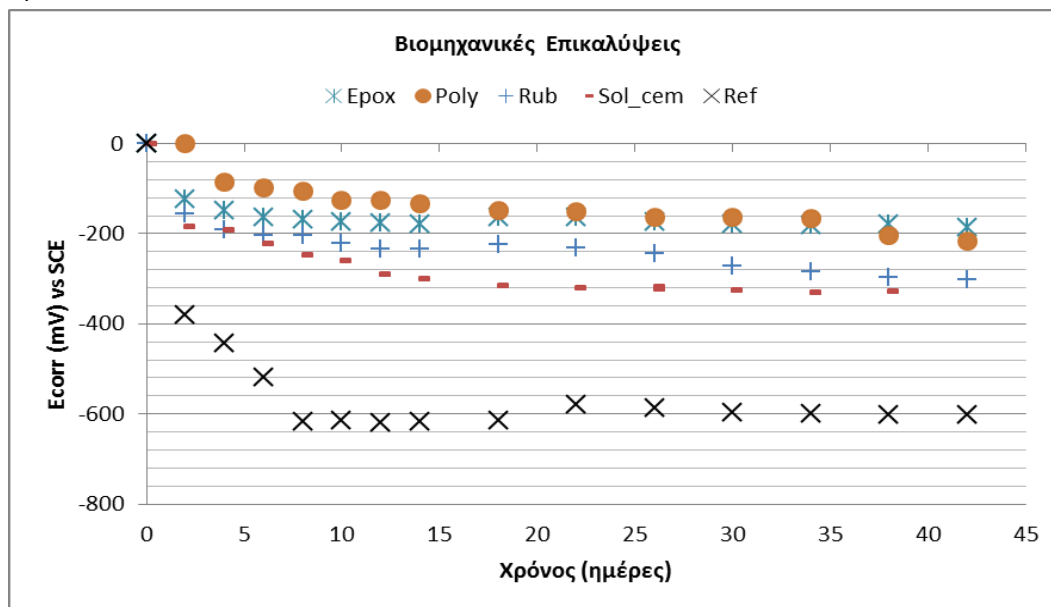
Πίνακας 10.20: Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης για όλες τις επικαλύψεις μετά από έκθεση σε επιταχυνόμενες συνθήκες διάβρωσης για διάστημα 6 εβδομάδων

Χρόνος (ημέρες)	E <sub>corr</sub> (mV) vs SCE											
	Συμβατικές Επικαλύψεις				Βιομηχανικές Επικαλύψεις				Επικαλύψεις Νανοτεχνολογίας			Ref
	Acr1	Acr_Sil	Elast_horz	Elast_vert	Erox	Poly	Rub	Sol_Cem	Silox_nano	Acr_nano	Elast_nano	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-0,233	-0,279	-0,289	-0,227	-0,122	-0,085	-0,156	-0,185	-0,184	-0,278	-0,306	-0,380
4	-0,304	-0,284	-0,314	-0,273	-0,15	-0,099	-0,191	-0,192	-0,198	-0,275	-0,330	-0,443
6	-0,349	-0,302	-0,309	-0,281	-0,163	-0,106	-0,204	-0,222	-0,213	-0,291	-0,328	-0,519
8	-0,370	-0,315	-0,315	-0,301	-0,169	-0,126	-0,203	-0,248	-0,249	-0,295	-0,343	-0,618
10	-0,371	-0,301	-0,316	-0,300	-0,174	-0,126	-0,223	-0,259	-0,270	-0,285	-0,306	-0,616
12	-0,389	-0,283	-0,317	-0,298	-0,176	-0,135	-0,234	-0,289	-0,299	-0,283	-0,288	-0,620
14	-0,350	-0,293	-0,315	-0,312	-0,179	-0,149	-0,235	-0,301	-0,298	-0,308	-0,276	-0,618
18	-0,401	-0,303	-0,326	-0,289	-0,164	-0,150	-0,224	-0,315	-0,32	-0,329	-0,277	-0,613
22	-0,389	-0,318	-0,286	-0,283	-0,164	-0,163	-0,232	-0,321	-0,308	-0,322	-0,302	-0,580
26	-0,381	-0,327	-0,291	-0,273	-0,174	-0,165	-0,244	-0,322	-0,314	-0,333	-0,298	-0,586
30	-0,384	-0,331	-0,297	-0,278	-0,178	-0,166	-0,272	-0,326	-0,318	-0,331	-0,291	-0,598
34	-0,397	-0,333	-0,301	-0,269	-0,181	-0,204	-0,284	-0,330	-0,313	-0,325	-0,26	-0,600
38	-0,399	-0,338	-0,305	-0,279	-0,18	-0,217	-0,296	-0,328	-0,308	-0,323	-0,267	-0,601
42	-0,402	-0,335	-0,304	-0,283	-0,186	-0,241	-0,302	-0,325	-0,309	-0,32	-0,278	-0,601
34	-0,397	-0,333	-0,301	-0,269	-0,181	-0,204	-0,284	-0,330	-0,313	-0,325	-0,26	-0,600
38	-0,399	-0,338	-0,305	-0,279	-0,18	-0,217	-0,296	-0,328	-0,308	-0,323	-0,267	-0,601
42	-0,402	-0,335	-0,304	-0,283	-0,186	-0,241	-0,302	-0,325	-0,309	-0,32	-0,278	-0,601



Σχήμα 10.44: Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης για οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα με συμβατικές επικαλύψεις που υποβλήθηκαν σε επιταχυνόμενη διάβρωση για διάστημα 6 εβδομάδων

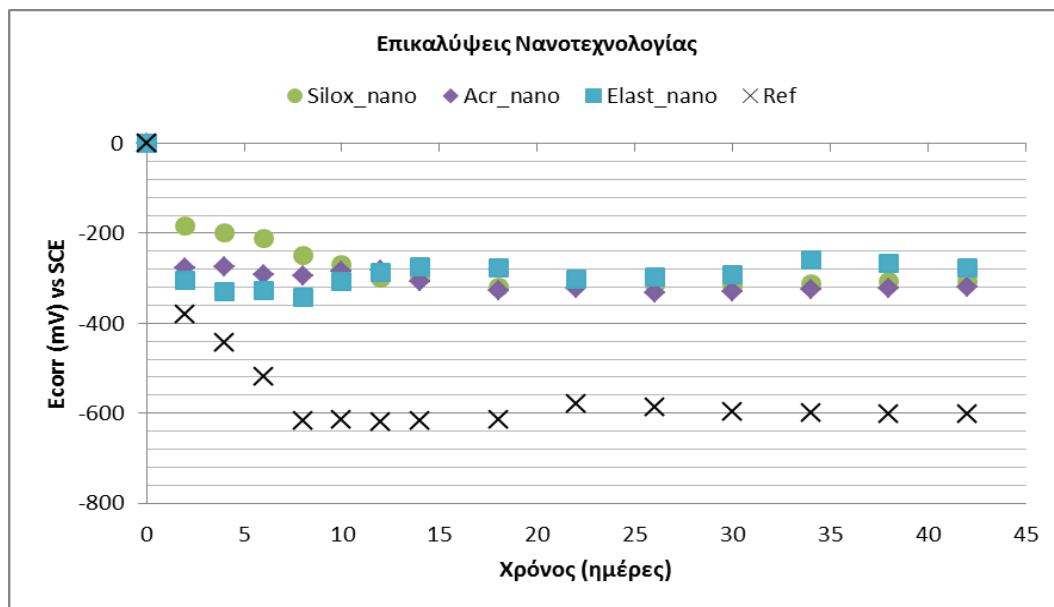
Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87 όλες οι συμβατικές οργανικές επικαλύψεις βρίσκονται σε κατάσταση υψηλής πιθανότητας διάβρωσης από την αρχή της περιόδου έκθεσης στο θάλαμο αλατονέφωσης. Τα δυναμικά διάβρωσης κυμαίνονται από -276mV έως -126mV.



Σχήμα 10.45: Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης για οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα με βιομηχανικές επικαλύψεις που υποβλήθηκαν σε επιταχυνόμενη διάβρωση για διάστημα 6 εβδομάδων

Τόσο η εποξειδική επικάλυψη όσο και η επικάλυψη χλωριωμένου καουτσούκ παρουσιάζουν ασαφή κατάσταση οπλισμού σε όλη τη διάρκεια της περιόδου έκθεσης. Το χρώμα πολυουρεθάνης μετά τις πρώτες 10 ημέρες που βρίσκεται σε παθητική κατάσταση επιδεικνύει και αυτό ασαφή κατάσταση των οπλισμών. Αντίθετα, το τσιμεντόχρωμα διαλύτη παρουσιάζει υψηλή πιθανότητα διάβρωσης για όλη τη διάρκεια του πειράματος.

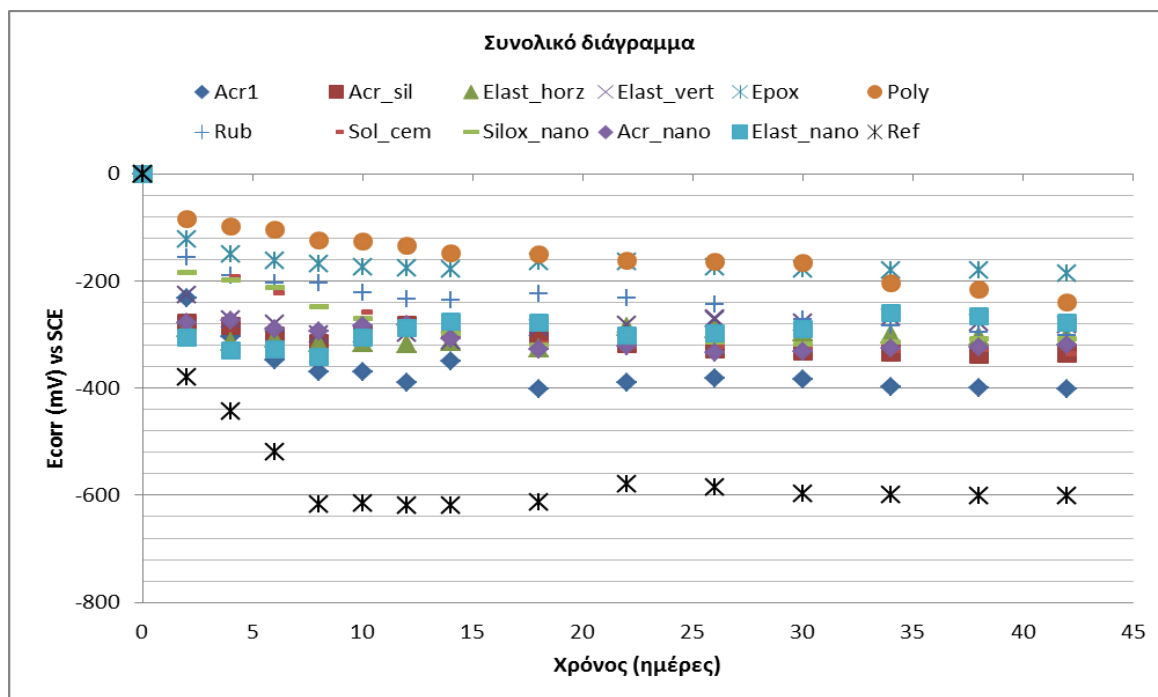
## Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης



**Σχήμα 10.46:** Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης για οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα με βιομηχανικές επικαλύψεις που υποβλήθηκαν σε επιταχυνόμενη διάβρωση για διάστημα 6 εβδομάδων

Η ακρυλική και η ελαστομερής επικάλυψη νανοτεχνολογίας παρουσιάζουν υψηλή πιθανότητα διάβρωσης των οπλισμών από την αρχή ενώ το σιλοξανικό χρώμα για τις πρώτες 10 μέρες διατηρείται σε ασαφή κατάσταση.

Η συνολική εικόνα όλων των επικαλύψεων που εξετάστηκαν φαίνεται στο **Σχήμα 10.47** όπου τα βιομηχανικά χρώματα πολυουρεθάνης και εποξειδικού υπερτερούν σε σχέση με τις συμβατικές και επικαλύψεις νανοτεχνολογίας. Οι τελευταίες όμως δείχνουν ελαφρά πιο ηλεκτροθετικά δυναμικά συγκριτικά με τις παραδοσιακές επικαλύψεις.



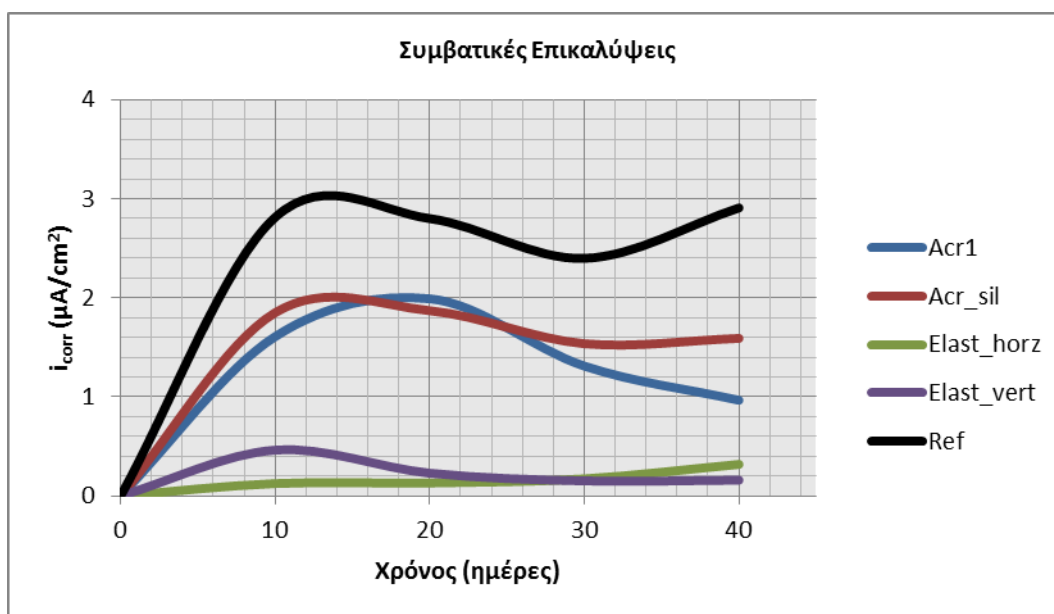
**Σχήμα 10.47:** Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης συναρτήσεως του χρόνου για δοκίμια εκτεθειμένα σε επιταχυνόμενη διάβρωση για διάστημα 6 εβδομάδων

### 10.2.2 Προσδιορισμός Πυκνότητας Ρεύματος Διάβρωσης

Τα δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος που εκτέθηκαν σε συνθήκες επιταχυνόμενης διάβρωσης εξετάστηκαν με τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης ανά τακτά χρονικά διαστήματα για την αποτίμηση βασικών ηλεκτροχημικών παραμέτρων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν όπου φαίνονται και οι γραφικές παραστάσεις πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης-χρόνου για όλες τις επικαλύψεις. Οι τιμές αναφέρονται στους μέσους όρους 6 δοκιμίων από κάθε σειρά επικαλύψεων.

**Πίνακας 10.21:** Ηλεκτροχημικές παράμετροι για οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα με συμβατικές επικαλύψεις που εκτέθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης για διάστημα 6 εβδομάδων

Χρόνος (ημέρες)	Acr1					Acr_Sil				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	-0,370	-387,304	1,6088	16161	36,958	-0,298	-299,572	1,8507	14049	42,514
20	-0,350	-350,571	1,9908	13060	45,733	-0,294	-294,516	1,8703	13901	42,965
30	-0,342	-340,923	1,3105	19840	30,105	-0,320	-321,44	1,5368	16918	35,304
40	-0,368	-369,051	0,9658	26922	22,186	-0,374	-374,388	1,5909	16343	36,546
Χρόνος (ημέρες)	Elast_horz					Elast_vert				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	-0,29	-249,742	0,1248	208342	2,8668	-0,305	-308,594	0,4619	56288	10,611
20	-0,300	-300,388	0,1304	199452	2,9946	-0,314	-314,883	0,2289	113603	5,2576
30	-0,308	-307,389	0,1721	151110	3,9526	-0,284	-285,593	0,1509	172273	3,4671
40	-0,327	-338,482	0,318	81771	7,3042	-0,264	-267,443	0,1584	164171	3,6382



**Σχήμα 10.48:** Πυκνότητα ρεύματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικές επικαλύψεις, εκτεθειμένα σε συνθήκες επιταχυνόμενης διάβρωσης

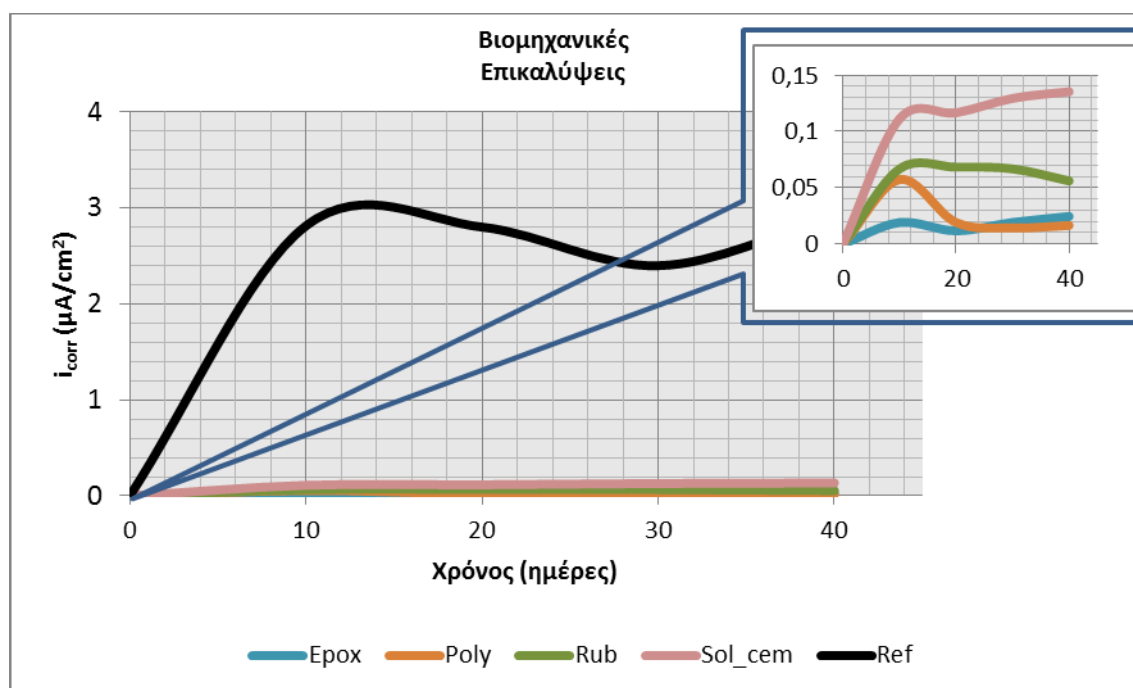
Οι ελαστομερές επικαλύψεις παρουσιάζουν χαμηλό έως μέτριο ρυθμό διάβρωσης σε όλη τη διάρκεια της περιόδου έκθεσης ενώ τα ακρυλικά χρώματα εμφανίζουν υψηλό ρυθμό διάβρωσης από την αρχή της περιόδου έκθεσης.



## Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης

**Πίνακας 10.22:** Ηλεκτροχημικές παράμετροι για οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα με βιομηχανικές επικαλύψεις που εκτέθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης για διάστημα 6 εβδομάδων

Χρόνος (ημέρες)	Erox					Poly				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	-0,168	-171,089	0,0191	1359262	0,4394	-0,128	-129,643	0,0573	453405	1,3173
20	-0,178	-171,685	0,0118	2211066	0,2701	-0,150	-150,543	0,0192	1355130	0,4408
30	-0,164	-167,984	0,0192	1355249	0,4407	-0,167	-164,876	0,0143	1817826	0,3286
40	-0,167	-169,032	0,0245	1059873	0,5635	-0,189	-189,732	0,0166	1570900	0,3802
Χρόνος (ημέρες)	Rub					Sol_cem				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	-0,230	-232,21	0,0668	389296	1,5343	-0,251	-253,599	0,1113	233597	2,5569
20	-0,238	-239,831	0,0683	380451,9	1,5699	-0,300	-301,447	0,1166	223008	2,6783
30	-0,230	-234,428	0,0668	389056	1,5352	-0,315	-315,338	0,1295	200810	2,9743
40	-0,264	-265,932	0,0561	463268,6	1,2893	-0,330	-332,338	0,1354	192068	3,1097



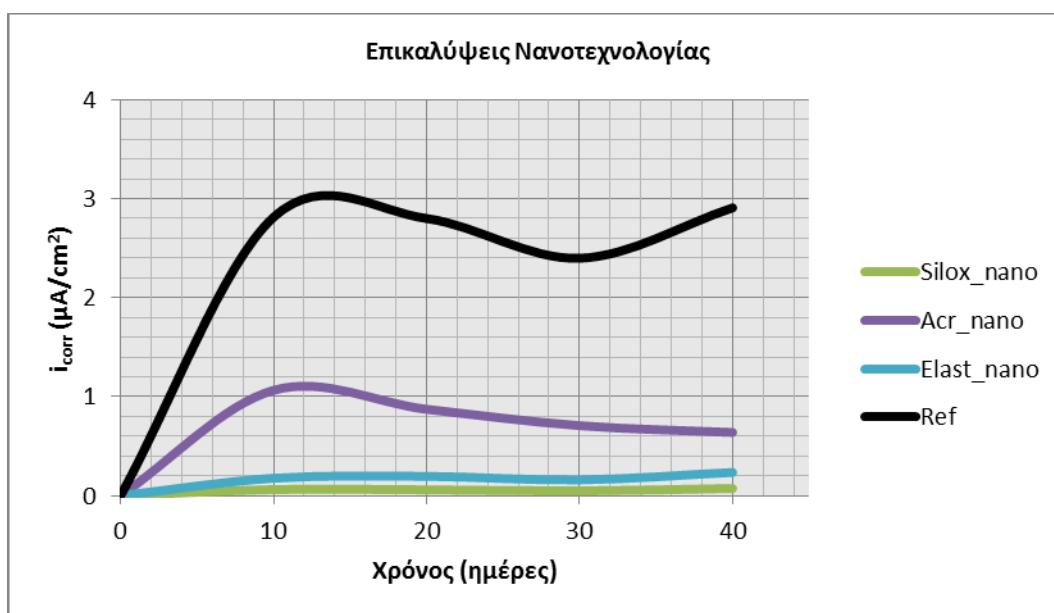
**Σχήμα 10.49:** Πυκνότητα ρεύματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικές επικαλύψεις, εκτεθειμένα σε συνθήκες επιταχυνόμενης διάβρωσης

Όσον αφορά τις βιομηχανικές επικαλύψεις, το εποξειδικό χρώμα, το χρώμα πολουρεθάνης και η επικάλυψη χλωριωμένου καουτσούκ εμφάνισαν παθητικοποίηση για όλο το διάστημα έκθεσης στο θάλαμο αλατονέφωσης. Το τσιμεντόχρωμα διαλύτη επέδειξε χαμηλούς έως μέτριους ρυθμούς διάβρωσης.

## Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης

**Πίνακας 10.23:** Ηλεκτροχημικές παράμετροι για οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα με επικαλύψεις νανοτεχνολογίας που εκτέθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης για διάστημα 6 εβδομάδων

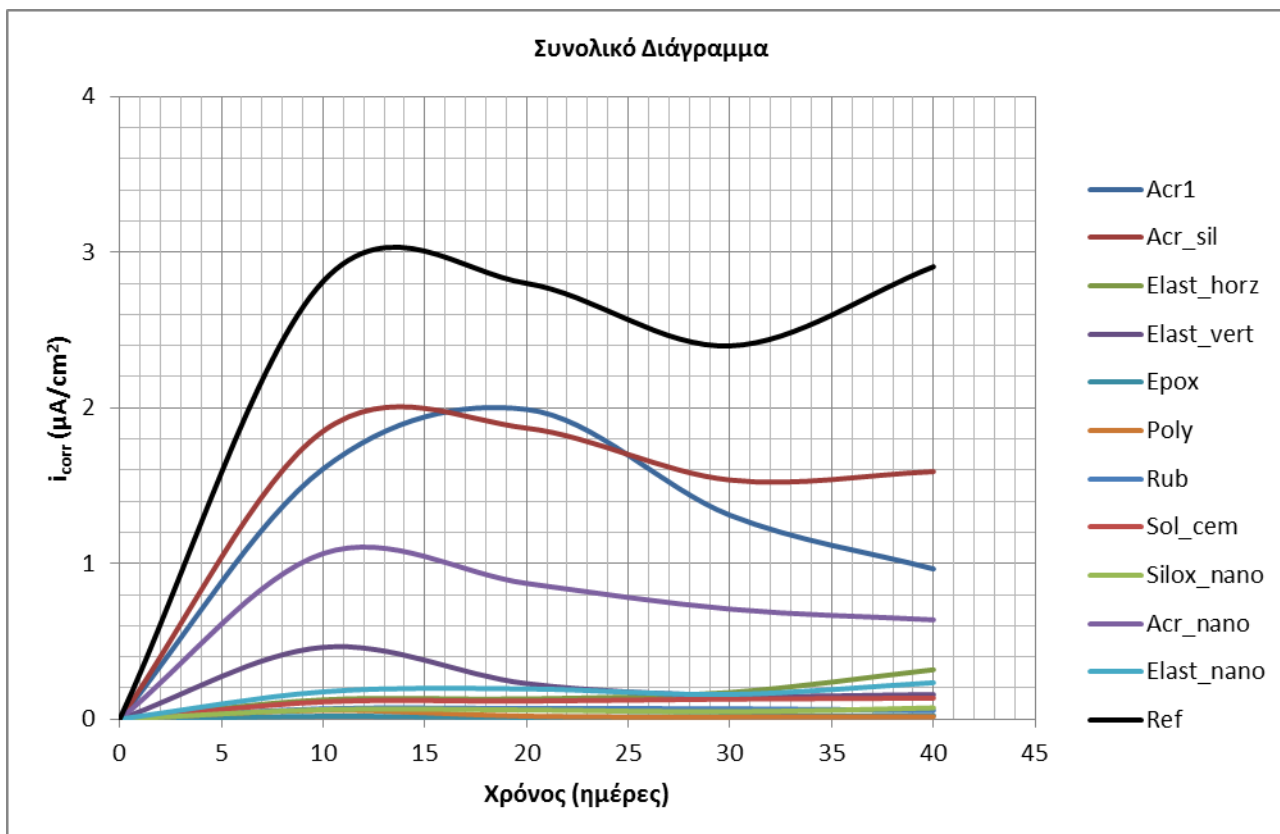
Χρόνος (ημέρες)	Silox_nano					Acr_nano				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	-0,318	-318,471	0,0613	424358	1,4075	-0,295	-290,948	1,0646	24422	24,456
20	-0,321	-321,633	0,0591	439885	1,3578	-0,308	-308,517	0,8727	29791	20,049
30	-0,281	-284,531	0,0478	543535	1,0989	-0,314	-316,351	0,7074	36752	16,252
40	-0,312	-315,994	0,0726	358333	1,6668	-0,354	-361,843	0,6384	40725	14,666
Χρόνος (ημέρες)	Elast_nano					Ref				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	CR ( $\mu m/y$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	-0,349	-349,760	0,1762	147560	4,0477	-0,619	-620,761	2,8134	9241	64,631
20	-0,277	-278,306	0,1946	133598	4,4707	-0,620	-621,960	2,8002	9284	64,328
30	-0,299	-299,061	0,1591	163424	3,6548	-0,584	-583,410	2,3988	10838	55,105
40	-0,312	-315,843	0,2348	110729	5,3941	-0,589	-591,238	2,9077	8941	66,795



**Σχήμα 10.50:** Πυκνότητα ρεύματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος με συμβατικές επικαλύψεις, εκτεθειμένα σε συνθήκες επιταχυνόμενης διάβρωσης

Η ακρυλική επικάλυψη έδειξε μέτριους έως υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης ενώ η ελαστομερής εμφάνισε χαμηλούς έως μέτριους ρυθμούς. Το σιλοξανικό χρώμα βρισκόταν σε παθητική κατάσταση για όλη την περίοδο έκθεσης των δοκιμίων στον θάλαμο αλατονέφωσης.

Το συνολικό διάγραμμα του ρεύματος διάβρωσης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις γραμμικής πόλωσης παρατίθεται στο **Σχήμα 10.51** για όλες τις επικαλύψεις.



**Σχήμα 10.51:** Πυκνότητα ρεύματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος εκτεθειμένα σε συνθήκες επιταχυνόμενης διάβρωσης

Από το συγκεντρωτικό διάγραμμα φαίνεται ότι οι βιομηχανικές επικαλύψεις εποξειδικών ρητινών και πολυουρεθάνης μαζί με το σιλοξανικό χρώμα νανοτεχνολογίας υπερτερούν σε σχέση με τα υπόλοιπα χρώματα. Επίσης οι ελαστομερές επικαλύψεις παρουσιάζονται καλύτερες στο σύνολό τους από τις ακρυλικές. Τονίζεται τέλος ότι το ακρυλικό χρώμα με προϊόντα νανοτεχνολογίας παρουσιάζεται καλύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο συμβατικό, ενώ οι ελαστομερικές επικαλύψεις συμβατικές και νανοτεχνολογίας παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά.

### 10.2.3 Απώλεια Μάζας Χαλύβων

Τα αποτελέσματα της απώλειας μάζας των χαλύβδινων οπλισμών παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες όπου υπολογίζεται και ο ρυθμός διάβρωσης των χαλύβων των οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων που ήταν εκτεθειμένα σε θάλαμο αλατονέφωσης για διάστημα 6 εβδομάδων. Οι τιμές αφορούν τους μέσους όρους των μετρήσεων 6 δοκιμίων για κάθε επικάλυψη. Κάθε κατηγορία παρατίθεται ξεχωριστά και στο τέλος δίνεται το συγκριτικό διάγραμμα όλων των επικαλύψεων με τους μέσους όρους των τιμών απώλειας βάρους και ρυθμού διάβρωσης για λόγους σύγκρισης.

## Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης

**Πίνακας 10.24:** Απώλεια βάρους για δοκίμια με συμβατικές επικαλύψεις που εκτέθηκαν σε επιταχυνόμενη διάβρωση

Κατηγορία 1: Συμβατικές Οργανικές Επικαλύψεις					
Χρώμα	Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια βάρους (g)	Απώλεια βάρους (%)	Ρυθμός διάβρωσης (μm/year)
Acr1_1	65,2110	64,9650	0,2460	0,3772	87,2001
Acr1_2	67,5990	67,3451	0,2539	0,3756	90,0099
Acr1_3	66,7590	66,5007	0,2583	0,3869	91,5657
Acr1_4	64,4050	64,1544	0,2506	0,3891	88,8393
Acr1_5	63,2775	63,0315	0,2463	0,3887	87,1943
Acr1_6	65,8392	65,5799	0,2593	0,3938	91,9247
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,2523</b>	<b>0,3852</b>	<b>89,4557</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0053</b>	<b>±0,0072</b>	<b>±2,07059</b>
Acr_sil_1	63,3570	63,1229	0,2341	0,3695	82,9971
Acr_sil_2	64,5897	64,3505	0,2392	0,3703	84,7838
Acr_sil_3	63,7435	63,5080	0,2355	0,3695	83,4935
Acr_sil_4	66,2307	65,9795	0,2512	0,3792	89,0376
Acr_sil_5	65,4033	65,1544	0,2489	0,3806	88,2534
Acr_sil_6	66,6192	66,3566	0,2626	0,3942	93,0973
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,2453</b>	<b>0,3772</b>	<b>86,9438</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,011</b>	<b>±0,0097</b>	<b>±3,90156</b>
Elast_horz_1	64,5811	64,4162	0,1648	0,2552	58,4265
Elast_horz_2	66,0371	65,8717	0,1653	0,2503	58,5966
Elast_horz_3	64,8890	64,7307	0,1583	0,2439	56,1057
Elast_horz_4	68,1692	68,0032	0,1658	0,2432	58,7726
Elast_horz_5	67,4633	67,2957	0,1676	0,2485	59,4317
Elast_horz_6	66,3211	66,1495	0,1716	0,2588	60,8367
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,1656</b>	<b>0,25</b>	<b>58,695</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,004</b>	<b>±0,0062</b>	<b>±1,54414</b>
Elast_vert_1	64,6380	64,4885	0,1495	0,2313	52,9915
Elast_vert_2	66,3730	66,2190	0,1540	0,2320	54,5802
Elast_vert_3	65,4930	65,3369	0,1561	0,2384	55,3510
Elast_vert_4	65,9240	65,7657	0,1583	0,2402	56,1359
Elast_vert_5	67,5569	67,3981	0,1588	0,2351	56,3050
Elast_vert_6	63,5543	63,3952	0,1591	0,2503	56,3913
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,156</b>	<b>0,2379</b>	<b>55,2925</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0037</b>	<b>±0,007</b>	<b>±1,32282</b>

**Πίνακας 10.25:** Απώλεια βάρους για δοκίμια με συμβατικές επικαλύψεις που εκτέθηκαν σε συνθήκες επιταχυνόμενης διάβρωσης

Κατηγορία 2: Βιομηχανικές Οργανικές Επικαλύψεις					
Χρώμα	Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια βάρους (g)	Απώλεια βάρους (%)	Ρυθμός διάβρωσης (μm/year)
Erox_1	65,1490	65,0472	0,1018	0,1562	36,0756
Erox_2	64,8970	64,8004	0,0966	0,1488	34,2335
Erox_3	67,8120	67,7040	0,1080	0,1592	38,2714
Erox_4	66,0450	65,9424	0,1026	0,1553	36,3610
Erox_5	68,9321	68,8302	0,1019	0,1478	36,1177
Erox_6	65,5466	65,4448	0,1018	0,1553	36,0841
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,1021</b>	<b>0,1538</b>	<b>36,1906</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0036</b>	<b>±0,0045</b>	<b>±1,28207</b>
Poly_1	66,6700	66,5486	0,1214	0,1821	43,0393
Poly_2	68,5190	68,3891	0,1299	0,1896	46,0547
Poly_3	65,3150	65,1908	0,1242	0,1901	44,0169
Poly_4	64,8670	64,7447	0,1223	0,1886	43,3701
Poly_5	67,8431	67,7214	0,1217	0,1794	43,1472
Poly_6	64,3905	64,2605	0,1300	0,2019	46,0980
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,1249</b>	<b>0,1886</b>	<b>44,2877</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,004</b>	<b>±0,0079</b>	<b>±1,42647</b>

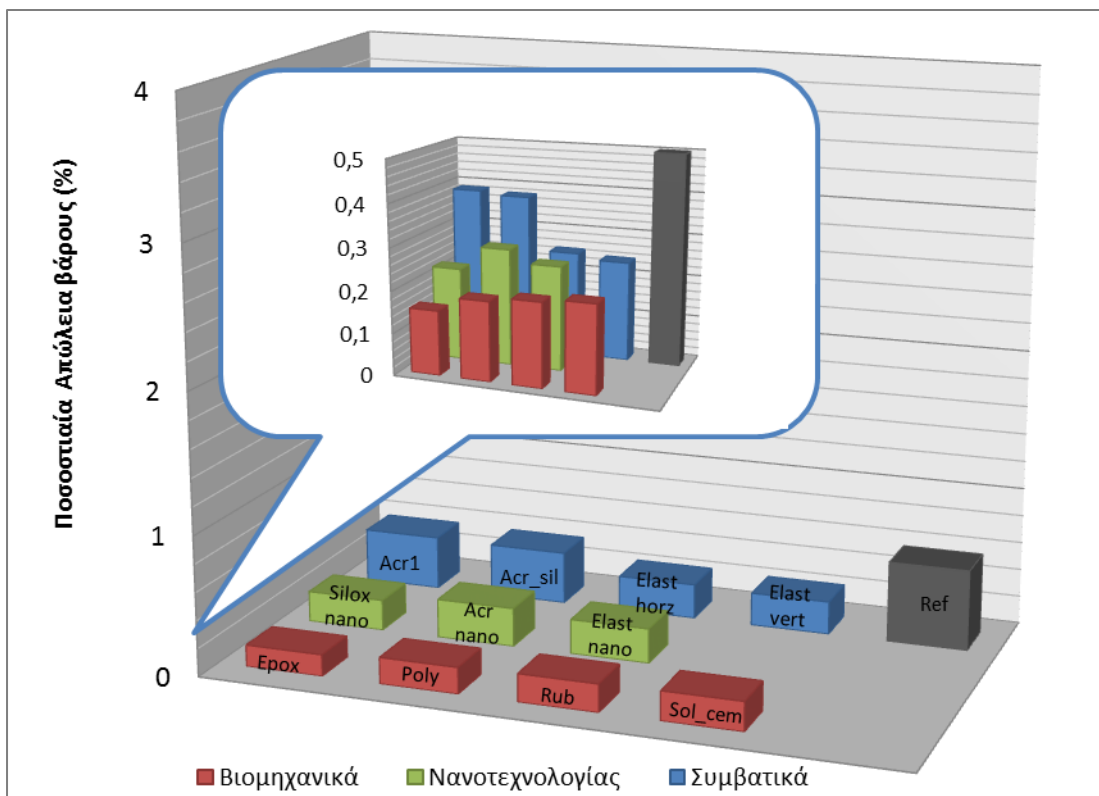
## Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης

Rub_1	67,9701	67,8296	0,14036	0,2065	49,7581
Rub_2	66,9050	66,7746	0,13033	0,1948	46,2031
Rub_3	67,8060	67,6674	0,13860	0,2044	49,1330
Rub_4	65,7900	65,6620	0,12796	0,1945	45,3630
Rub_5	65,5034	65,3790	0,12439	0,1899	44,0970
Rub_6	67,4402	67,2991	0,14107	0,2092	50,0090
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,13378</b>	<b>0,1999</b>	<b>47,427</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,00712</b>	<b>±0,0078</b>	<b>±2,5241</b>
Sol_cem_1	68,4036	68,2560	0,1476	0,2157	52,3141
Sol_cem_2	65,2251	65,0934	0,1317	0,2019	46,6922
Sol_cem_3	65,0004	64,8667	0,1337	0,2056	47,3876
Sol_cem_4	67,0063	66,8714	0,1349	0,2013	47,8138
Sol_cem_5	69,8357	69,6824	0,1533	0,2195	54,3410
Sol_cem_6	65,2250	65,0889	0,1361	0,2087	48,2533
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,1395</b>	<b>0,2088</b>	<b>49,467</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0087</b>	<b>±0,0074</b>	<b>±3,10134</b>

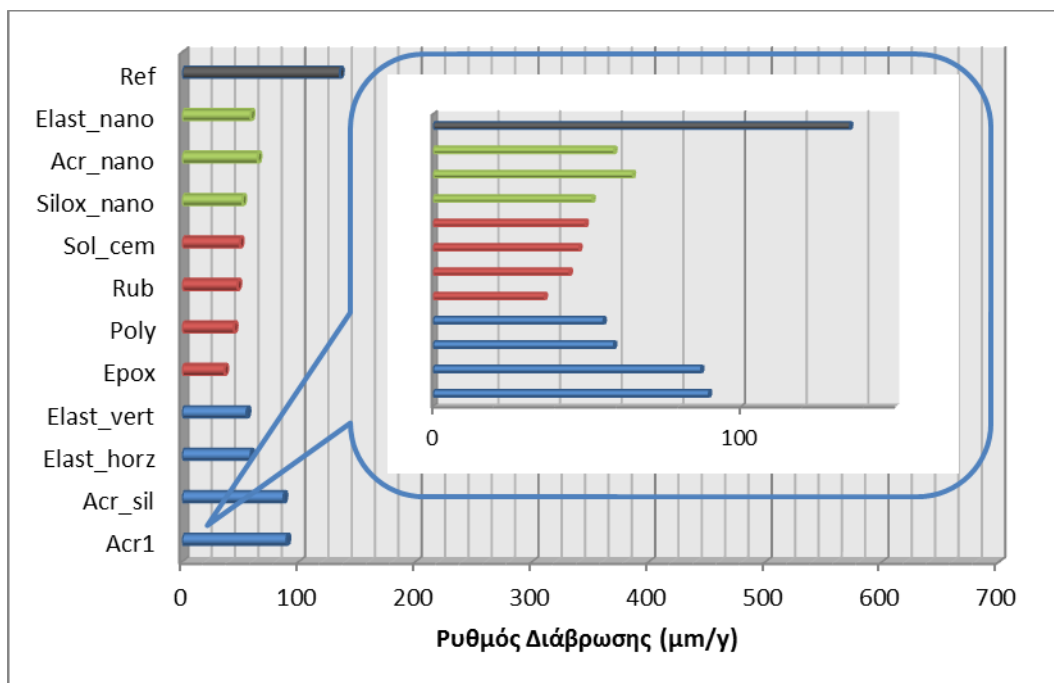
**Πίνακας 10.26:** Απώλεια βάρους για δοκίμια με επικαλύψεις νανοτεχνολογίας που εκτέθηκαν σε συνθήκες επιταχυνόμενης διάβρωσης

### Κατηγορία 3: Οργανικές Επικαλύψεις Νανοτεχνολογίας

Χρώμα	Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια βάρους (g)	Απώλεια βάρους (%)	Ρυθμός διάβρωσης (μm/year)
Silox_nano_1	68,8991	68,7430	0,1560	0,2264	55,3059
Silox_nano_2	67,1566	67,0155	0,1410	0,2101	50,0194
Silox_nano_3	64,4255	64,2773	0,1481	0,2301	52,5303
Silox_nano_4	65,8903	65,7422	0,1480	0,2247	52,5006
Silox_nano_5	64,2138	64,0728	0,1409	0,2194	49,9522
Silox_nano_6	66,4551	66,3146	0,1403	0,2112	49,7687
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,1484</b>	<b>0,2203</b>	<b>51,6795</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0061</b>	<b>±0,0082</b>	<b>±2,1881</b>
Acr_nano_1	65,5661	65,3803	0,1856	0,2832	65,8258
Acr_nano_2	65,9822	65,8006	0,1813	0,2749	64,3020
Acr_nano_3	66,7592	66,5750	0,1839	0,2756	65,2248
Acr_nano_4	65,3893	65,2072	0,1817	0,2781	64,4427
Acr_nano_5	63,6612	63,4898	0,1713	0,2691	60,7313
Acr_nano_6	67,2295	67,0378	0,1916	0,2850	67,9383
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,1826</b>	<b>0,2776</b>	<b>64,7441</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0066</b>	<b>±0,0058</b>	<b>±2,3661</b>
Elast_nano_1	66,9293	66,7611	0,1678	0,2508	59,5067
Elast_nano_2	65,7444	65,5866	0,1573	0,2394	55,7962
Elast_nano_3	67,9933	67,8271	0,1629	0,2396	57,7505
Elast_nano_4	67,7421	67,5738	0,1661	0,2453	58,9070
Elast_nano_5	65,73332	65,5683	0,1649	0,2510	58,4902
Elast_nano_6	66,3128	66,1378	0,1749	0,2638	62,0245
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,1657</b>	<b>0,2483</b>	<b>58,7458</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,0052</b>	<b>±0,0091</b>	<b>±2,0548</b>
<b>Δοκίμια Αναφοράς</b>					
Ref_1	64,4774	64,099	0,3785	0,5862	133,9910
Ref_2	67,5565	67,1579	0,3981	0,5893	141,1320
Ref_3	63,9564	63,5887	0,3673	0,5743	130,2100
Ref_4	67,2185	66,8225	0,3968	0,5891	140,3780
Ref_5	66,5199	66,1401	0,3798	0,5715	134,6520
Ref_6	64,7661	64,3964	0,3697	0,5708	131,0630
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,3815</b>	<b>0,5801</b>	<b>135,2370</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>			<b>±0,013</b>	<b>±0,009</b>	<b>±4,5993</b>



Σχήμα 10.52: Μέσοι όροι ποσοστιαίας απώλειας βάρους (%) χαλύβων οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων επικαλυμμένων με οργανικές επικαλύψεις σε συνθήκες επιταχυνόμενης διάβρωσης



Σχήμα 10.53: Μέσοι όροι ρυθμού διάβρωσης διαφόρων τύπων χάλυβα οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων με οργανικές επικαλύψεις που υπέστησαν επιταχυνόμενη διάβρωση

Από το διάγραμμα των μέσων όρων της ποσοστιαίας απώλεια μάζας και του ρυθμού διάβρωσης φαίνεται πως οι βιομηχανικές επικαλύψεις παρουσιάζουν τις μικρότερες απώλειες βάρους και αντίστοιχα τους μικρότερους ρυθμούς διάβρωσης, γεγονός που

αποτυπώνεται και στις ηλεκτροχημικές μετρήσεις. Το σιλοξανικής βάσης χρώμα με προϊόντα νανοτεχνολογίας ακολουθεί τις βιομηχανικές επικαλύψεις με μικρή διαφορά. Όπως και στις ηλεκτροχημικές μετρήσεις, έτσι και εδώ φαίνεται η υπεροχή των ελαστομερικών χρωμάτων έναντι των ακρυλικών καθώς και η βελτίωση της συμπεριφοράς των ακρυλικών χρωμάτων μετά την προσθήκη προϊόντων νανοτεχνολογίας. Οι ελαστομερές συμβατικές επικαλύψεις όμως παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με τις αντίστοιχες νανοτεχνολογίας.

#### **10.2.4 Οπτικές Παρατηρήσεις με Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών**

Η οπτική παρατήρηση των χαλύβων επετεύχθη με μικροσκόπιο οπτικών ινών και οι απεικονίσεις παρατίθενται στο **Σχήμα 10.54** για όλες τις κατηγορίες των επικαλύψεων.

Κατά την παρατήρηση της μορφολογίας της επιφάνειας των χαλύβων που ήταν εγκιβωτισμένοι σε δοκίμια καλυμμένα με ακρυλικές επικαλύψεις παρουσιάστηκε ταχεία επιφανειακή διάβρωση. Μεγάλοι κρατήρες και απώλεια υλικού παρατηρείται και στην ελαστομερή επικάλυψη για οριζόντιες επιφάνειας, ενώ στην αντίστοιχη για κάθετες επιφάνειες η επιφάνεια του χάλυβα καλύπτεται από σαφώς λιγότερα προϊόντα διάβρωσης. Για τα τρία πρώτα βιομηχανικά επιστρώματα η κατάσταση των χαλύβων είναι παρόμοια, με οξείδια να καλύπτουν την επιφάνεια των χαλύβων αλλά να μην παρατηρούνται κρατήρες και πόροι, εκτός από το τσιμεντόχρωμα διαλύτη όπου εμφανίζονται μικρές επιφανειακές αλλοιώσεις. Οι χάλυβες των δοκιμών που ήταν καλυμμένα με χρώματα νανοτεχνολογίας παρουσιάζουν προϊόντα διάβρωσης με την ακρυλική όμως διασπορά να εμφανίζει μικρούς πόρους. Γενικά, σε όλους τους τύπου επικαλύψεων παρατηρείται συγκέντρωση των οξειδίων διάβρωσης γύρω από τις νευρώσεις του χάλυβα και η διάβρωση χαρακτηρίζεται ως διάβρωση με βελονισμούς εξαιτίας τις δημιουργίας πόρων και κρατήρων στην χαλύβδινη επιφάνεια.



Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης

Συμβατικές Επικαλύψεις



Acr1



Acr\_sil

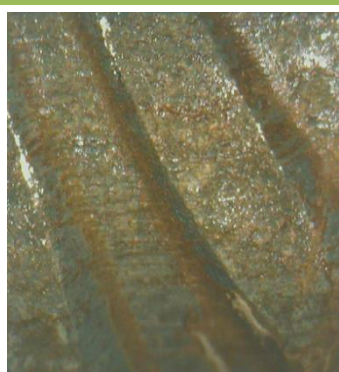


Elast\_horz



Elast\_vert

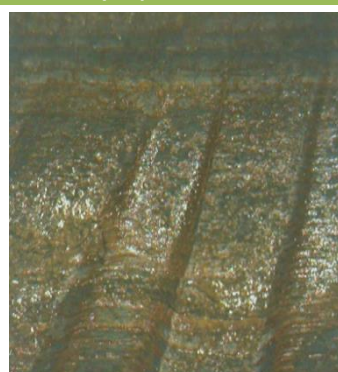
Βιομηχανικές Επικαλύψεις



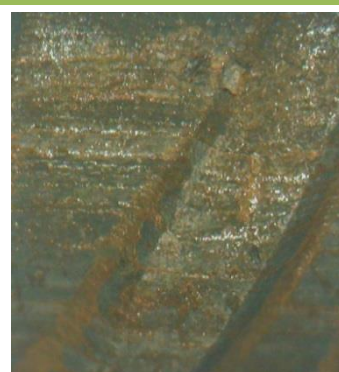
Erox



Poly

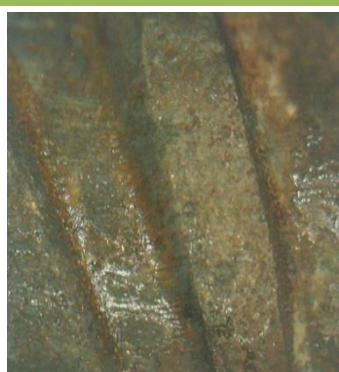


Rub



Sol\_cem

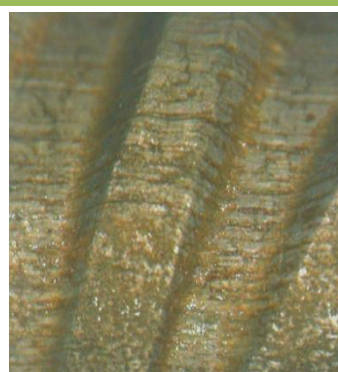
Επικαλύψεις Νανοτεχνολογίας



Silox\_nano



Acr\_nano



Elast\_nano



Ref

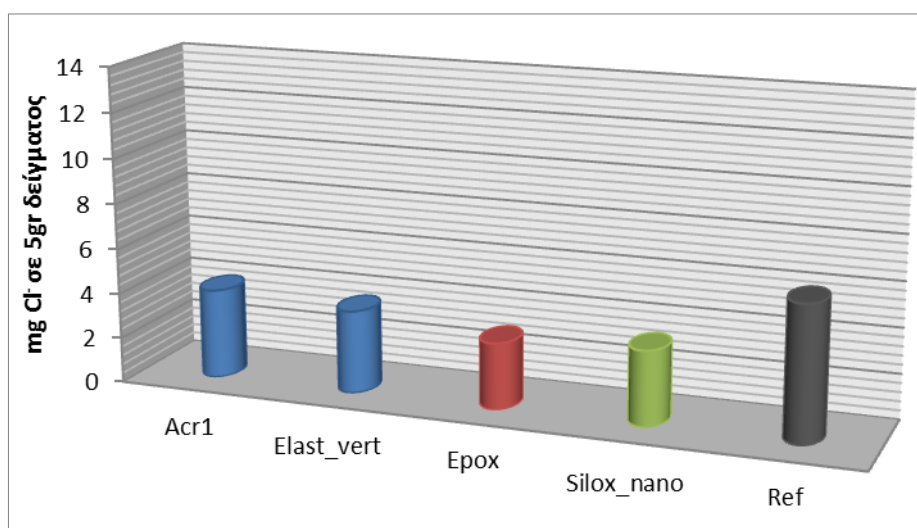
**Σχήμα 10.54:** Μακροσκοπική εξέταση των προϊόντων διάβρωσης δομικών χαλύβων με μικροσκόπιο οπτικών ινών. Περιβάλλον διάβρωσης: επιταχυνόμενη διάβρωση σπλισμένων δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος με οργανικές επικαλύψεις. Για όλες τις φωτογραφίες η μεγέθυνση είναι x50

### 10.2.5 Μέτρηση Χλωριόντων με Μέθοδο Mohr

Από κάθε ομάδα οργανικών επικαλύψεων επιλέχθηκε ένα χρώμα και τα δοκίμια που ήταν επικαλυμμένα με αυτό εξετάστηκαν αναφορικά με την περιεκτικότητα σε ιόντα χλωρίου. Ο πίνακας και το διάγραμμα των μέσω όρων δίνονται στη συνέχεια.

**Πίνακας 10.27:** Αποτελέσματα μεθόδου Mohr για την αποτίμηση των χλωριόντων σε δείγμα οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων επικαλυμμένων με οργανικές επικαλύψεις μετά από παραμονή σε θάλαμο αλατονέφωσης

	ml AgNO <sub>3</sub> που απαιτούνται για την αλλαγή χρώματος	mg Cl <sup>-</sup> που καταβυθίστηκαν	mg Cl <sup>-</sup> στα 5gr δείγματος
Acr1_1	0,45	0,1596	3,9881
Acr1_2	0,44	0,1560	3,8995
Acr1_3	0,45	0,1595	3,9881
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>0,4467</b>	<b>0,1583</b>	<b>3,9585</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	<b>±0,0058</b>	<b>±0,0020</b>	<b>±0,0511</b>
Elast_vert_1	0,42	0,1488	3,7222
Elast_vert_2	0,41	0,1453	3,6336
Elast_vert_3	0,41	0,1453	3,6336
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>0,4133</b>	<b>0,1465</b>	<b>3,6632</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	<b>±0,0058</b>	<b>±0,0020</b>	<b>±0,0511</b>
Erox_1	0,33	0,1170	2,9246
Erox_2	0,33	0,1170	2,9246
Erox_3	0,33	0,1170	2,9246
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>0,33</b>	<b>0,1170</b>	<b>2,9246</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Silox_nano_1	0,38	0,1347	3,3677
Silox_nano_2	0,37	0,1311	3,2791
Silox_nano_3	0,37	0,1311	3,2791
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>0,3733</b>	<b>0,1323</b>	<b>3,3087</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	<b>±0,0058</b>	<b>±0,0020</b>	<b>±0,0511</b>
Ref_1	0,67	0,2375	5,9378
Ref_2	0,68	0,2410	6,0265
Ref_3	0,67	0,2375	5,9378
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>0,6733</b>	<b>0,2387</b>	<b>5,9674</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	<b>±0,0057</b>	<b>±0,0020</b>	<b>±0,0512</b>



**Σχήμα 10.55:** Περιεκτικότητα χλωριόντων σε επικαλυμμένα δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος μετά από παραμονή σε θάλαμο αλατονέφωσης

Η περιεκτικότητα των ιόντων χλωρίου είναι σαφώς μικρότερη στο εποξειδικό βιομηχανικό χρώμα όπως είναι και αναμενόμενο εφόσον παρουσίασε και μικρότερους ρυθμούς διάβρωσης. Το σιλοξανικό χρώμα νανοτεχνολογίας ακολουθεί με μεγαλύτερη συγκέντρωση χλωριόντων από το εποξειδικό, παρουσιάζεται όμως βελτιωμένο σε σύγκριση με τα συμβατικά χρώματα. Τα ακάλυπτα δοκίμια εμφανίζουν σαφώς αυξημένη περιεκτικότητα.

### 10.3 Εναλλασσόμενοι Κύκλοι Διάβρωσης

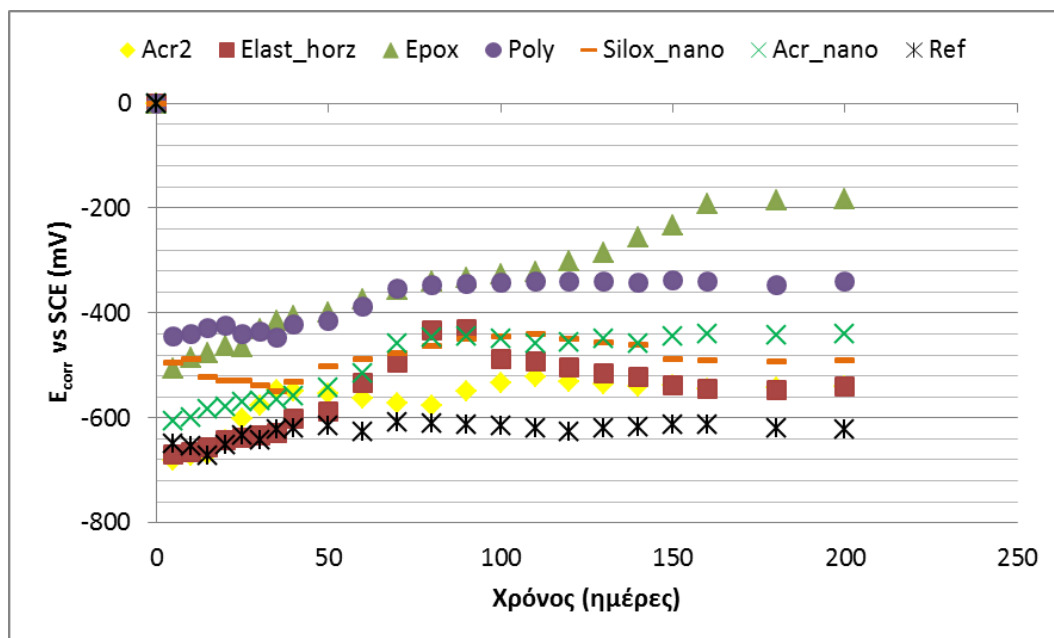
Για την μελέτη της αποτελεσματικότητας των οργανικών επικαλύψεων σε εναλλασσόμενους κύκλους διάβρωσης κατασκευάστηκαν οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα τα οποία εμβαπτίστηκαν πλήρως σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 24h. Στη συνέχεια τα δοκίμια ξηραίνονταν στον αέρα για το ίδιο χρονικό διάστημα και η διαδικασία επαναλαμβανόταν. Η χρονική διάρκεια του πειράματος ήταν 6 μήνες. Ο σκοπός των συνεχόμενων κύκλων ύγρυνσης – ξήρανσης είναι η προσομοίωση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε περιοχές όπου εμφανίζεται το φαινόμενο παλίρροιας-άμπωτης όπως σε λιμενικά έργα και σε βάθρα γεφυρών.

#### 10.3.1 Χρονική Εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης των Χαλύβων

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του δυναμικού διάβρωσης παρατίθενται στον Πίνακα 10.28 για όλες τις επικαλύψεις ανά κατηγορία. Στο Σχήμα 10.56 δίνεται η χρονική εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης όλα τα δοκίμια που υπέστησαν εναλλασσόμενους κύκλους ύγρυνσης-ξηρανσης για διάστημα 6 μηνών. Οι τιμές που δίνονται αφορούν τους μέσους όρους που προέκυψαν από 6 δοκίμια.

Πίνακας 10.28: Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης για δοκίμια που υπέστησαν εναλλασσόμενους κύκλους διάβρωσης

Χρόνος (ημέρες)	$E_{corr}$ (mV) vs SCE						Ref
	Συμβατικές Επικαλύψεις		Βιομηχανικές Επικαλύψεις		Επικαλύψεις Νανοτεχνολογίας		
	Acr2	Elast_horz	Erox	Poly	Silox_nano	Acr_nano	
0	0	0	0	0	0	0	0
5	-682	-671	-506	-445	-495	-606	-650
10	-673	-665	-486	-441	-487	-599	-655
15	-670	-657	-476	-429	-522	-583	-672
20	-643	-642	-462	-425	-528	-580	-652
25	-601	-639	-465	-440	-529	-569	-634
30	-577	-633	-431	-435	-539	-567	-642
35	-548	-629	-415	-446	-549	-565	-622
40	-550	-602	-406	-423	-532	-559	-619
50	-553	-587	-398	-415	-502	-542	-615
60	-562	-533	-374	-387	-489	-516	-627
70	-571	-495	-356	-353	-477	-459	-609
80	-577	-434	-339	-347	-463	-447	-610
90	-550	-430	-332	-345	-450	-445	-612
100	-533	-489	-326	-343	-445	-450	-615
110	-523	-492	-322	-341	-441	-458	-621
120	-531	-504	-301	-339	-450	-455	-626
130	-535	-516	-285	-341	-455	-450	-619
140	-541	-522	-255	-343	-461	-458	-617
150	-539	-537	-233	-338	-488	-445	-613
160	-544	-544	-193	-340	-490	-439	-613
180	-542	-548	-185	-347	-493	-443	-620
200	-540	-540	-184	-340	-490	-440	-622



Σχήμα 10.56: Δυναμικό Διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για δοκίμια τσιμεντοκονιάματος εκτεθειμένα σε εναλλασσόμενες συνθήκες διάβρωσης.

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87 οι χάλυβες των δοκιμίων καλυμμένων με συμβατικές οργανικές επικαλύψεις και επικαλύψεις нанοτεχνολογίας υπόκεινται σε εκτεταμένη διάβρωση για όλο το χρονικό διάστημα έκθεσης, με τις τελευταίες να παρουσιάζουν ελαφρά πιο ηλεκτροθετικές τιμές. Τα βιομηχανικά χρώμα ενώ για τις πρώτες 35 ημέρες του πειράματος επιδεικνύουν εκτεταμένη διάβρωση στη συνέχεια μετακινούνται προς ηλεκτροθετικότερα δυναμικά, με την επικάλυψη πολυουρεθάνης να παρουσιάζει υψηλό κίνδυνο διάβρωσης ενώ η εποξειδική εμφανίζει υψηλό κίνδυνο διάβρωσης και προς το τέλος του πειράματος παρουσιάζει ασαφή κατάσταση οπλισμών.

### 10.3.2 Προσδιορισμός Πυκνότητας Ρεύματος Διάβρωσης

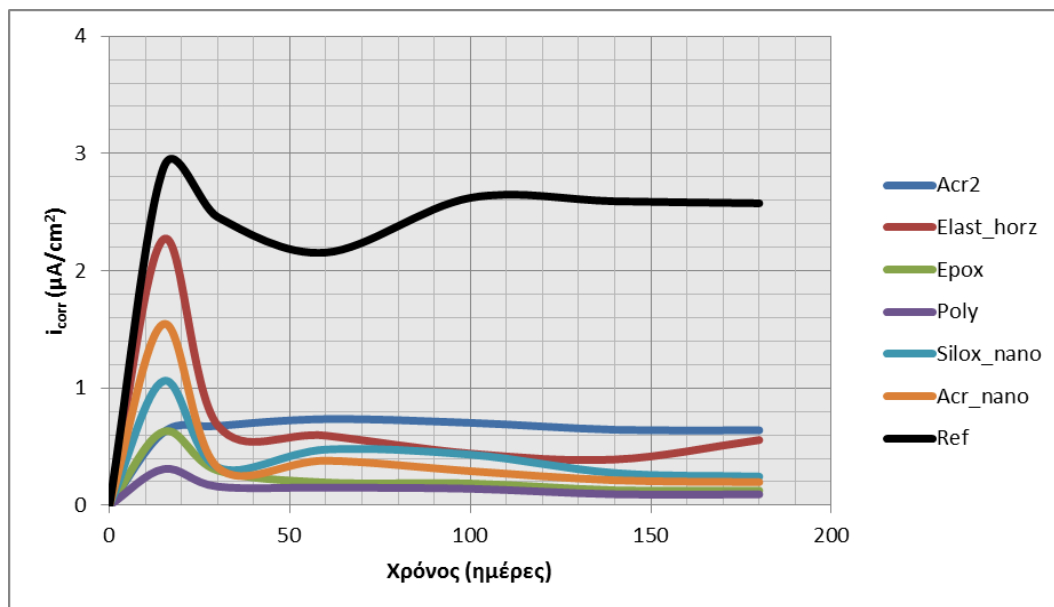
Τα αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών παραμέτρων που αποτιμήθηκαν με την μέθοδο της γραμμικής πόλωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.29, ενώ η χρονική εξέλιξη του ρεύματος διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου δίνεται στο Σχήμα 10.57. Οι τιμές αφορούν τους μέσους όρους 6 δοκιμίων από κάθε κατηγορία επικάλυψης.



## Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης

**Πίνακας 10.29:** Ηλεκτροχημικές παράμετροι για σπλισμένα τσιμεντοκονιάματα που υπέστησαν εναλλασσόμενους κύκλους διάβρωσης για διάστημα 6 μηνών

Χρόνος (ημέρες)	Συμβατικές Επικαλύψεις									
	Acr2					Elast_horz				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	-0,675	382,973	0,6233	41710	14,3200	-0,666	-671,306	2,26957	11456	52,1371
30	-0,568	-567,822	0,6769	38411	15,5500	-0,638	-638,897	0,68104	38177	15,6451
60	-0,563	-566,631	0,7353	35360	16,8910	-0,531	-534,959	0,59474	43717	13,6625
100	-0,534	-532,817	0,7041	36928	16,1740	-0,490	-492,109	0,44203	58819	10,1545
140	-0,538	-540,994	0,6447	40328	14,8100	-0,524	-528,082	0,39124	66456	8,98765
180	-0,546	-546,936	0,6401	40619	14,7050	-0,551	-552,786	0,5569	46687	12,7932
Χρόνος (ημέρες)	Βιομηχανικές Επικαλύψεις									
	Erox					Poly				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	-0,502	-506,278	0,6292	41321	14,455	-0,444	-445,013	0,3091	84108	7,1013
30	-0,432	-434,758	0,2976	87357	6,8372	-0,433	-435,516	0,1599	162576	3,6738
60	-0,375	-378,697	0,1951	133258	4,4821	-0,340	-346,933	0,1518	171325	3,4862
100	-0,320	-321,552	0,1864	139506	4,2814	-0,339	-340,726	0,1416	183575	3,2536
140	-0,256	-258,880	0,1292	201188	2,9688	-0,348	-346,789	0,0948	274292	2,1775
180	-0,190	-190,042	0,1256	206968	2,8859	-0,347	-347,649	0,0936	277762	2,1503
Χρόνος (ημέρες)	Επικαλύψεις Νανοτεχνολογίας									
	Silox_nano					Acr_nano				
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	-0,493	-494,922	1,0601	24526	24,352	-0,605	-606,532	1,5464	16813	35,525
30	-0,546	-549,703	0,3231	80470	7,4224	-0,563	-565,707	0,3226	80605	7,4099
60	-0,482	-483,063	0,4761	54605	10,938	-0,517	-517,514	0,3811	68218	8,7555
100	-0,440	-440,896	0,4328	60079	9,9416	-0,456	-458,066	0,2922	88974	6,713
140	-0,461	-463,722	0,2758	94288	6,3346	-0,560	-563,436	0,2144	121269	4,9252
180	-0,495	497,639	0,2457	105842	5,6431	-0,496	-496,746	0,1982	131170	4,5535
Χρόνος (ημέρες)	Ref									
	$E_{corr}$ (V)	$E(I=0)$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CR ( $\mu\text{m}/\text{y}$ )					
	0	0	0	0	0					
15	-0,321	-322,572	2,8791	9031	66,1400					
30	-0,644	-645,844	2,4579	10578	56,4600					
60	-0,630	-630,755	2,1559	12062	49,5200					
100	-0,621	-622,338	2,6217	9917	60,2300					
140	-0,620	-620,774	2,5978	10028	59,5600					
180	-0,622	-623,665	2,5752	10096	59,1600					



**Σχήμα 10.57:** Πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης για δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος εκτεθειμένα σε εναλλασσόμενους κύκλους ύγρυνσης-ξηρανσης

Οι συμβατικές οργανικές επικαλύψεις επιδεικνύουν εξ' αρχής μέτριους έως υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης τους οποίους και διατηρούν μέχρι το τέλος της περιόδου έκθεσης. Η συμπεριφορά των χρωμάτων νανοτεχνολογίας είναι η ίδια για τις πρώτες 15 ημέρες, δηλαδή υψηλός ρυθμός διάβρωσης, αλλά στη συνέχεια οι τιμές της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης αντιστοιχούν σε χαμηλούς έως μέτριους διαβρωτικούς ρυθμούς. Η εποξειδική επικάλυψη για τις πρώτες 150 ημέρες εναλλασσόμενων κύκλων διάβρωσης εμφανίζει μέτριους έως υψηλούς ρυθμούς ενώ στη συνέχεια σταθεροποιείται σε χαμηλούς έως μέτριους ρυθμούς. Τέλος το πολυουρεθανικό χρώμα μετά την 100<sup>η</sup> ημέρα βρίσκεται σε παθητική κατάσταση.

Πρέπει να παρατηρηθεί ότι και στις μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης και στις μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ρεύματος διάβρωσης οι αρχικές τιμές των δοκιμών είναι περισσότερο υψηλές και το όριο των 15 ημερών παρουσιάζεται σχεδόν σε όλα τα δοκίμια όπου από εκεί και έπειτα τα χρώματα βελτιώνουν τη συμπεριφορά τους στο συγκεκριμένο περιβάλλον.

### 10.3.3 Απώλεια Μάζας Χαλύβων

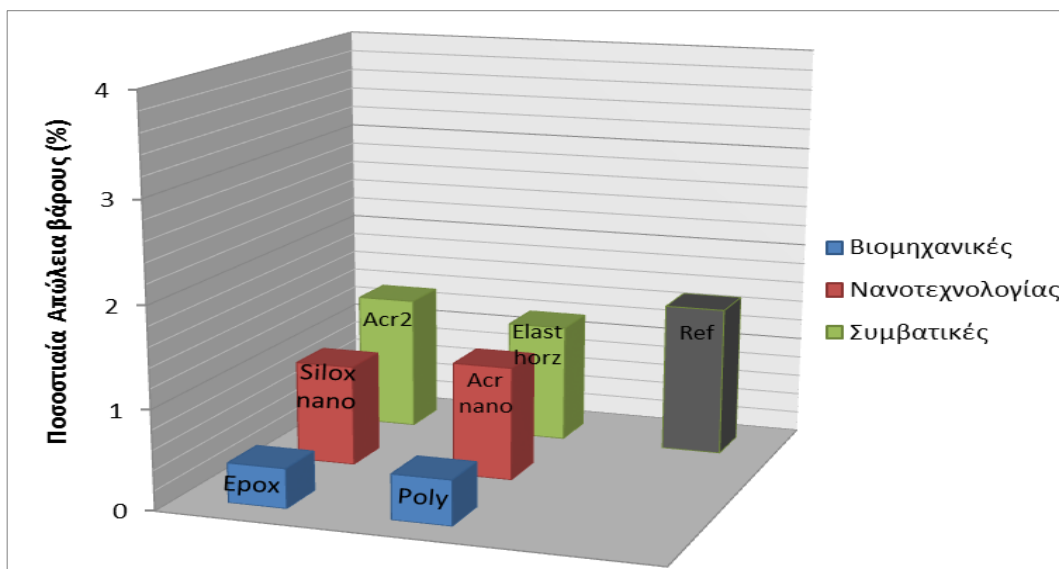
Στον Πίνακα 10.30 δίνονται οι τιμές για την απώλεια μάζας των χαλύβδινων οπλισμών μετά από 6 μήνες έκθεσης των οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων στο διαβρωτικό περιβάλλον. Οι τιμές αποτελούν τους μέσους όρους από 6 δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε χρώμα. Η σύγκριση των τιμών απώλειας μάζας και ρυθμού διάβρωσης για όλα τα δοκίμια γίνεται στα Σχήμα 10.58 και Σχήμα 10.59.

## Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης

**Πίνακας 10.30:** Απώλεια βάρους για δοκίμια που εκτέθηκαν σε συνθήκες εναλλασσόμενης διάβρωσης

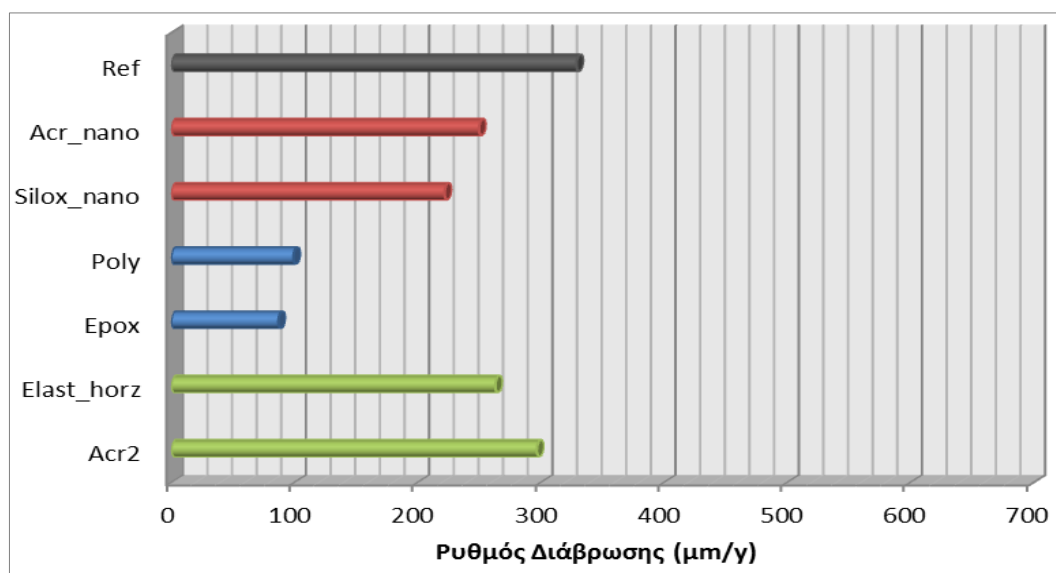
Κατηγορία 1: Συμβατικές Οργανικές Επικαλύψεις					
Χρώμα	Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια βάρους (g)	Απώλεια βάρους (%)	Ρυθμός διάβρωσης (μm/year)
Acr2_1	60,8320	60,0168	0,8151	1,3400	288,9864
Acr2_2	63,7562	62,8947	0,8614	1,3512	305,4004
Acr2_3	60,3281	59,5163	0,8117	1,3455	287,7582
Acr2_4	60,7483	59,9264	0,8218	1,3529	291,3571
Acr2_5	63,9744	63,0996	0,8747	1,3671	310,1197
Acr2_6	62,1104	61,2754	0,8349	1,3443	296,0088
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,8366</b>	<b>1,3502</b>	<b>296,6051</b>
Τυπική Απόκλιση			<b>±0,0259</b>	<b>±0,0096</b>	<b>±9,2109</b>
Elast_horz_1	62,1450	61,4087	0,7362	1,1847	261,0061
Elast_horz_2	63,9293	63,1701	0,7591	1,1874	269,1172
Elast_horz_3	60,83392	60,1064	0,7274	1,1958	257,8935
Elast_horz_4	62,1793	61,4499	0,7293	1,1729	258,5469
Elast_horz_5	62,4644	61,7194	0,7449	1,192	264,1031
Elast_horz_6	62,8133	62,0598	0,7534	1,1994	267,0885
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,7417</b>	<b>1,1888</b>	<b>262,9592</b>
Τυπική Απόκλιση			<b>±0,0129</b>	<b>±0,0094</b>	<b>±4,5874</b>
Κατηγορία 2: Βιομηχανικές Επικαλύψεις					
Χρώμα	Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια βάρους (g)	Απώλεια βάρους (%)	Ρυθμός διάβρωσης μm/year
Erox_1	61,4949	61,2514	0,2434	0,3958	86,2966
Erox_2	60,6017	60,3536	0,2480	0,4092	87,9220
Erox_3	62,1730	61,9271	0,2458	0,3954	87,1490
Erox_4	60,4833	60,2389	0,2443	0,4039	86,6094
Erox_5	61,0488	60,8021	0,2466	0,4039	87,4236
Erox_6	62,3396	62,0985	0,2410	0,3866	85,4421
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,2448</b>	<b>0,3991</b>	<b>86,8071</b>
Τυπική Απόκλιση			<b>±0,0024</b>	<b>±0,0081</b>	<b>±0,8835</b>
Poly_1	61,2554	60,9814	0,274002	0,44731	97,1353
Poly_2	60,4072	60,13542	0,271778	0,44991	96,3471
Poly_3	61,8329	61,55558	0,277321	0,4485	98,3119
Poly_4	62,72794	62,44322	0,284725	0,453904	100,9368
Poly_5	63,9274	63,63576	0,291643	0,45621	103,3894
Poly_6	60,72639	60,44998	0,276407	0,455168	97,9881
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,279312</b>	<b>0,451834</b>	<b>99,0181</b>
Τυπική Απόκλιση			<b>±0,007466</b>	<b>±0,003737</b>	<b>±2,6468</b>
Κατηγορία 3: Οργανικές Επικαλύψεις Νανοτεχνολογίας					
Χρώμα	Αρχικό Βάρος (g)	Τελικό Βάρος (g)	Απώλεια βάρους (g)	Απώλεια βάρους (%)	Ρυθμός διάβρωσης μm/year
Silox_nano_1	62,3636	61,7302	0,6334	1,0156	224,5461
Silox_nano_2	61,4563	60,8304	0,6259	1,0184	221,8872
Silox_nano_3	62,8540	62,2257	0,6282	0,9995	222,7213
Silox_nano_4	62,9532	62,3164	0,6367	1,0114	225,7360
Silox_nano_5	60,0604	59,4578	0,6025	1,0032	213,6150
Silox_nano_6	61,1323	60,5062	0,6260	1,0241	221,9480
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,6254</b>	<b>1,0120</b>	<b>221,7423</b>
Τυπική Απόκλιση			<b>±0,012</b>	<b>±0,0093</b>	<b>±4,2634</b>
Acr_nano_1	<b>62,8776</b>	62,1599	0,7176	1,1413	254,4071
Acr_nano_2	<b>61,9084</b>	61,2060	0,7023	1,1345	248,9933
Acr_nano_3	60,3392	59,6516	0,6875	1,1394	243,7385
Acr_nano_4	61,6234	60,9170	0,7064	1,1463	250,4260
Acr_nano_5	60,9123	60,2124	0,6998	1,1489	248,0982
Acr_nano_6	62,8462	62,1341	0,7121	1,1330	252,4443
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,7043</b>	<b>1,1406</b>	<b>249,6846</b>
Τυπική Απόκλιση			<b>±0,0104</b>	<b>±0,0062</b>	<b>±3,7099</b>
Δοκίμια Αναφοράς					
Ref_1	63,2218	62,2804	0,9413	1,4890	333,7228
Ref_2	61,3312	60,4033	0,9278	1,5129	328,9395
Ref_3	62,7994	61,8585	0,9408	1,4982	333,5413
Ref_4	61,7320	60,8000	0,9319	1,5097	330,3888
Ref_5	60,2481	59,3496	0,8984	1,4912	318,4957
Ref_6	61,5552	60,6308	0,9243	1,5016	327,6792
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>			<b>0,9274</b>	<b>1,5004</b>	<b>328,7945</b>
Τυπική Απόκλιση			<b>±0,0157</b>	<b>±0,0096</b>	<b>±5,5980</b>





Σχήμα 10.58: Μέσοι όροι ποσοστιαίας απώλειας βάρους (%) χάλυβων οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων επικαλυμμένων με οργανικές επικαλύψεις σε συνθήκες εναλλασσόμενης διάβρωσης

Οι βιομηχανικές επικαλύψεις παρουσιάζουν τις μικρότερες απώλειες μάζας και κατά συνέπεια τους χαμηλότερους ρυθμούς διάβρωσης ενώ τα χρώματα νανοτεχνολογίας δείχνουν καλύτερη συμπεριφορά στο περιβάλλον από τις συμβατικές επικαλύψεις.

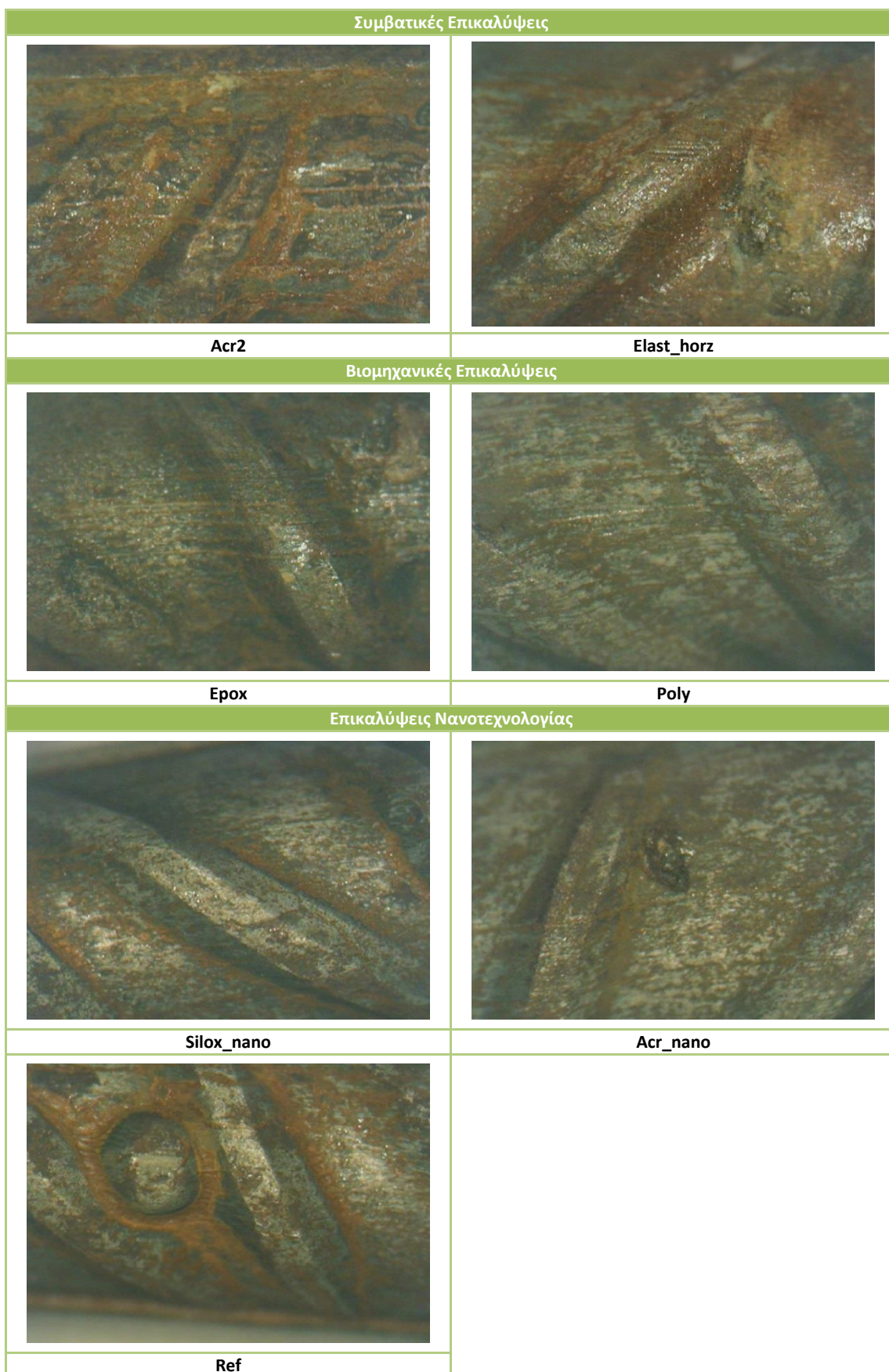


Σχήμα 10.59: Μέσοι όροι ρυθμού διάβρωσης διαφόρων τύπων χάλυβα οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων με οργανικές επικαλύψεις που υπέστησαν εναλλασσόμενους κύκλους διάβρωσης

#### 10.3.4 Οπτική Παρατήρηση με FOM

Στο Σχήμα 10.60 παρατίθενται οι απεικονίσεις από το μικροσκόπιο οπτικών ινών για τους χάλυβες όλων των κατηγοριών των επικαλυμμένων τσιμεντοκονιαμάτων. Οι χάλυβες των δοκιμών με συμβατικές επικαλύψεις παρουσιάζουν εκτεταμένα προϊόντα διάβρωσης στην χαλύβδινη επιφάνεια και κυρίως στις νευρώσεις των οπλισμών. Οι βιομηχανικές επικαλύψεις δεν δείχνουν σημάδια διάβρωσης και δεν υπάρχουν συσώρευση διαβρωτικών προϊόντων. Τέλος τα χρώματα νανοτεχνολογίας δείχνουν σαφώς λιγότερα προϊόντα στην επιφάνεια τους, όμως μικροί κρατήρες αρχίζουν να φαίνονται ιδιαίτερα στο ακρυλικό χρώμα.

## Κεφάλαιο 10: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης



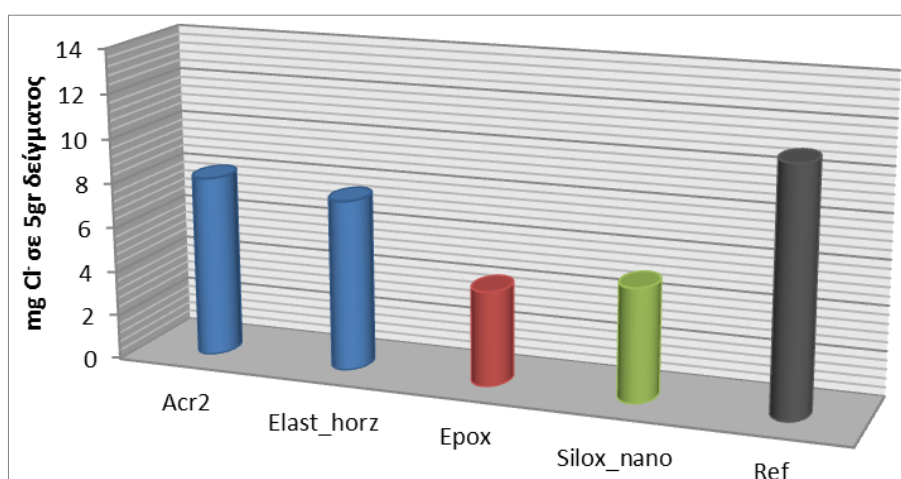
**Σχήμα 10.60:** Μακροσκοπική εξέταση των προϊόντων διάβρωσης δομικών χαλύβων με μικροσκόπιο οπτικών ινών. Περιβάλλον διάβρωσης: εναλλασσόμενοι κύκλοι διάβρωσης σπλισμένων δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος με οργανικές επικαλύψεις. Για όλες τις φωτογραφίες η μεγέθυνση είναι x50.

### 10.3.5 Μέτρηση Χλωριόντων με Μέθοδο Mohr

Για την μέτρηση των χλωριόντων στη μάζα των σπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων πραγματοποιήθηκε τιτλοδότηση κατά Mohr σε ένα χρώμα ανά ομάδα. Τα αποτελέσματα δίνονται στον παρακάτω πίνακα και ακολουθεί και το σχετικό διάγραμμα των μέσων όρων.

**Πίνακας 10.31:** Αποτελέσματα μεθόδου Mohr για την αποτίμηση των χλωριόντων σε δείγμα τσιμεντοκονιαμάτων με οργανικές επικαλύψεις μετά από εναλλασσόμενους κύκλους διάβρωσης

	ml AgNO <sub>3</sub> που απαιτούνται για την αλλαγή χρώματος	mg Cl <sup>-</sup> που καταβυθίστηκαν	mg Cl <sup>-</sup> στα 5gr δείγματος
Acr2_1	0,91	0,3226	8,0649
Acr2_2	0,91	0,3226	8,0649
Acr2_3	0,92	0,3261	8,1535
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>0,9133</b>	<b>0,3238</b>	<b>8,0944</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	<b>±0,0058</b>	<b>±0,002</b>	<b>±0,0512</b>
Elast_horz_1	0,85	0,3013	7,5331
Elast_horz_2	0,88	0,312	7,799
Elast_horz_3	0,85	0,3013	7,5331
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>0,86</b>	<b>0,3049</b>	<b>7,6218</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	<b>±0,0173</b>	<b>±0,0061</b>	<b>±0,1535</b>
Erox_1	0,48	0,1702	4,254
Erox_2	0,48	0,1702	4,254
Erox_3	0,47	0,1666	4,1654
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>0,4767</b>	<b>0,169</b>	<b>4,2245</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	<b>±0,0058</b>	<b>±0,002</b>	<b>±0,0512</b>
Silox_nano_1	0,58	0,2056	5,1403
Silox_nano_2	0,56	0,1985	4,963
Silox_nano_3	0,57	0,2021	5,0516
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>±0,57</b>	<b>±0,2021</b>	<b>±5,0516</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	<b>0,01</b>	<b>0,0035</b>	<b>0,0886</b>
Ref_1	1,21	0,4289	10,724
Ref_2	1,25	0,4431	11,078
Ref_3	1,22	0,4325	10,812
<b>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</b>	<b>1,2267</b>	<b>0,4349</b>	<b>10,871</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	<b>±0,0208</b>	<b>±0,0074</b>	<b>±0,1845</b>



**Σχήμα 10.61:** Αποτελέσματα τιτλοδότησης κατά Mohr σε σπλισμένα τσιμεντοκονιάματα μετά από παραμονή σε εναλλασσόμενο περιβάλλον διάβρωσης

Τα αποτελέσματα των τιμών της τιτλοδότησης συμφωνούν με τις αντίστοιχες τιμές του ρυθμού διάβρωσης, αποδεικνύοντας ότι το εποξειδικό χρώμα ανθίσταται περισσότερο στη διάβρωση του σπλισμού με μικρή όμως διαφορά από το χρώμα нанοτεχνολογίας. Αναφορικά με τα συμβατικά χρώματα το ελαστομερές παρουσιάζεται ελαφρά καλύτερο.



## 11. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο εκτιμήθηκε η προστασία που προσφέρουν οι διάφοροι τύποι οργανικών επικαλύψεων ενάντια στην ενανθράκωση, η οποία αποτελεί σημαντικό πρόβλημα των κατασκευών από Ο.Σ. σε αστικό και βιομηχανικό περιβάλλον. Το ενανθρακωμένο σκυρόδεμα εμφανίζει μειωμένο pH με αποτέλεσμα κάτω από αυτές τις συνθήκες να προκαλείται αποπαθητικοποίηση του χάλυβα και έναρξη της διάβρωσης. Το γεγονός ότι η ενανθράκωση και η ύπαρξη χλωριόντων δρουν συνεργιστικά, εντείνει την σημαντικότητα της προστασίας των επικαλύψεων απέναντι στην παρεμπόδιση της εισόδου του CO<sub>2</sub>.

### 11.1 Υλικά και Μέθοδοι

Όλες οι οργανικές επικαλύψεις και από τις τρεις κατηγορίες (συμβατικά χρώματα, βιομηχανικά χρώματα και χρώματα νανοτεχνολογίας) μελετήθηκαν ως προς την προστασία που προσφέρουν ενάντια στην ενανθράκωση. Εφαρμόστηκαν σε επιφάνειες τσιμεντοκονιάματος και σκυροδέματος (**Σχήμα 11.1**) και εκτέθηκαν στην ατμόσφαιρα αλλά και σε θάλαμο αυξημένης συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> με σκοπό τη σύγκριση τόσο των επικαλύψεων όσο και των υποστρωμάτων στα οποία εφαρμόστηκαν.



(a)



(b)

**Σχήμα 11.1:** (a) Δοκίμια σκυροδέματος και (b) τσιμεντοκονιάματος που χρησιμοποιήθηκαν για μετρήσεις βάθους ενανθράκωσης

### 11.2 Φυσική Ενανθράκωση

Οι υπό μελέτη οργανικές επικαλύψεις εφαρμόστηκαν σε δοκίμια άοπλου τσιμεντοκονιάματος και σκυροδέματος τα οποία διατηρήθηκαν για διάστημα 20 μηνών στην ατμόσφαιρα, σε συνθήκες που περιγράφονται στον **Πίνακας 11.1**. Στη συνέχεια μετρήθηκε το βάθος ενανθράκωσης των δοκιμίων με χρήση δείκτη φαινολοφθαλεΐνης σε φρέσκιες τομές. Η εφαρμογή των χρωμάτων και σε επιφάνειες σκυροδέματος και σε

## Κεφάλαιο 11: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Ενανθράκωσης

επιφάνειες τσιμεντοκονιάματος έγινε με σκοπό τη σύγκριση των δύο διαφορετικών υποστρωμάτων στην αποτελεσματικότητα των επικαλύψεων έναντι ενανθράκωσης.

**Πίνακας 11.1:** Μέση τιμή των περιβαλλοντικών παραμέτρων κατά την περίοδο έκθεσης των δοκιμών

Σταθμός	Τοποθεσία	Κλίμα	Θερμοκρασία T (°C)	Σχετική υγρασία RH (%)	SO <sub>2</sub> (μg/m <sup>3</sup> day)	NO <sub>x</sub> (μg/m <sup>3</sup> day)	CO (μg/m <sup>3</sup> day)
Ε.Μ.Π.	37.98N, 23.73'Ε	Μεσογειακό	30	25	25	110	3,5

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του βάθους ενανθράκωσης δίνονται στους παρακάτω πίνακες για κάθε κατηγορία επικαλύψεων ξεχωριστά και για τα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος και για τα δοκίμια σκυροδέματος εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα για διάστημα 20 μηνών. Δίνεται επίσης και το συγκριτικό διάγραμμα των μέσων όρων για όλες τις επικαλύψεις στο **Σχήμα 11.2**.

**Πίνακας 11.2:** Βάθη ενανθράκωσης δοκιμών σκυροδέματος και τσιμεντοκονιάματος με συμβατικές επικαλύψεις μετά από 20 μήνες έκθεσης στην ατμόσφαιρα

Κατηγορία 1: Συμβατικές Επικαλύψεις		
Επικάλυψη	Βάθος Ενανθράκωσης (mm)	
	Τσιμεντοκονίαμα	Σκυρόδεμα
Acr1_1	2,5	0,5
Acr1_2	2,5	0,5
Acr1_3	2,5	0,5
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>2,5</b>	<b>0,5</b>
Acr2_1	2,3	1,5
Acr2_2	2,3	1,5
Acr2_3	2,1	1,5
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>2,0</b>	<b>1,5</b>
Acr3_1	2,0	0,5
Acr3_2	2,0	0,5
Acr3_3	2,0	0,5
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>2,0</b>	<b>0,5</b>
Acr_sil_1	2,3	1,0
Acr_sil_2	2,2	1,0
Acr_sil_3	2,2	1,0
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>
Acr_rel_1	2,5	0,5
Acr_rel_2	2,5	0,5
Acr_rel_3	2,5	0,5
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>2,5</b>	<b>0,5</b>
Acr_glas_1	2,5	1,0
Acr_glas_2	2,0	1,0
Acr_glas_3	2,0	1,0
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>
Acr_cem_1	1,0	0,5
Acr_cem_2	1,0	0,5
Acr_cem_3	1,5	0,5
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>
Elast_horz_1	1,0	0,5
Elast_horz_2	1,0	0,5
Elast_horz_3	1,0	0,5
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>
Elast_vert_1	1,0	0,5
Elast_vert_2	1,0	0,5
Elast_vert_3	1,0	0,5
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>



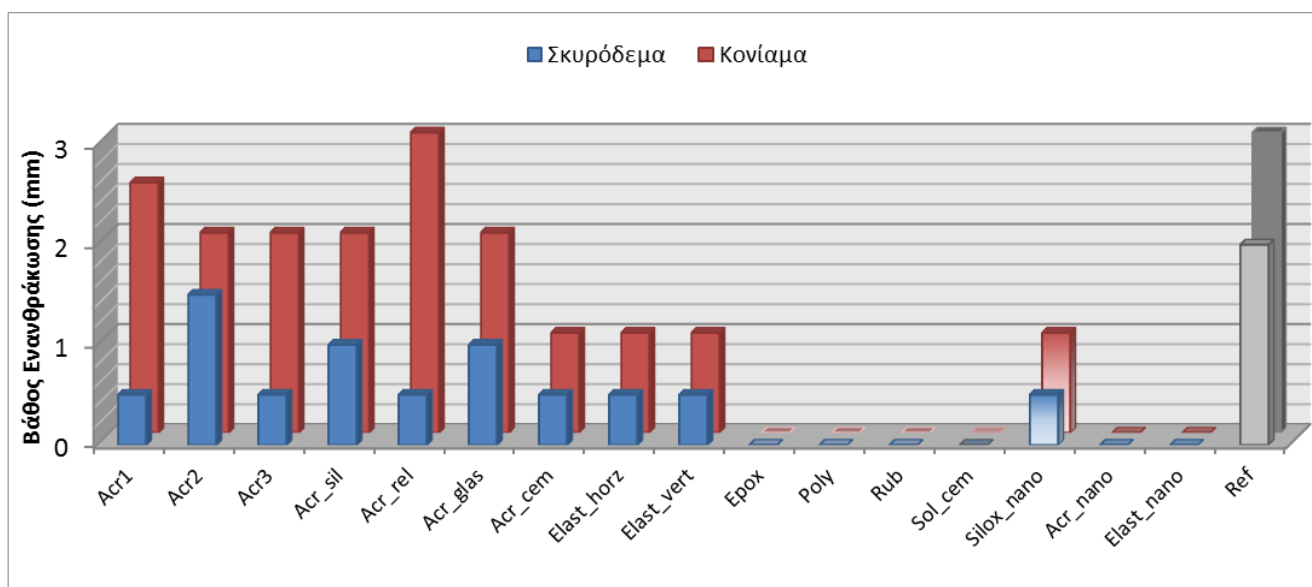
Πίνακας 11.3: Βάθη ενανθράκωσης δοκιμίων σκυροδέματος και τσιμεντοκονιάματος με βιομηχανικές επικαλύψεις μετά από 20 μήνες έκθεσης στην ατμόσφαιρα

Κατηγορία 2: Βιομηχανικές Επικαλύψεις		
Επικάλυψη	Βάθος Ενανθράκωσης (mm)	
	Τσιμεντοκονίαμα	Σκυρόδεμα
Erox_1	0	0
Erox_2	0	0
Erox_3	0	0
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Poly_1	0	0
Poly_2	0	0
Poly_3	0	0
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Rub_1	0	0
Rub_2	0	0
Rub_3	0	0
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Sol_cem_1	0	0
Sol_cem_2	0	0
Sol_cem_3	0	0
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Πίνακας 11.4: Βάθη ενανθράκωσης δοκιμίων σκυροδέματος και τσιμεντοκονιάματος με επικαλύψεις νανοτεχνολογίας μετά από 20 μήνες έκθεσης στην ατμόσφαιρα

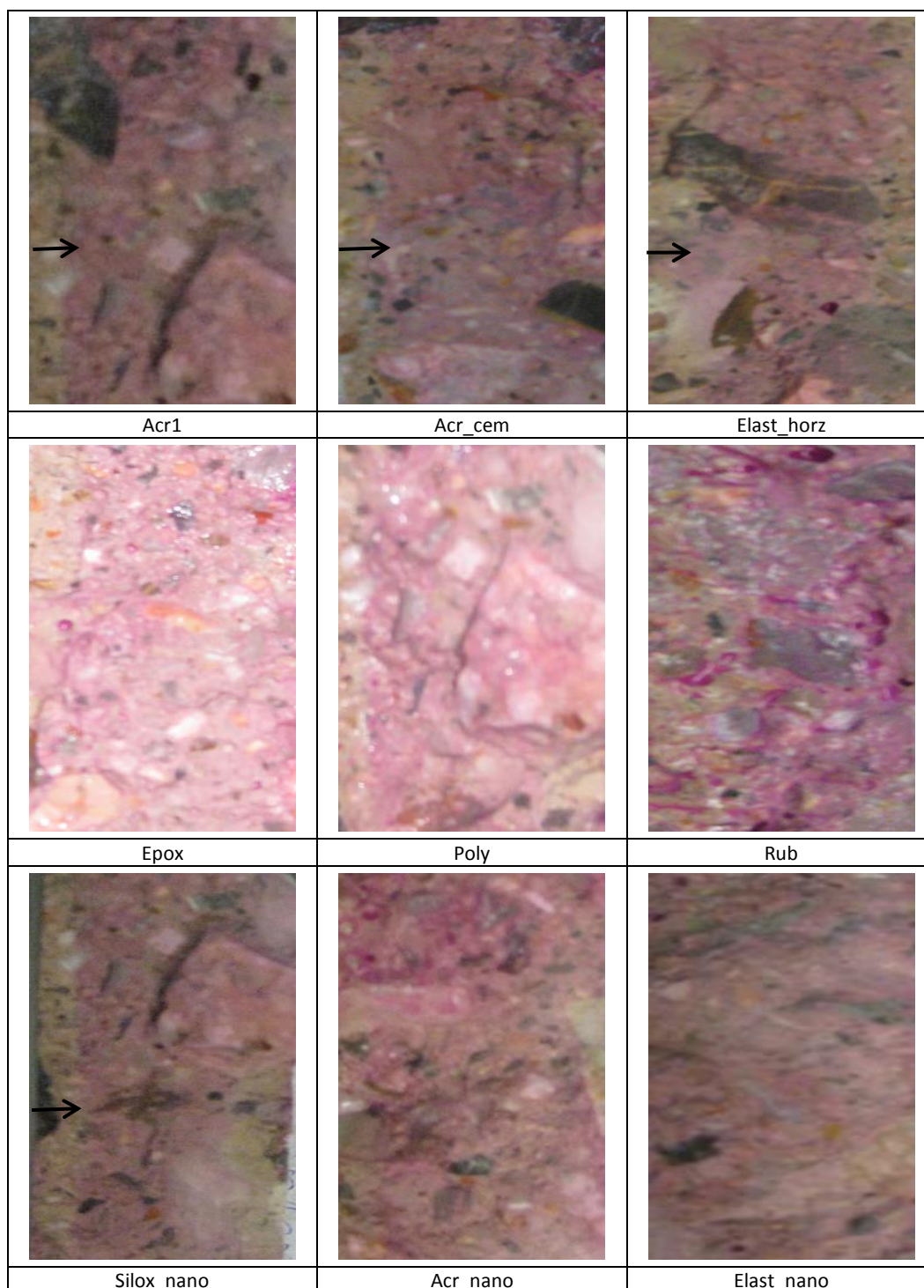
Κατηγορία 3: Επικαλύψεις Νανοτεχνολογίας		
Επικάλυψη	Βάθος Ενανθράκωσης (mm)	
	Τσιμεντοκονίαμα	Σκυρόδεμα
Silox_nano_1	1,0	0,5
Silox_nano_2	1,0	0,5
Silox_nano_3	1,0	0,5
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>
Acr_nano_1	0	0
Acr_nano_2	0	0
Acr_nano_3	0	0
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Elast_nano_1	0	0
Elast_nano_2	0	0
Elast_nano_3	0	0
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Ref_1	3,0	2,0
Ref_2	3,0	2,0
Ref_3	3,0	2,0
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>





Σχήμα 11.2: Βάθος ενανθράκωσης για δοκίμια τσιμεντοκονιάματος και σκυροδέματος μετά από έκθεση στο περιβάλλον για διάστημα 20 μηνών

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα το υπόστρωμα του τσιμεντοκονιάματος ευνοεί την αύξηση του βάθους ενανθράκωσης σε σχέση με αυτό του σκυροδέματος γεγονός που είναι αναμενόμενο εφόσον η δομή είναι πιο συμπαγής με λιγότερους και μικρότερους πόρους. Το γεγονός αυτό παρατηρείται σε όλες τις επικαλύψεις από όλες τις κατηγορίες. Περισσότερο αποτελεσματικά έναντι ενανθράκωσης είναι τα βιομηχανικά χρώματα τα οποία παρουσιάζουν μηδενικά βάθη ενανθράκωσης. Τα χρώματα νανοτεχνολογίας επίσης παρουσίασαν μηδενικές τιμές με εξαίρεση το σιλοξανικό χρώμα. Τέλος, από τις συμβατικές επικαλύψεις φαίνεται ότι στη φυσική ενανθράκωση μεγαλύτερη αντίσταση παρουσιάζουν τα ελαστομερή χρώματα σε σχέση με τα ακρυλικά. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθενται ενδεικτικές φωτογραφίες της μέτρησης του βάθους ενανθράκωσης.



Σχήμα 11.3: Ενδεικτικές φωτογραφίες από τις μετρήσεις του βάθους ενανθράκωσης μετά από έκθεση στην ατμόσφαιρα δοκιμίων σκυροδέματος για διάστημα 20 μηνών

### 11.3 Επιταχυνόμενη Ενανθράκωση

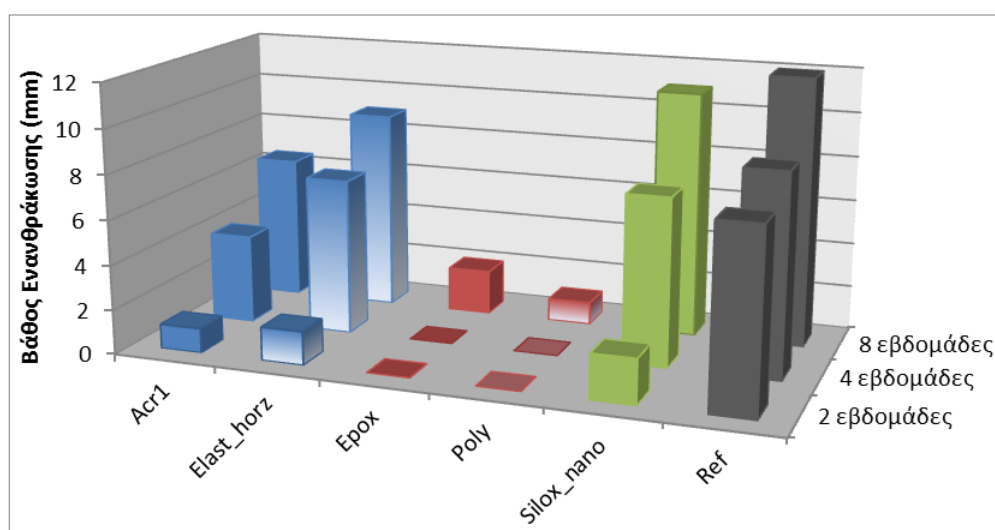
Δοκίμια άοπλου τσιμεντοκονιάματος εκτέθηκαν σε θάλαμο ενανθράκωσης με συγκέντρωση 1% κ.ο. σε CO<sub>2</sub> για συνολικό χρονικό διάστημα 8 εβδομάδων. Το βάθος ενανθράκωσης των επικαλυμμένων δοκιμίων μετρήθηκε σε 2, 4 και 8 εβδομάδες και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.5. Οι τιμές του βάθους ενανθράκωσης προέκυψαν από το μέσο όρο τριών δοκιμίων κάθε φόρα.

## Κεφάλαιο 11: Εκτίμηση Αποτελεσματικότητας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Ενανθράκωσης

Τα βάθη ενανθράκωσης που παρατηρήθηκαν στις επιταχυνόμενες συνθήκες είναι σαφώς υψηλότερα σχετικά με αυτά της φυσικής έκθεσης των δοκιμών. Τα βιομηχανικά χρώματα παρουσιάζουν την καλύτερη συμπεριφορά εφόσον επιδεικνύουν πρακτικά μηδενικό βάθος ενανθράκωσης ακόμα και μετά από ένα μήνα. Η ακρυλική επικάλυψη παρουσιάζεται βελτιωμένη σε σχέση με την ελαστομερή και αναφορικά με το χρώμα νανοτεχνολογίας πρέπει να επισημανθεί πως δεν παρουσιάζει ικανοποιητική προστασία. Το διάγραμμα με τους μέσους όρους των τιμών που προέκυψαν δίνεται παρακάτω.

**Πίνακας 11.5:** Βάθη ενανθράκωσης δοκιμών τσιμεντοκονιάματος με οργανικές επικαλύψεις μετά από 2, 4 και 8 εβδομάδες σε θάλαμο ενανθράκωσης

Έκθεση σε Θάλαμο Ενανθράκωσης			
Επικάλυψη	Βάθος Ενανθράκωσης (mm)		
	2 εβδομάδες	4 εβδομάδες	8 εβδομάδες
Acr1_1	1,1	4,3	6,7
Acr1_2	1,1	4,1	6,6
Acr1_3	1,1	4,0	6,2
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>1,1</b>	<b>4,0</b>	<b>6,5</b>
Elast_horz_1	1,5	7,0	9,0
Elast_horz_2	1,5	7,2	9,0
Elast_horz_3	1,5	7,0	9,0
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>1,5</b>	<b>7,0</b>	<b>9,0</b>
Erox_1	0	0	2,0
Erox_2	0	0	2,0
Erox_3	0	0	2,0
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2,0</b>
Poly_1	0	0	0,5
Poly_2	0	0	1,0
Poly_3	0	0	1,0
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1,0</b>
Silox_nano_1	2,0	7,8	11,3
Silox_nano_2	2,0	7,4	11,0
Silox_nano_3	2,0	7,3	11,1
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>2,0</b>	<b>7,5</b>	<b>11,0</b>
Ref_1	8,0	8,8	12,3
Ref_2	8,0	9,3	12,4
Ref_3	8,0	9,2	12,2
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>8,0</b>	<b>9,0</b>	<b>12,0</b>



**Σχήμα 11.4:** Μέσοι όροι βάθους ενανθράκωσης μετά από παραμονή δοκιμών σε θάλαμο αυξημένης συγκέντρωσης CO<sub>2</sub>

## 12. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

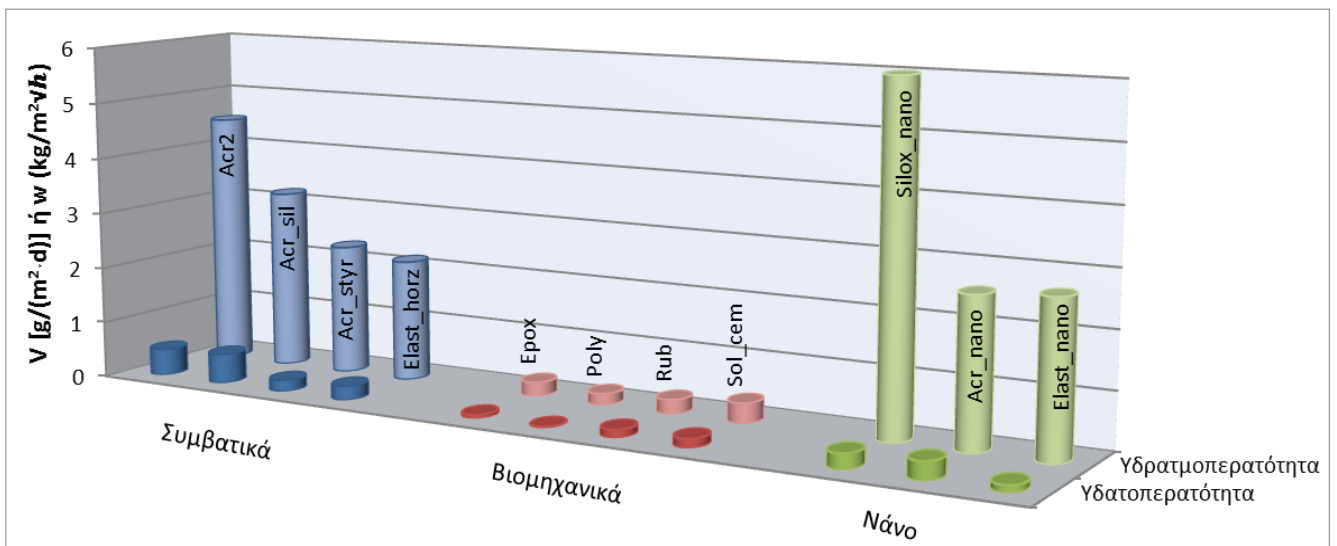
Στον παρόν κεφάλαιο διεξάγεται μια γενική σύγκριση όλων των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Συγκρίνονται τόσο οι φυσικοχημικές ιδιότητες των χρωμάτων όσο και η επίδοσή τους έναντι διάβρωσης από ιόντα χλωρίου και ενανθράκωση.

### 12.1 Φυσικοχημικές και Μηχανικές Ιδιότητες

Από το πλήθος των φυσικοχημικών ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν μια προστατευτική επικάλυψη στην συγκεκριμένη διατριβή ελέγχθησαν η υδατοπερατότητα, η υδρατμοπερατότητα, η διαπερατότητα σε  $\text{Cl}^-$  και η διαπερατότητα σε  $\text{CO}_2$  εξαιτίας της άμεσης συνάρτησής τους με τις διαβρωτικές δράσεις.

Αναφορικά με τις δύο πρώτες ιδιότητες θα πρέπει να σημειωθεί πως η βέλτιστη συμπεριφορά για μια οργανική επικάλυψη που προορίζεται για πορώδη υλικά, είναι η ταυτόχρονη επίτευξη υψηλής υδρατμοπερατότητας και χαμηλής υδατοπερατότητας. Επικαλύψεις με αυτές τις ιδιότητες αποτρέπουν την είσοδο του νερού και όλων των συστατικών που το νερό μεταφέρει (πχ.  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) και παράλληλα επιτρέπουν την διαφυγή των υδρατμών από το εσωτερικό της τοιχοποιίας δημιουργώντας μια σφραγιστική μεμβράνη που “αναπνέει”.

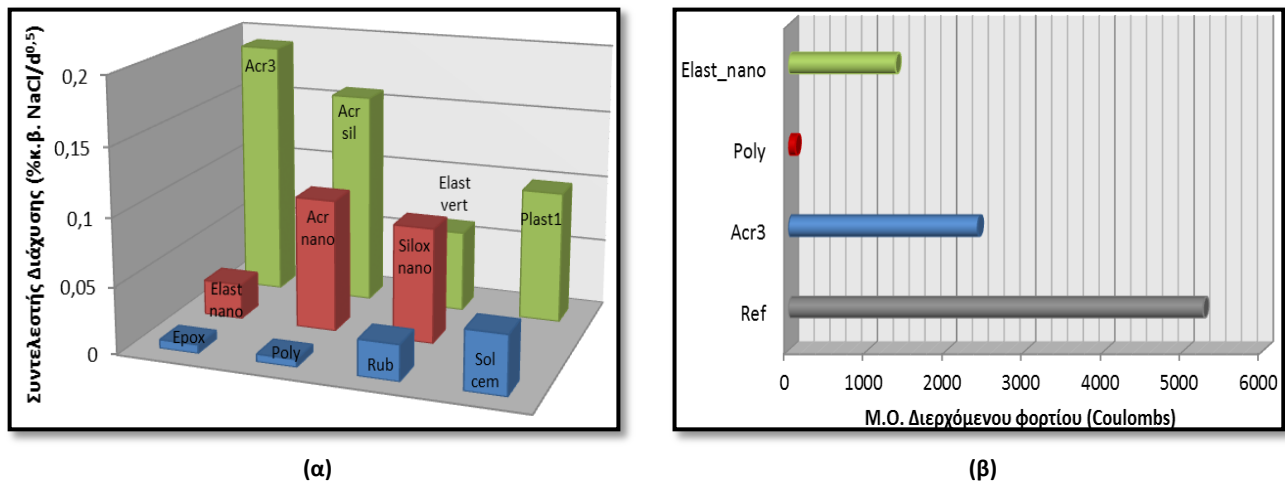
Στο **Σχήμα 12.1** δίνονται οι συνολικοί ρυθμοί υδατοπερατότητας και υδρατμοπερατότητας των επικαλύψεων όλων των κατηγοριών. Για τις συμβατικές επικαλύψεις απεικονίζονται μόνο αυτές που επέδειξαν καλύτερη συμπεριφορά, όπου παρατηρούνται υψηλότεροι ρυθμοί διαπερατότητας υδρατμών στα ακρυλικά χρώματα και χαμηλότερες τιμές υδατοπερατότητας στις ελαστομερές επικαλύψεις, παρατήρηση που έχει διαπιστωθεί και σε άλλες μελέτες<sup>296</sup>. Η ταυτόχρονη επίτευξη υψηλής περατότητα υδρατμών και χαμηλής υδατοπερατότητας επιδεικνύεται στις συμβατικές και στις επικαλύψεις νανοτεχνολογίας η διαφορά όμως είναι εντονότερη στις επικαλύψεις νανοτεχνολογίας γεγονός που αποδεικνύει την καταλληλότητα της χρήσης των επιστρωμάτων αυτών σαν χρώματα εσωτερικής και εξωτερικής τοιχοποιίας.



**Σχήμα 12.1:** Ρυθμοί υδατοπερατότητας & υδρατμοπερατότητας για όλες τις οργανικές επικαλύψεις

Τη μικρότερη διαφορά στις δύο τιμές παρουσιάζουν οι βιομηχανικές επικαλύψεις **Epox** και **Poly** οι οποίες επιδεικνύουν πολύ χαμηλές τιμές περατότητας σε νερό αλλά και χαμηλές τιμές διαπερατότητας υδρατμών. Οι βιομηχανικές επικαλύψεις δεν προορίζονται για συμβατικές εφαρμογές και είναι αναμενόμενο η υδρατμοπερατότητα να μην αποτελεί βασική παράμετρο για την επίτευξη των στόχων των εν λόγω χρωμάτων που μπορεί να είναι η σφράγιση δεξαμενών, η επικάλυψη βιομηχανικών τμημάτων, πύργων ψύξης κ.α. Αντίθετα, η υδατοπερατότητα των εποξειδικών και πολυουρεθανικών συστημάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική και παρουσιάζεται πολύ μικρή όπως επιβεβαιώνεται και από την διεθνή βιβλιογραφία<sup>297</sup>. Στην συγκεκριμένη ενότητα αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι η υπεροχή των χρωμάτων νανοτεχνολογίας σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα όπου όπως φαίνεται το χρώμα **Silox\_nano** εμφανίζεται καλύτερο στην επίτευξη του διπλού στόχου. Το **Elast\_nano** είναι και πάλι καλύτερο από τα συμβατικά ανάλογά του ενώ το **Acr\_nano** εμφανίζεται βελτιωμένο από τα περισσότερα ακρυλικά ανάλογά του.

Για την διάχυση των ιόντων χλωρίου δια μέσω των οργανικών επικαλύψεων προσδιορίστηκε ο συντελεστής διάχυσης έμμεσα μετρώντας την αγωγιμότητα υδατικού διαλύματος NaCl που διερχόταν μέσω της μεμβράνης της επικάλυψης και επίσης μετρήθηκε το διερχόμενο φορτίο με τη μέθοδο “Rapid Chloride Permeability Test, RCPT”. Και με τις δύο μεθόδους βρέθηκε ότι υπερτερούν τα βιομηχανικά χρώματα **Epox** και **Poly** που παρουσιάζουν τους μικρότερους συντελεστές διάχυσης ιόντων Cl<sup>-</sup> και το μικρότερο διερχόμενο φορτίο. Η διαπίστωση αυτή έχει παρατηρηθεί και από άλλους ερευνητές<sup>298</sup> όπου τα χρώματα πολυουρεθάνης είναι βελτιωμένα συγκριτικά με ακρυλικές και σιλοξανικές διασπορές αλλά και χρώματα οργανικού διαλύτου. Το RCPT έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την μέτρηση του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων σε σκυρόδεμα όπως έχει διαπιστωθεί και στο παρελθόν<sup>299</sup> και δίνει τα ίδια αποτελέσματα με άλλες μεθόδους προσδιορισμού. Τέλος πρέπει να τονιστεί πως τα άλλα δύο βιομηχανικά χρώματα (**Sol\_cem**, **Rub**) παρουσιάζουν μεγαλύτερους συντελεστές διάχυσης από το χρώμα νανοτεχνολογίας **Elast\_nano** το οποίο παρουσίασε και μικρότερο συντελεστή υδατοπερατότητας από τα συγκεκριμένα δύο βιομηχανικά χρώματα.



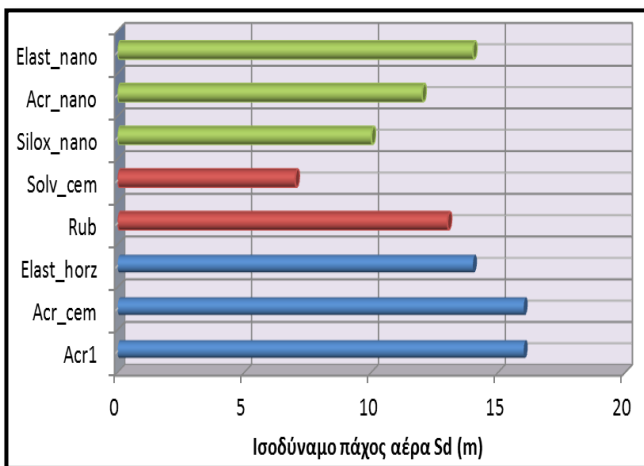
Σχήμα 12.2: (α) Μ.Ο. Συντελεστή διάχυσης Cl<sup>-</sup>, (β) Μ.Ο. διερχόμενου φορτίου (C) μετά από τη δοκιμή RCPT

Οι τιμές του συντελεστή διαπερατότητας σε χλωριόντα είναι αναμενόμενο να συμφωνούν με τους ρυθμούς υδατοπερατότητας εφόσον ο κύριος παράγοντας μεταφοράς των ιόντων χλωρίου είναι το νερό. Οι επικαλύψεις νανοτεχνολογίας παρουσιάζονται και στο σύνολό τους καλύτερες από τα συμβατικά χρώματα αλλά και καλύτερες αναλογικά. Δηλαδή, το

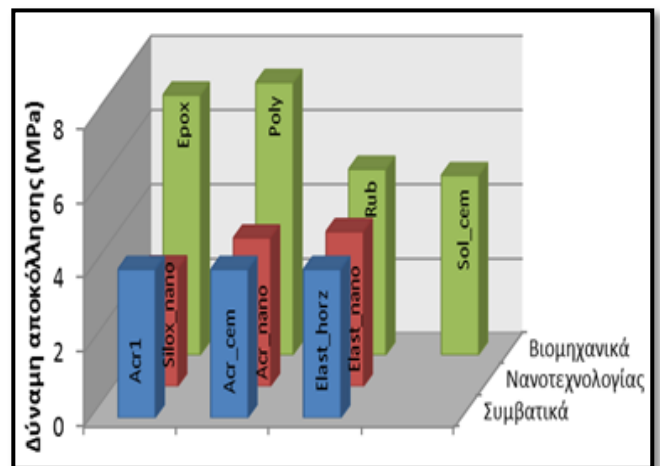


ελαστομερές νανοτεχνολογίας είναι βελτιωμένο σε σχέση με το συμβατικό ελαστομερές και αντίστοιχα και για τα ακρυλικά χρώματα. Εν γένει όμως οι ακρυλικές επικαλύψεις υστερούν έναντι των ελαστομερικών.

Η συμπεριφορά των επικαλύψεων έναντι διάχυσης CO<sub>2</sub> δίνεται στο **Σχήμα 12.3(α)** όπου έχουν παραλειφθεί αρκετές συμβατικές επικαλύψεις για την μείωση του όγκου των δεδομένων. Για τα βιομηχανικά χρώματα **Epox** και **Poly** δεν ήταν δυνατόν να υπολογιστούν οι συντελεστές διάχυσης μιας και τα δοκίμια δεν παρουσίασαν καθόλου βάθος ενανθράκωσης μετά από την περίοδο έκθεσης. Τα παραπάνω χρώματα παρουσιάζουν γενικά χαμηλούς συντελεστές διάχυσης CO<sub>2</sub>, όπως έχει σημειωθεί και από άλλους ερευνητές<sup>300,301</sup>. Από τα υπόλοιπα δεδομένα φαίνεται πως τα ακρυλικά χρώματα υπερέρχουν συγκριτικά με τα χρώματα νανοτεχνολογίας και τα υπόλοιπα δύο βιομηχανικά χρώματα, παρουσιάζοντας υψηλότερο ισοδύναμο πάχος αέρα. Θα πρέπει να σημειωθεί πως το ισοδύναμο πάχος αέρα των επικαλύψεων προσδιορίστηκε έπειτα από παραμονή των δοκιμών σε θάλαμο ενανθράκωσης όπου οι ακρυλικές διασπορές δίνουν, όπως έχει παρατηρηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία<sup>302</sup>, μικρότερους συντελεστές διάχυσης CO<sub>2</sub> συγκριτικά με σιλοξανικά χρώματα.



(α)



(β)

**Σχήμα 12.3:** (α) Ισοδύναμο πάχος αέρα για οργανικές επικαλύψεις, (β) Δύναμη αποκόλλησης όπως εκτιμήθηκε με τη μέθοδο Pull-off test

Ο προσδιορισμός της πρόσφυσης των επιστρωμάτων επετεύχθη με δύο μεθόδους, μέσω του προσδιορισμού της ελάχιστης εφελκυστικής τάσης αποκόλλησης (Pull-off test) και μέσω της αντίστασης σε σταυροειδή χάραξη (cross-cut test) και τα αποτελέσματα δίνονται στο **Σχήμα 12.3(β)**.

Σε σχετικές έρευνες που έχουν δημοσιευτεί<sup>303</sup> παρατηρήθηκε ότι η δύναμη αποκόλλησης για εποξειδικά χρώματα εφαρμοσμένα σε χάλυβα ήταν πολύ μεγαλύτερη από ότι σε ακρυλικά. Το ίδιο παρατηρήθηκε και όταν το υπόστρωμα ήταν τσιμεντοκονίαμα όπου τα χρώματα **Epox** και **Poly** παρουσιάζουν αισθητά υψηλότερες τιμές, ενώ όλες οι υπόλοιπες επικαλύψεις συμπεριλαμβανομένων και των άλλων δύο βιομηχανικών χρωμάτων κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα. Τα αποτελέσματα αυτά αποτυπώνονται και στις μετρήσεις σταυροειδούς χάραξης όπου το καλύτερο χρώμα από την κατηγορία των χρωμάτων νανοτεχνολογίας είναι το **Elast\_nano** το οποίο παρουσιάζει και την υψηλότερη δύναμη αποκόλλησης στην κατηγορία αυτή. Τη χειρότερη συμπεριφορά παρουσιάζουν τα ακρυλικά χρώματα τόσο τα συμβατικά

όσο και τα νανοτεχνολογίας αλλά και το τσιμεντόχρωμα διαλύτη το οποίο συγκαταλέγεται στις βιομηχανικές επικαλύψεις.

Αναφορικά με το θάλαμο αλατονέφωσης, τα ακρυλικά χρώματα παρουσίασαν την χειρότερη συμπεριφορά με εμφανή τα προϊόντα διάβρωσης στην επιφάνειά τους. Αντίθετα, τα ελαστομερή συμβατικά χρώματα επιδεικνύουν καλύτερη συμπεριφορά με μικρή εμφάνιση σκουριάς στα δοκίμια που ελέγχθησαν. Όλες οι βιομηχανικές επικαλύψεις επέδειξαν άριστη συμπεριφορά με την όψη των δοκιμών να παρουσιάζεται ελεύθερη προϊόντων διάβρωσης. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και άλλοι ερευνητές<sup>297</sup> όταν ακρυλικά και εποξειδικά χρώματα εφαρμόζονται σε μεταλλικές επιφάνειες και τα πρώτα παρουσιάζουν 40% διαβρωμένη επιφάνεια ενώ τα δεύτερα μέγιστη τιμή 8% της συνολικής επιφάνειας έκθεσης. Αναφορικά με τις επικαλύψεις νανοτεχνολογίας, η συμπεριφορά τους είναι καλύτερη από των αντίστοιχων συμβατικών και γενικά και ανά συγκεκριμένη κατηγορία. Πρέπει όμως να τονιστεί πως το ακρυλικό χρώμα νανοτεχνολογίας ενώ δεν επέδειξε προϊόντα διάβρωσης στην επιφάνειά του, παρουσίασε μεγάλο βαθμό αποχρωματισμού και ξεθωριάσματος.

## 12.2 Βαθμός Προστασία Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Διάβρωσης

Για την αποτίμηση της προστασίας που προσέφεραν οι οργανικές επικαλύψεις στην διάβρωση του οπλισμού από ιόντα χλωρίου μελετήθηκαν δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος και οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος σε 3 διαφορετικά περιβάλλοντα διάβρωσης τα οποία ήταν:

- Περιβάλλον Διάβρωσης 1: Μερική Εμβάπτιση Δοκιμών σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl
- Περιβάλλον Διάβρωσης 2: Επιταχυνόμενη Διάβρωση Δοκιμών σε Θάλαμο Αλατονέφωσης
- Περιβάλλον Διάβρωσης 3: Εναλλασσόμενοι κύκλοι Ύγρυνσης-Ξήρανσης Δοκιμών σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl

Η προστασία που προσέφεραν οι οργανικές επικαλύψεις έναντι διάβρωσης αξιολογείται με τον προσδιορισμό του βαθμού προστασίας, όπως ορίζεται παρακάτω:

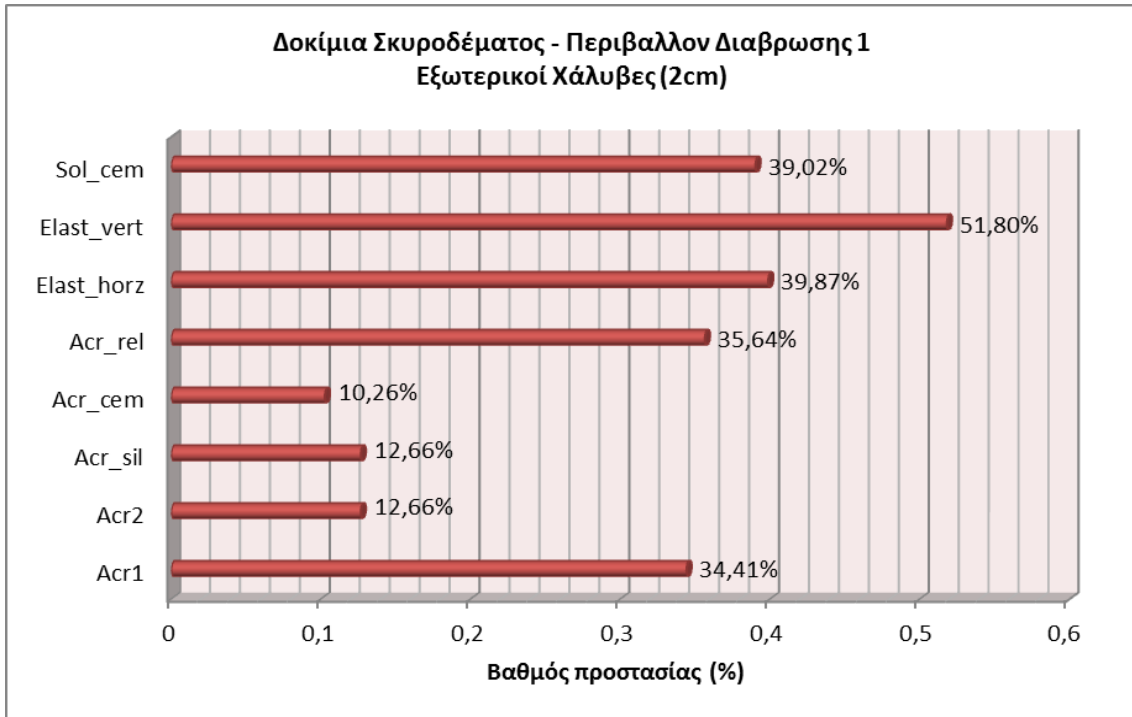
$$\text{βαθμός προστασίας (\%)} = \frac{m' - m''}{m'} 100\% \quad [12.1]$$

**Όπου:**  $m'$  η ποσοστιαία απώλεια βάρους των δοκιμών χωρίς επικάλυψη και  $m''$  η ποσοστιαία απώλεια βάρους των δοκιμών με οργανικές επικαλύψεις

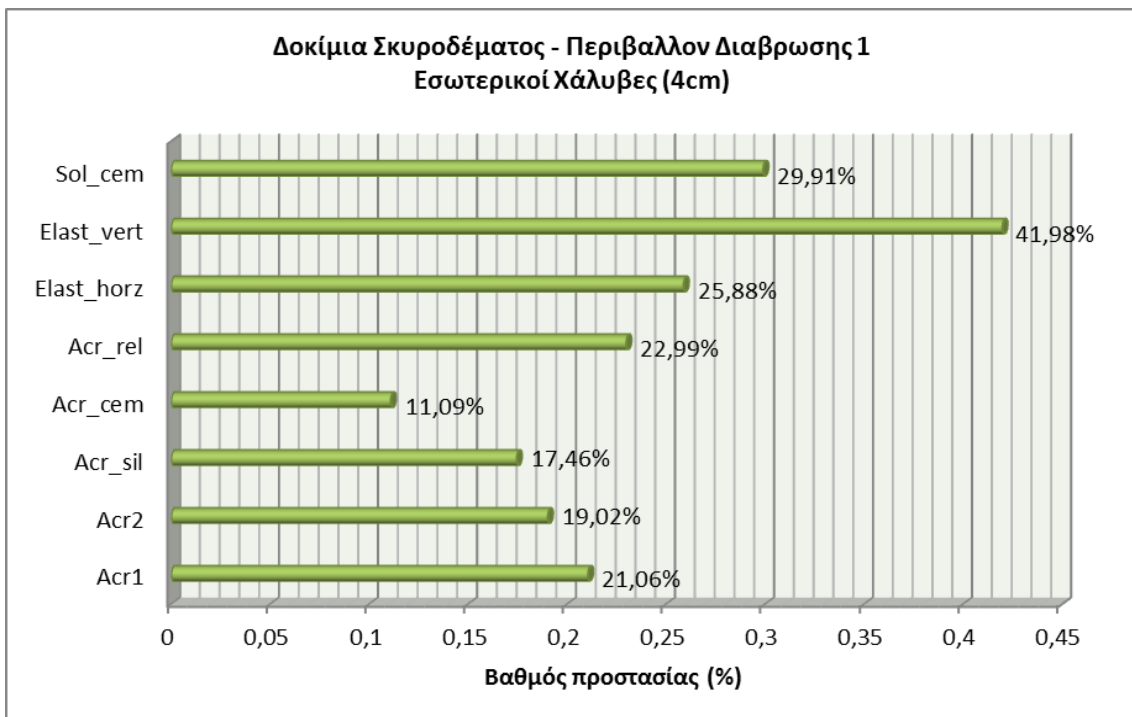
Στα παρακάτω διαγράμματα δίνονται οι βαθμοί προστασίας (%) για όλες τις επικαλύψεις σε όλα τα διαβρωτικά περιβάλλοντα στα οποία ελέγχθησαν.

Αναφορικά με τα δοκίμια σκυροδέματος τα οποία εκτέθηκαν σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 1600 ημέρες, παρατηρήθηκαν πολύ υψηλότεροι ρυθμοί διάβρωσης στους εξωτερικούς χάλυβες συγκριτικά με τους εσωτερικούς λόγω της μικρότερης επικάλυψης σκυροδέματος. Στους εξωτερικούς χάλυβες με πάχος επικάλυψης 2cm παρατηρούνται υψηλότεροι βαθμοί προστασίας από τα δύο ελαστομερή συστήματα και από το τσιμεντόχρωμα διαλύτη, ενώ τα υπόλοιπα ακρυλικά χρώματα αποτυγχάνουν να προστατεύσουν επαρκώς τον οπλισμό (**Σχήμα 12.4**). Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και από το **Σχήμα 12.5**, όπου και πάλι τα ελαστομερή συστήματα *Elast\_vert* και *Elast\_horz* καθώς και το βιομηχανικό χρώμα οργανικού διαλύτου *Sol\_cem* υπερτερούν προσφέροντας μεγαλύτερους βαθμούς προστασίας στους εσωτερικούς χάλυβες με πάχος επικάλυψης 4cm.





**Σχήμα 12.4:** Βαθμός προστασίας οργανικών επικαλύψεων σε εξωτερικούς χάλυβες οπλισμένων σκυροδεμάτων εκτεθειμένων σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 1500 ημερών

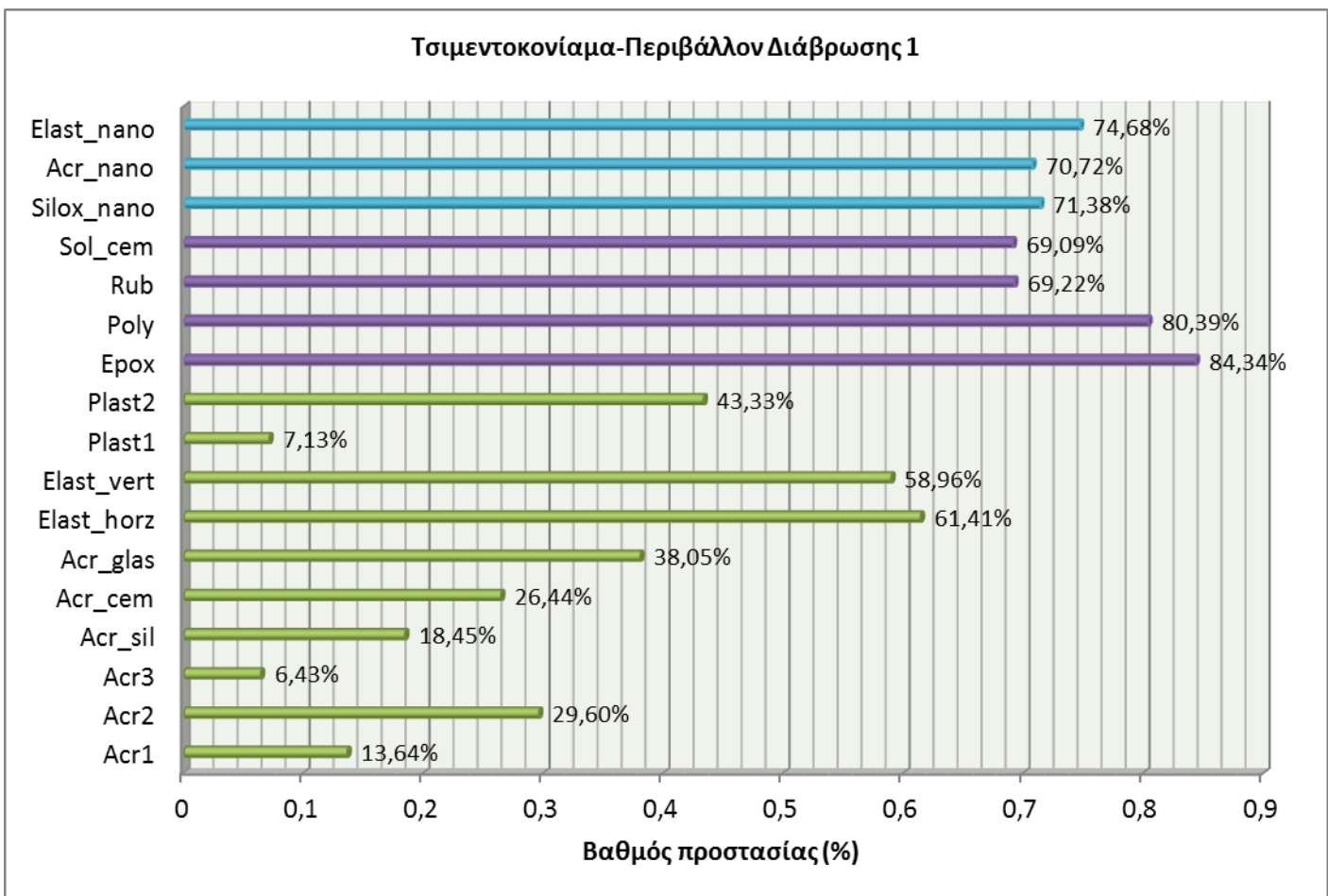


**Σχήμα 12.5:** Βαθμός προστασίας οργανικών επικαλύψεων σε εσωτερικούς χάλυβες οπλισμένων σκυροδεμάτων εκτεθειμένων σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 1500 ημερών

Τα ελαστομερή χρώματα συνήθως χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: α) στα 100% ακρυλικά ελαστομερή και β) στα χρώματα που περιέχουν και άλλες ελαστομερές ρητίνες όπως ρητίνες σιλοκόνης. Τα χρώματα που ανήκουν στην κατηγορία των ελαστομερών-ελαστομερικών περιέχουν και αυτά ακρυλικές ρητίνες με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν όλα τα

πλεονεκτήματα των ακρυλικών χρωμάτων όπως υψηλή υδρατμοπερατότητα, και ανθεκτικότητα και ταυτόχρονα επιτυγχάνουν υψηλότερη ελαστική δομή η οποία δύναται να ακολουθεί τις παραμορφώσεις της επιφάνειας και να γεφυρώνει μικροπόρους. Σαν αποτέλεσμα παρουσιάζονται “ενισχυμένα” σε σχέση με τα 100% ακρυλικά ή τα σύνθετα ακρυλικά χρώματα, αναφορικά με την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση<sup>304</sup>.

Για την μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για 600 ημέρες δοκιμών τσιμεντοκονιάματος, τα βιομηχανικά χρώματα **Epox** και **Poly** έδειξαν τους υψηλότερους βαθμούς προστασίας φτάνοντας μέχρι και στο 84% (**Σχήμα 12.6**), ενώ η προστασία που προσέφεραν οι επικαλύψεις νανοτεχνολογίας υπολογίστηκε λίγο παραπάνω από αυτή των άλλο δύο βιομηχανικών χρωμάτων **Rub** και **Sol\_cem**. Οι συμβατικές επικαλύψεις παρουσίασαν μειωμένη προστασία και από αυτές ξεχωρίζουν τα ελαστομερικά χρώματα σε σχέση με τα ακρυλικά. Τα καθαρά ακρυλικά παρουσιάστηκαν χειρότερα από τα σύνθετα ακρυλικά, ενώ πολύ χαμηλή ήταν και η προσφερόμενη προστασία του πλαστικού χρώματος στην διάβρωση μακράς διαρκείας.

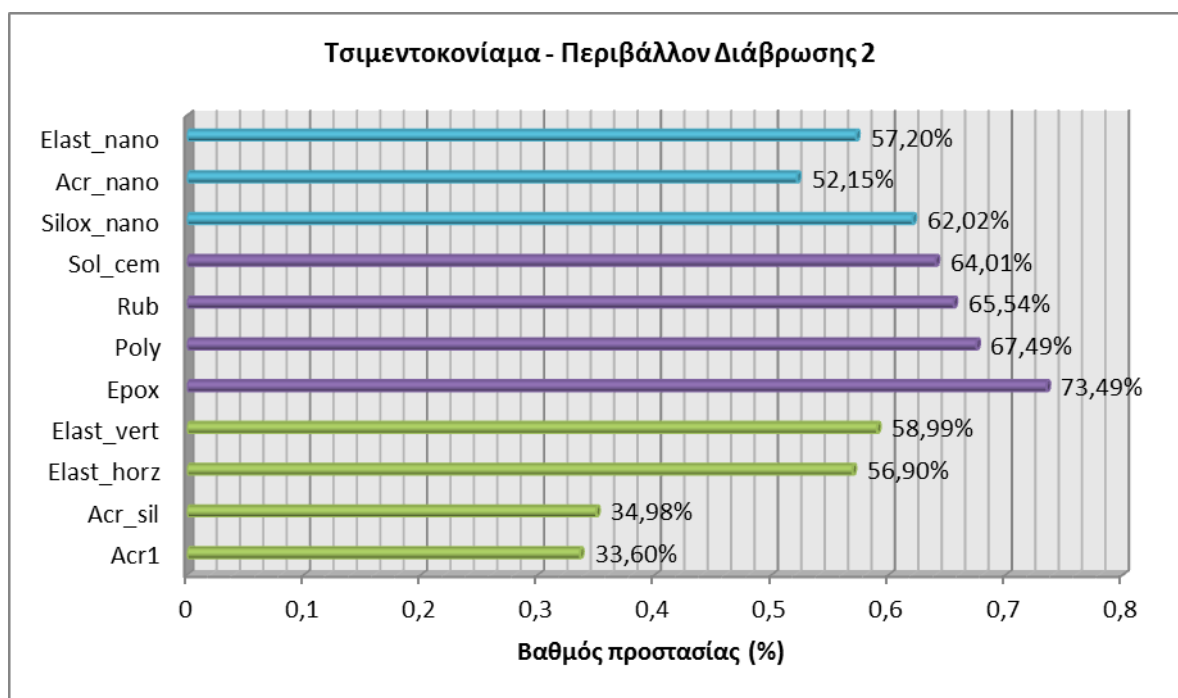


**Σχήμα 12.6:** Βαθμός προστασίας οργανικών επικαλύψεων σε οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα εκτεθειμένα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 600 ημερών

Οι βιομηχανικές επικαλύψεις με εποξειδικές και ρητίνες πολυουρεθάνης παρουσιάζονται περισσότερο αποτελεσματικές στην προστασία του οπλισμού από όλα τα υπόλοιπα χρώματα λόγω του ότι είναι χρώματα ειδικών βιομηχανικών εφαρμογών. Η αποτελεσματικότητά τους είναι επιβεβαιωμένη και σε άλλες ακραίες συνθήκες, πχ. έκθεση

σε οξεία<sup>305</sup>. Τα χρώματα αυτής της κατηγορίας είναι χρώματα χημικής αντίδρασης δύο συστατικών με ισχυρούς οργανικούς διαλύτες που δημιουργούν μια αδιαπέραστη μεμβράνη στο σκυρόδεμα προστατεύοντάς το από το περιβάλλον. Είναι όμως αρκετά δύσκολα στην εφαρμογή τους, επιβαρύνοντας το περιβάλλον λόγω της περιεκτικότητάς τους σε VOC (Volatile Organic Compounds, Πτητικούς Οργανικούς Διαλύτες). Τα άλλα δύο χρώματα βιομηχανικών εφαρμογών (Rub, Sol\_cem) δεν είναι τόσο αποτελεσματικά έναντι διάβρωσης και αυτό εν μέρει οφείλεται στο ότι είναι χρώματα φυσικής ξήρανσης ενός συστατικού με μικρότερες αντοχές στο εξωτερικό περιβάλλον και περιορισμένη σφραγιστική ικανότητα.

Μετά από έκθεση σε θάλαμο αλατονέφωσης δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος για 40 ημέρες (**Σχήμα 12.7**) όλα τα βιομηχανικά χρώματα επέδειξαν καλύτερους βαθμούς προστασίας σε σχέση με τις συμβατικές επικαλύψεις και τα μόνο το σιλοξανικό χρώμα νανοτεχνολογίας παρουσιάστηκε βελτιωμένο συγκριτικά με τα παραδοσιακά συστήματα επικάλυψης. Τα ελαστομερικά χρώματα στο σύνολό τους ήταν καλύτερα από τα ακρυλικά, ενώ το ακρυλικό χρώμα νανοτεχνολογίας ήταν βελτιωμένο συγκριτικά με το συμβατικό ακρυλικό επίχρισμα.

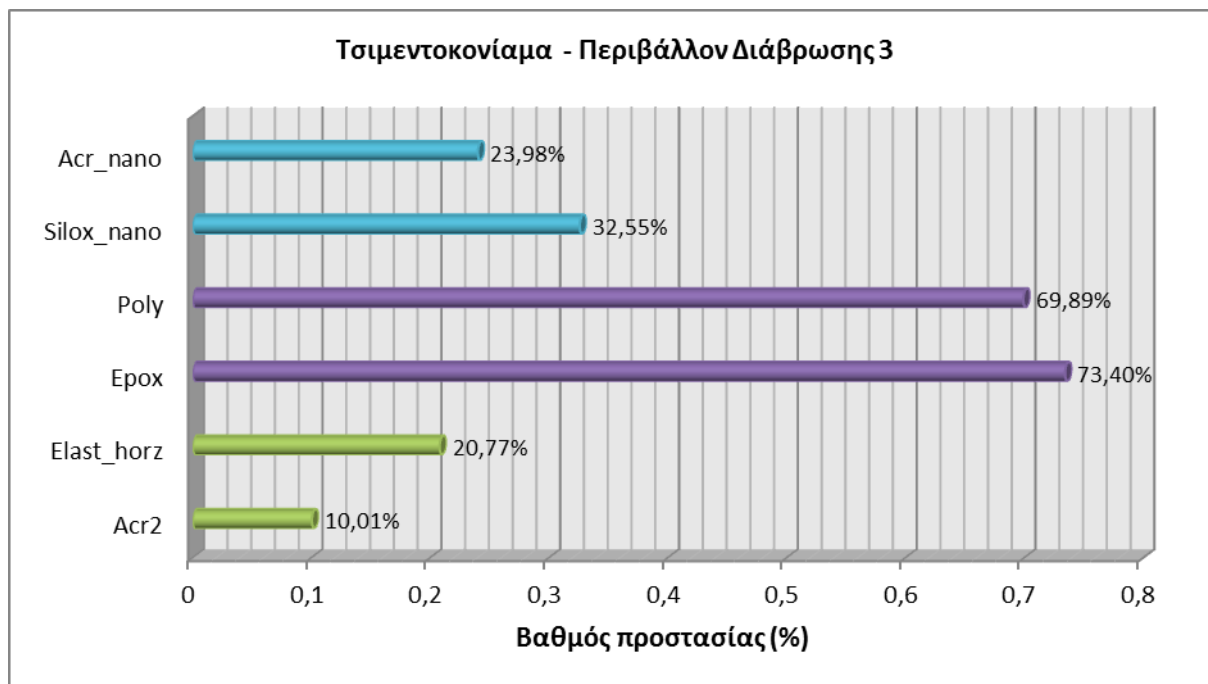


**Σχήμα 12.7:** Βαθμός προστασίας οργανικών επικαλύψεων σε οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα εκτεθειμένα σε θάλαμο αλατονέφωσης για διάστημα 40 ημερών

Η αντοχή των επικαλύψεων στο θάλαμο αλατονέφωσης καθορίζει και το βαθμό προστασίας τους έναντι διάβρωσης στο συγκεκριμένο περιβάλλον. Στις ακραίες αυτές συνθήκες όλες οι βιομηχανικές επικαλύψεις παρουσιάζονται καλύτερες λόγω των βελτιωμένων τους μηχανικών χαρακτηριστικών. Ειδικότερα για το χρώμα πολυουρεθάνης είναι επιβεβαιωμένη η προστασία που παρέχει κάτω από ακραίες συνθήκες όπως είναι σε αποχετευτικά συστήματα έπειτα από έκθεση έως και πέντε ετών<sup>306</sup>.

Τέλος, για έκθεση σε εναλλασσόμενους κύκλους ύγρανσης-ξηράνσης δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος (**Σχήμα 12.8**) εκτιμήθηκε πως οι προσφερόμενοι ρυθμοί προστασίας των βιομηχανικών χρωμάτων **Epoх** και **Poly** ήταν μέχρι 70%, ενώ όλων των υπολοίπων χρωμάτων ήταν τουλάχιστον υποδιπλάσιες. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι η προστασία των

χρωμάτων νανοτεχνολογίας βρέθηκε σε αυτό το περιβάλλον υψηλότερη από των συμβατικών επικαλύψεων.



**Σχήμα 12.8:** Βαθμός προστασίας οργανικών επικαλύψεων σε οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα εκτεθειμένα σε εναλλασσόμενες συνθήκες διάβρωσης για διάστημα 180 ημερών

Από τις ηλεκτροχημικές μετρήσεις Γραμμικής Πόλωσης προσδιορίστηκε η πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης των χαλύβδινων οπλισμών κατά τη διάρκεια της παραμονής τους στο διαβρωτικό περιβάλλον και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με βάση τον Πίνακα 12.1.

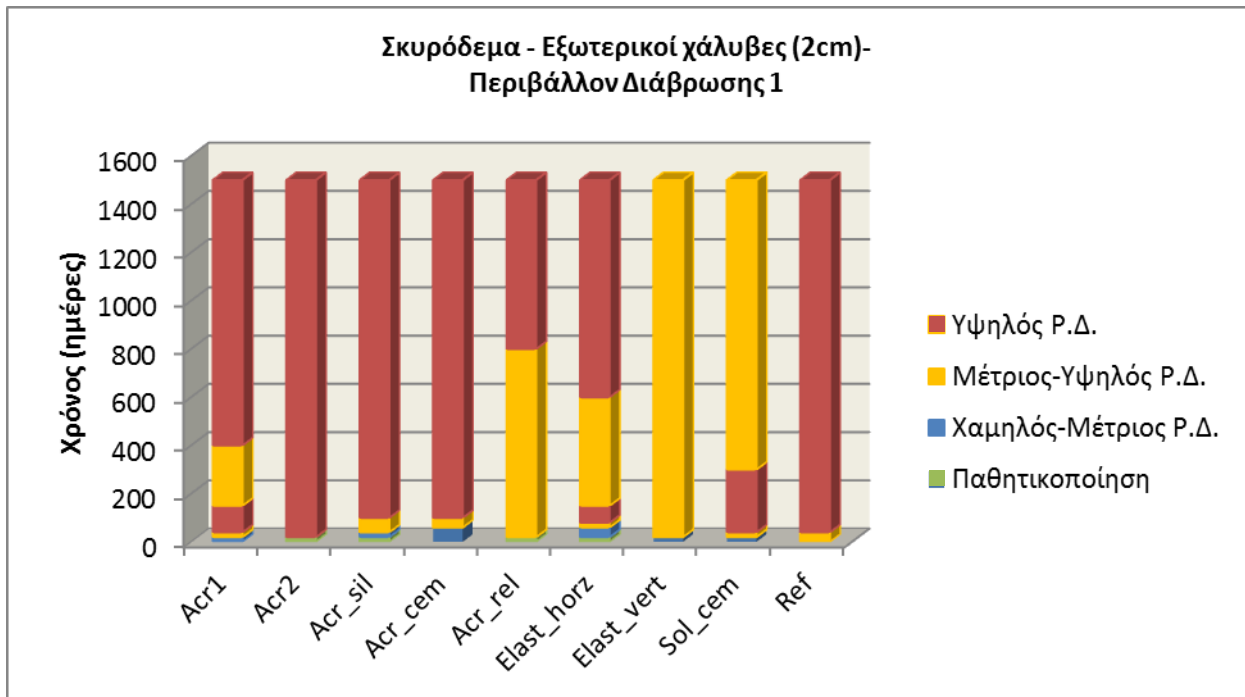
**Πίνακας 12.1:** Συσχέτιση μεταξύ των τιμών της πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης χαλύβδινων οπλισμών σε σκυρόδεμα και της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα<sup>307</sup>

$i_{corr}$ ( $\mu\text{A cm}^{-2}$ )	$R_p$ ( $\text{k}\Omega\text{ cm}^2$ )	Κατάσταση Οπλισμού
<0,1	>260	Παθητική κατάσταση
0,1-0,5	52-260	Χαμηλός ως μέτριος ρυθμός διάβρωσης
0,5-1	26-52	Μέτριος ως υψηλός ρυθμός διάβρωσης
>1	<26	Υψηλός ρυθμός διάβρωσης

Στα παρακάτω ραβδογράμματα αποτυπώνεται η κατάσταση του οπλισμού των επικαλυμμένων δοκιμίων σκυροδέματος ή τσιμεντοκονιάματος κατά την παραμονή τους στο περιβάλλον διάβρωσης. Με κόκκινο χρώμα αποδίδεται το χρονικό διάστημα όπου ο ρυθμός διάβρωσης είναι υψηλός, με κίτρινο χρώμα η περίοδος έκθεσης όπου ο ρυθμός διάβρωσης είναι μέτριος έως υψηλός, το μπλε χρώμα αναφέρεται σε χαμηλούς έως μέτριους ρυθμούς διάβρωσης και τέλος με η πράσινη περιοχή αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα όπου ο χάλυβας ήταν παθητικοποιημένος.

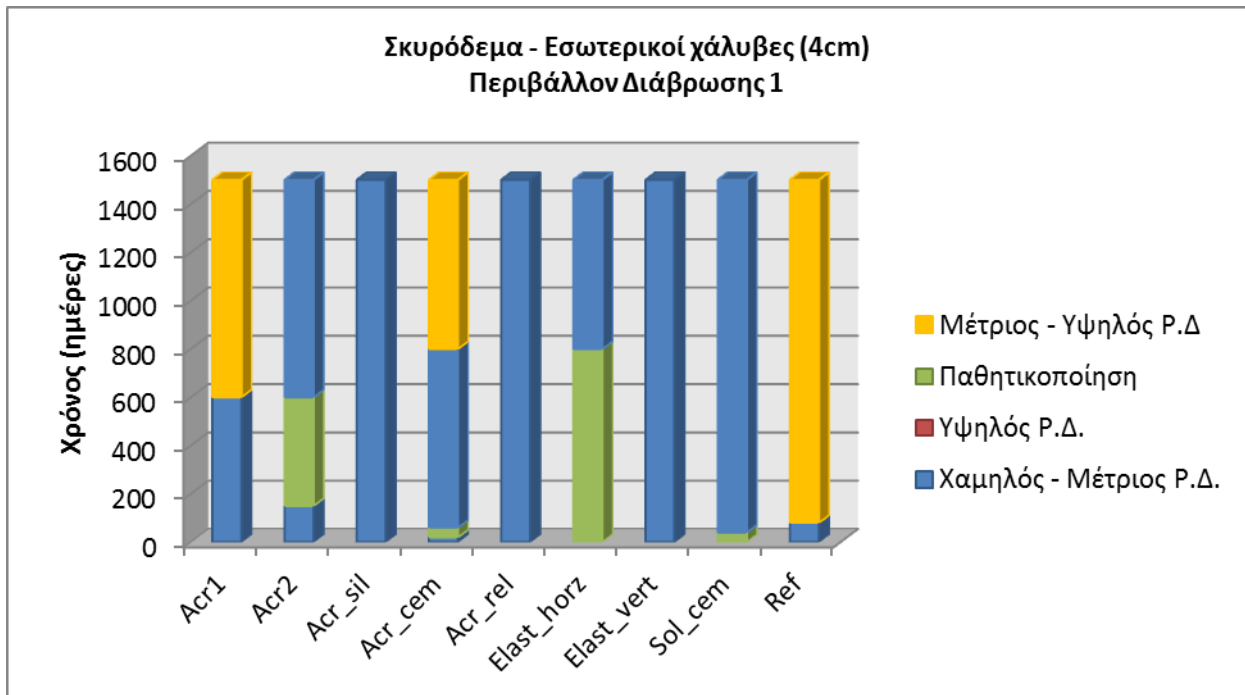
Αναφορικά με την έκθεση των σκυροδεμάτων σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl, εκτός από τα ελαστομερή χρώματα *Elast\_vert*, *Elast\_horz*, το χρώμα οργανικού διαλύτου *Sol\_cem* και την ακρυλική επικάλυψη τύπου ρελιφ *Acr\_rel* που εμφανίζουν μέτριους προς υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης, οι υπόλοιπες επικαλύψεις για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα έκθεσης παρουσιάζουν υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης (**Σχήμα 12.9**). Το γεγονός αυτό

οφείλεται στο μικρό πάχος επικάλυψης (2cm) και στην μεγάλη περίοδο έκθεσης των δοκιμών στο διαβρωτικό περιβάλλον.



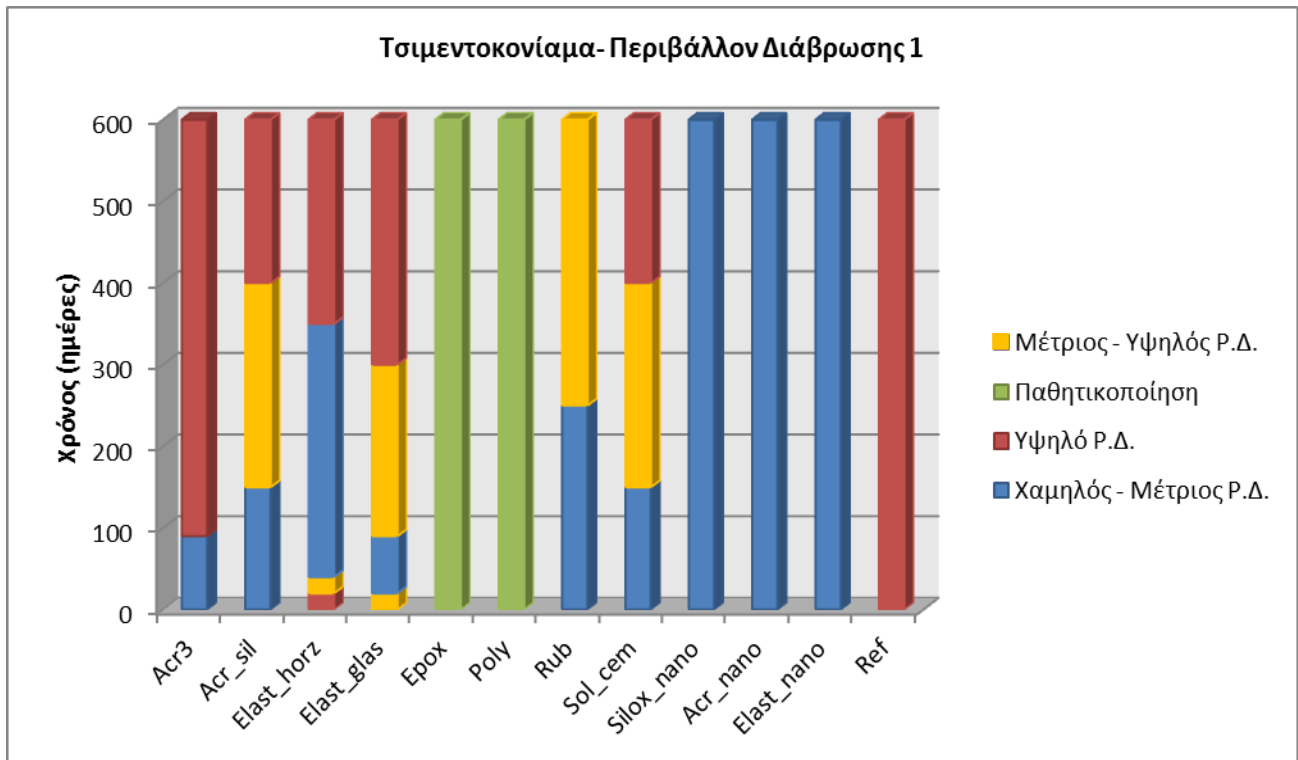
**Σχήμα 12.9:** Κατανομή ρυθμού διάβρωσης οπλισμένων σκυροδεμάτων με οργανικές επικαλύψεις μετά από έκθεση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 1500 ημερών, πάχος επικάλυψης 2cm

Αντίθετα, οι ρυθμοί διάβρωσης μειώνονται αισθητά καθώς αυξάνεται το πάχος επικάλυψης των οπλισμών (4cm), με την βέλτιστη συμπεριφορά να παρουσιάζεται στους χάλυβες των σκυροδεμάτων που ήταν επικαλυμμένα με την ελαστομερή επικάλυψη **Elast\_vert** καθώς παρέμειναν για περίπου 800 ημέρες παθητικοποιημένοι (**Σχήμα 12.10**).



**Σχήμα 12.10:** Κατανομή ρυθμού διάβρωσης οπλισμένων σκυροδεμάτων με οργανικές επικαλύψεις μετά από έκθεση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 1500 ημερών, πάχος επικάλυψης 4cm

Για τα οπλισμένα τσιμεντοκονιάματα που έμειναν μερικώς εμβαπτισμένα για διάστημα 600 ημερών στο περιβάλλον διάβρωσης παρατηρείται πως οι ρυθμοί διάβρωσης μειώνονται λόγω της μικρότερης περιόδου έκθεσης των δοκιμών (**Σχήμα 12.11**). Η βέλτιστη συμπεριφορά επιδεικνύεται από τα βιομηχανικά χρώμα τα **Epox** και **Poly** καθώς οι εγκιβωτισμένοι χάλυβες παραμένουν παθητικοποιημένοι για όλο το χρονικό διάστημα έκθεσης. Τα χρώματα νανοτεχνολογίας παρουσιάζουν πολύ ικανοποιητική συμπεριφορά καθώς οι ρυθμοί διάβρωσης χαρακτηρίζονται από χαμηλοί έως μέτριοι και εμφανίζονται καλύτερα από τα συμβατικά και από τα υπόλοιπα δύο βιομηχανικά χρώματα.

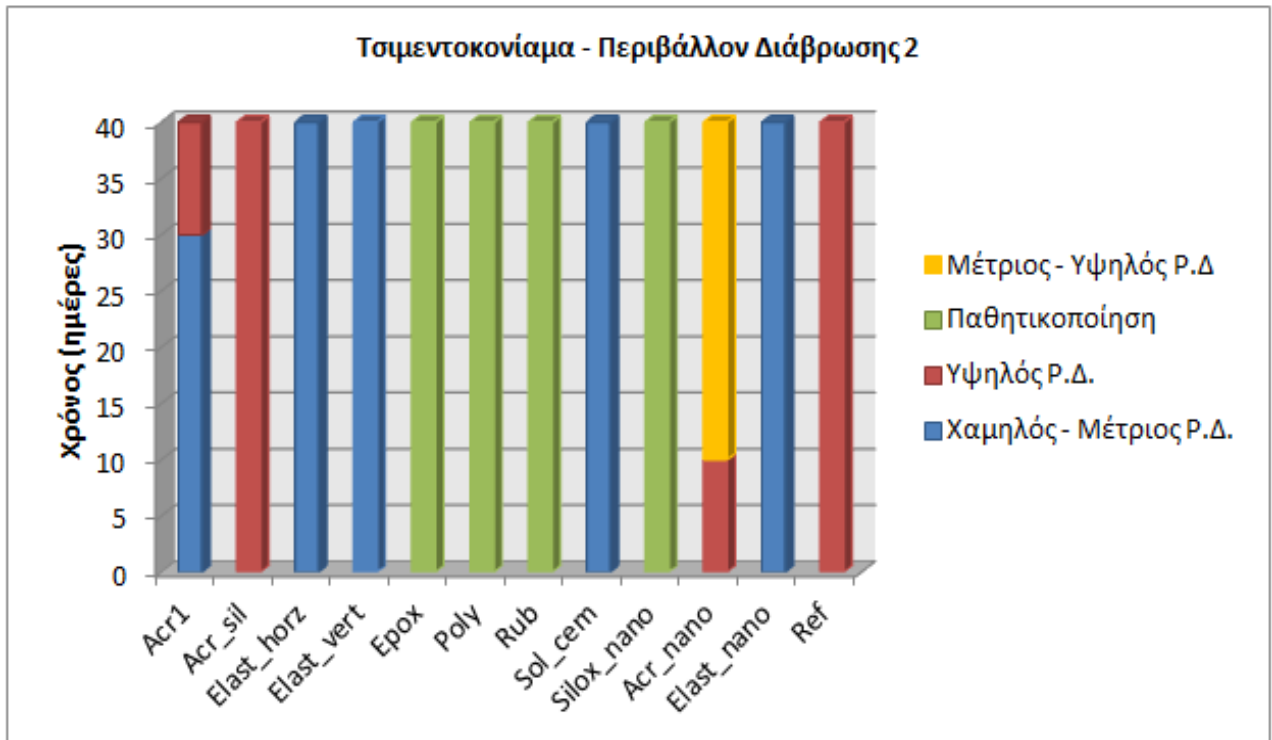


**Σχήμα 12.11:** Κατανομή ρυθμού διάβρωσης οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων με οργανικές επικαλύψεις μετά από έκθεση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl για διάστημα 600 ημερών

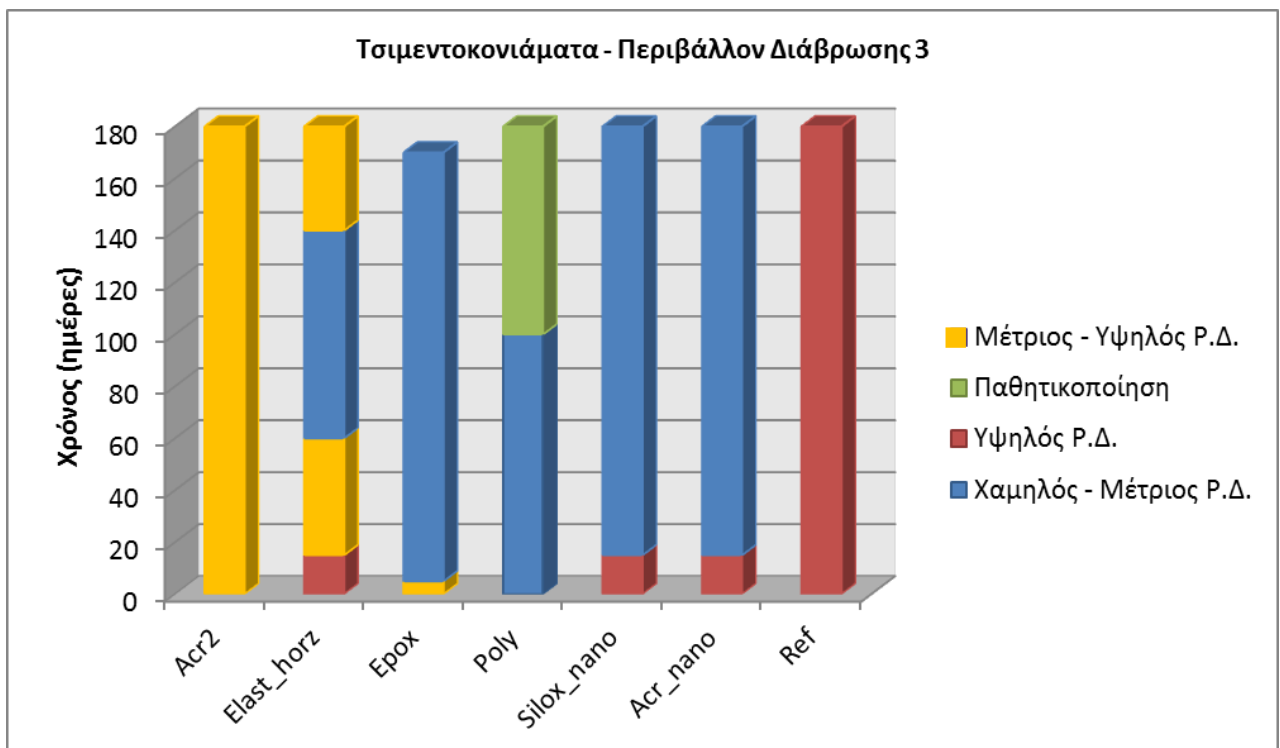
Στο θάλαμο αλατονέφωσης τα δοκίμια οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος παρουσίασαν τους υψηλότερους ρυθμούς διάβρωσης γεγονός που οφείλεται στην υψηλή και σταθερή συγκέντρωση υγρασίας που επικρατούσε καθώς στην αυξημένη συγκέντρωση διαλύματος NaCl (5% κ.β.) (**Σχήμα 12.12**). Κάτω από τις συνθήκες αυτές όλα τα βιομηχανικά χρώματα πλην αυτό του οργανικού διαλύτου παθητικοποιήθηκαν και από τα χρώματα νανοτεχνολογίας την καλύτερη επίδοση είχε το σιλοξανικό χρώμα **Silox\_nano**. Τα ελαστομερή χρώματα υπερέχουν των ακρυλικών, γεγονός που παρατηρήθηκε και στην μερική εμβάπτιση των δοκιμών στο χλωριούχο διάλυμα. Στην σύγκριση ανάμεσα στα συμβατικά και στα χρώματα νανοτεχνολογίας το ελαστομερικό χρώμα νανοτεχνολογίας παρουσιάστηκε ίδιο με το αντίστοιχο συμβατικό του αλλά το ακρυλικό νανόχρωμα εμφανίστηκε βελτιωμένο μόνο σε σχέση με το αντίστοιχο σιλικονούχο ακρυλικό.

Η έκθεση των δοκιμών σε εναλλασσόμενες συνθήκες διάβρωσης (**Σχήμα 12.13**) είχε σαν αποτέλεσμα αρκετά υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης δεδομένης της σχετικά μικρής διάρκειας του πειράματος (180 ημέρες). Τα βιομηχανικά χρώματα **Poly** και **Epox** παρουσίασαν τους χαμηλότερους ρυθμούς και συγκεκριμένα το χρώμα πολυουρεθάνης παρέμεινε σε παθητική

κατάσταση για το μισό της περιόδου έκθεσης. Τα χρώματα νανοτεχνολογίας ήταν καλύτερα από τα συμβατικά και η ελαστομερής συμβατική επικάλυψη ήταν πιο αποτελεσματική από την παραδοσιακή ακρυλική και σε αυτό το περιβάλλον έκθεσης.



**Σχήμα 12.12:** Κατανομή ρυθμού διάβρωσης οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων με οργανικές επικαλύψεις μετά από έκθεση σε θάλαμο αλατονέφωσης για διάστημα 40 ημερών



**Σχήμα 12.13:** Κατανομή ρυθμού διάβρωσης οπλισμένων τσιμεντοκονιαμάτων με οργανικές επικαλύψεις μετά από έκθεση σε εναλλασσόμενες συνθήκες διάβρωσης για διάστημα 180 ημερών



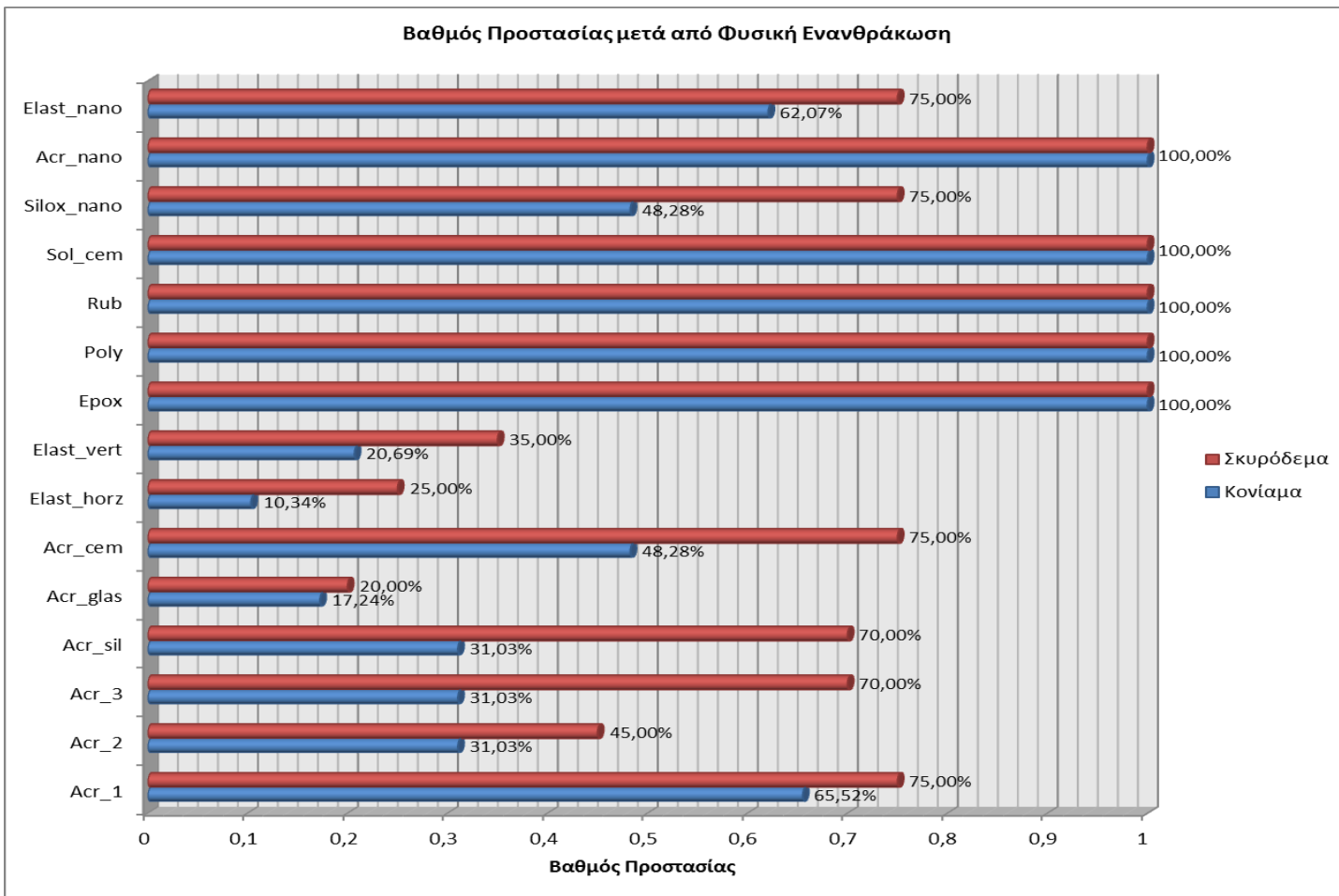
### 12.3 Βαθμός Προστασίας Οργανικών Επικαλύψεων έναντι Ενανθράκωσης

Δοκίμια τσιμεντοκονιάματος και σκυροδέματος εκτέθηκαν σε συνθήκες φυσικής και τεχνητής ενανθράκωσης και υπολογίστηκε ο προσφερόμενος βαθμός προστασίας με βάση τον τύπο:

$$\text{βαθμός προστασίας(\%)} = \frac{x' - x''}{x'} \quad [12.12.2]$$

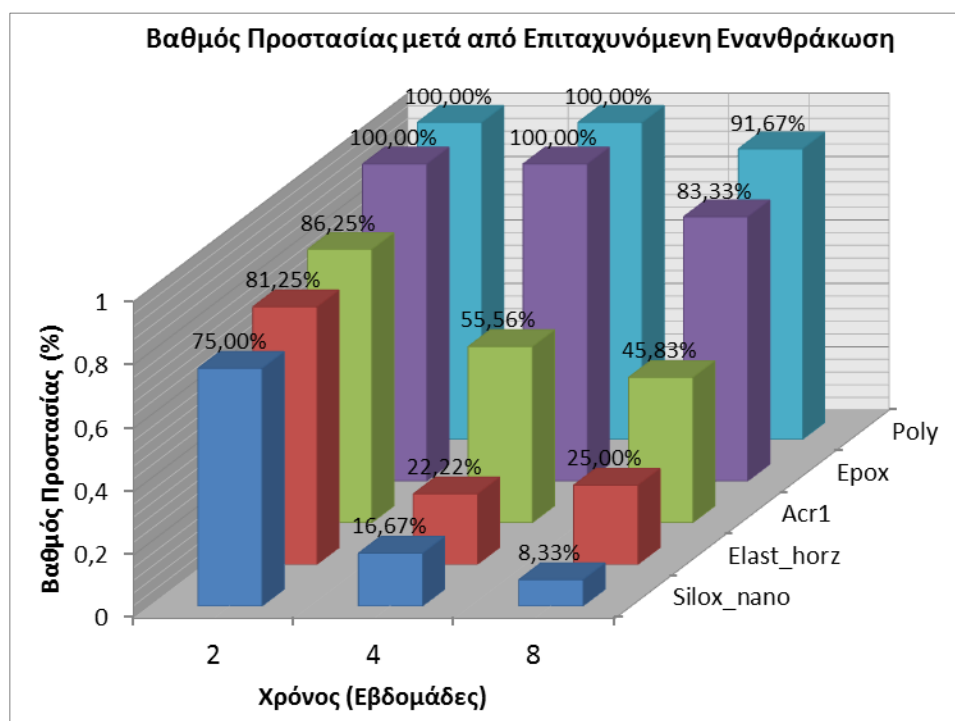
Όπου:  $x'$  το βάθος ενανθράκωσης των δοκιμών χωρίς επικάλυψη και  $x''$  το βάθος ενανθράκωσης των επικαλυμμένων δοκιμών

Για τα δοκίμια που εκτέθηκαν σε φυσικές συνθήκες παρατηρείται μεγαλύτερο ποσοστό προστασίας στα δοκίμια σκυροδέματος από ότι στα κονιάματα, γεγονός αναμενόμενο λόγω της καλύτερης ποιότητας του υποστρώματος από άποψη πορώδους. Στο **Σχήμα 12.14** φαίνεται πως όλες οι βιομηχανικές επικαλύψεις (*Epox, Poly, Rub, Sol\_cem*) καθώς και η ακρυλική και ελαστομερής επικάλυψη νανοτεχνολογίας *Acr\_nano* και *Elast\_nano* έδειξαν την καλύτερη αντίσταση σε ενανθράκωση παρουσιάζοντας μηδενικό βάθος ενανθράκωσης. Από τις υπόλοιπες μετρήσεις δείχνεται ότι τα ελαστομερή χρώματα υπερέχουν των ακρυλικών ενώ τα σιλοξανικό χρώμα νανοτεχνολογίας εμφανίζεται το ίδιο αποτελεσματικό με τα αντίστοιχα συμβατικά του.



**Σχήμα 12.14:** Βαθμός προστασίας που προσέφεραν οι οργανικές επικαλύψεις σε δοκίμια σκυροδέματος και τσιμεντοκονιάματος εκτεθειμένα σε φυσική ενανθράκωση για διάστημα 20 μηνών

Τα αποτελέσματα του προσφερόμενου βαθμού προστασίας μετά από έκθεση σε θάλαμο ενανθράκωσης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 12.15**. Όπως φαίνεται η εποξειδική και η επικάλυψη πολυουρεθάνης εμφανίζουν βάθος ενανθράκωσης μόνο μετά από 8 εβδομάδες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον. Από τις υπόλοιπες επικαλύψεις αποδεικνύεται πως η ακρυλική επικάλυψη υπερέχει συγκριτικά με την ελαστομερική αλλά και την επικάλυψη νανοτεχνολογίας. Στις επιταχυνόμενες συνθήκες τα ακρυλικά χρώματα παρουσιάζονται καλύτερα από τα υπόλοιπα γεγονός που παρατηρήθηκε και κατά τον προσδιορισμό του συντελεστή διάχυσης CO<sub>2</sub>. Η σιλοξανική επικάλυψη νανοτεχνολογίας εμφανίζεται μικρότερη προστασία συγκριτικά με τις παραδοσιακές ακρυλικές και ελαστομερές διασπορές και το ίδιο γεγονός παρατηρήθηκε και στην φυσική έκθεση των δοκιμίων.



**Σχήμα 12.15:** Βαθμός προστασίας που προσέφεραν οι οργανικές επικαλύψεις σε δοκίμια τιμεντοκονιάματος εκτεθειμένα σε επιταχυνόμενη ενανθράκωση για διάστημα 8 εβδομάδων

Συμπερασματικά η επιλογή μιας οργανικής επικάλυψης εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Σε επιφάνειες που αντιμετωπίζουν επαφή με νερό μόνο τα βιομηχανικά χρώματα μπορούν να δώσουν ικανό επίπεδο προστασίας. Το ίδιο ισχύει για έντονη παρουσία υγρασίας άνω του 90%. Στις συνθήκες αυτές η επιλογή των βιομηχανικών χρωμάτων είναι σχεδόν υποχρεωτική παρά την επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

Σε πιο ήπιο περιβάλλον τα χρώματα νανοτεχνολογίας υπερτερούν των συμβατικών. Θα πρέπει να σημειωθεί πως οι συγκεκριμένες οργανικές επικαλύψεις έχουν εμφανιστεί τα τελευταία χρόνια και επομένως αναμένεται να βελτιωθούν.

Μεταξύ των συμβατικών επικαλύψεων τα ελαστομερή χρώματα είναι προτιμότερα παρουσία χλωριόντων, ενώ σε συνθήκες ενανθράκωσης οι ακρυλικές διασπορές πλησιάζουν την απόδοση των ελαστομερών.



### 13. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάστηκε η προστασία που προσφέρουν διάφορα είδη οργανικών επικαλύψεων στο οπλισμένο σκυρόδεμα όταν εφαρμόζονται στην επιφάνεια σκυροδέματος ή κονιάματος το οποίο εκτίθεται σε συνθήκες διάβρωσης από χλωριόντα και CO<sub>2</sub>. Τα είδη των οργανικών επικαλύψεων που εξετάστηκαν χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- **Βιομηχανικά Χρώματα:** ελέχθησαν συγκεκριμένα ένα εποξειδικό χρώμα, μια επικάλυψη πολουρεθάνης, ένα τσιμεντόχρωμα οργανικού διαλύτου και μια επικάλυψη χλωριωμένου καουτσούκ.
- **Συμβατικές Επικαλύψεις:** συγκεκριμένα μελετήθηκαν 100% ακρυλικά χρώματα, σύνθετα ακρυλικά χρώματα (σιλικόνης, τσιμεντόχρωμα νερού, ακρυλικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού, ακρυλικό τύπου ρελιέφ και ελαστομερικά χρώματα), καθώς και πλαστικά χρώματα.
- **Χρώματα με προϊόντα νανοτεχνολογίας:** συγκεκριμένα μελετήθηκαν ένα ακρυλικό, ελαστομερές και σιλοξανικό νανόχρωμα, τα οποία προορίζονται για συμβατικές χρήσεις. Τα εν λόγω συστήματα επικαλύψεων έχουν όλα τα χαρακτηριστικά των συμβατικών συστημάτων επικάλυψης και επιπλέον παρουσιάζουν και άλλες ιδιότητες όπως υψηλή αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία, αντιβακτηριδιακή δράση, αντοχή σε μύκητες κ.α.

Η μελέτη των εξεταζόμενων οργανικών επικαλύψεων χωρίστηκε σε δύο ενότητες: α) την αποτίμηση βασικών φυσικοχημικών και μηχανικών ιδιοτήτων που επηρεάζουν έμμεσα την διάβρωση και β) την προστασία που προσφέρουν οι οργανικές επικαλύψεις στον οπλισμό του σκυροδέματος από χλωριόντα και από CO<sub>2</sub> εφόσον οι παραπάνω παράγοντες αποτελούν τους δύο βασικούς μηχανισμούς διάβρωσης του Ο.Σ. Η αποτίμηση της διάβρωσης από χλωριόντα επετεύχθη μέσω ηλεκτροχημικών μετρήσεων και η αξιολόγηση της αντίστασης των επικαλύψεων σε CO<sub>2</sub> πραγματοποιήθηκε με μέτρηση του βάθους ενανθράκωσης. Στη συνέχεια αναφέρονται τα γενικά συμπεράσματα της διατριβής αλλά δεν πρέπει να διαφύγει της προσοχής το γεγονός ότι οργανικές επικαλύψεις με οργανικούς διαλύτες επιβαρύνουν το περιβάλλον σημαντικά σε σύγκριση με τις οργανικές επικαλύψεις υδατικών διασπορών.

Από την παρούσα Διδακτορική Διατριβή προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

#### ➔ **Βιομηχανικές Επικαλύψεις:**

- ☑ Οι επικαλύψεις με εποξειδικές και με ρητίνες πολουρεθάνης παρουσιάστηκαν τα πιο αποτελεσματικά χρώματα αναφορικά με όλους τους συντελεστές διάχυσης που μετρήθηκαν.
- ☑ Παρουσίασαν επίσης τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες επιδεικνύοντας 43% μεγαλύτερη αντοχή σε πρόσφυση από τα καλύτερα συμβατικά και χρώματα νανοτεχνολογίας.

- ☑ Αναφορικά με την διάβρωση από Cl<sup>-</sup> και από CO<sub>2</sub> εμφανίστηκαν καλύτερα από όλα τα υπόλοιπα χρώματα γεγονός που αποτυπώνεται σε όλες τις μετρήσεις.
- ☑ Αναποτελεσματικά θεωρούνται μόνο από άποψη υδρατμοπερατότητας εφόσον παρουσίασαν πολύ χαμηλούς συντελεστές διάχυσης γεγονός που δεν επιτρέπει την διαπνοή των συστημάτων αυτών.
- ✗ Τα άλλα δύο βιομηχανικά χρώματα, το χλωριωμένο καουτσούκ και το τσιμεντόχρωμα διαλύτη, επέδειξαν μέτριες μηχανικές ιδιότητες και μέτρια αποτελεσματικότητα έναντι διάβρωσης σε χλωριόντα και τα χρώματα νανοτεχνολογίας υπερείχαν σε αρκετές μετρήσεις.

#### ➔ Συμβατικές Επικαλύψεις:

- ☑ Τα ελαστομερή χρώματα ήταν πιο αποτελεσματικά από τα ακρυλικά σε όλες τις ιδιότητες πλην της ενανθράκωσης σε επιταχυνόμενες συνθήκες όπου υπερείχαν οι ακρυλικές διασπορές.
- ☑ Στα πειράματα διάβρωσης βρέθηκε μεγαλύτερος βαθμός προστασίας από τις ελαστομερικές επικαλύψεις σε σχέση με τις ακρυλικές σε όλα τα περιβάλλοντα έκθεσης και στα δύο υποστρώματα που ελέχθησαν.
- ☑ Τα ακρυλικά χρώματα επέδειξαν καλή συμπεριφορά στο θάλαμο ενανθράκωσης δίνοντας τις υψηλότερες τιμές ισοδύναμου πάχους αέρα.
- ✗ Τα υπόλοιπα ακρυλικά χρώματα βρέθηκαν αναποτελεσματικά τόσο στις φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες όσο και στα πειράματα διάβρωσης.

#### ➔ Επικαλύψεις Νανοτεχνολογίας:

- ☑ Παρουσίασαν την βέλτιστη συμπεριφορά ανάμεσα στις δύο βασικότερες φυσικοχημικές ιδιότητες υδατοπερατότητας και υδρατμοπερατότητας επιδεικνύοντας υψηλότερες τιμές διαπερατότητας υδρατμών από τα συμβατικά χρώματα και ταυτόχρονα χαμηλότερη διαπερατότητα νερού.
- ☑ Υπερτερούσαν έναντι των συμβατικών στις μηχανικές ιδιότητες που μελετήθηκαν.
- ☑ Στις μετρήσεις διάβρωσης που πραγματοποιήθηκαν τα χρώματα νανοτεχνολογίας παρουσίασαν 19%, 5% και 40% μεγαλύτερους βαθμούς προστασίας από τα καλύτερα συμβατικά χρώματα στα τρία περιβάλλοντα διάβρωσης.
- ☑ Η προστασία των επικαλύψεων νανοτεχνολογίας έναντι ενανθράκωσης ήταν πολύ ικανοποιητική εφόσον στην φυσική έκθεση των δοκιμών υπερτερούσαν σε σχέση με όλα τα συμβατικά χρώματα.
- ✗ Εμφάνισαν μειωμένη αντοχή στο θάλαμο ενανθράκωσης παρουσιάζοντας υψηλά βάρη ενανθράκωσης.

Παρακάτω παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας σχετικά με την επίδοση των επικαλύψεων σε όλες τις μετρήσεις. Ο χαρακτηρισμός των επικαλύψεων γίνεται ως εξής:

+ : κακή επίδοση, ++ : μέτρια επίδοση, +++ : καλή επίδοση, - : δεν εξετάσθει

				ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ					ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ			ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΠΟ Cl <sup>-</sup>			ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΠΟ CO <sub>2</sub>	
				Υδατοπερατότητα	Υδρατμοπερατότητα	Συνδυσασμός	Διαπερατότητα Cl <sup>-</sup>	Ισοδύναμο πάχος αέρα CO <sub>2</sub>	Pull-off	Cross-cut	Θάλαμος αλατονέφωσης	Μακράς Διαρκείας	Επιταχυνόμενη	Εναλλασσόμενη	Φυσική	Επιταχυνόμενη
ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ	Ακρυλικά	100% Ακρυλικά	Acr1	++	+++	+++	-	+++	++	++	+	+	+	-	++	++
			Acr2	+	+++	++	-	+	+	++	-	+	-	+	+	-
			Acr3	++	++	+	+	-	+	++	-	+	-	-	++	-
	Σύνθετα	Ελαστομερή	Acr_sil	+	+++	++	+	+	+	+	+	+	+	-	++	-
			Acr_glas	++	++	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-
			Acr_cem	++	++	+	-	+++	++	++	-	+	-	-	++	-
			Acr_rel	++	++	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
	Πλαστικά	Ελαστομερή	Elast_horz	++	+++	+++	-	++	++	+++	+++	++	++	+	+	+
			Elast_vert	++	+++	+++	++	+	+	++	+++	++	++	-	+	-
	Πλαστικά	Ελαστομερή	Plast1	++	++	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-
Plast2			++	+++	+++	-	++	+	-	-	+	-	-	-	-	
ΒΙΟΜΗΧΑ-ΝΙΚΕΣ			Erox	+++	++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
			Poly	+++	++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
			Rub	++	++	+	+++	++	++	+++	+++	++	++	-	+++	-
			Sol_cem	++	++	+	++	+	+	+	+++	++	++	-	+++	-
NANO			Silox_nano	++	+++	+++	++	+	+	++	++	++	++	-	++	+
			Acr_nano	++	+++	+++	++	++	++	+	++	++	++	++	+++	-
			Elast_nano	++	+++	+++	+++	++	++	++	++	++	++	++	++	-





#### 14. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΙΖΟΜΕΝΗΣ ΈΡΕΥΝΑΣ

**Μ**ε την παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνήθηκε σε βάθος η προστασία που προσφέρουν οι οργανικές επικαλύψεις όλων των κατηγοριών στην προστασία του οπλισμού του σκυροδέματος από την διάβρωση λόγω χλωριόντων και CO<sub>2</sub>. Επίσης ελέχθησαν τα χρώματα νέας γενιάς με προϊόντα νανοτεχνολογίας έναντι μακροχρόνιας διάβρωσης σε διαφορετικά περιβάλλοντα έκθεσης.

Η συνέχιση της έρευνας μπορεί να συνεχισθεί προκειμένου:

- ⇒ Να μελετηθούν περισσότερες μηχανικές ιδιότητες των νέων χρωμάτων νανοτεχνολογίας
- ⇒ Να εκτιμηθεί η αντοχή των χρωμάτων νανοτεχνολογίας σε UV ακτινοβολία
- ⇒ Να συνδυαστούν τα χρώματα νανοτεχνολογίας με αποτελεσματικούς αναστολείς διάβρωσης ώστε να μελετηθεί ο προσφερόμενος βαθμός προστασίας



### Δημοσιεύσεις σε Έγκριτα Επιστημονικά Περιοδικά

1. Zafeiropoulou, T.; Rakanta, E.; Batis, G., "Performance evaluation of organic coatings against corrosion in reinforced cement mortars", *Progress in Organic Coatings*, Volume 72, issue 1-2 (2011), pp. 175-180.
2. Th. Zafeiropoulou, E. Rakanta and G. Batis, "Industrial Coatings for High Performance Application: Physico- chemical Characteristics and Anti-Corrosive Behavior," *Brick and mortar research*, Chapter 9, 2012, pp. 245-258.
3. Rakanta, E.; Zafeiropoulou, Th.; Batis, G., "Corrosion protection of steel with DMEA-based organic inhibitor", *Construction and Building Materials*, Volume 44, issue (July, 2013), p. 507-513.
4. Theodosia Zafeiropoulou, Eleni Rakanta, George Batis , "Carbonation Resistance and Anticorrosive Properties of Organic Coatings for Concrete Structures", *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 2013, 3, 67-74. *Published Online February 2013* (<http://www.scirp.org/journal/jsemat>), (<http://dx.doi.org/10.4236/jsemat.2013.31A010>).
5. Ioannis Vyrides, Eleni Rakanta, Theodosia Zafeiropoulou, George Batis, "Efficiency of Amino Alcohols as Corrosion Inhibitors in Reinforced Concrete", *Open Journal of Civil Engineering* Vol.3 No.2A (2013), Article ID:33039, 8 pages. DOI:10.4236/ojce.2013.32A001. <http://dx.doi.org/10.4236/ojce.2013.32A001>  
*Published Online June 2013* (<http://www.scirp.org/journal/ojce>)

### Ανακοινώσεις σε Διεθνή Συνέδρια

1. Theodosia Zafeiropoulou; Eleni Rakanta; George Batis, "Performance evaluation of organic coatings against corrosion in reinforced cement mortars" XXX FATIPEC CONGRESS – Genoa, Italy, November 9–11, 2010 (pp. 175-180).
2. Th. Zafeiropoulou, E. Rakanta, G. Batis, "Correlation between electrochemical measurements and physicochemical characteristics in specimens covered with organic coatings", 9th European Symposium on Electrochemical Engineering, 9th ESEE, Chania, Greece, 19- 23 June, 2011.
3. Th. Zafeiropoulou, E. Rakanta and G. Batis, "Novel Coatings: Physicochemical Characteristics and Corrosion Evaluation," 12th International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues, Prague, 30 October-1 November 2012, 24 Pages
4. Theodosia Zafeiropoulou, Eleni Rakanta, George Batis, "Reinforced Concrete Corrosion Control with the Usage of Nano Coatings: Comparison with Traditional and High Performance Application Systems", UKIERI Concrete Congress Innovations in Concrete Construction, 5 - 8 March 2013, (Punjab) India.
5. Theodosia Zafeiropoulou, Eleni Rakanta, George Batis, «Nanotechnology coatings for corrosion control of cement mortar specimens under wet-dry cycles», Spring World

Congress on Engineering and Technology (SCET), April.16-18, 2014, Shanghai China,  
PAPER ACCEPTED FOR ORAL PRESENTATION

6. Theodosia Zafeiropoulou, Eleni Rakanta, George Batis, "Organic coatings in cement mortar specimens for corrosion prevention under wet-dry Cycles", 10th Coatings Science International COSI, Noordwijk, The Netherlands 23 June - 27 June 2014.

#### **Ανακοινώσεις σε Εθνικά Συνέδρια**

1. Θ. Ζαφειροπούλου, Ε. Ρακαντά, Γ. Μπατής, «Προστασία Οπλισμένου Σκυροδέματος με Οργανικές Επικαλύψεις σε Αστικό και Θαλάσσιο Περιβάλλον», 11<sup>ο</sup> Συμπόσιο Χρωμάτων «Έρευνα και Τεχνολογία Χρωμάτων, Βερνικιών & Μελανιών», σελ305-320, Αθήνα 2009.
2. Θ. Ζαφειροπούλου, Ε. Ρακαντά, Γ. Μπατής, «Προστασία οπλισμένου σκυροδέματος με οργανικές επικαλύψεις σε αστικό και θαλάσσιο περιβάλλον», 11ο Συμπόσιο Χρωμάτων, Αθήνα, 306, 2010
3. Ο. Ντηλιά, Θ. Ζαφειροπούλου, Ε. Ρακαντά, Γ. Μπατής, "Διάβρωση οπλισμού τσιμεντοκονιάματος με οργανικές επικαλύψεις σε εναλλασσόμενο διαβρωτικό περιβάλλον", 9ο Πανελλήνιο συνέδριο χημικής Μηχανικής, Αθήνα, 23-26 Μαΐου 2013

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- <sup>1</sup>prEN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings”, European Committee for Standardization, 2002.
- <sup>2</sup>J.R. Davis, “Corrosion: Understanding the basics”, ASM International, The Materials Information Society, U.S.A, 2004
- <sup>3</sup>ISO 8044 -99, “Corrosion of Metals and Alloys – Basic Terms and Definitions”
- <sup>4</sup>Θ.Ν. Σκουλικίδης, “Διάβρωση και Συντήρηση των Δομικών Υλικών των Μνημείων”, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2000
- <sup>5</sup>Ν. Κουλουμπή, *Διάβρωση και Προστασία*, Ε.Μ.Π, Αθήνα, 2010
- <sup>6</sup>Θ. Σκουλικίδης, Π. Βασιλείου, “Διάβρωση και Προστασία Υλικών”», Εκδόσεις Συμεών, Β’ Έκδοση, Αθήνα, 2000
- <sup>7</sup>J. Kruger, “Electrochemistry of corrosion” The Johns Hopkins University, 2001
- <sup>8</sup>D. A. Jones, “Principles and prevention of corrosion”, Prentice – Hall, 1992.
- <sup>9</sup>B.Y.R. Surnam “Anti-Corrosion Methods and Materials”, Vol. 60, No. 2, (2013) 73–83 Emerald Group Publishing Limited [ISSN 0003-5599], [DOI 10.1108/00035591311308047]
- <sup>10</sup>R.W. Revie, H. H. Uhlig, “Corrosion and corrosion control: An Introduction to corrosion science and engineering”, John Wiley & Sons, Inc., 4th edition, N.Jersey 2008
- <sup>11</sup>Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States, Publication No. FHWA-RD-01-156
- <sup>12</sup>P.W. Atkins, “Φυσικοχημεία, Τόμος “, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2001
- <sup>13</sup>M. G. Fontana, “Corrosion Engineering”, McGraw-Hill, New York 1978
- <sup>14</sup>Guang-Ling Song, Zhenqing Xu, “Crystal orientation and electrochemical corrosion of polycrystalline Mg, Corrosion Science”, Volume 63, October 2012, pp. 100–112
- <sup>15</sup>E. McCafferty, “Introduction to Corrosion Science”, Springer, USA, 2010
- <sup>16</sup>[http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/pourbaix/pourbaix\\_example.php](http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/pourbaix/pourbaix_example.php)
- <sup>17</sup>K.R. Trethewey, J. Champerlain, “Corrosion for Science and Engineering”, Longman 2nd Edition, London 1998
- <sup>18</sup>N. Perez, “Electrochemistry and Corrosion Science”, Springer US, 2004
- <sup>19</sup>R. S. Razavi, “Recent Researches in Corrosion Evaluation and Protection”, InTech, 2012
- <sup>20</sup>J. C. Scully, “The fundamentals of corrosion”, 3rd edition, Pergamon Press, 1990
- <sup>21</sup>[http://www.engineeringtoolbox.com/oxygen-steel-pipe-corrosion-d\\_1170.html](http://www.engineeringtoolbox.com/oxygen-steel-pipe-corrosion-d_1170.html)
- <sup>22</sup>J. Xiao, S. Chaudhuri, “Predictive modeling of localized corrosion: An application to aluminum alloys”, Electrochemical Acta, Vol. 56, No. 16, 2011, pp.5630–5641
- <sup>23</sup>Ε.Κ.Ω.Σ 2003, Κεφάλαιο 5, Ανθεκτικότητα σε διάρκεια και γεωμετρικά δεδομένα
- <sup>24</sup>G. Batis E. Rakanta, “Corrosion of steel reinforcement due to atmospheric pollution”, Cement and Concrete Composites, Vol. 27, Issue 2, 2005, pp 269–275
- <sup>25</sup>U. R. Evans, ‘An introduction to Metallic Corrosion”, 3rd edition, E. Arnold Ltd., London, 1981
- <sup>26</sup>DIN EN ISO 12944-2 (1998-07), “Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Part 2: Classification of environments” (ISO 12944-2:1998)
- <sup>27</sup>A. Bayliss, D.H. Deacon, “Steelwork corrosion control”, Spon Press, 2nd edition, 2002
- <sup>28</sup><http://events.nace.org/library/corrosion/AtmCorros/mechani1.asp>
- <sup>29</sup>Chadler, K. A., “Marine offshore corrosion”, Butterworths, London, 1984
- <sup>30</sup>J.D. Morrison, “Report on the Relative Corrosivity of Atmospheres at Various Distances from the Seacoast”, NASA-KSC Report MTB 099-74
- <sup>31</sup>C. Leygraf, T. E. Graedel, “Atmospheric corrosion”, Wiley-Interscience, 2000
- <sup>32</sup>T. Kamimura, K. Kashima, K. Sugae, H. Miyuki, T. Kudo, “The role of chloride ion on the atmospheric corrosion of steel and corrosion resistance of Sn-bearing steel” Corrosion Science, Vol. 62, September 2012, Pages 34–41
- <sup>33</sup>D. de la Fuente, I. Dvaz, J. Simancas, B. Chico, M. Morcillo, “Long-term atmospheric corrosion of mild steel”, Corrosion Science, Vol. 53, 2011, pp. 604–617
- <sup>34</sup>ISO 9223:2012, “Corrosion of metals and alloys-Corrosivity of atmospheres-Classification”
- <sup>35</sup>ISO 9225:2012, “Corrosion of metals and alloys -- Corrosivity of atmospheres -- Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres”
- <sup>36</sup><http://events.nace.org/library/corrosion/SoilCorrosion/introduction.asp>
- <sup>37</sup>Corrosion: Understanding the Basics ASM International, 2000

- <sup>38</sup> P.R. Roberge, "Handbook of Corrosion Engineering", McGraw Hill Handbooks, 1999
- <sup>39</sup> <http://events.nace.org/library/corrosion/Localized/Introduction.asp>
- <sup>40</sup> <http://met-engineering.blogspot.gr/2009/06/forms-of-corrosion.html>
- <sup>41</sup> <http://octane.nmt.edu/WaterQuality/corrosion/CO2.aspx>
- <sup>42</sup> ASTM Standard G48-03: Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion of Stainless Steels and Alloys by Use of FeCl<sub>3</sub>.
- <sup>43</sup> <http://www.nstcenter.biz/writeup.aspx?title=Marine%20Cathodic%20Protection&page=NavyCommunityAppExtShipCathodicProtection.html>
- <sup>44</sup> <http://aluminumsurface.blogspot.gr/2009/04/corrosion-between-anodized-aluminum-and.html>
- <sup>45</sup> <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/C/corrosion.html>
- <sup>46</sup> <http://www.pump-zone.com/topics/nps-h-characteristic-all-pumps>
- <sup>47</sup> <http://corrosion.ksc.nasa.gov/fretcor.htm>
- <sup>48</sup> S. K. Coburn, "Corrosion", American Society for Metals, National Association of Corrosion Engineers, 1984
- <sup>49</sup> <http://www.david-bailey.org.uk/page-eight.htm>
- <sup>50</sup> Δ. Παντελής, Γ. Χρυσουλάκης, "Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών", Παπασωτηρίου, 2003
- <sup>51</sup> <http://corrosion-doctors.org/Forms-selective/dezinc-valve.htm>
- <sup>52</sup> P. Elliott, "Gallery of Corrosion Damage, Corrosion Materials", Vol 13B, ASM Handbook, ASM International, 2005, p 631–646)
- <sup>53</sup> Γ. Μπατής, "Περί του μηχανισμού σχηματισμού ενεργού δρόμου κατά τη διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση κραμάτων αλουμινίου", Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα 1976
- <sup>54</sup> [http://www.cdcorrosion.com/mode\\_corrosion/stress\\_corrosion\\_cracking.htm](http://www.cdcorrosion.com/mode_corrosion/stress_corrosion_cracking.htm)
- <sup>55</sup> R. H. Jones, "Stress-Corrosion Cracking: Materials Performance and Evaluation", ASM International, 1992
- <sup>56</sup> W. Zhao, Y. Wang, T. Zhang, Y. Wang, "Study on the mechanism of high-cycle corrosion fatigue crack initiation in X80 steel", Corrosion Science, Vol. 57, 2012, pp. 99-103
- <sup>57</sup> <http://hghouston.com/resources/corrosion-images/dezincification-corrosion-of-admiralty-brass.aspx>
- <sup>58</sup> [http://www.corrosionclinic.com/types\\_of\\_corrosion/Corrosion%20Fatigue.htm](http://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/Corrosion%20Fatigue.htm)
- <sup>59</sup> <http://corrosion.ksc.nasa.gov/intercor.htm>
- <sup>60</sup> [https://online.platts.com/PPS/P=m&s=1029337384756.1478827&e=1095283125113.2309170660154904077/?artnum=2x004UU09G1x31cA15503D\\_1](https://online.platts.com/PPS/P=m&s=1029337384756.1478827&e=1095283125113.2309170660154904077/?artnum=2x004UU09G1x31cA15503D_1)
- <sup>61</sup> R. Sánchez-Tovar, M.T. Montañés, J. García-Antón, "Thermogalvanic corrosion and galvanic effects of copper and AISI 316L stainless steel pairs in heavy LiBr brines under hydrodynamic conditions", Corrosion Science, Vol. 60, 2012, pp. 118–128
- <sup>62</sup> Δ.Κ. Υφαντής, "Υλικά – Διάβρωση και Προστασία", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2000
- <sup>63</sup> Ε. Ζαχαρίου – Ρακαντά, "Διερεύνηση της χρήσης ειδικών προσθέτων για την προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα", Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Τομέας επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Αθήνα 2010
- <sup>64</sup> <http://micblast.blogspot.gr/2010/01/how-nitrogen-prevents-corrosion-in-fire.html>
- <sup>65</sup> [http://qualitymarineservices.net/stray\\_current\\_corrosion.html](http://qualitymarineservices.net/stray_current_corrosion.html)
- <sup>66</sup> P. A. M. Basheer, S. E. Chidiact and A. E. Long, "Predictive models for deterioration of concrete structures", Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 1, pp. 27-37, 1996
- <sup>67</sup> L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, R.B. Polder, "Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair", 2004 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- <sup>68</sup> J.R. Davis, Davis & Associates, "Corrosion: Understanding the basics", ASM International, The Materials Information Society, U.S.A, 2004
- <sup>69</sup> M. Pourbaix, "Lectures on Corrosion", Plenum Press, New York, 1973.
- <sup>70</sup> V. K. Gouda, "Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel – I. Immersed in alkaline solutions", British Corrosion Journal, 1970, 5, 198–203.
- <sup>71</sup> H. Arup, "The mechanisms of the protection of steel by concrete", in Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, A. P. Crane (Ed.), Ellis Horwood Ltd., Chichester, 151–157, 1983

- <sup>72</sup> A. Rossi, G. Puddu, B. Elsener, "The surface of iron and Fe10Cr alloys in alkaline media", Proc. Eurocorr 2001, Riva del Garda, 30 September –4 October 2001, Associazione Italiana di Metallurgia, Milan
- <sup>73</sup> P. Pedefferri, L. Bertolini, "Durability of Reinforced Concrete", McGrawHill Italia, Milan, 2000
- <sup>74</sup> Z. P. Bazant, "Physical model for steel corrosion in concrete sea structures", Journal of the Structural Division, ASCE, 1979, 105 (ST6), 1137–1166.
- <sup>75</sup> K. Tuutti, "Corrosion of Steel in Concrete, Swedish foundation for concrete research", Stockholm, 1982
- <sup>76</sup> C. L. Page, "Corrosion and its Control in Reinforced Concrete", The sixth Sir F. Lea Memorial Lecture, 26th Annual Convention of the Institute of Concrete Technology, Bosworth (UK), 6–8 April 1998
- <sup>77</sup> C. Andrade, M. C. Alonso, J. A. Gonzales, "An initial effort to use the corrosion rate measurements for estimating rebar durability", Symposium on Corrosion Rate of Reinforcement in Concrete, ASTM, Baltimore, USA, 29, 1988
- <sup>78</sup> K. K. Σίδερης, "Αντοχή σκυροδέματος έναντι πυρκαγιάς. Μηχανισμοί αστοχίας και μέθοδοι προστασίας", Περιοδικό Σκυρόδεμα, 2003
- <sup>79</sup> C. Repapis, C. Zeris, E. Vintzileou, "Evaluation of the Seismic Behaviour of Existing RC Buildings: II. A Case Study for Regular and Irregular Buildings", Journal of Earthquake Engineering, Imperial College Press, Vol. 10, No. 3, pp. 429-452, 2006.
- <sup>80</sup> G. Malumbela, P. Moyo, M. Alexander, "A step towards standardising accelerated corrosion tests on laboratory reinforced concrete specimens", Journal of the South African Institution of Civil Engineering, Vol. 54, No.2, 2012
- <sup>81</sup> C. Alonso, C. Andrade, "Life time of rebars in carbonated concrete", in Progress in Understanding and Prevention of Corrosion, J. M. Costa, A. D. Mercer (Eds.), Institute of Materials, London, 624, 1994
- <sup>82</sup> G. Sergi, "Corrosion of Steel in Concrete: Cement Matrix Variables", PhD Thesis, University of Aston, Birmingham, 1986
- <sup>83</sup> J. P. Broomfield, "Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair", E&FN SPON, 1997
- <sup>84</sup> D. W. S. Ho, R. K. Lewis, "Carbonation of concrete and its prediction", Cement and Concrete Research, 1987, 17, 489.
- <sup>85</sup> <http://www.understanding-cement.com/carbonation.html>
- <sup>86</sup> L.F. Lin, C.Y. Chao, and D.D. MacDonald, "A Point Defect Model for Anodic Passive Films II. Chemical breakdown and Pit Initiation", J. Electrochem. Soc., 128, 1194-1198 (1981)
- <sup>87</sup> N. Sato, "A Theory for Breakdown of Anodic Oxide Films on Metals", Electrochimica Acta, 16, 1683-1692 (1971).
- <sup>88</sup> D.D. Macdonald, M. Urquidi-Macdonald, S.J. Lenhart, "Recent Developments in the Point Defect Model for the Growth and Breakdown of Passive Films on Metal Surfaces in: Surfaces, Inhibition, and Passivation", ed. by E. McCafferty, Nat. Res. Lab., Wash. D.C., R.J. Brodd, Gould Inc., Ohio, Proceedings Vol. 86-7, 1986, pp. 402-420, The Electrochemical Society, 1986
- <sup>89</sup> N. Sato, Anodic Breakdown of Passive Films on Metals, J. Electrochem. Soc., 129, 255-260 (1982).
- <sup>90</sup> R. Cigna, O. Fumei, "On the cathodic protection of steel in reinforced concrete", L'Industria Italiana del Cemento, 1981
- <sup>91</sup> R. B. Polder, "Cathodic protection of reinforced-concrete structures in the Netherlands – experience and developments", in Corrosion of Reinforcement in Concrete – Monitoring, Prevention and Rehabilitation, Papers from Eurocorr' 97, J. Mietz, B. Elsener, R. B. Polder (Eds.), The European Federation of Corrosion Publication number 25, The Institute of Materials, London, 172–184, 1998.
- <sup>92</sup> G. Schuten, J. Leggedoor, R. B. Polder, "Cathodic protection of concrete ground floor elements with mixed in chloride", in Corrosion of Reinforcement in Concrete, Corrosion Mechanisms and Corrosion Protection, Papers from Eurocorr'99, J. Mietz, R. B. Polder, B. Elsener, The European Federation of Corrosion Publication number 31, The Institute of Materials, London, 85–92, 2000
- <sup>93</sup> P. R. Vassie, "Reinforcement corrosion and the durability of concrete bridges", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 1, Vol. 76, paper 8798, 713, 1984
- <sup>94</sup> P. Pedefferri, "Cathodic protection and cathodic prevention", Construction and Building Materials, 1996, 10, 391–402.
- <sup>95</sup> C. Alonso, M. Castellote, C. Andrade, "Dependence of chloride threshold with the electrical potential of reinforcements", Proc. 2nd International RILEM Workshop Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete, C. Andrade, J. Kropp (Eds.), PRO 19, RILEM Publications, 415–425, 2000.



- <sup>96</sup> Andrade, Carmen, et al, "Mathematical Modeling of a Concrete Surface 'Skin Effect' on Diffusion in Chloride Contaminated Media", *Advanced-Cement-Based-Materials* Vol. v. 1997
- <sup>97</sup> P. B. Bamforth, J. Chapman-Andrews, "Long term performance of RC elements under UK coastal exposure condition", *Proc. Int. Conf. on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*, R. N. Swamy (Ed.), Sheffield Academic Press, 24–29 July 1994, 139–156
- <sup>98</sup> L. O. Nilsson, A. Andersen, L. Tang, P. Utgenannt, "Chloride ingress data from field exposure in a Swedish environment", *Proc. 2nd Int. Rilem Workshop Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete*, C. Andrade, J. Kropp (Eds.), Paris, 11–12 Sept. 2000, 69–83.
- <sup>99</sup> A. Lindvall, A. Andersen, L. O. Nilsson, "Chloride ingress data from Danish and Swedish road bridges exposed to splash from de-icing salt", *Proc. 2nd Int. Rilem Workshop Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete*, C. Andrade, J. Kropp (Eds.), Paris, 11–12 Sept. 2000, 85–103.
- <sup>100</sup> L. Tang, A. Andersen, "Chloride ingress data from five years field exposure in a Swedish marine environment", *Proc. 2nd Int. Rilem Workshop Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete*, C. Andrade, J. Kropp (Eds.), Paris, 11–12 Sept. 2000, 105–119. [
- <sup>101</sup> C. Andrade, J. L. Sagera, M. A. Sanjuan, "Several years study on chloride ion penetration into concrete exposed to Atlantic ocean water", *Proc. 2nd Int. Rilem Workshop Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete*, C. Andrade, J. Kropp (Eds.), Paris, 11–12 Sept. 2000, 121–134.
- <sup>102</sup> D. Izquierdo, C. Andrade, O. de Rincon, "Statistical analysis of the diffusion coefficients measured in the piles of Maracaibo's bridge", *Proc. 2nd Int. Rilem Workshop Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete*, C. Andrade, J. Kropp (Eds.), Paris, 11–12 Sept. 2000, 135–148.
- <sup>103</sup> C.M. Hansson, A. Poursaee, A. Laurent, "Macrocell and microcell corrosion of steel in ordinary Portland cement and high performance concretes", *Cement and Concrete Research* Vol. 36, No. 11, 2006, pp 2098–2102)
- <sup>104</sup> Θ.Π. Τάσιος, Κ. Αλιγιζάκη, *Ανθεκτικότητα Ωπλισμένου Σκυροδέματος*, Αθήνα, 1992
- <sup>105</sup> M. A. Bader, "Performance of concrete in a coastal environment", *Cement & Concrete Composites* 25 (2003) pp. 539-534.
- <sup>106</sup> J. M. Frederiksen (Ed.), *HETEK –Chloride Penetration into Concrete. State of the Art. Transport Processes, Corrosion Initiation, Test Methods and Prediction Models*, The Road Directorate, Report No. 53, Copenhagen, 1996.
- <sup>107</sup> P. B. Bamforth, "Concrete classification for R. C. structures exposed to marine and other salt-laden environments", *Proc. of Structural Faults and Repair – 93*, Edinburgh, 29 June–1 July 1993.
- <sup>108</sup> R. N. Swamy, H. Hamada, J. C. Laiw, "A critical evaluation of chloride penetration into concrete in marine environment", *Proc. Int. Conf. on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*, R. N. Swamy (Ed.), Sheffield Academic Press, 24–29 July 1994.
- <sup>109</sup> R. N. Swamy, H. Hamada, J. C. Laiw, "A critical evaluation of chloride penetration into concrete in marine environment", *Proc. Int. Conf. on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*, R. N. Swamy (Ed.), Sheffield Academic Press, 24–29 July 1994.
- <sup>110</sup> G. K. Glass, C. L. Page, N. R. Short, "Factors affecting the corrosion of steel in carbonated mortars", *Corrosion Science*, 1991, 32, 1283
- <sup>111</sup> CEB, *Durable Concrete Structures*, CEB Design Guide, Bulletin d'information 182, 1989.
- <sup>112</sup> B. Buhr, P. V. Nielsen, F. Bajernaru, A. McLeish, "Bucharest metro: dealing with stray current corrosion", *Tunnel Construction and Piling Conference '99*, September 8–10, London, 1999.
- <sup>113</sup> B. Bazzoni, M. C. Briglia, G. Cavallero, D. Melodia, F. Panaro, "Monitoring of stray current interference in the reinforced-concrete structures of the Turin underground railway loop", 54th NACE Corrosion '99, 1999.
- <sup>114</sup> H. Mingyu, L. Fumei, T. Mingshu, "The thaumasite form of sulfate attack in concrete of Yongan Dam" *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 10 2006, pp. 2006–2008
- <sup>115</sup> EN 206-1, *Concrete – Part 1. Specification, Performance, Production and Conformity*, European Committee for Standardization, 2001.
- <sup>116</sup> prEN 1992-1-1, *Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings*, European Committee for Standardization, 2002.
- <sup>117</sup> J. L. Kepler, D. Darwin, C. E. Locke Jr., "Evaluation of corrosion protection methods for reinforced concrete highway structures", *Structural Engineering and Engineering Materials*, SM Report No. 58, UNIVERSITY OF KANSAS CENTER FOR RESEARCH, INC., LAWRENCE, KANSAS, May 2000
- <sup>118</sup> Κ.Κ. Σίδερης, «Τεχνολογία Δομικών Υλικών», Τομ. Β', Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 1984.

- 
- <sup>119</sup> A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 4th Edn., Longman, Harlow, 1995.
- <sup>120</sup> Τσίμας Σ.-Τσιβιλής Σ., "Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα (2000)
- <sup>121</sup> Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος, 1997 (ΚΤΣ-97), ΥΑ Δ14/19164, ΦΕΚ 315/Β/1997
- <sup>122</sup> Ν. Κουλουμπή, Α. Μοροπούλου, Γ. Μπατής, *Σημειώσεις για το μάθημα «Υλικά Ι»*, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1998.
- <sup>123</sup> J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*, Clarendon Press, Oxford, 1983.
- <sup>124</sup> EN 206-1 Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity, 2001-07
- <sup>125</sup> M. Katsioti, D. Gkanis, P. Pipilikaki, A. Sakellariou, A. Papathanasiou, Ch. Teas, E. Chaniotakis, P. Moundoulas, A. Moropoulou, *Study of the substitution of limestone filler with pozzolanic additives in mortars*, Construction and Building Materials, Vol. 23, Issue 5, May 2009, pp. 1960–1965
- <sup>126</sup> A. Moropoulou, E. Aggelakopoulou, *Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis*, Thermochemica Acta, Vol. 420, Issues 1–2, 2004, pp. 135–140
- <sup>127</sup> Γ. Μπατής, Κ. Μελετίου, Αθ. Ρούτουλας, «*Η Προστασία του Οπλισμού του Σκυροδέματος με Ορυκτά Πρόσθετα*», 13<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Ρέθυμνο, Vol 2, pp 345-352, 1999.
- <sup>128</sup> Ch. Malami, G. Batis, N. Kouloumbi, V. Kaloidas, "*Influence of Pozzolanic and Hydraulic Cement Additions on Carbonations and Corrosion of Reinforced Mortar Specimens*", Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, Sheffield, Vol 2, 1994, pp 668-679.
- <sup>129</sup> Whiting, D. and Detwiler, R. (1998). "*Silica Fume Concrete for Bridge Decks*," NCHRP Report No. 410, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- <sup>130</sup> N. Kouloumbi, G. Batis., «*Chloride Corrosion of Steel Rebars in Mortars with Fly Ash Admixtures*», Cement and Concrete Composites, 14, 199-207, 1992.
- <sup>131</sup> Detwiler, Rachel J., Whiting, David A. and Lagergen, Eric S. (1999). "*Statistical Approach to Ingress of Chloride Ions in Silica Fume Concrete for Bridge Decks*," ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 6, Nov.-Dec., pp. 670-675.
- <sup>132</sup> GjØrv, O. V. "*Effect of Condensed Silica Fume on Steel Corrosion in Concrete*," ACI Materials Journal, Vol. 92, No. 6, Nov.-Dec., pp. 591-598, 1995
- <sup>133</sup> S. Gavela, A. Ntziouni, E. Rakanta, N. Kouloumbi, V. Kasselouri-Rigopoulou, "*Corrosion behaviour of steel rebars in reinforced concrete containing thermoplastic wastes as aggregates*", Construction and Building Materials, Vol. 41, 2013, pp. 419–426
- <sup>134</sup> G. E. Monfore and C. J. Verbeck, "*Corrosion of Prestressed Wire in Concrete*," J. of American Concrete Institute, Vol. 57, 1960, pp. 491-516.
- <sup>135</sup> Virmani, Y. P. & Clemena G.G. 1998. *Corrosion Protection- Concrete Bridges* Report No. FHWA-D98-088, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- <sup>136</sup> <http://blog.highconcrete.com/six-degrees-of-rebar-corrosion-resistance-for-parking-structures/>
- <sup>137</sup> K.C. Clear, Y.P. Virmani, *Corrosion of non-specification Epoxy-Coated Rebars in Salty Concrete*, Paper No 114 Corrosion 83, 1983 Anaheim, CA
- <sup>138</sup> K.C Clear, H.H. William, J. McIntyre, L. Seung Kyong , "*Performance of Epoxy-Coated Reinforcing Steel in Highway Bridges*", NCHRP Report No. 370, Transportation Research Board, Washington, D.C.,1995
- <sup>139</sup> A. B. Tripler, E. L. White, F. H. Haynie, and W. K. Boyd, "*Methods of Reducing Corrosion of Reinforcing Steel*," National Cooperative Highway Research Program Report No. 23, Highway Research Board, Washington, D. C., 1966, 22 pp.
- <sup>140</sup> G. A. Hill, D. L. Spellman, and R. F. Stratfull, "*Laboratory Corrosion Tests of Galvanized Steel in Concrete*," Transportation Research Record No. 604, 1976, pp. 25-30.
- <sup>141</sup> N. Unz, "*Performance of Galvanized Reinforcement in Calcium Hydroxide Solution*," Journal Of American Concrete Institute, Vol. 75, 1978, pp. 91-99.
- <sup>142</sup> I. Cornet and B. Bresler, "*Corrosion of Steel and Galvanized Steel in Concrete*," Materials Protection, Vol. 5, No. 4, 1966, pp. 69-72.
- <sup>143</sup> A. R. Cook and S. F. Radtke, "*Recent Research on Calvanized Steel for Reinforcement of Concrete*," Chloride Corrosion of Steel in Concrete, STP-629, ASTM, Philadelphia, 1977, pp. 51-60.
- <sup>144</sup> C. J. Arnold, "*Galvanized Steel Reinforced Concrete Bridge Decks: Construction Reports*," Research Report R-845, Michigan State Highway Commission, Michigan, 1973.
- <sup>145</sup> D. Stark and W. Perenchio, "*The Performance of Galvanized Reinforcement in Concrete Bridge Decks*," Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 1975.

- 
- <sup>146</sup> McCrum, L. and Arnold, C. J. (1993). "Evaluation of Simulated Bridge Deck Slabs Using Uncoated, Galvanized, and Epoxy Coated Reinforcing Steel," Research Report No.R-1320, Michigan Department of Transportation, Lansing, MI.
- <sup>147</sup> Π. Μαυροειδής, «Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος με βάση τις σύγχρονες απαιτήσεις των κανονισμών», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2005.
- <sup>148</sup> McDonald, D. B., Sherman, M. R., Pfeifer, D. W., and Virmani, Y. P. (1995b). "Stainless Steel Reinforcing as Corrosion Protection," Concrete International, Vol. 17, No. 5, May, pp. 65-70.
- <sup>149</sup> Darwin, David, Locke, Carl E. Jr., Balma, Javier, and Kahrs, Jason T. (1999). "Evaluation of Stainless Steel Clad Reinforcing Bars," SL Report No. 99-3, The University of Kansas Center for Research, Inc., Lawrence, Kansas, 17 pp.
- <sup>150</sup> Tripler, A. B., White, E. L., Haynie, F. H. and Boyd, W. K. (1966). "Methods of Reducing Corrosion of Reinforcing Steel," Report No. 23, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C.
- <sup>151</sup> Virmani, Yash Paul and Clemena, Gerardo G. (1998). "Corrosion Protection- Concrete Bridges," Report No. FHWA-RD-98-088, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- <sup>152</sup> McDonald, D. B., Sherman, M. R., and Pfeifer, D. W. (1995a). "The Performance of Bendable and Nonbendable Organic Coatings for Reinforcing Bars in Solution and Cathodic Debonding Tests," Report No. FHWA-RD-94-103, Federal Highway Administration.
- <sup>153</sup> Virmani, Y. P., Clear, K. C., and Pasko Jr., T. J. (1983). "Time to Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs Vol. 5-Calcium Nitrite Admixture or Epoxy Coated Reinforcing Bars as Corrosion Protection Systems," Report No. FHWA-RD-83-012, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- <sup>154</sup> McDonald, David B., Virmani, Yash Paul, and Pfeifer, Donald F. (1996). "Testing the Performance of Copper-Clad Reinforcing Bars," Concrete International, Vol. 18, No. 11, Nov., pp. 39-43.
- <sup>155</sup> Erki, M. A. and Rizkalla, S. H. (1993). "FRP Reinforcement for Concrete Structures," Concrete International, Vol. 15, No. 6, Jun., pp. 48-53.
- <sup>156</sup> Phong, Le (1997). "Plastic Composites in Civil Engineering Structures," California Engineer, Vol. 76, No. 2, Dec., pp. 20-24.
- <sup>157</sup> N. S. Berke, "Impregnation of Concrete with Corrosion Inhibitors", Corrosion Forms and Control of Infrastructure, ASTM STP 1137, Philadelphia, 1992.
- <sup>158</sup> U. Nuerbeger, 'Korrosionsschutz im Massivbau', Expert Verlag, Boebbigen, pp 108-114, 1986.
- <sup>159</sup> K.Y. Ann, H.S. Jung, H.S. Kim, S.S. Kim and H.Y. Moon, "Effect of calcium nitrite-based corrosion inhibitor in preventing corrosion of embedded steel in concrete", Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 3, 2006, pp. 530-535.
- <sup>160</sup> G. Batis, Th. Routoulas, "Steel Rebars Corrosion Investigation with Strain Gages" Cement & Concrete Composites, Vol 21, 1999, pp 163-171.
- <sup>161</sup> M. Ormellese, M. Berra, F. Bolzoni and T. Pastore, "Corrosion inhibitors for chlorides induced corrosion in reinforced concrete structures", Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 3, 2006, pp. 536-547.
- <sup>162</sup> Lorenzo Fedrizzi, Francesca Azzolini and Pier Luigi Bonora, "The use of migrating corrosion inhibitors to repair motorways' concrete structures contaminated by chlorides", Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 3, 2005, pp. 551-561.
- <sup>163</sup> T.H. Misselbrook, J. Webb and S.L. Gilhespy, "Ammonia emissions from outdoor concrete yards used by livestock—quantification and mitigation", Atmospheric Environment, Volume 40, Issue 35, 2006, pp.6752-6763.
- <sup>164</sup> S.W. Dean Jr et al., «Inhibitor Types», Materials Performance, 20, 47-51 (1981).
- <sup>165</sup> V. Saraswathy and Ha-Won Song, "Improving the durability of concrete by using inhibitors", Building and Environment, Volume 42, Issue 1, 2007, pp. 464-472.
- <sup>166</sup> S. Matsudo and H.H. Uhlig, «Effect of pH, Sulfates, and Chlorides on Behavior of Sodium Chromate and Nitrite as Passivators for Steel», J. Electrochem. Soc., 111, 156-161 (1964).
- <sup>167</sup> B. Elsener, Corrosion Inhibitors for Steel in Concrete – State of the Art Report, EFC Publication No. 35, The Institute of Materials, Maney Publishing, London, 2001.
- <sup>168</sup> M. Hynes. B. Malric, "Use of migratory corrosion inhibitors", Construction Repair, 1997, 11 (4), 10.
- <sup>169</sup> C. Alonso, C. Andrade, M. Acha, B. Malric, Preliminary testing of Na<sub>2</sub>PO<sub>3</sub>F as a curative corrosion inhibitor for steel reinforcements in concrete, Cement and Concrete Research, 1992, 22, 869.
- <sup>170</sup> U. Møder, "A new class of corrosion inhibitors", in Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, N. Swamy (Ed.), Sheffield Academic Press, Vol. 2, 851, 1994.

- <sup>171</sup> G. Batis, A. Routoulas and E. Rakanta, «Effects of Migrating Inhibitors on Corrosion of Reinforcing Steel Covered with Repair Mortar», *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, pp 109-115, 2003.
- <sup>172</sup> G. Batis, P. Pantazopoulou, A. Routoulas, “Corrosion protection investigation of reinforcement by inorganic coating in the presence of alkanolamine-based inhibitor”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, Issue 3, 2003, pp. 371–377
- <sup>173</sup> Ε. Ντάφλου, Α. Καραντώνης, Γ. Μπατής, “Προστασία του δομικού χάλυβα με τη χρήση πηκτικών αναστολέων διάβρωσης. Μελέτη της προσρόφησης του αναστολέα στη μεταλλική επιφάνεια”, 16<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/2009, Πάφος, Κύπρος
- <sup>174</sup> B. Elsener, M. Bóchler, F. Stalder, H. Βφhni, “A migrating corrosion inhibitor blend for reinforced concrete – Part 1: prevention of corrosion”, *Corrosion*, **1999**, 55, 1155–1163.
- <sup>175</sup> A. Rossi, B. Elsener, M. Textor, N. D. Spencer, “Combined XPS and ToF-SIMS analyses in the study of inhibitor function – organic films on iron”, *Analysis*, **1997**, 25 (5), M30.
- <sup>176</sup> C. L. Page, V. T. Ngala, M. M. Page, “Corrosion inhibitors in concrete repair systems”, *Magazine of Concrete Research*, **2000**, 52, 25–37.
- <sup>177</sup> Batis, G. Routoulas, A. Maeder, U. 1999. Performance of Corrosion Inhibitors in the Protection of Reinforced Concrete in Seaside Environment. 14th International Corrosion Congress. Cape Town, South Africa.
- <sup>178</sup> S. M. Trupanier, B. B. Hope, C. M. Hansson, “Corrosion inhibitors in concrete. Part III: Effect on time to chloride- induced corrosion initiation and subsequent corrosion rates of steel in mortar”, *Cement and Concrete Research*, **2001**, 31, 713.
- <sup>179</sup> B. Elsener, M. Bóchler, F. Stalder, H. Βφhni, “A migrating corrosion inhibitor blend for reinforced concrete – Part 2: Inhibitor as repair strategy”, *Corrosion*, **2000**, 56, 727.
- <sup>180</sup> I. Vyrides, E. Rakanta, Th. Zafeiropoulou, G. Batis, Efficiency of Amino Alcohols as Corrosion Inhibitors in Reinforced Concrete, *Open Journal of Civil Engineering*, Vol. 3, pp. 1-8, 2013 doi:10.4236/ojce.2013.32A001
- <sup>181</sup> G. Batis, N. Kouloumbi, P. Pantazopoulou, “Corrosion Protection of Steel in Pumice Lightweight Mortar by Coatings”, *Cement and Concrete Composites*, Vol 27, pp 261-267, 2005
- <sup>182</sup> G. Batis, P. Pantazopoulou, A. Routoulas, “Synergistic Effect of Corrosion Inhibitor and Inorganic Coating on Reinforcement Corrosion”, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 48, No 2, pp.107-115, 2001
- <sup>183</sup> G. Batis, N. Kouloumbi, P. Pantazopoulou, “Protection of reinforced Concrete by Coatings and Corrosion Inhibitors”, *Pigment and Resin Technology*, Vol. 26, No 3, pp 159-163, 2000
- <sup>184</sup> C.M. Hansson, L. Mammoliti, B.B. Hope, «Corrosion Inhibitors in Concrete—PART I: The Principles», *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 12, pp. 1775–1781, 1998
- <sup>185</sup> Shiyuan Qian, Daniel Cusson, “Electrochemical evaluation of the performance of corrosion-inhibiting systems in concrete bridges”, *Cement & Concrete Composites* 26 (2004) pp. 217-233.
- <sup>186</sup> G.K. Glass, “Technical Note. The 100-mV Decay Cathodic Protection Criterion”, *Corrosion*, 55, 289-290 (1999).
- <sup>187</sup> NACE Standard RP0290-90, “Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures”, (Houston, TX - NACE, 1990).
- <sup>188</sup> Γ. Μπατής, Α. Μοροπούλου, Ε. Ρακαντά, Π. Μούνδουλας, Ε. Αγγελικοπούλου, «Καθοδική Προστασία του Καθολικού του Ναού Νέας Μονής Χίου», 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, Πάφος 2009
- <sup>189</sup> Γ. Μπατής, Π. Καρύδης, «Καθοδική Προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα», 13ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Ρέθυμνο, 1999
- <sup>190</sup> Γ. Μπατής, Ε. Ντάφλος, «Μελέτη Καθοδικής Προστασίας Γενικού Κρατικού Νοσοκομείου Νίκαιας», 2008
- <sup>191</sup> Γ. Μπατής, Ε. Ρακαντά, «Η καθοδική προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα», Σκυρόδεμα, Τεύχος 3, 2006
- <sup>192</sup> <http://www.norcure.com/ECE.pdf>
- <sup>193</sup> Velivasakis, Emmanuel E., Henriksen, Sten K., and Whitmore, David W. (1997). “Halting Corrosion by Chloride Extraction and Realkalization,” *Concrete International*, Vol. 19, No. 12, pp. 39-45.
- <sup>194</sup> Noteby, Norwegian Patent Application No. 875438, 1987.
- <sup>195</sup> V. Pollet, R. Guerin, C. Tourneur, H. Mahouche, A. Raharinaivo, “Concrete realkalisation using sacrificial anode”, *Eurocorr '97*, Trondheim, 1997, Proc. Vol. 1, 523–528.



- 
- <sup>196</sup> A. Raharinaivo, J. C. Lenglet, C. Tourneur, H. Mahouche, V. Pollet, "Chloride removal and realkalisation of concrete by using galvanic anodes", Int. Conf. on *Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures*, Federal Highway Administration, Orlando, 7–11 December 1998
- <sup>197</sup> E. Metaxa, T. Agelakopoulou, I. Bassiotis, Ch. Karagianni, F. Roubani-Kalantzopoulou, Gas chromatographic study of degradation phenomena concerning building and cultural heritage materials, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 164, Issues 2–3, 2009, ππ. 592–599
- <sup>198</sup> R. B. Polder, R. Walker, C. L. Page, "Electrochemical desalination of cores from a reinforced concrete coastal Structure", *Magazine of Concrete Research*, **1995**, 47, 321–327.
- <sup>199</sup> R. B. Polder, H. J. van den Hondel, "Electrochemical realkalization and chloride removal of concrete", Proc. of the Int. RILEM/CSIRO/ACRA Conference: *Rehabilitation of Concrete Structures*, D. W. S. Ho, F. Collins (Eds.), Melbourne, 31 August – 2 September 1992, 135–147.
- <sup>200</sup> J. Mietz, "Electrochemical rehabilitation methods for reinforced-concrete structures – A state of the art report", European Federation of Corrosion Publication number 24, IOM Communications, London, 1998.
- <sup>201</sup> V. Pollet, "Re-alkalisation: specification for the treatment application and acceptance criteria", Annual progress report 1998–1999, COST 521 workshop, Annecy, 1999.
- <sup>202</sup> C. Andrade, M. Castellote, C. Alonso, "An overview of electrochemical realkalisation and chloride extraction", in *Rehabilitation of Structures*, Proceedings of the 2nd Int. RILEM/CSIRO/ACRA Conference, Melbourne, D. W. S. Ho, I. Godson, F. Collins (Eds.), 1–12, 1998.
- <sup>203</sup> C. Andrade, M. Castellote, J. Sarria, C. Alonso, "Evolution of pore solution chemistry, electro-osmosis and rebar corrosion rate induced by realkalisation", *Materials and Structures*, **1999**, 32, 427–436.
- <sup>204</sup> P. F. G. Banfill, "Electrochemical re-alkalisation, chloride removal and alkali-silica reaction in concrete", Annual Progress Report 1998–1999, COST 521 workshop, Annecy, 1999.
- <sup>205</sup> P. F. G. Banfill, "Features of the mechanism of realkalisation and desalination treatments for reinforced concrete", Proc. Int. Conf. on *Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*, R. N. Swamy (Ed.), Sheffield Academic Press, 24–29 July 1994, 1489–1498.
- <sup>206</sup> Corrosion of steel in reinforced concrete structures, COST Action 521, Final report
- <sup>207</sup> J. M. Bijen (Ed.), "Maintenance and repair of concrete structures", *Heron*, **1989**, 34 (2), 2–82.
- <sup>208</sup> Pfeifer, D. W. and Scali, M. J. (1981). *NCHRP Report 244: Concrete Sealers for the Protection of Bridge Structures*, Transportation Research Board, Washington D.C., 138 pp.
- <sup>209</sup> Μπατής Γ., "Φθορά και Προστασία των Υλικών", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα (1999).
- <sup>210</sup> A. Goldschmidt, H.J. Streitberger "BASF Handbook on Basics of Coating Technology"
- <sup>211</sup> DIN EN ISO 4618 Paints and varnishes-Terms and definitions (ISO4618:2006)
- <sup>212</sup> Σταμ. Καμπάνης "Χημεία Χρωμάτων", 2009
- <sup>213</sup> Ν. Κουλουμπή, « Χρώματα GRAFFITI – Καθαρισμός-Αντιγραφίτι Προστατευτικά Επιστρώματα», Αθήνα 2004
- <sup>214</sup> R. Lambourne and T.A. Strivens, «Paint and Surface coatings : Theory and Practice», 2nd edition, Woodhead Publishing Limited
- <sup>215</sup> <http://www.whatischemistry.unina.it/en/maglacrylic.html>
- <sup>216</sup> H.B. Yamak , "Emulsion Polymerization: Effects of Polymerization Variables on the Properties of Vinyl Acetate Based Emulsion Polymers", *Polymer Science*, Ch. 2 January 23 **2013**, DOI: 10.5772/51498
- <sup>217</sup> D. Stoye, W. Freitag, «Resins for coatings, chemistry, properties and applications», C.H. Verlag, N.York 1996
- <sup>218</sup> R. De Jaeger M. Gleria, "Inorganic Polymers", Nova Publisher, Ch.2, pp.61-161, 2007
- <sup>219</sup> A. Bradshaw , N.J. Simms, J.R. Nicholls, "Development of hot corrosion resistant coatings for gas turbines burning biomass and waste derived fuel gases", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 16, No. 15, pp.8–22, February 2013
- <sup>220</sup> <http://epoxy.nilsmalmgren.com/kemi.html>
- <sup>221</sup> J. Park, « Innovation in epoxy systems », 9th Paints Symposium, Athens 2004
- <sup>222</sup> A. M. Atta, F. Ahmed, El-Kafrawy, H.M. Aly, A. Abdel-Azim, «New epoxy resins based on recycled poly(ethylene terephthalate) as organic coatings», *Progress in Organic Coatings*, Vol 58, Issue 1, 2007
- <sup>223</sup> <http://www.ec.gc.ca/subsnouvelles-news/default.asp?lang=En&n=2478BD9E-1>
- <sup>224</sup> [http://www.123rf.com/photo\\_12857468\\_molecular-structure-of-a-particle-of-polyurethane-a-plastic-commonly-used-in-the-manufacture-of-insu.html](http://www.123rf.com/photo_12857468_molecular-structure-of-a-particle-of-polyurethane-a-plastic-commonly-used-in-the-manufacture-of-insu.html)

- 
- <sup>225</sup> <http://www.nfsa.gov.au/preservation/handbook/base-polymers-and-decomposition/film-base-polymers/>
- <sup>226</sup> R. Lambourne and T.A. Strivens, «Paint and Surface coatings : Theory and Practice», 2nd edition, Woodhead Publishing Limited
- <sup>227</sup> C.G. Munger, L.D. Vincent, National Association of Corrosion Engineers, «Corrosion Prevention y Protective Coatings (I)», 2nd ed., NACE Int. U.S.A 1999
- <sup>228</sup> J. Knoef, “The use of coating additives in environmentally friendlier coatings”, 9th Paints Symposium, Athens 2004
- <sup>229</sup> B. Lohmeijer, R. Balk, R. Baumstark, “Preferred partitioning: the influence of coalescents on the build-up of mechanical properties in acrylic core-shell particles (I)”, Journal of Coatings Technology and Research, February 2012, DOI 10.1007/s11998-012-9396-8
- <sup>230</sup> W.A. Whitaker «Acrylic polymers: A clear focus», Medical Plastics and Biomaterials Magazine, 1996
- <sup>231</sup> I.A. Kartsonakis, A.C. Balaskas, E.P. Koumoulos, C.A. Charitidis, G. Kordas, “Evaluation of corrosion resistance of magnesium alloy ZK10 coated with hybrid organic-inorganic film including containers”, Corrosion Science, Vol.65, 2012, pp. 481–493
- <sup>232</sup> I.A. Kartsonakis, E.P. Koumoulos, A.C. Balaskas, G.S. Pappas, C.A. Charitidis, G.C. Kordas, “Hybrid organic-inorganic multilayer coatings including nanocontainers for corrosion protection of metal alloys”, Corrosion Scienc, Vol 57, 2012, pp.56–66
- <sup>233</sup> I.A. Kartsonakis, A.C. Balaskas, E.P. Koumoulos, C.A. Charitidis, G.C. Kordas, “Incorporation of ceramic nanocontainers into epoxy coatings for the corrosion protection of hot dip galvanized steel”, Corrosion Science Vol 57, 2012, pp. 30–41
- <sup>234</sup> Federal Ministry for Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, First General Administrative Regulation Pertaining the Federal Immission Control Act (Technical Instructions on Air Quality Control – TA Luft) of 24 July 2002
- <sup>235</sup> J. V. Koleske, «Paint and Coating Testing Manual» 14th ed. of the Gardner–Sward Handbook, ASTM, Philadelphia, 1995
- <sup>236</sup> ASTM D4541 - 09e1 Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers
- <sup>237</sup> DIN 53152 (1993-05) Paints And Varnishes; Bend Test An Coatings; Method Using Cylindrical Mandrel
- <sup>238</sup> ASTM D4060 – 10 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser
- <sup>239</sup> ASTM D1308-02 Standard Test Method for Effect of Household Chemicals on Clear and Pigmented Organic Finishes
- <sup>240</sup> BS 476-10:2009 “Fire tests on building materials and structures. Guide to the principles, selection, role and application of fire testing and their outputs”
- <sup>241</sup> ASTM D2134 - 93(2012) ‘Standard Test Method for Determining the Hardness of Organic Coatings with a Sward-Type Hardness Rocker»
- <sup>242</sup> J.F. Lamond, J. H. Pielert “Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials”, Issue 169, Part 4, ASTM International, Jan 1, 2006
- <sup>243</sup> prEN 1062-6:2001 “Paints and varnishes – Coating materials and coating systems for exterior masonry and concrete – Part 6: Determination of carbon dioxide permeability”
- <sup>244</sup> BS EN ISO 2814:2006, Paints and varnishes. Comparison of contrast ratio (hiding power) of paints of the same type and colour
- <sup>245</sup> ASTM G57 - 06(2012) «Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method»
- <sup>246</sup> ASTM D3924 - 80(2011) Standard Specification for Standard Environment for Conditioning and Testing Paint, Varnish, Lacquer, and Related Materials
- <sup>247</sup> ASTM D 6132-08 “Standard Test Method for Nondestructive Measurement of Dry Film Thickness of Applied Organic Coatings Using an Ultrasonic Gage”, Vo.06.01, 2008
- <sup>248</sup> <http://www.concrete-inc.com/color-flake-paint-chip-layers.html>
- <sup>249</sup> M.C. Bernard, A. Hugot-Le Goff, D. Massinon, N. Phillips, « Underpaint corrosion of zinc-coated steel sheet studied by in situ raman spectroscopy», Corrosion Science, Vol 35, Issues 5-8 1993
- <sup>250</sup> P.L. Bonora, F. Deflorian, L. Fedrizzi, « Electrochemical impedance spectroscopy as a tool for investigating underpaint corrosion .» Electrochimica Acta, Vol 41, Issues 7-8, 1996

- 
- <sup>251</sup> C.G. Munger, L.D. Vincent, National Association of Corrosion Engineers, «Corrosion Prevention and Protective Coatings (I)», 2nd ed., NACE Int. U.S.A 1999
- <sup>252</sup> [http://www.classictrucks.com/tech/1205clt\\_fixing\\_paint\\_issues/photo\\_02.html](http://www.classictrucks.com/tech/1205clt_fixing_paint_issues/photo_02.html)
- <sup>253</sup> [http://pc.dupont.com/dpc/en/US/html/visitor/s/trouble/PDSG\\_Home.html](http://pc.dupont.com/dpc/en/US/html/visitor/s/trouble/PDSG_Home.html)
- <sup>254</sup> <http://saint-charles.certapro.com/paint-failures.aspx>
- <sup>255</sup> [http://www.concopaints.com/pro\\_resources/exterior\\_issues/](http://www.concopaints.com/pro_resources/exterior_issues/)
- <sup>256</sup> DIN EN 1062-3, "Determination and classification of liquid-water transmission rate (permeability)", 2008.
- <sup>257</sup> DIN EN 7783-2:1999, "Determination and classification of water-vapour transmission rate (permeability)", Vo. 09.99, 1999.
- <sup>258</sup> ASTM D4541 - 09e1, "Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers", Vo. 06.02, 2009.
- <sup>259</sup> ASTM D3359 - 09e2, "Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test"
- <sup>260</sup> ASTM B117 - 11 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus
- <sup>261</sup> ΕΛΟΤ 1421-3: "Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος - Συγκολλησιμοι χάλυβες - Μέρος 3: Τεχνική κατηγορία B500C"
- <sup>262</sup> ISO/DIS 8407.3, Procedures for removal of corrosion products from corrosion test specimen
- <sup>263</sup> ΕΛΟΤ 452, "Ποιότητα νερού - Προσδιορισμός συνολικού υδραργύρου με φασματοφωτομετρία ατομικής απορρόφησης δίχως φλόγα - (μετά από χώνευση της οργανικής ύλης με διάλυμα υπερμαγγανικών - υπερθειικών ιόντων)", Αθήνα 1983
- <sup>264</sup> ASTM D6132 - 08 "Standard Test Method for Nondestructive Measurement of Dry Film Thickness of Applied Organic Coatings Using an Ultrasonic Gage"
- <sup>265</sup> DIN EN 1062-3 (2008-04), "Paints and varnishes - Coating materials and coating systems for exterior masonry and concrete - Part 3: Determination of liquid water permeability"
- <sup>266</sup> DIN EN ISO 7783-2, "Coating materials and coating systems for exterior masonry and concrete - Part 2: Determination and classification of water-vapour transmission rate (permeability)"
- <sup>267</sup> ASTM C1202 - 12 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration
- <sup>268</sup> Whiting, D. 1981, Rapid determination of the chloride permeability of concrete. Final Report No. FHWA/RD-81/119. Federal Highway Administration, Washington, DC.
- <sup>269</sup> Crank J. *The Mathematics of Diffusion*. Oxford: Oxford University Press, 1975
- <sup>270</sup> Miguel Angel Sanjuán , César del Olmo, Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating, *Building and Environment* 36 (2001) 949–953
- <sup>271</sup> BS EN 24624:1993/ BS EN ISO 4624:2003 "Paints and varnishes-Pull off test for adhesion"
- <sup>272</sup> ASTM D4541 - 09e1, "Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers", Vo. 06.02, 2009.
- <sup>273</sup> ASTM D 907 "Standard terminology of adhesives"
- <sup>274</sup> ISO 2409:1992e, "Paints and varnishes – Cross cut test"
- <sup>275</sup> ASTM D3330/D3330M - 04(2010) Standard Test Method for Peel Adhesion of Pressure-Sensitive Tape
- <sup>276</sup> ASTM B117 - 11 "Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus"
- <sup>277</sup> American Galvanizers Association (1998), "Salt Spray Testing vs. Atmospheric Corrosion Data", Galvanising Insights, Vol. III, No. I, pp. 3.
- <sup>278</sup> Mattson E. (1995), "Basic Corrosion Technology for Scientists and Engineers", 2d Edition, IOM Communications, London.
- <sup>279</sup> ASTM D610-07, Standard Test Method for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces
- <sup>280</sup> ASTM D714 - 02(2009) Standard Test Method for Evaluating Degree of Blistering of Paints
- <sup>281</sup> ASTM D1654-08 Standard Test Method for Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosive Environments
- <sup>282</sup> ASTM C876 - 09 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete
- <sup>283</sup> Vassie, R.P.W., 'Evaluation of techniques for investigating the corrosion of steel in concrete', TRRL Supplementary Report 39, Transport and Road Research Laboratory, London, 1978.
- <sup>284</sup> ASTM G59 - 97(2009) «Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements» Vol. 03.02.



- 
- <sup>285</sup> J. Broomfield, *“Corrosion of Steel in Concrete Understanding, Investigation and Repair”*, E&FN SPOK, UK, 1997, pp. 16–21.
- <sup>286</sup> Α. Μοροπούλου, Υλικά Ι «Χαρακτηρισμός, Έλεγχος Ποιότητας, Διάγνωση φθοράς και Συντήρηση Δομικών Υλικών μεθοδολογία ενοργάνων & μη καταστροφικών τεχνικών» εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2003, σελ. 421.
- <sup>287</sup> Α. Μοροπούλου, Σημειώσεις για τις εργαστηριακές ασκήσεις του μαθήματος «Υλικά», 7ο εξάμηνο Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., «Μη καταστρεπτικές μέθοδοι εξέτασης των υλικών – εφαρμογή στο εργαστήριο και επί τόπου», ΕΜΠ, Αθήνα 1996, σελ.100.
- <sup>288</sup> ASTM D6132 - 08 “Standard Test Method for Nondestructive Measurement of Dry Film Thickness of Applied Organic Coatings Using an Ultrasonic Gage”  
289 Miguel Angel Sanjuán , César del Olmo, *Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating*, Building and Environment 36 (2001) 949–953
- <sup>290</sup> ASTM D610-07, Standard Test Method for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces
- <sup>291</sup> ASTM D714 - 02(2009) Standard Test Method for Evaluating Degree of Blistering of Paints
- <sup>292</sup> ENV 13670-1, *Execution of Concrete Structures – Part 1: Common*”, European Committee for Standardization, 2000.
- <sup>293</sup> A.O.S. Solgaard, A. Michel, H. Stang, M. R. Geiker, C. Edvardsen, A. Küter, «Numerical modeling of cracking of concrete due to corrosion of reinforcement – Impact of cover thickness and concrete toughness», Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - Assessment, Durability, Monitoring and Retrofitting of Concrete Structures- B. H. Oh, et al. (eds), 2010 Korea Concrete Institute, Seoul, ISBN 978-89-5708-181-5
- <sup>294</sup> R. Farhat, «Thickness of Concrete Cover for Corrosion Protection of Steel Reinforcement and Crack Control», Advanced Materials Research, Vol. 95, 2010, pp. 61-68, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.95.61
- <sup>295</sup> J. Broomfield, *“Corrosion of Steel in Concrete Understanding, Investigation and Repair”*, E&FN SPOK, UK, 1997, pp. 16–21.
- <sup>296</sup> E. Carretti, L. Dei, Physicochemical characterization of acrylic polymeric resins coating porous materials of artistic interest, Progress in Organic Coatings, Volume 49, Issue 3, 2004, pp. 282–289
- <sup>297</sup> M. Delucchi\*, A. Barbucci, G. Cerisola, “Crack-bridging ability of organic coatings for concrete: influence of the method of concrete cracking, thickness and nature of the coating”, Progress in Organic Coatings 49 (2004) 336–341
- <sup>298</sup> M.H.F. Medeiros, P. Helene, Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption, Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 3, March 2009, Pages 1476–1484
- <sup>299</sup> Vagelis G Papadakis, “Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress”, Cement and Concrete Research, Volume 30, Issue 2, February 2000, Pages 291–299
- <sup>300</sup> D.C. Park, *“Carbonation of concrete in relation to CO<sub>2</sub> permeability and degradation of coatings”*, Construction and Building Materials 22 (2008) 2260–2268
- <sup>301</sup> M. Tsukagoshi, H.Miyauchi, K. Tanaka, “Protective performance of polyurethane waterproofing membrane against carbonation in cracked areas of mortar substrate”, Construction and Building Materials, Volume 36, November 2012, Pages 895–905
- <sup>302</sup> .B. Aguiar, C. Junior, “Carbonation of surface protected concrete”, Construction and Building Materials 49 (2013) 478–483
- <sup>303</sup> R. Selvaraj, M. Selvaraj, S.V.K. Iyer, Studies on the evaluation of the performance of organic coatings used for the prevention of corrosion of steel rebars in concrete structures, Progress in Organic Coatings Volume 64, Issue 4, March 2009, Pages 454–459
- <sup>304</sup> P. Haisley, An Overview of Paints and Elastomeric Coatings, Hawaii Pacific Architecture, 1996
- <sup>305</sup> R. Vera, J. Apablaza, A.M. Carvajal, E.Vera, Effect of Surface Coatings in the Corrosion of Reinforced Concrete in Acid Environments, International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE, 8 (2013) 11832 - 11846
- <sup>306</sup> C. Vipulanandan, J. Liu, Performance of polyurethane-coated concrete in sewer environment, Cement and Concrete Research Volume 35, Issue 9, September 2005, Pages 1754–1763
- <sup>307</sup> J. Broomfield, *“Corrosion of Steel in Concrete Understanding, Investigation and Repair”*, E&FN SPOK, UK, 1997, pp. 16–21.