

## ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΘΟΔΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΟΠΛΙΣΜΩΝ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η αύξηση του επιπέδου της ζημιάς που προκαλείται από τη διάβρωση, έχει ανοίξει νέους ορίζοντες για να επιτευχθεί η ανθεκτικότητα και τη σταθερότητα του οπλισμένου σκυροδέματος των κατασκευών, ειδικά σε ιδιαίτερα επιθετικές περιβαλλοντικά περιοχές.

Διάφορα φαινόμενα συμβάλλουν στην έναρξη της διάβρωσης του χάλυβα σε οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι πιο κοινές αιτίες διάβρωσης, αναφέρονται στην ενανθράκωση του σκυροδέματος και στην περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε χλωριόντα.

Λόγω της εγγενούς αλκαλικής του φύσης, το σκυρόδεμα δημιουργεί ένα προστατευτικό περιβάλλον γύρω από τον χάλυβα, αλλά αυτό το περιβάλλον δεν είναι αιώνιο. Οι μελέτες δείχνουν ότι η ζημία λόγω διάβρωσης συμβαίνει όταν κρίσιμες ποσότητες επιθετικών παραγόντων διεισδύουν μέσα από τους πόρους στο σκυρόδεμα, επιτίθενται και καταστρέφουν την Παθητικοποίηση του σκυροδέματος και την προστατευτική μεμβράνη γύρω από τον χάλυβα και εκθέτει τις ράβδους οπλισμού στην διαδικασία διάβρωσης.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι επιθετικών παραγόντων που μπορούν να δημιουργήσουν αυτό το φαινόμενο:

- **Ενανθράκωση σκυροδέματος:** Το διοξείδιο του άνθρακα και η υγρασία στον περιβάλλοντα αέρα διεισδύουν στους πόρους του σκυροδέματος και μειώνουν το επίπεδο του pH σε τιμές κοντά στο ουδέτερο δημιουργώντας την ενανθράκωση του σκυροδέματος. Σε τέτοιες συνθήκες οι ράβδοι οπλισμού είναι εκτεθειμένες στην διάβρωση.
- **Χλωριόντα:** Διεισδύοντας τα χλωριόντα στο σκυρόδεμα, μπορούν να καταστρέψουν το προστατευτικό φιλμ του χαλύβδινου οπλισμού και να παράγουν τοπική διάτρηση (βελονισμούς) και εξάχνωση στην επιφάνεια του χάλυβα, που μπορεί να οδηγήσουν ακόμη και σε αστοχία του χαλύβδινου οπλισμού.

Η διάβρωση των ράβδων οπλισμού, που δημιουργήθηκε από αυτά τα φαινόμενα σχηματίζουν οξείδιο του σιδήρου ( $Fe^2O^3$ ) (σκουριά). Αφού το οξείδιο του σιδήρου (σκουριά) είναι πολύ πιο ογκώδης από τον συμπαγή χάλυβα (5-6 φορές περισσότερο), έστω και μια μικρή απώλεια του μέταλλο (π.χ.  $\sim 0,1$  mm) από την επιφάνεια των ράβδων οπλισμού μπορεί να προκαλέσει επαρκή προϊόντα διάβρωσης για τη δημιουργία εσωτερικών τάσεων που ραγίζουν και εκτινάσσουν το σκυρόδεμα επικάλυψης (Εικόνα 1).



Φωτογραφία 1. Ένα παράδειγμα από οπλισμένο σκυρόδεμα κατεστραμμένο από διάβρωση των ράβδων του οπλισμού.

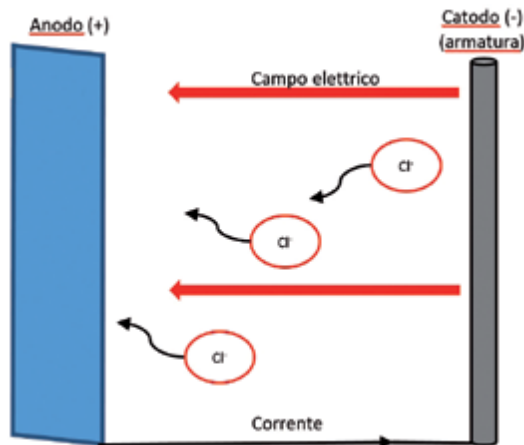
Η διάβρωση από τα χλωριόντα δρα σημειακά και με άκρως καταστροφικό τρόπο, δημιουργώντας διάτρηση (βελονισμούς) και εξάχνωση χωρίς να παρουσιάζει εξωτερικά σημάδια από την δράση της, είναι αναμφίβολα ο πιο επιθετικός και επικίνδυνος τύπος για τη δομική ευστάθεια του στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος. Είναι ο κύριος λόγος της ξαφνικής πτώσης των εξωστών.

Η **καθοδική προστασία (CP)** έχει αποδειχθεί η πιο αποτελεσματική τεχνική για την αποκατάσταση του οπλισμένου σκυροδέματος σε δομές μολυσμένες από χλωρίδια και να σταματήσει τη διάβρωση, όποιο κι αν είναι το επίπεδό της.

Με την εφαρμογή της καθοδικής προστασίας, η δυνατότητα διάβρωσης μεταφέρεται προς τα ανόδια, η διαδικασία της διάβρωσης των οπλισμών τερματίζεται. Για να εφαρμοστεί η καθοδική προστασία, τα κατεστραμμένα μέρη του σκυροδέματος πρέπει να αφαιρεθούν και αποκατασταθούν. Δεν είναι πάντα απαραίτητο για να αφαιρεθεί το στερεό, μολυσμένο μέρος του σκυροδέματος.

**Η εφαρμογή καθοδικής προστασίας σε μια κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα μεταμορφώνει το περιβάλλον γύρω από την εφαρμογή και παράγει έναν αριθμό θετικών αποτελεσμάτων:**

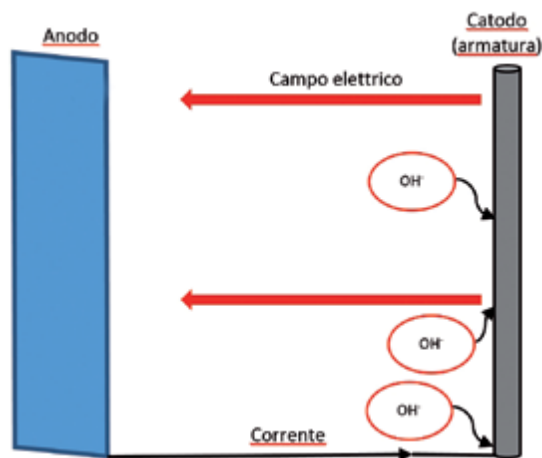
- **Αποχλωρίωση:** Μέσα στο μπετόν με καθοδική προστασία, με το ρεύμα μεταφέρονται τα ιόντα ανάλογα με την συγκέντρωση και την κινητικότητα τους. Τα θετικά ιόντα κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση με το ρεύμα, δηλαδή από την άνοδο στην κάθοδο, ενώ τα αρνητικά ιόντα κινούνται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Με τον τρόπο αυτό, το ρεύμα διαρρέει το μολυσμένο από χλωρίδια σκυρόδεμα και προκαλεί τη μετανάστευση των χλωριδίων ( $Cl^-$ ) από την περιοχή γύρω από την κάθοδο (- ράβδοι οπλισμού) έως την περιοχή γύρω από την άνοδο (+ ανόδια). Σε τέτοια περιπτώσεις, το ρεύμα ροής μειώνει την περιεκτικότητα σε χλωριόντα στην επιφάνεια των ράβδων οπλισμού, η οποία είναι γνωστή ως «**αποχλωρίωση**» (Εικόνα 2α).



Εικόνα 2α

- **Επαναπαθητικοποίηση του σπλισμού:** Το οξυγόνο και νερό στην επιφάνεια των ράβδων σπλισμού (καθοδική ζώνη) με ηλεκτρόνια  $e^-$  από τα ανόδια καταναλώνονται και σχηματίζουν ιόντα υδροξυλίου ( $2OH^-$ ) σύμφωνα με την εξίσωση:  $H_2 + \frac{1}{2} O_2 + e^- \rightarrow 2OH^-$

Τα ιόντα υδροξυλίου αποκαθιστούν την αλκαλικότητα της επιφάνειας του μετάλλου σε επίπεδο pH έως περίπου 12, γνωστή ως «επανααλκαλοποίηση» (Εικόνα 2β) και προκαλούν την **Επαναπαθητικοποίηση του σπλισμού**.



Εικόνα 2β

### Καθοδική πρόληψη

Νέες δομές που βρίσκονται σε περιβάλλον με πολλούς επιθετικούς παράγοντες, μπορεί να είναι εξοπλισμένες με CP σύστημα που εφαρμόζεται στην αρχή του διάρκειας ζωής τους. Αυτό το είδος προστασίας ονομάζεται «**καθοδική πρόληψη**» και μπορεί να χρησιμοποιηθεί **σε νέες δομές ή σε υπάρχουσες κατασκευές** στις οποίες η διαδικασία διάβρωσης δεν έχει ξεκινήσει αλλά είναι πιθανό να συμβεί λόγω της προοδευτικής διείσδυσης των επιθετικών πρακτόρων μετά από κάποια χρόνια.

Υπάρχουν δύο τύποι καθοδικής προστασίας: **με συνεχές ρεύμα (ICCP)** ή **γαλβανικό ρεύμα με θυσιαζόμενες ανόδους (SACP)**. Όταν έχουν σχεδιαστεί, εγκατασταθεί σωστά και τεθεί σε

λειτουργία, και τα δύο συστήματα έχει αποδειχθεί ότι έχουν την ικανότητα να ελέγχουν και να μετριάσουν τη διάβρωση παρέχοντας το απαιτούμενο επίπεδο προστασίας. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων είναι ότι ο τύπος του συνεχούς ρεύματος απαιτεί ένα τροφοδοτικό και μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος για να λειτουργήσει, ενώ το γαλβανικό σύστημα βασίζεται στο αρχή της ένωσης δύο διαφορετικών μετάλλων μαζί στο ίδιο περιβάλλον που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, παρόμοια με μια μπαταρία.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του SACP είναι ότι απαιτεί μόνο ένα ελάχιστο επίπεδο συντήρησης αφού εγκατασταθεί.

Η απλότητα του σχεδιασμού του και το χαμηλό επίπεδο της απαιτούμενη συντήρηση, θεωρούνται ως τα κύρια πλεονεκτήματα του SACP συστήματα. Σε ένα σύστημα SACP το ρεύμα αυτορυθμίζεται ανάλογα με τον ρυθμό διάβρωση του χαλύβδινου σπλισμού, που σημαίνει ότι το σύστημα λειτουργεί όταν και όσο απαιτείται και χωρίς υπερφορτώσεις Ένα σύστημα SACP έχει επίσης όρια.

Τα γαλβανικό συστήματα έχει το δικό τους σταθερό, φυσικό δυναμικό και ως αποτέλεσμα, σε μεγάλη ποσότητα και έντονα διαβρωμένες ράβδους σπλισμού, το ρεύμα που δημιουργείται μπορεί να μην είναι πάντα επαρκής για να εγγυηθεί αποπόλωση του χάλυβα. Σε τέτοια περιπτώσεις, αυξάνοντας τον αριθμό των θυσιαζομένων ανοδίων και χρησιμοποιώντας χαμηλή ειδική αντίσταση στο κονίαμα μπορεί να είναι μια αποτελεσματική λύση.

Επίσης, αφού δεν απαιτείται πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, το σύστημα δεν επηρεάζεται από διακοπές του ρεύματος. Επιπλέον, γαλβανικά συστήματα χρησιμοποιούν σχετικά χαμηλά φυσικά ρεύματα που αποτρέπουν την δημιουργία προβλημάτων που προκύπτουν λόγω του υδρογόνου στην ευθραυστότητα και διάβρωση υπό πίεση του προεντεταμένου χάλυβα, που θα μπορούσε να συμβεί, από την άλλη, στην περίπτωση προστασίας με συστήματα ICCP.

Η διάρκεια ζωής των ανοδίων σε συστήματα SACP καθορίζεται από διάφορους παράγοντες και αυτοί μπορεί να διαφέρουν όσο περνάει ο καιρός Η σχέση μεταξύ του ανοδικού ρεύματος που καταναλώνει την άνοδο και του ρυθμού διάβρωσης, που εκφράζεται ως απώλεια μάζας με την πάροδο του χρόνου, μπορούν να ληφθούν με την εφαρμογή του **πρώτου νόμου του Faraday**. Η μάζα του ανοδικού απαιτούμενου υλικού, το οποίο περιλαμβάνει επίσης συντελεστές απόδοσης και χρήσης, υπολογίζεται με την εφαρμογή του νόμου αυτού σύμφωνα με η εξίσωση:

$$W = (ARC * CR * L) / (E * U)$$

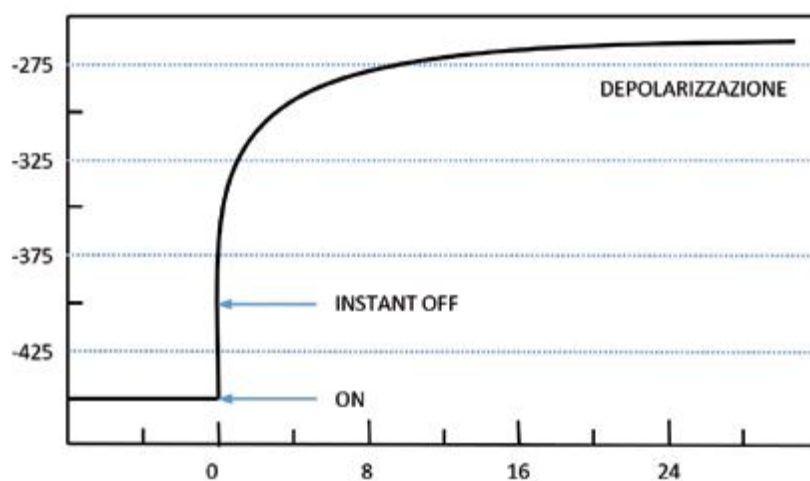
Όπου:

- Το ARC είναι το μέσο ρεύμα που απαιτείται (συνήθως από 2 έως 20 mA/m<sup>2</sup> για παλιά δομές και από 0,2 έως 2 mA/m<sup>2</sup> για νέες κατασκευές σύμφωνα με το ISO 12696:2012 «Καθοδική προστασία του χάλυβας σε σκυρόδεμα»).
- CR είναι ο ρυθμός κατανάλωσης της ανόδου.
- L είναι η διάρκεια σχεδιασμού.
- E είναι η απόδοση του μετάλλου που χρησιμοποιείται.
- U είναι ο συντελεστής χρήσης της ανόδου.

Για παράδειγμα, αν λάβουμε υπόψη μια άνοδο ψευδαργύρου που παράγει σταθερό ρεύμα 1mA για ένα έτος, το ποσοστό κατανάλωσης θα ήταν περίπου 12-14 g ανοδικού υλικού. Λαμβάνοντας υπόψη τα πρότυπα για «Καθοδική προστασία του χάλυβα στο σκυρόδεμα»- (ISO, B. (2016). 12696 -2016. Cathodic protection of steel in concrete.

SP0216 (2016). Sacrificial cathodic protection of reinforcing steel in atmospherically exposed concrete structures. Houston, TX: NACE International.)

Τα πιο ευρέως διαδεδομένα κριτήρια για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος CP που εφαρμόζεται σε μια δομή είναι να μετρήσετε την αποπόλωση των ράβδων του οπλισμού στην διάρκεια του χρόνου. Ξεκινώντας από το δυναμικό "Instant OFF", μέτρηση δυναμικού πριν την σύνδεση των ανόδων Στην συνέχεια μετράμε το δυναμικό (πόλωση) των ράβδων του οπλισμού όταν είναι συνδεδεμένες με τα ανόδια, μετά την μέτρηση αυτή αποσυνδέονται τα ανόδια από τους ράβδους οπλισμού και η μέτρηση επαναλαμβάνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Θα υπάρξει αποπόλωση, φαινόμενο που παρουσιάζεται από αύξηση του δυναμικού του χάλυβα οπλισμού σε πιο θετικές τιμές (π.χ. πόλωση -450 mV, αποπόλωση -285mV). Σύμφωνα με το ISO 12696, αυτή η μετατόπιση του δυναμικού πρέπει να είναι τουλάχιστον 100 mV το πολύ εντός 24 ωρών ή τουλάχιστον 150 mV για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Παρακάτω εμφανίζεται ένα τυπικό γράφημα αποπόλωσης στο Σχήμα 3.στ



Σχήμα 3.στ

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του δυναμικού περιλαμβάνουν χειροκίνητες ή φορητές συσκευές ή αυτά που είναι εγκατεστημένα μόνιμα στη δομή. Η χρήση του μόνιμου, διαδικτυακού συστήματος παρακολούθησης, είναι προτιμότερο γιατί επιτρέπει την ύπαρξη δεδομένων έχει πρόσβαση ανά πάσα στιγμή και επίσης προσδιορίζει προβλήματα άμεσα. Για τις πιο σημαντικές δομές, επιθεωρήσεις πρέπει γενικά να πραγματοποιούνται σύμφωνα με καθορισμένο χρονοδιάγραμμα που μπορεί να διαφέρει από μήνες σε χρόνια, εκτός αν υπάρχουν ιδιαίτερες προϋποθέσεις που απαιτούν συχνότερους ελέγχους.

Ας ελπίσουμε ότι, στο όχι και πολύ μακρινό στο μέλλον, μεγάλες υποδομές θα είναι εξοπλισμένες με συστήματα αυτού του τύπου, προκειμένου να ξεπεραστούν τα προβλήματα ασφάλειας, αλλά επίσης και για την παρακολούθηση και την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών που σχετίζονται με την αλλοίωση των κατασκευών.