

ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ & ΤΡΟΠΟΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

**ΔΗΜΑΔΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ
ΚΑΤΣΕΝΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΑ**

Περίληψη

Στην εργασία αυτή αναλύεται το πολύπλοκο φαινόμενο της διάβρωσης του οπλισμού των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και παρουσιάζονται τρόποι αποκατάστασης. Είναι σημαντικό να προσεγγιστεί το πρόβλημα της διάβρωσης από την θεωρητική του πλευρά γι' αυτό και καταγράφονται τα αίτια, οι μηχανισμοί και οι συνέπειες του φαινομένου αυτού. Τέλος γίνεται διάκριση των επεμβάσεων σε ενεργές και ήπιες και καταλήγουμε σε κάποια συμπεράσματα για την αντιμετώπιση της διάβρωσης.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται το φαινόμενο, έργα από οπλισμένο σκυρόδεμα κατασκευασμένα πριν από αρκετές δεκαετίες να φθάνουν στο τέλος της χρήσιμης ζωής τους, όχι επειδή κρίνονται ως λειτουργικά ανεπαρκή, ούτε γιατί κάποια εξωτερική μηχανική δράση όπως ο σεισμός ή τα φορτία χρήσης, προκάλεσε την αστοχία, αλλά εξαιτίας της φυσικής γήρανσής τους. Το πρόβλημα επομένως που καλείται ένας σύγχρονος μηχανικός να λύσει, είναι αυτό της ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος σε διάρκεια, το οποίο οφείλεται κυρίως στους μηχανισμούς διάβρωσης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των μετάλλων είναι πολλοί γι' αυτό και το φαινόμενο της διάβρωσης είναι πολύπλοκο και συχνά μη προβλέψιμο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συστηματική, επιστημονική έρευνα δεν έχει μακρά ιστορία, η δε κάλυψη από Κανονισμούς και Προδιαγραφές είναι από ελάχιστη έως ανύπαρκτη.

2.ΑΙΤΙΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

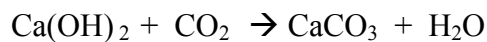
Στη χώρα μας είναι εξαιρετικά σπάνιο το ενδεχόμενο σταδιακής αποσύνθεσης του σκυροδέματος λόγω εναλλαγών πήξεως-τήξεως του νερού των πόρων, ή λόγω προσβολής αδρανών από την αλκαλικότητα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Συνεπώς το κύριο πρόβλημα από άποψη ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος είναι η διάβρωση των οπλισμών. Οι ράβδοι οπλισμού προστατεύονται από τη διάβρωση μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου, που δημιουργείται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Το σκληρυμένο σκυρόδεμα περιέχει μεγάλο ποσοστό οξειδίου του ασβεστίου, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, στο νερό των πόρων έτσι ώστε να δημιουργείται αλκαλικό περιβάλλον με τιμή pH γύρω στο 12.5. Με αυτόν τον τρόπο προστατεύεται ο χάλυβας από τη διάβρωση εφόσον το οξύδιο παραμένει ανέπαφο. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως παθητικοποίηση του χάλυβα. [2]

Οι τρεις βασικοί λόγοι διάβρωσης του χάλυβα είναι:

1. Ενανθράκωση του σκυροδέματος
2. Επίδραση χλωριόντων
3. Ρωγμές

2.1 ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ [6]

Κατά την πήξη του τσιμέντου παράγεται ως γνωστόν υδροξείδιο του ασβεστίου-Ca(OH)₂. Το υδροξείδιο του ασβεστίου αυτό πλεονάζει στο σκυροδέμα. Μπορεί να θεωρηθεί ότι το 25% περίπου του βάρους του τσιμέντου, υπάρχει μετά την κρυστάλλωση υπό μορφή υδροξειδίου του ασβεστίου. Αποτέλεσμα του πλεονάσματος αυτού είναι το υψηλό αλκαλικό pH του μπετόν (περίπου 12,5). Όσο ο οπλισμός βρίσκεται μέσα στο αλκαλικό αυτό περιβάλλον είναι προστατευμένος από οξείδωση. Αντιδράσεις όμως με διεισδύουσες όξινες ουσίες μειώνουν διαρκώς το pH. Την μέγιστη σημασία έχει εδώ η επίδραση του CO₂. Αυτό αφομοιώνεται τριχοειδώς από την επιφάνεια του μπετόν, διαλυμένο στο νερό της βροχής, συχνά μαζί και με SO₂ (σε βιομηχανικές και μολυσμένες περιοχές). Το αποτέλεσμα της απορρόφησης του CO₂ είναι η βαθμιαία εξουδετέρωση της αλκαλικότητας:



Το δημιουργημένο ανθρακικό ασβέστιο δίνει και το όνομα της ενανθράκωσης στο φαινόμενο αυτό. Η ενανθράκωση επιταχύνεται δραστικά από πόρους, φωλιές, κακοτεχνίες, ανομοιογενή κακή δόνηση κ.λ.π. Αξιοσημείωτο είναι ότι η ενανθράκωση μένει απαρατήρητη για πολλά χρόνια. Μόνον όταν οξειδωθεί ο οπλισμός παρατηρούνται, αρχικά τριχοειδείς ρωγμές λόγω της αύξησης του όγκου του. Ένα βίαιο φαινόμενο (σεισμός, κρούση, κ.λ.π.) αποκαλύπτει πολλές φορές, λόγω αποκολλήσεων, την κατάσταση οξείδωσης.

Παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα ενανθράκωσης:

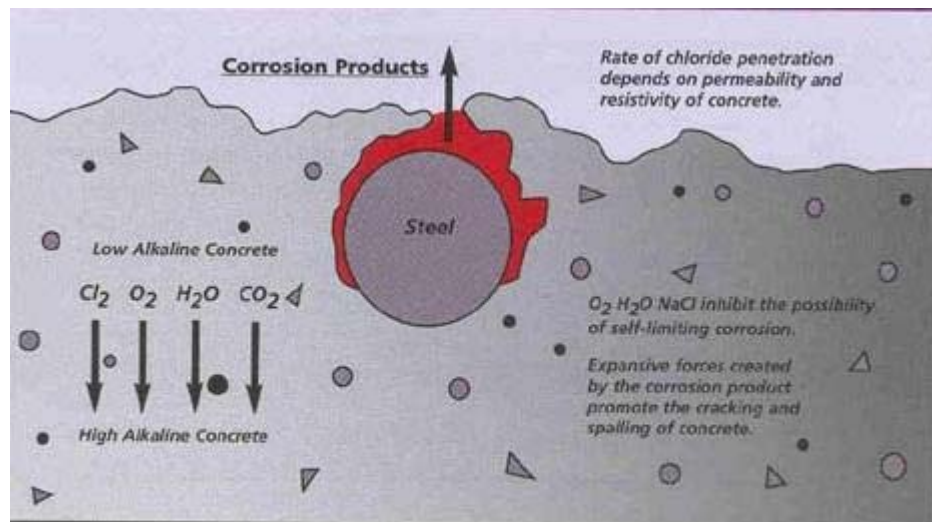
- α) Η αυξημένη περιεκτικότητα του μπετόν σε τσιμέντο μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης.
- β) Σχέση νερού τσιμέντου (W/Z): Το τσιμέντο δεσμεύει χημικά και φυσικά, περίπου το 0,4 του βάρους του σε νερό. Στην πράξη για να επιτυγχάνεται όμως εργασιμότητα συχνά αυξάνεται η σχέση αυτή σε 0,5 ή και 0,6. Το πλεονάζον και μη δυνάμενο να δεσμευτεί νερό εξατμίζεται αφήνοντας τον όγκο του σαν τριχοειδή και πόρους που αργότερα θα είναι η αφετηρία της ενανθράκωσης.
- γ) Η σχετική υγρασία του αέρα καθώς και η ποιότητα και το πάχος της επικάλυψης.

Η αντίδραση πραγματοποιείται παρουσία μικρής ποσότητας νερού. Το νερό που δημιουργείται μετά την αντίδραση διαχέεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος όπως επίσης και το CO₂ μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Αποτέλεσμα είναι το pH του σκυροδέματος να μειώνεται σε τιμές κάτω του 9 (περίπου 8.3). Με την διαδικασία της ενανθράκωσης, ο χάλυβας αποπαθητικοποιείται οπότε πλέον η διάβρωση είναι βέβαιη.

2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ [2]

Τα χλωριόντα που μπορεί να διατρήσουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίου όταν φτάσουν μέσω του νερού των πόρων μέχρι τον οπλισμό, μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος, αν έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτά αδρανή από παραλίες ή θαλασσινό νερό μείξης (νησιωτική Ελλάδα), ή πρόσμικτα βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα, είτε από το φυσικό περιβάλλον. Τα χλωριόντα μπορούν να διαπεράσουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίων, μέσα από τους πόρους του στρώματος με μεγαλύτερη ευκολία από άλλα ιόντα, με αποτέλεσμα την τοπική ή γενική καταστροφή του επιφανειακού προστατευτικού οξειδίου και την έναρξη της οξείδωσής του.

Έχει παρατηρηθεί όμως ότι η ενανθράκωση και η διείσδυση χλωριόντων δεν είναι ανεξάρτητες διαδικασίες, και μάλιστα η πρώτη επιταχύνει σημαντικά τη δεύτερη. Όταν το υδροξείδιο του ασβεστίου του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού αντιδρά με τα χλωριόντα και τα δεσμεύει, περιορίζοντας την ποσότητα αυτών που διαχέονται προς τον οπλισμό, κάτω από την οριακή συγκέντρωση του 0.4-0.6%, που απαιτείται για την διάτρηση του προστατευτικού οξειδίου. Όταν όμως το υδροξείδιο του ασβεστίου μετατραπεί με την ενανθράκωση σε ανθρακικό ασβέστιο τα χλωριόντα που είχε δεσμεύσει ελευθερώνονται και διατίθενται πλέον για την προσβολή του χάλυβα.



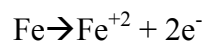
Σχήμα 1: Απεικόνιση διείσδυσης χλωριόντων. [7]

2.3 ΡΩΓΜΕΣ

Η ύπαρξη ρωγμών στο σκυρόδεμα αποτελούν μέσο για να περάσουν, τόσο το διοξείδιο του άνθρακα όσο και τα χλωριόντα στον οπλισμό και να επιταχύνουν την διαδικασία της διάβρωσης. Οι ρωγμές αυτές μπορεί να προέρχονται από συστολή ξήρανσης, από υψηλές εντάσεις ή από διάφορες συγκρούσεις.

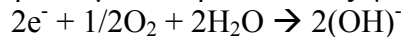
2.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ [1]

Η διάβρωση είναι ένα σύνθετο χημικό και ηλεκτροχημικό φαινόμενο και για να πραγματοποιηθεί απαιτείται ένας ηλεκτρολύτης και μία ηλεκτρική σύνδεση. Το ρόλο του ηλεκτρολύτη παίζει το σκυρόδεμα το οποίο είναι γεμάτο μικρούς πόρους που περιέχουν υγρασία ενώ η ράβδος του χάλυβα παρέχει την ηλεκτρική σύνδεση. Το φαινόμενο της ηλεκτρολύσεως μπορεί να διακριθεί σε δύο απλές διαδικασίες: της ανόδου και της καθόδου. Η άνοδος δημιουργείται στην περιοχή του χάλυβα όπου έχει καταστραφεί το προστατευτικό στρώμα οξειδίων έτσι ώστε τα άτομα του σιδήρου να μετατρέπονται σε ιόντα, ελευθερώνοντας ηλεκτρόνια.



Τα ηλεκτρόνια λόγω διαφοράς δυναμικού που δημιουργείται κατευθύνονται προς την κάθοδο. Ως κάθοδος μπορεί να λειτουργήσει η περιοχή του χάλυβα που έχει νερό και οξυγόνο

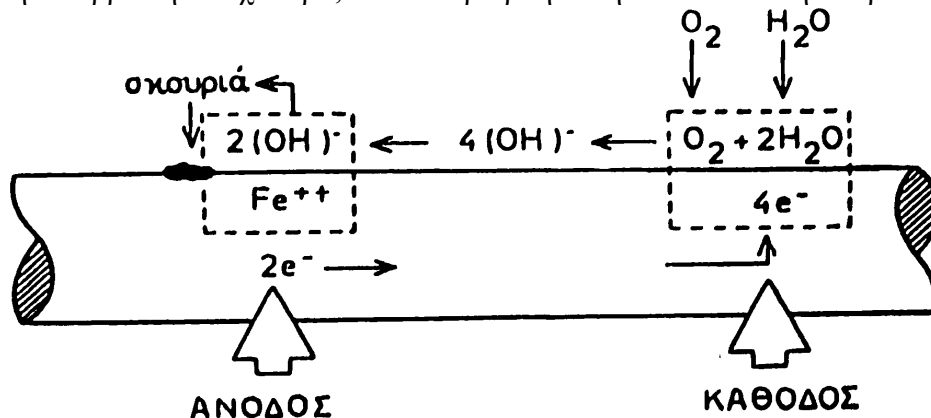
ανεξάρτητα αν έχει καταστραφεί το στρώμα οξειδίου,συνεπώς ολόκληρη η ράβδος.Εκεί αντιδρούν τα ηλεκτρόνια με το νερό και το οξυγόνο δίνοντας ιόντα υδροξυλίου.



Τα ιόντα υδροξυλίου κινούνται μέσα στο νερό των πόρων,από την περιοχή της καθόδου προς την άνοδο, όπου θα ενωθούν με τα ιόντα του σιδήρου και θα σχηματίσουν σκουριά.



Μετά την παραπάνω αντίδραση είναι δυνατόν να σχηματιστούν,διάφορα οξείδια του σιδήρου,π.χ. FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄.Συμπερασματικά,για τις αντιδράσεις οξειδώσεως έχουμε ότι οι ποσότητες νερού πριν και μετά παραμένουν σταθερές,το οξυγόνο είναι αυτό που καταναλώνεται για την διάβρωση του χάλυβα,ενώ το νερό βοηθά την διαδικασία ηλεκτρολύσεως.



Σχήμα 2 :Απλοποιημένο προσομοίωμα της ηλεκτροχημικής διαδικασίας διαβρώσεως του σιδηροπλισμού

3.ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ [5]

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

- Από την μία ,με την οξείδωση του χάλυβα μειώνεται η ενεργός διατομή του και άρα μειώνεται η στατική επάρκεια της κατασκευής.
- Από την άλλη, οι ρηγματώσεις αυξάνουν τη διαπερατότητα του σκυροδέματος σε CO₂ δημιουργώντας έτσι τις προϋποθέσεις για νέες ρηγματώσεις και τη γρήγορη διάβρωση του οπλισμού.

Γενικά υπολογίζεται ότι το 5% του Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος μιας σύγχρονης χώρας διατίθεται για αποκατάσταση τέτοιων βλαβών σε κατασκευές.

4.ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ

Σκοπός των επεμβάσεων είναι η αποκατάσταση των βλαβών,έτσι ώστε να διατηρεί η κατασκευή κατά την διάρκεια της ζωής της τα λειτουργικά και αισθητικά χαρακτηριστικά της.Όταν ανακαλυφθεί η φθορά,τα στοιχεία που χρειάζεται να γνωρίζει ο Μηχανικός για να αποφασίσει τα απαιτούμενα μέτρα που χρειάζεται να ληφθούν είναι η ηλικία της κατασκευής,η μέση ετήσια

διακύμανση της σχετικής υγρασίας στην περιοχή, η ταχύτητα φθοράς της κατασκευής, αλλά και η σκοπούμενη μελλοντική χρήση της.

Λαμβάνοντας υπ' όψη τα παραπάνω, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι αποκατάστασης οι οποίες διακρίνονται σε ήπιες και ενεργές.

4.1 ΗΠΙΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ

A) Στο σκυρόδεμα

4.1.1 Επαναλκαλοποίηση

Ο σκοπός της μεθόδου αυτής είναι να αυξήσουμε το pH του σκυροδέματος, όταν αυτό έχει λόγω ενανθράκωσης ή άλλων αιτιών μειωθεί. Η διαδικασία της επαναλκαλοποίησης στηρίζεται στην λειτουργία ανόδου και καθόδου. Επαλείφουμε την επιφάνεια του σκυροδέματος με ένα αλκαλικό υγρό με περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3). Ως άνοδος λειτουργεί ένα ηλεκτρόδιο ενώ ως κάθοδος λειτουργεί ο χάλυβας. Με την εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού δυναμικού (περίπου 10V), το αλκαλικό υγρό διαχέεται στους πόρους του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την αύξηση του pH του. [1]

Πλεονεκτήματα

1. Απλή στην εφαρμογή
2. Αποτελέσματα άμεσα ελεγχόμενα

Μειονεκτήματα

1. Μπορεί να υπάρξουν περιοχές που δεν αλκαλοποιήθηκαν
2. Ανεπαρκή πειραματικά στοιχεία για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου

4.1.2 Αφαίρεση χλωριόντων

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί έναν κατάλληλο ηλεκτρολύτη, μία ρητίνη ανταλλαγής ιόντων και ένα μεταλλικό πλέγμα που απλώνεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος και λειτουργεί ως άνοδος. Στο ηλεκτροχημικό κύκλωμα που δημιουργείται, ο οπλισμός δρα ως κάθοδος. Με την επιβολή ηλεκτρικού ρεύματος, τα χλωριόντα κινούνται προς την θετικά φορτισμένη άνοδο εκεί δεσμεύονται από την ρητίνη και απομακρύνονται από το σκυρόδεμα. [1]

Πλεονεκτήματα

1. Αποτελεσματική κυρίως σε καταστρώματα γεφυρών
2. Γρήγορα αποτελέσματα

Μειονεκτήματα

1. Υψηλό κόστος
2. Χρειάζεται καλής ποιότητας σκυρόδεμα (εξαιτίας κινδύνου εμφανίσεων ρωγμών)
3. Αυξάνει την διαπερατότητα του σκυροδέματος (αντιμετωπίζεται με εμποτισμό του σκυροδέματος με πολυμερή)
4. Προκαλεί ασυνάφεια στο χάλυβα-σκυρόδεμα
5. Μειώνει την ολκιμότητα σε χάλυβες υψηλής αντοχής

4.1.3 Αφαίρεση υγρασίας

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την αφαίρεση υγρασίας από κονιάματα και ονομάζεται “ηλεκτρική”. Για να είναι η μέθοδος εφαρμόσιμη, πρέπει το κονίαμα να περιέχει άλατα σε περιεκτικότητα 2%-5% και το pH του υλικού να είναι αρκετά υψηλό (μεγαλύτερο του

8).Η διαδικασία της μεθόδου αυτής είναι όμοια με αυτήν της αφαίρεσης χλωριόντων.Με την εφαρμογή του δυναμικού,τα ιόντα των αλάτων κινούνται προς τα ηλεκτρόνια,μεταφέροντας μαζί τους και νερό.Η μεταφορά των μορίων από τα ιόντα ερμηνεύεται με διάφορους μη ταυτόχρονους μηχανισμούς:

- τα ανιόντα και τα κατιόντα των αλάτων είναι ενυδατωμένα,αλλά σε διαφορετικό βαθμό το καθένα
- τα ανιόντα παρασύρουν κατά την κίνησή τους προς του πόλους το υδατικό περίβλημα των πόρων
- τα ιόντα καθώς μετακινούνται προς τα ηλεκτρόδια ,αναπτύσσουν δράσεις προωθήσεως με τις οποίες “σπρώχνουν” το νερό που βρίσκουν μπροστά τους μέσα στους λεπτούς πόρους(στους μεγάλους πόρους δε συμβαίνει η συγκεκριμένη διαδικασία)

Για να προκληθεί ικανοποιητική ξήρανση πρέπει να δημιουργηθεί ηλεκτρικό ρεύμα εντάσεως ίσης με 0,1 A- 1 A. [1]

Πλεονεκτήματα

1. Αποτελεσματική διαδικασία και με χαμηλό κόστος σε τοιχοποιίες

Μειονεκτήματα

1. Βραδύτατη διαδικασία(π.χ η μείωση της υγρασίας ενός τοίχου από 50% σε 30% διαρκεί 6 μήνες)

4.1.4 Σφράγισμα ρωγμών

- Ενέσεις ρητινών
- Ενέσεις τσιμέντου
- Επανακαλοποίηση σκυροδέματος

Ρητίνες[3]

Οι ρητίνες αποτελούν ένα υλικό που μπορεί να γεμίσει το κενό μιας ρωγμής,επιτυγχάνοντας τελικά την πλήρη συνέχεια του υλικού.Επίσης λόγω της σύστασής τους,παρεμποδίζουν την ελεύθερη διείσδυση οξυγόνου και υγρασίας, των κύριων δηλαδή συστατικών της οξειδωτικής διαδικασίας.Κατά την διαδικασία αυτή οι οπλισμοί εγκιβωτίζονται,με αποτέλεσμα την προστασία τους από την διάβρωση.Επίσης οι υψηλές αντοχές εφελκυσμού και συνάφειας των ρητινών εμποδίζουν την διεύρυνση των ρωγμών.Μεγάλο πλεονέκτημα στις ρητίνες είναι το γεγονός ότι δεν είναι υλικά ευάλωτα σε εξωτερικούς παράγοντες και άρα έχουν αντοχή στο χρόνο.Το βασικό μειονέκτημα των ρητινών είναι η χαμηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες(κίνδυνος σε πυρκαϊά),καθώς και το υψηλό τους κόστος.

Β)Στον οπλισμό

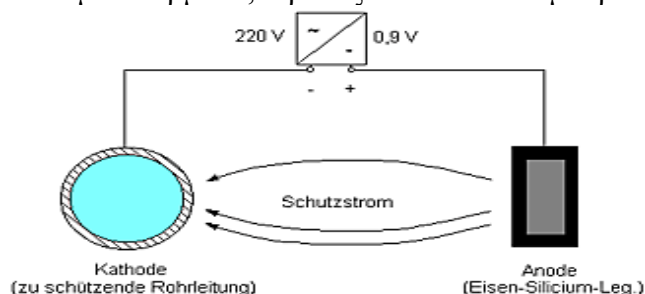
4.1.5 Καθοδική προστασία

Σκοπός της είναι να επανέλθει η αλκαλικότητα του σκυροδέματος και να αποφευχθεί η ενανθράκωση των οπλισμών.Κατά την μέθοδο της καθοδικής προστασίας,φορτίζουμε αρνητικά την εγκατάσταση που θέλουμε να προστατέψουμε.Έτσι ενώ πριν η εγκατάσταση ήταν άνοδος,τώρα γίνεται κάθοδος.Αυτό σημαίνει ότι η εγκατάσταση εξακολουθεί να είναι αρνητικά φορτισμένη,όπως και πριν την εφαρμογή της προστασίας,απλά η δράση αντιστρέφεται:έχει προδιάθεση να πάθει αναγωγή και όχι,όπως αρχικά, οξείδωση.Για να εφαρμοστεί η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθούν,είτε ηλεκτρική τάση από πηγή συνεχούς ρεύματος,είτε θυσιαζόμενοι άνοδοι. Άρα διακρίνουμε:

A)Σύστημα με εφαρμοζόμενο ρεύμα [4]

Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην σύνδεση του θετικού πόλου μιας πηγής συνεχούς ρεύματος με την επιφάνεια του σκυροδέματος, και του αρνητικού με τους οπλισμούς. Έτσι, η επιφάνεια γίνεται άνοδος και οι οπλισμοί κάθοδος. Τα ανιόντα υδροξυλίου (OH^-) που σχηματίζονται στην κάθοδο (χάλυβας) με την αντίδραση του νερού των πόρων με το οξυγόνο και με ελεύθερα ηλεκτρόνια από την κάθοδο κινούνται προς την επιφάνεια αντί, να κατευθύνονται κατά μήκος των ράβδων. Επίσης προς την επιφάνεια κινούνται υπό την επίδραση της τάσης συνεχούς ρεύματος και τα τυχόν υπάρχοντα χλωριόντα της μάζας του σκυροδέματος και του νερού των πόρων. Έτσι η εξουδετέρωση των ανιόντων, δηλαδή η οξείδωση, γίνεται στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος και όχι στον χάλυβα με συνέπεια τη διάβρωσή του.

Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής απαιτεί εξαιρετικά μεγάλη προσοχή γιατί αν εφαρμοστεί με λαθεμένες συνθήκες, η αύξηση της καθοδικότητας της εγκατάστασης πάνω από ορισμένο όριο (υπερπροστασία), μεγαλώνει εξαιρετικά την ταχύτητα διάβρωσης. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με την επάλειψη μεγάλου τμήματος της επιφάνειας του σκυροδέματος με ένα συνεχές στρώμα ηλεκτρικά αγωγίμης μπογιάς (συνήθως με βάση τον άνθρακα) με το οποίο συνδέονται σε αρκετά πυκνές αποστάσεις ηλεκτρικά καλώδια από το θετικό πόλο της ηλεκτρικής πηγής. Η σύνδεση των ράβδων οπλισμού ή η επαφή των ράβδων μέσω των συρμάτων επαρκεί. Αντίθετα εντελώς απαραίτητο είναι να μην υπάρχουν μεταξύ επιφανειακού αγωγίμου στρώματος και ράβδων οπλισμού σύρματα, καβίλιες και άλλα που μπορούν να βραχυκυκλώσουν το ηλεκτρικό κύκλωμα.



Σχήμα 3: Απεικόνιση συστήματος καθοδικής προστασίας, με χρήση ηλεκτρικής πηγής. [11]

Πλεονεκτήματα

1. Μεγάλη διάρκεια ζωής των ανόδων άρα όχι συχνή αντικατάσταση
2. Πλήρης αναστολή της διάβρωσης του χάλυβα εφαρμόζοντας ποικίλες τιμές ρεύματος
3. Μία άνοδος παρέχει υψηλά ποσά ρεύματος και έτσι προστατεύεται μεγάλο μέρος της κατασκευής
4. Μπορεί να τοποθετηθεί μακριά από την κατασκευή επειδή παρέχει υψηλές τάσεις (έως 100V)

Μειονεκτήματα

1. Απαιτεί συχνή ρύθμιση και προσαρμογή (πιθανή διακοπή ρεύματος, διακύμανση ιδιοτήτων διαβρωτικού περιβάλλοντος)
2. Ασυνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος
3. Μειώνει την ολκιμότητα σε χάλυβες υψηλής αντοχής λόγω εκλύσεως υδρογόνου
4. Ακριβότερη από την β μέθοδο (χρησιμοποίηση δαπανηρότερων δυναμοστατών σε διαβρωτικό περιβάλλον με μεγάλες διακυμάνσεις των ιδιοτήτων του)
5. Αλληλεπιδρά με γειτονικές εγκαταστάσεις προκαλώντας τους διάβρωση
6. Πρέπει να γίνεται σωστή εκλογή των ορίων τιμών της καθοδικής τάσης με προηγούμενη εργαστηριακή έρευνα

7. Δεν μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα στην περίπτωση προεντεταμένων χαλύβων, λόγω του κινδύνου της ψαθυροποίησης από έκλυση υδρογόνου, εκτός αν χρησιμοποιηθούν κατάλληλοι αυτοματισμοί περιορισμού της μεταβλητότητας του εφαρμοζόμενου ρεύματος (κατάλληλα ηλεκτρόδια μη βλαπτικά για τον οπλισμό του σκυροδέματος).
8. Για την πραγματοποίηση αυτής της μεθόδου πρέπει να βρεθεί ένα σταθερό υλικό ανόδου, που θα μπορεί να καταναίμει το ρεύμα καθοδικής προστασίας σε μεγάλες επιφάνειες.



Σχήμα 4 : Εφαρμογή της καθοδικής προστασίας με εξωτερικά εφαρμοζόμενο ρεύμα σε γέφυρα. [12]

Εφαρμόζεται πολύ περισσότερο σε σχέση με την μέθοδο θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις:

- α) για την προστασία σωλήνων μέσα στο έδαφος σε γλυκό ή θαλασσινό νερό
- β) σε κατασκευές πλωτών και μη, μέσα στη θάλασσα
- γ) για πλοία

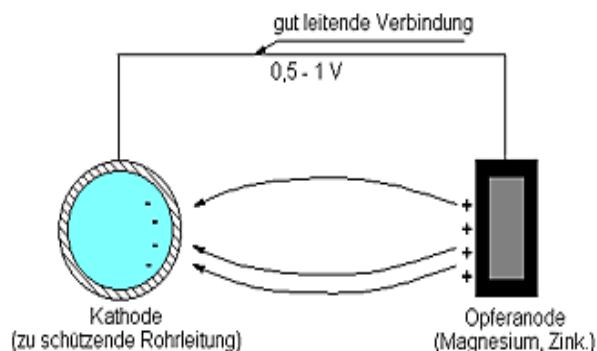


Σχήμα 5 : Καθοδική προστασία σε βιομηχανικό χώρο. [14]

Β) Σύστημα θυσιαζόμενης ανόδου [10]

Κατά αυτόν τον τρόπο καθοδικής προστασίας τοποθετείται στους οπλισμούς σειρά πλακών από μέταλλο ανοδικότερο του χάλυβα, το οποίο λειτουργεί ως θυσιαζόμενη άνοδος. Συνήθως χρησιμοποιούνται κράματα Mg, Zn, Al. Οι πλάκες αυτές συνδέονται με την κατασκευή χωριστά η καθεμία με τη βοήθεια εξωτερικά μονωμένων αγωγών και με την παρεμβολή αντίστασης. Τα ανοδικότερα αυτά μέταλλα αποκτούν αυθόρμητα αρνητικό δυναμικό σε σχέση με το διαβρωτικό περιβάλλον. Το ίδιο αρνητικά φορτισμένη (σε σχέση με το διαβρωτικό περιβάλλον) είναι και η χαλύβδινη κατασκευή που πρόκειται να προστατευθεί. Όμως, τα μέταλλα αυτά έχουν μεγαλύτερη προδιάθεση να διαβρωθούν (είναι ανοδικότερα) και για το λόγο αυτό φορτίζονται περισσότερο αρνητικά ως προς το περιβάλλον απ' ό,τι ο χάλυβας. Έτσι ο χάλυβας φορτίζεται

θετικά ως προς τα μέταλλα αυτά. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα γαλβανικό στοιχείο με αρνητικό πόλο το μέταλλο και θετικό το χάλυβα. Επιβάλεται δηλαδή στο χάλυβα απ' τα ανοδικότερα αυτά μέταλλα ένα αντίστροφο δυναμικό, απ' το δυναμικό διάβρωσής του (ηλεκτρόνια ρέουν απ' την πλάκα του μετάλλου προς το χάλυβα). Ταυτόχρονα, εξ αιτίας του γαλβανικού στοιχείου που δημιουργήθηκε, το ανοδικότερο μέταλλο οξειδώνεται (απώλεια ηλεκτρονίων, σχηματισμός ιόντων) και καταναλίσκεται περισσότερο παρά αν ήταν μόνο του. Θυσιάζεται δηλαδή για την προστασία της κατασκευής.



Σχήμα 6: Απεικόνιση συστήματος καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενη άνοδο. [11]

Πλεονεκτήματα

1. Εύκολη εγκατάσταση
2. Ασήμαντη συντήρηση
3. Χρήση και σε προεντεταμένο σκυρόδεμα
4. Δεν απαιτούν την ύπαρξη πηγής για παροχή εξωτερικού ρεύματος
5. Χρήσιμα για τοπική προστασία σε μία κατασκευή
6. Δύσκολο σχετικά να δημιουργήσουν αλληλεπιδράσεις με γειτονικές κατασκευές

Μειονεκτήματα

1. Μικρή διάρκεια ζωής της άνοδου (συχνή αντικατάσταση αφού μακροχρόνια χρήση των ανόδων μπορεί να τις αποπαθητικοποιήσει και να δημιουργήσει ένα μη αγωγίμο στρώμα στην επιφάνειά τους, ώστε να μην μπορούν να παράγουν ρεύμα).
2. Χρειαζόμαστε μεγάλο αριθμό ανόδων για προστασία όλων των οπλισμών
3. Μη επαρκής έλεγχος της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος (εξαρτάται από περιβαλλοντικές συνθήκες).

Ειδικότερα έχει παρατηρηθεί ότι όταν οι άνοδοι από μαγνήσιο (Mg) ή αλουμίνιο (Al) τοποθετηθούν σε σκουριασμένη επιφάνεια και κοντά σε εύφλεκτα υλικά, όπως πετρέλαιο, παράγουν σπινθήρα εξαιτίας θερμικής αντίδρασης. Σε επικίνδυνο περιβάλλον συνίσταται άνοδος Zn. Από την άλλη, άνοδοι Zn δεν λειτουργούν αποτελεσματικά σε παραθαλάσσιο περιβάλλον με υψηλή θερμοκρασία (άνω των 60°C).

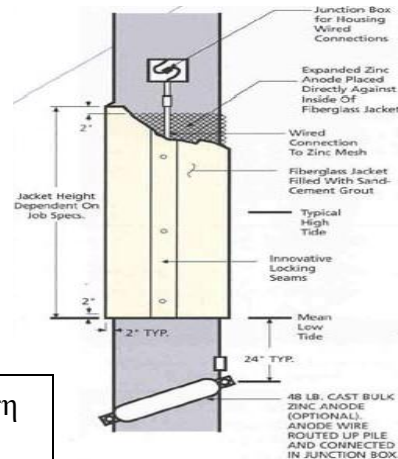
4.1.6 Εναλλακτική μέθοδος καθοδικής προστασίας [7]

Πρόκειται για ένα “έξυπνο” σύστημα που αποτελείται από μία εκτεταμένη, δικτυωτή, ψευδαργυρική άνοδο, η οποία τοποθετείται στην υπό επισκευή κατασκευή (εφαρμόζεται κυρίως σε βάθρα γεφυρών) και περιβάλλεται από μανδύα με ίνες γυαλιού. Ο μανδύας αυτός αποτελείται από δύο τμήματα που συγκολλούνται μεταξύ τους σε όλο

το ύψος. Το κενό μεταξύ του μανδύα και του βάρου πληρώνεται με έγχυτο σκυρόδεμα. Όσον αφορά στη διαδικασία της ,συνίσταται στα εξής: Αρχικά αφαιρείται το αποσθρωμένο και χαλαρό σκυρόδεμα με ειδικό εξοπλισμό, μέχρι να αποκαλυφθεί ο διαβρωμένος οπλισμός. Στην συνέχεια αφαιρείται η σκουριά από τις ράβδους, είτε με αμμοβολή είτε με υδροβολή ώστε να έχουμε καλή αγωγή διεπιφάνεια και το σύστημα να λειτουργήσει σωστά. Γίνεται η συγκόλληση των τμημάτων του μανδύα με ειδική μέθοδο, χρησιμοποιώντας μη αγωγή υλικά, που παρέχουν μόνωση από την υγρασία. Τέλος τοποθετείται μία ξύλινη βάση για να συγκρατεί το εκχυνόμενο σκυρόδεμα, η οποία στην συνέχεια αφαιρείται, ενώ παράλληλα γίνεται η καλωδιακή ένωση και είναι πλέον εφικτή η καθοδική προστασία.



Σχήμα 7: Απεικόνιση του συστήματος σε βάθρο[7]



Σχήμα 8: Το σύστημα και τα αποτελούμενα μέλη του αναλυτικά[7]



Σχήμα 9: Σε περίπτωση που υπάρχει εκτεταμένη βλάβη και είναι απαραίτητη η προσθήκη νέου οπλισμού, το σύστημα μπορεί να προσαρμοστεί, ώστε να ενσωματώσει και τις νέες ράβδους.[7]

Πλεονεκτήματα

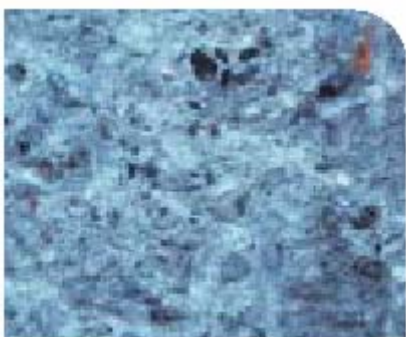
1. Είναι ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας
2. Εύκολο στην εγκατάσταση
3. Είναι αυτορυθμιζόμενο
4. Δεν χρειάζεται συντήρηση, συνεπώς έχει μικρό κόστος.
5. Η τεχνολογία του είναι πειραματικά ελεγμένη
6. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε απομακρυσμένες περιοχές γιατί το σύστημα παράγει ρεύμα, χωρίς την βοήθεια εξωτερικής πηγής.
7. Παρέχει προστασία για παραπάνω από 20 χρόνια.

Αυτή η μέθοδος εφαρμόστηκε πειραματικά από το Florida Department of Transportation Corrosion Research Laboratory.

4.1.7 Επισκευή με ινοπλισμένα τσιμεντοειδή κονιάματα με υψηλή συγκέντρωση σε αναστολείς διαβρώσεως [8]

Η διαδικασία αυτή συνίσταται στην ιδιότητα των μορίων να διαλύονται και σε υγρή και σε αέρια μορφή. Διεισδύουν ακόμα και στο πιο μικρό πόρο ή κοιλότητα του σκυροδέματος, ψάχνοντας να βρουν είτε θετικά είτε αρνητικά φορτισμένη μεταλλική επιφάνεια (άνοδο ή κάθοδο) και δημιουργούν ένα προστατευτικό μονομοριακό στρώμα στις ράβδους οπλισμένου σκυροδέματος. Αυτό βασίζεται σε έναν φυσικό απορροφητικό μηχανισμό, που σημαίνει ότι τα μόρια αυτά μπορούν να εμποδίσουν μελλοντική διάβρωση των βαριά διαβρωμένων ράβδων. Η διαδικασία αποτελείται από τα εξής βήματα:

Σχήμα 10



1. Απομάκρυνση των αποσαθρωμένων και σπασμένων τμημάτων του σκυροδέματος, ώστε να αποκαλυφθεί πλήρως το υγιές σκυρόδεμα και ο διαβρωμένος οπλισμός. Οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι αμμοβολή, υδροβολή, τρίψιμο με συρματόβουρτσα κτλ.

Σχήμα 11



2. Επάλληψη σε 2 στρώσεις στον καθαρισμένο από σκουριά, γράσα και υπολείμματα σκυροδέματος οπλισμό, με το ειδικό ρευστοκονίαμα, προστατευτικό, αντιδιαβρωτικό σε στρώμα πάχους 1-2 mm.

Σχήμα 12



3. Επάλληψη τσιμεντοειδούς κονιάματος στην καθαρισμένη επιφάνεια σκυροδέματος με ψεκασμό χαμηλής πίεσης ή με βούρτσα, το οποίο διεισδύει στο σκυρόδεμα και προσκολλάται στην επιφάνεια της ράβδου.

Σχήμα 13



4.Επάλλειψη με μία ινοπλισμένη τσιμεντοειδή στρώση 2 συστατικών με σκληρή βούρτσα πάχους περίπου 10mm η οποία λειτουργεί ως ένα είδος "γέφυρας" για να περικλείει τα εύθρυπτα κομμάτια.Επίσης δημιουργεί ένα υπόστρωμα που εξασφαλίζει την πρόσφυση του επισκευαστικού κονιάματος στην επιφάνεια του οπλισμού.

Σχήμα 14

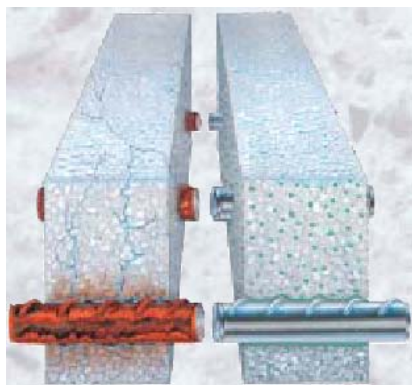


5.Επάλλειψη με επισκευαστικό μη-συρρικνούμενο,θιξοτροπικό τσιμεντοκονίαμα με πολύ καλές προσκολλητικές ιδιότητες,με μεγάλη αντίσταση στην διείσδυση διοξειδίου του άνθρακα,των χλωριόντων και των σουλφιδίων.Επίσης με μεγάλη μηχανική αντοχή και μικρό μέτρο ελαστικότητας.Η επάλλειψη γίνεται είτε με μυστρί είτε με ψεκασμό,σε στρώση πάχους από 10-61 mm.

Σχήμα 15



6.Για το τελείωμα επαλείφεται η επιφάνεια με επισκευαστικό τσιμεντοειδές κονίαμα,ομοίων ιδιοτήτων με το προηγούμενο το οποίο όμως περιέχει μικρότερα αδρανή.Η στρώση μπορεί να είναι από 1 έως 50mm.Δεν χρειάζεται διαβροχή.



Σχήμα 16: Αποτελέσματα της διείσδυσης των αντιδιαβρωτικών μορίων στις διαβρωμένες ράβδους οπλισμού.

Πλεονεκτήματα

- 1.Εύκολη εφαρμογή στην επάλλειψη του ειδικού τσιμεντοειδούς κονιάματος.
- 2.Παρέχει καλές μηχανικές αντοχές

Μειονεκτήματα

- 1.Υψηλό κόστος
- 2.Πολύπλοκη μέθοδος
- 3.Πρακτικά αδύνατη αν η ενανθράκωση έχει προχωρήσει σε μεγάλο βαθμό

4.2 ΕΝΕΡΓΕΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ [1]

Οι ενεργές επεμβάσεις έχουν ως σκοπό την αποκατάσταση(ή την αύξηση)της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής και όχι την απ'ευθείας αναίρεση των περιβαλλοντικών αιτίων που προκάλεσαν την διάβρωση.Συνεπώς κρίνεται απαραίτητο να εφαρμόζεται πάντοτε και μία συντηρητική επέμβαση.

Παρακάτω παρατίθενται κάποιες κατασκευαστικές,ενεργές επισκευές.

Καμπτική ενίσχυση(δοκών,υποστηλωμάτων,πλακών)

A)Επικόλληση λεπτών χαλύβδινων ελασμάτων μέσω εποξειδικών ρητινών

Όταν το στοιχείο του φέροντος οργανισμού έχει ρηγματωθεί λόγω διάβρωσης,πρέπει να αποκατασταθεί και να ενισχυθεί.Τα προς επικόλληση λεπτά ελάσματα πρέπει να είναι από ανοξείδωτο χάλυβα και να έχουν πάχος 1-1,5 mm.Η επικόλληση των ελασμάτων πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου εξασφαλίζεται με την χρήση των ενέσιμων εποξειδικών ρητινών.[13]

B)Ανοιχτοί μανδύες εκτοξευόμενου οπλισμένου σκυροδέματος

Γ)Μερική καθαίρεση και αποκατάσταση βλαμμένης περιοχής

4.2.1 Μέθοδος επισκευής με ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) [9]

Το πρόβλημα της αναβάθμισης που αντιμετωπίζουν οι παλαιότερες ανεπαρκώς οπλισμένες κατασκευές με πολλές συσσωρευμένες βλάβες μπορεί να επιλυθεί κυρίως με τη χρήση μανδύων από ινοπλισμένα πολυμερή (F.R.P. wraps),ως μέσο ενίσχυσης αλλά και ως αδιαπέραστου εμποδίου λόγω της σύστασης της σκληρυμένης ρητίνης στην διάχυση διαβρωτικών παραγόντων.Εφαρμόζοντας σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα και γυαλιού πρωτίστως και σπανιότερα αραμιδίου,επιδιώκουμε σε μέλη στοιχείων προσβεβλημένων από διάβρωση ο επικολλημένος μανδύας να λειτουργήσει ως μηχανισμός περιορισμού της διεύρυνσης των ρωγμών αναπτύσσοντας ισοδύναμη περισφικτική τάση.Τα σύνθετα αυτά υλικά,θα λειτουργήσουν τελικά ως εξωτερικά επικολλούμενος οπλισμός που θα παραλάβει τις εφελκυστικές τάσεις.

Πλεονεκτήματα

1. Ταχύτατη μέθοδος
2. Απλή στην εκτέλεσή της(άρα μειωμένα εργατικά) αλλά και αποτελεσματική, γεγονός που την κάνει να υπερτερεί ενάντια των άλλων μεθόδων που αναφέρθηκαν προηγουμένως.
3. Ανθεκτική στον χρόνο

Μειονεκτήματα

1. Υψηλό κόστος εξαιτίας των υλικών ,ρητινών και υφασμάτων

Εφαρμογές

Αυτή η μέθοδος αποκατάστασης θεωρείται αρκετά αποτελεσματική, ωστόσο εφαρμόζεται όταν το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο, δηλαδή οι διαστάσεις των ρωγμών είναι σημαντικές και η απλή ρητινένωση δεν μπορεί να αποδώσει ως μέθοδος επισκευής. Έτσι τα υφάσματα με σύνθετα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν προς ενίσχυση δοκών και πλακοδοκών, όμως εκεί που πραγματικά η χρήση τους θεωρείται επιβεβλημένη, είναι στην ενίσχυση των κρίσιμων στοιχείων του φέροντος οργανισμού δηλαδή στην περίσφιγξη των υποστηλωμάτων, στα τοιχώματα και στους κόμβους του οπλισμένου σκυροδέματος. Στην χώρα μας έχουν εφαρμοστεί κυρίως μανδύες πολυμερών για την επισκευή υποστηλωμάτων. Η συμβολή τους είναι καθοριστική, ώστε να μην παρατηρηθούν μεγαλύτερες βλάβες και το φαινόμενο της διάβρωσης επεκταθεί και στα πέδιλα της θεμελίωσης.

Διατηρητική ενίσχυση [1]

A)Προσθήκη εξωτερικών συνδετήρων(κολάρα, ταινίες συσκευασίας)

B)Κατάλληλη αγκύρωση των άκρων των πρόσθετων συνδετήρων,όπως στην καμπτική ενίσχυση

5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ύστερα από την ανάλυση των ήπιων και ενεργών επεμβάσεων για την αντιμετώπιση της διάβρωσης των οπλισμών μιας κατασκευής, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι από τις ήπιες επεμβάσεις, αυτή που κυρίως εφαρμόζεται είναι η καθοδική προστασία του οπλισμού και συγκεκριμένα σε βάθρα γεφυρών που έχουν υποστεί διάβρωση από διείσδυση χλωριόντων, η πιο σύγχρονη μορφή της, η εναλλακτική καθοδική προστασία. Το κύριο πλεονέκτημά της είναι ότι πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας, που μπορεί εύκολα να συνδυαστεί και με μία ενεργή μέθοδο, όπως ο μανδύας. Όσον αφορά τις άλλες μεθόδους καθοδικής προστασίας, δηλαδή με εξωτερική πηγή και με θυσιαζόμενες ανόδους, η πρώτη υπερτερεί της δεύτερης, μολονότι είναι ακριβότερη, διότι αναστέλλει πλήρως την διάβρωση και μία άνοδος προστατεύει μεγάλο μέρος της εγκατάστασης. Βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε βιομηχανικούς χώρους και γέφυρες. Οι άλλες ήπιες μέθοδοι έχουν περιορισμένες εφαρμογές. Επιπλέον η επισκευή με ινοπλισμένο τσιμεντοκονίαμα, είναι εύκολη στην εφαρμογή αλλά δεν μπορεί να αντιμετωπίσει εκτεταμένη διάβρωση του οπλισμού και δεν ενδείκνυται για μεγάλες επιφάνειες λόγω κόστους. Απ' την άλλη οι ενεργές επεμβάσεις είναι απαραίτητες όταν έχει μειωθεί η στατική επάρκεια της κατασκευής. Από αυτές η πιο συμφέρουσα λύση είναι τα F.R.P. Τέλος συμπεραίνουμε ότι με τις ήπιες επεμβάσεις αναστέλλουμε τους μηχανισμούς διάβρωσης, ενώ αντίθετα με τις ενεργές, αυξάνουμε την φέρουσα ικανότητα της κατασκευής χωρίς απαραίτητα να εμποδίζουμε την διαδικασία διάβρωσης. Γι' αυτό τον λόγο είναι αναγκαίο να εφαρμόζεται μια ήπια επέμβαση αρχικά και ανάλογα με την κατάσταση της κατασκευής προχωρούμε και σε μια πιο ενεργή επέμβαση ώστε ταυτόχρονα να το ενισχύσουμε αν αυτό απαιτείται. Γενικά η διάβρωση του σιδηρού οπλισμού αποτελεί αναμφισβήτητα ένα από τα πιο καιρία προβλήματα του Πολιτικού Μηχανικού. Αρκεί μόνο να αναφερθεί ότι το 5% του Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος μιας σύγχρονης χώρας διατίθεται για αποκατάσταση τέτοιων βλαβών σε κατασκευές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] **Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος**
Θ.Π.Τάσιος ,Κ.Αλιγιζάκη
Αθήνα 1993
- [2] **Ανθεκτικότητα του (οπλισμένου) σκυροδέματος σε διάρκεια,αφίερωμα**
Μ.Φαρδής(βιβλιογραφία 10 φοιτητικού συνεδρίου 2004)
- [3] **Ενισχύσεις/επισκευές κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα**
Σ.Η.Δρίτσος
Πάτρα 2005
- [4] **Διάβρωση και προστασία υλικών**
Θ.Ν.Σκουλικίδης
Αθήνα 1994
- [5] **Περιοδικό Κτίριο Τεύχος 112,Άρθρο «Διάβρωση του σιδηρού οπλισμού»**
Μαυροειδής Π.
- [6] www.renovat.gr/TechSol.aspx?TS_ID=16
- [7] www.cathodicprotection.com/pdf/lifejacket.pdf
- [8] www.cortecmci.com/brochures/HPRS.pdf
- [9] **Περιοδικό Κτίριο,Άρθρο «Μανδύες από σύνθετα υλικά ως μέσο επισκευής στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα»**
Σ.Ι.Πανταζοπούλου ΔΠΘ
- [10] **Προστασία Χάλυβα από Διάβρωση**
Βλάχος Σ.-1991(διδασκαρική διατριβή)
- [11] www.korrosion.de
- [12] www.cathodicprotection.com
- [13] www.isomat.gr/isomat_gr/lisi.asp?id=44
- [14] www.marpo.gr/cathodic_protection/industrial/industrial.html