

## ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

**ΚΟΥΡΕΠΙΝΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ  
ΜΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

### Περίληψη

*Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να παρουσιαστούν τρόποι αποκατάστασης και επισκευής του χάλυβα του οπλισμένου σκυροδέματος. Για αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητη αναφορά στους μηχανισμούς διάβρωσης, τα αίτια και τις συνέπειες του φαινομένου αυτού.*

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μέταλλα, κράματα όπως ο χάλυβας οπλισμένου σκυροδέματος είναι συνήθως θερμοδυναμικά μη σταθερά σε επαφή με το αέρα και το νερό και τείνουν να υποβαθμιστούν ενεργειακά οξειδούμενα με συνέπεια να υφίστανται μια μεγάλη ποικιλία καταστροφών λόγω της αντίδρασής τους με το περιβάλλον τους. Δηλαδή, τα μέταλλα έχουν την προδιάθεση για αυθόρμητη ενεργειακή υποβάθμιση, με σχηματισμό των αρχικών μορφών τους ενεργειακά χαμηλότερης στάθμης. Η συμπεριφορά ενός μετάλλου ως προς τη διάβρωση είναι συνάρτηση των χαρακτηριστικών του μετάλλου και του περιβάλλοντος του. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των μετάλλων είναι πολλοί, για αυτό και το φαινόμενο της διάβρωσης είναι πολύπλοκο και συχνά μη προβλέψιμη η φύση της διάβρωσης. Κοινό όμως χαρακτηριστικό όλων των μορφών διάβρωσης είναι η επιφανειακή αλλοίωση των υλικών με επιπτώσεις που η βαρύτητά τους εξαρτάται από τις απαιτήσεις λειτουργίας του υλικού. (Γ.Μπατής, Ε.Ρακαντά, Ι. Κάλου)

### ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

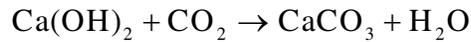
Για να πραγματοποιηθεί η διάβρωση του χάλυβα σε οποιοδήποτε περιβάλλον, πρέπει τα θετικά ιόντα του σιδήρου να απομακρυνθούν από την επιφάνεια του. Για να γίνει αυτό πρέπει το υλικό που περιβάλλει το χάλυβα να είναι αγωγίμο. Το νερό αποτελεί συνήθως το αγωγίμο μέσο και είναι τόσο πιο αγωγίμο όσο μεγαλύτερο ποσοστό αλάτων περιέχει σε διάλυση. Παρόμοιο ηλεκτρολυτικό διάλυμα δημιουργείται από την υγρασία μέσα στο σκυρόδεμα που περιέχει άλατα με αποτέλεσμα να προκαλείται η διάβρωση του οπλισμού του. Αντίθετα σε περιβάλλον με υψηλό pH η τάση του χάλυβα για διάβρωση είναι περιορισμένη. Το σκληρυμένο σκυρόδεμα περιέχει μεγάλο ποσοστό οξειδίου του ασβεστίου ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), έτσι ώστε να δημιουργείται αλκαλικό περιβάλλον με τιμή pH περίπου 12.5, υπεύθυνο για τη δημιουργία ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου στην επιφάνεια του χάλυβα το οποίο τον απομονώνει από το περιβάλλον και εξασφαλίζει τη διαρκή προστασία του από τη διάβρωση, όσο αυτό παραμένει ανέπαφο. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται παθητικοποίηση του χάλυβα

Οι δύο βασικοί λόγοι διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού είναι:

- i. Ενανθράκωση του σκυροδέματος
- ii. Προσβολή από ιόντα χλωρίου.

Η ενανθράκωση σκυροδέματος είναι η διαδικασία κατά την οποία το διοξείδιο του ασβεστίου που υπάρχει διάχυτο στην ατμόσφαιρα αντιδρά με το διαλυτό υδροξείδιο του

ασβεστίου (και γενικότερα με τον στερεό ιστό του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού.), υπεύθυνο για την αλκαλικότητα του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την μείωση αυτού και την πτώση του pH σε τιμές κοντά στο 8.3. Η χημική αντίδραση έχει ως προϊόντα νερό και ανθρακικό ασβέστιο το οποίο είναι αδιάλυτο.



Υψηλή αλκαλικότητα → Χαμηλή αλκαλικότητα

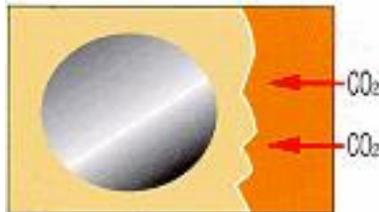
Έτσι, σταδιακά η αλκαλικότητα μειώνεται από την επιφάνεια προς τα μέσα.



Χάλυβας οπλισμού σε αλκαλικό σκυρόδεμα



Η διάβρωση μπορεί να αρχίσει όταν η ενανθράκωση φτάσει στο χάλυβα



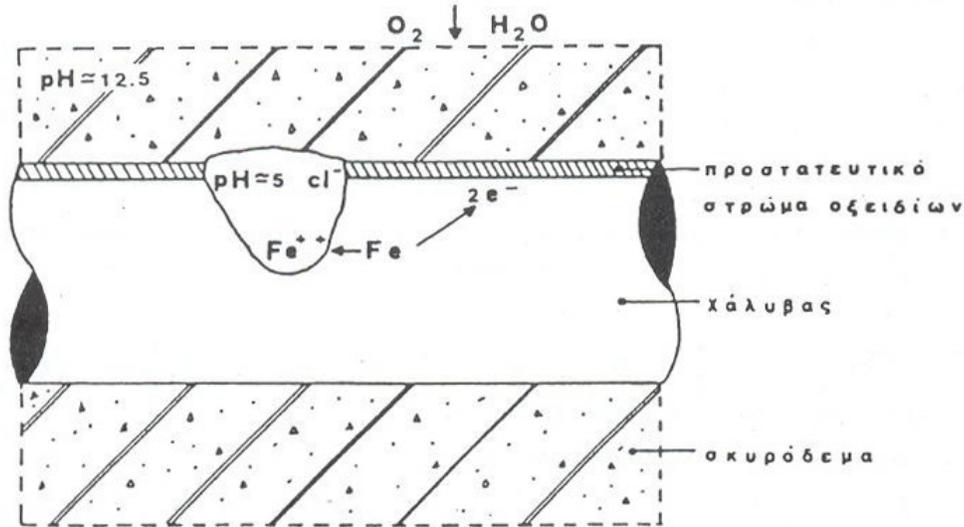
Σταδιακή απώλεια αλκαλικότητας με διείδυση CO<sub>2</sub>



Έναρξη δημιουργίας ρωγμών

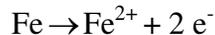
Όταν το σκυρόδεμα που βρίσκεται σε επαφή με το χάλυβα ενανθρακωθεί τότε λαμβάνει χώρα η αποπαθητικοποίηση του χάλυβα και παρουσία υγρασίας και οξυγόνου, η διάβρωση είναι μια αναπόφευκτη. Παρατηρείται λοιπόν ότι η ενανθράκωση και η διείδυση χλωριόντων δεν είναι ανεξάρτητες διαδικασίες, καθότι η πρώτη επιταχύνει σημαντικά τη δεύτερη: 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 υδροξείδιου του ασβεστίου μετατραπεί με την ενανθράκωση σε ανθρακικό ασβέστιο τα χλωριόντα που είχε δεσμεύσει ελευθερώνονται και διατίθενται πλέον για την προσβολή του χάλυβα.

Τα χλωριόντα εισέρχονται μέσω των πόρων του σκυροδέματος και έρχονται σε επαφή με τον χάλυβα με αποτέλεσμα την τοπική ή γενική καταστροφή του επιφανειακού προστατευτικού οξειδίου και την έναρξη της οξειδωσής του. Τα ιόντα χλωρίου είναι πιθανό να προέρχονται από αδρανή υλικά που έχουμε συλλέξει από παραλίες, το θαλασσινό νερό ανάμιξης, τα πρόσμικτα βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα, τον ατμοσφαιρικό αέρα (ειδικά σε παράκτιες περιοχές) και αρκετά σπάνια από άλατα που χρησιμοποιούνται για το λιώσιμο του χιονιού και του πάγου στους δρόμους (πρόβλημα το οποίο εμφανίζεται κυρίως σε καταστρώματα γεφυρών).



Σχ. 39. Απλοποιημένο προσομοίωμα της διαβρώσεως του χάλυβα λόγω επιδράσεως χλωριόντων (CEB. Bull. 148).

Η οξείδωση είναι μια ηλεκτροχημική αντίδραση και για αυτό απαιτεί έναν ηλεκτρολύτη. Το σκυρόδεμα είναι γεμάτο μικρούς πόρους οι οποίοι περιέχουν υγρασία και έτσι λειτουργεί αποτελεσματικά ως ηλεκτρολύτης. Η άνοδος δημιουργείται σε ένα σημείο της γυμνής από προστατευτικό οξείδιο επιφάνειας του χάλυβα από την οποία κατιόντα σιδήρου διαλύονται στο νερό των πόρων απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια.



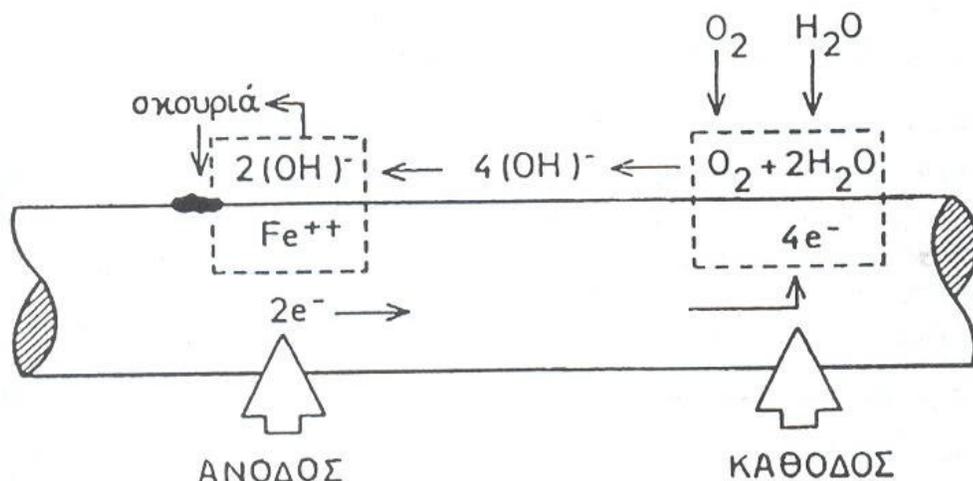
Τα ηλεκτρόνια αυτά κινούνται μέσω της ράβδου προς την κάθοδο η οποία μπορεί να βρίσκεται σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειάς του ασχέτως αν το προστατευτικό οξείδιο έχει παραμείνει ανέπαφο σε αυτό το σημείο. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σαν κάθοδος μπορεί να λειτουργήσει το σύνολο της επιφάνειας της ράβδου. Στην κάθοδο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια αντιδρούν με το νερό των πόρων του σκυροδέματος και με το οξυγόνο που διαλύεται σε αυτό από την αέρια φάση των πόρων δίνοντας υδροξείλιοντα.



Αυτά με την σειρά τους κινούνται μέσω του νερού των πόρων με την άνοδο όπου και αντιδρούν με τα διαλυμένα κατιόντα σιδήρου παράγοντας τελικά οξείδια του σιδήρου, δηλαδή σκουριά και ανασυνθέτοντας το νερό που είχε ηλεκτρολυθεί στην κάθοδο. Παρατηρούμε δηλαδή ότι η συνολική αντίδραση είναι μεταξύ οξυγόνου και σιδήρου, όμως δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί απουσία νερού, που στην συγκεκριμένη περίπτωση δρα ως καταλύτης.



Μετά την παραπάνω αντίδραση είναι δυνατόν να σχηματιστούν διάφορα οξείδια του σιδήρου π.χ.  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2 \text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3 \text{O}_4$ . Παρατηρώντας τις αντιδράσεις οξειδώσεως φαίνεται ότι οι ποσότητες νερού πριν και μετά παραμένουν σταθερές ενώ το οξυγόνο είναι αυτό που καταναλώνεται τελικά για την διάβρωση του χάλυβα.



Σχ. 37. Απλοποιημένο προσομοίωμα της ηλεκτροχημικής διαδικασίας διαβρώσεως του σιδηροπλισμού.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για τον σχηματισμό  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  απαιτείται 1,5 lt  $\text{O}_2$  ανά 1 gr σιδήρου. Η μεγάλη ποσότητα οξυγόνου που χρειάζεται εξηγεί το γεγονός ότι στοιχεία εντελώς βυθισμένα στο νερό δεν παρουσιάζουν φαινόμενα διάβρωσης.

Ακόμη, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου που απαιτούνται για να ξεκινήσει η διάβρωση του οπλισμού εξαρτάται άμεσα από το pH του σκυροδέματος. Σε μικρής ηλικίας σκυρόδεμα όπου η αλκαλικότητα είναι ακόμα σε υψηλά επίπεδα (pH=12.5 περίπου) η απαραίτητη ποσότητα ιόντων χλωρίου για την έναρξη της διάβρωσης είναι 7500-8000 ppm ενώ σε σκυροδέματα με χαμηλή αλκαλικότητα (pH=8.3 περίπου) το όριο είναι μόλις 100 ppm ή και λιγότερο.

### ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Τα προϊόντα της διάβρωσης του χάλυβα, οξείδια του σιδήρου ή υδροξείδια, καταλαμβάνουν τέσσερις με δέκα φορές μεγαλύτερο όγκο. Αυτή η αύξηση του όγκου ασκεί μεγάλες πιέσεις στο περιβάλλον σκυρόδεμα και κατά συνέπεια εφελκυστικές τάσεις που οδηγούν στην εμφάνιση ρωγμών του περιβάλλοντος σκυροδέματος παράλληλα με τη διεύθυνση του οπλισμού, λεκέδες σκουριάς και θρυμματισμό της υπερκείμενης επιφάνειας του σκυροδέματος. Η δημιουργία των ρωγμών καθιστά τον οπλισμό του σκυροδέματος ακόμη πιο ευάλωτο, με αποτέλεσμα η διαδικασία της διάβρωσης να επιταχύνεται. Ακόμη η μείωση της ενεργής διατομής του χάλυβα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής. Επιπλέον η διάβρωση προκαλεί μείωση της ολκιμότητας του χάλυβα, ένα από τα χαρακτηριστικά που τον καθιστά κατάλληλο ως δομικό υλικό. Εκτός των άλλων η διάβρωση του οπλισμού μειώνει την πυραντίσταση του δομικού στοιχείου και δημιουργεί πρόβλημα στην αισθητική εμφάνιση του στοιχείου.

### ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ

Σκοπός των επεμβάσεων είναι είτε η αναστολή μιας εξελισσόμενης διαδικασίας φθοράς, για παράδειγμα η επίτευξη διακοπής της διάβρωσης του χάλυβα, χωρίς να επιδιορθώνει αυτήν που έχει ήδη συμβεί είτε η αποκατάσταση της αρχικής ποιότητας των υλικών αφαιρώντας τους

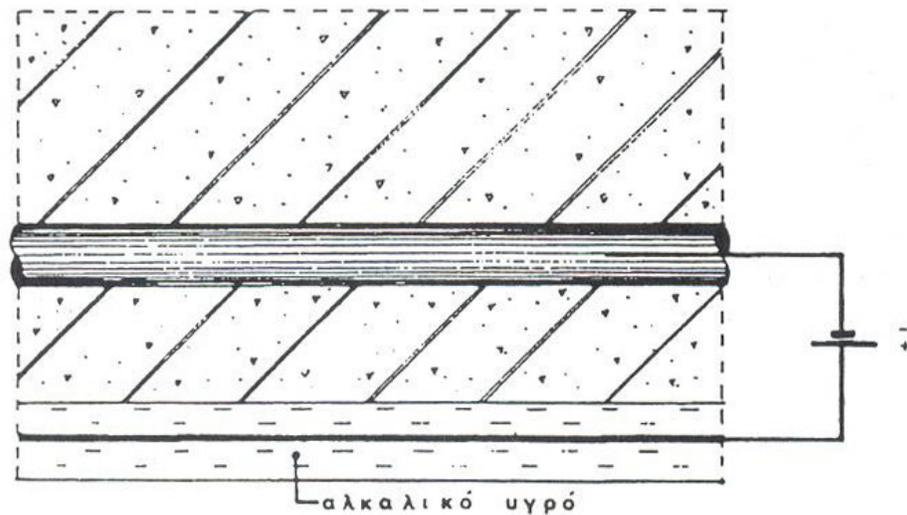
βλαπτικούς παράγοντες (π.χ. απομάκρυνση χλωριόντων ) με ή χωρίς σύγχρονη μείωση της ευαισθησίας τους.(μείωση συνάφειας οπλισμού-σκυροδέματος). Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μέθοδοι αποκατάστασης της διάβρωσης των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, η κάθε μια με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Από τις μεθόδους που παρουσιάζονται παρακάτω, η επανακαλοποίηση του σκυροδέματος, η αφαίρεση χλωριόντων από το σκυρόδεμα, η αφαίρεση υγρασίας από το σκυρόδεμα και ο εμποτισμός σκυροδέματος με πολυμερή στοχεύουν άμεσα στην αποκατάσταση του σκυροδέματος και ως επακόλουθο την επιβράδυνση της διάβρωσης του χάλυβα.

- **Επανακαλοποίηση του σκυροδέματος**

Η μέθοδος της επανακαλοποίησης του σκυροδέματος είναι μια διαδικασία η οποία εφαρμόζεται με σκοπό να αυξήσει την αλκαλικότητα του σκυροδέματος όταν αυτή έχει μειωθεί λόγω διαφόρων αιτίων όπως για παράδειγμα λόγω ενανθράκωσης του σκυροδέματος. Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο επαλείφεται η επιφάνεια του σκυροδέματος με ένα αλκαλικό υλικό με περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο( $\text{CaCO}_3$ ) και με την χρήση ενός ηλεκτροδίου το οποίο λειτουργεί ως άνοδος το ανθρακικό ασβέστιο διεισδύει στους πόρους του σκυροδέματος υπό ηλεκτροωσμωτική πίεση παρουσία εξωτερικού δυναμικού και επανακαλοποιεί σταδιακά το σκυρόδεμα από την επιφάνεια προς το εσωτερικό. Σε αυτήν την διαδικασία ο χάλυβας λειτουργεί ως κάθοδος.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι απαιτείται ποσότητα αλκαλικού υλικού 1.2 lt ανά 1 m<sup>2</sup> σκυροδέματος για να επανακαλοποιηθεί σκυρόδεμα πάχους 1 cm με πορώδες περίπου 12%. Η μέθοδος εφαρμόζεται επί 14 ημέρες περίπου.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι είναι πολύ απλή στην εφαρμογή της και τα αποτελέσματα άμεσα ελεγχόμενα. Το μειονέκτημα είναι ότι υπάρχει η πιθανότητα μη επανακαλοποίησης ορισμένων ενανθρακωμένων περιοχών του σκυροδέματος.



Σχ.89: Διάταξη για επανακαλοποίηση του σκυροδέματος (A van den Hondel et al., 1988).

- **Αφαίρεση χλωριόντων από το σκυρόδεμα**

Αυτή η μέθοδος, όπως και η προηγούμενη, βασίζεται στην αρχή της ηλεκτροωσμώσεως. Η διαδικασία απαιτεί μία προσωρινή άνοδο, που συνήθως είναι ένα μεταλλικό πλέγμα το οποίο

απλώνεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος, ένα κατάλληλο ηλεκτρολύτη, μια ρητίνη ανταλλαγής ιόντων και μια πηγή συνεχούς ηλεκτρικό ρεύματος(50 volt). Στο ηλεκτροχημικό κύκλωμα που δημιουργούμε ο οπλισμός λειτουργεί ως κάθοδος. Η θετικά φορτισμένη άνοδος έλκει τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα τα οποία και δεσμεύονται από την ρητίνη. Η μέθοδος εφαρμόστηκε επί τόπου σε κατάστρωμα γέφυρας των ΗΠΑ όπου και επιτεύχθηκε αφαίρεση 90% των χλωριόντων. Πειραματικά έχει βρεθεί ότι μια αρχική συγκέντρωση χλωριόντων 2,3% κ.β. τσιμέντου μπορεί μέσα σε 100 ώρες να ελαττωθεί στα επιτρεπόμενα όρια (G.Morrison et al,1975)

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί καλής ποιότητας σκυρόδεμα ,διότι η εφαρμογή του υψηλού δυναμικού αναπτύσσει θερμοκρασίες της τάξεως των  $90^{\circ}\text{C}$  με ενδεχόμενο αποτέλεσμα την εμφάνιση ρηγματώσεων. Ως μέθοδος είναι αρκετά δαπανηρή και επιπλέον αυξάνεται η διαπερατότητα του σκυροδέματος κατά πέντε φορές, πρόβλημα που όμως αντιμετωπίζεται με εμποτισμό του σκυροδέματος με πολυμερή, διαδικασία σχετικά εύκολη λόγω αυξημένου πορώδους του σκυροδέματος.

- **Αφαίρεση υγρασίας από το σκυρόδεμα**

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια για την αφαίρεση της υγρασίας από κονιάματα. Ο μηχανισμός της μεθόδου δεν βασίζεται στην αρχή της ηλεκτροωσμώσεως, για αυτό και ονομάζεται απλά “ηλεκτρική μέθοδος”. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της είναι το pH του υλικού να είναι αρκετά υψηλό (μεγαλύτερο από 8) και το κονίαμα να περιέχει άλας σε μικρές ποσότητες. Έχει βρεθεί πειραματικά ότι η ξήρανση πορώδους υλικού δε μπορεί να γίνει χωρίς την παρουσία αλάτων, αλλά ούτε με την παρουσία μεγάλων ποσοτήτων αλάτων. Εκτιμάται ότι επιτυγχάνονται καλά αποτελέσματα με την παρουσία αλάτων σε περιεκτικότητα 2 – 5%. Τα θεικά ιόντα διευκολύνουν τη διάσπαση του νερού, επομένως εμποδίζουν τη διαδικασία. Η εφαρμογή της μεθόδου πάνω στην κατασκευή γίνεται όπως έχει περιγραφεί για την αφαίρεση των χλωριόντων. Με την εφαρμογή του δυναμικού, τα ιόντα των αλάτων κινούνται προς τα ηλεκτρόδια, μεταφέροντας μαζί τους και νερό. Η μεταφορά των μορίων από τα ιόντα ερμηνεύεται με διάφορους μη ταυτόχρονους μηχανισμούς:

α) Τα ανιόντα και τα κατιόντα των αλάτων είναι ενυδατωμένα, αλλά σε διαφορετικό βαθμό το καθένα

β) Τα ανιόντα παρασύρουν κατά την κίνησή τους προς τους πόλους το υδατικό περίβλημα των πόρων.

γ) 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 τουλάχιστον ίσης με 0.1 – 1 A.

Πρόκειται πάντως για μία βραδύτατη διαδικασία: έχει βρεθεί ότι η μείωση της υγρασίας ενός τοίχου από 50 – 30% απαιτεί την εφαρμογή της μεθόδου επί 6 μήνες. Μέχρι σήμερα υπάρχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου σε τοιχοποιίες όπου το κόστος είναι χαμηλό. Η έρευνα συνεχίζεται για μια ευρύτερη εφαρμογή της μεθόδου. (Θ. Π. Τάσιος, Κ. Αλιγιάκη)

- **Εμποτισμός σκυροδέματος με πολυμερή**

Σκοπός αυτής της μεθόδου είναι η μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος, ιδιαίτερα σε πού διαβρωτικό περιβάλλον. Η πλήρωση των κενών γίνεται συνήθως σε βάθος σκυροδέματος 35 – 50 mm. Η κατεργασία του σκυροδέματος περιλαμβάνει τα εξής στάδια (Kukacka 1975)

- Καθαρισμός επιφάνειας του σκυροδέματος από ξένες ουσίες (σκόνες, έλαια, άλατα, κλπ)
- Άπλωμα άμμου στο σκυρόδεμα με σκοπό να αποφύγουμε το θερμικό σοκ το σκυροδέματος κατά την επακολουθούσα εφαρμογή υψηλών θερμοκρασιών.

- Ξήρανση του σκυροδέματος. Η ξήρανση γίνεται διατηρώντας υψηλές θερμοκρασίες για αρκετό χρόνο (λ.χ. στους 120 °C επί 8 ώρες).

- Σταδιακή απόψυξη του σκυροδέματος, με προσοχή ώστε να μην απορροφηθεί υγρασία από το περιβάλλον (λ.χ. διατήρηση στους 38° C επί 12 έως 36 ώρες).

- Αφαίρεση του αέρα από το σκυρόδεμα(εφαρμογή κενού).

- Προσθήκη μονομερούς.

- Προσθήκη αδιάβροχων μεμβρανών στη επιφάνεια, ώστε να εμποδίσουμε την εξάτμιση του μονομερούς.

- Θερμικός καταλυτικός πολυμερισμός του μονομερούς (λ.χ. στους 74°C επί 5 ώρες)

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εφαρμόζεται στις κατασκευές ανεξαρτήτως από την ποιότητα και τα συστατικά του σκυροδέματος και τα αποτελέσματα είναι μόνιμα. Ακόμα ,το εμποτισμένο με πολυμερή σκυρόδεμα παρουσιάζει βελτιωμένες όλες τις ιδιότητες του. Παρ' όλα αυτά απαιτείται προσοχή κατά την ξήρανση του σκυροδέματος διότι υπάρχει ο κίνδυνος εκτεταμένης ρηγμάτωσης.

- **Επισκευή με χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος**

Τα αποσπασμένα και σπασμένα τμήματα του σκυροδέματος καθαιρούνται και αποκαλύπτεται πλήρως το υγιές σκυρόδεμα και ο διαβρωμένος οπλισμός. Αφαιρείται η σκουριά από τον οπλισμό με τρίψιμο με συρματόβουρτσα, αμμοβολή κλπ., ανάλογα με την έκταση και το βαθμό της διάβρωσης. Κατόπιν εφαρμόζεται η εποξειδική αντισκωριακή επάλειψη ή τσιμεντοειδής αντιδιαβρωτική επάλειψη στον οπλισμό των βλαφθέντων δομικών στοιχείων, προκειμένου να προστατευθούν αυτοί από μελλοντική διάβρωση.

Στη συνέχεια επισκευάζεται η αποφλοιωμένη περιοχή του σκυροδέματος με εφαρμογή ινοπλισμένου, επισκευαστικού τσιμεντοκονιάματος υψηλών αντοχών, ώστε να αποκατασταθεί η μονολιθικότητα και οι αντοχές του βλαφθέντος δομικού στοιχείου.

Αναλυτικά οι εργασίες αποκατάστασης γίνονται ως εξής:

α) Απομακρύνονται επιμελώς όλα τα σαθρά και χαλαρά τμήματα του αποφλοιωμένου σκυροδέματος και αποκαλύπτεται πλήρως ο διαβρωμένος οπλισμός.

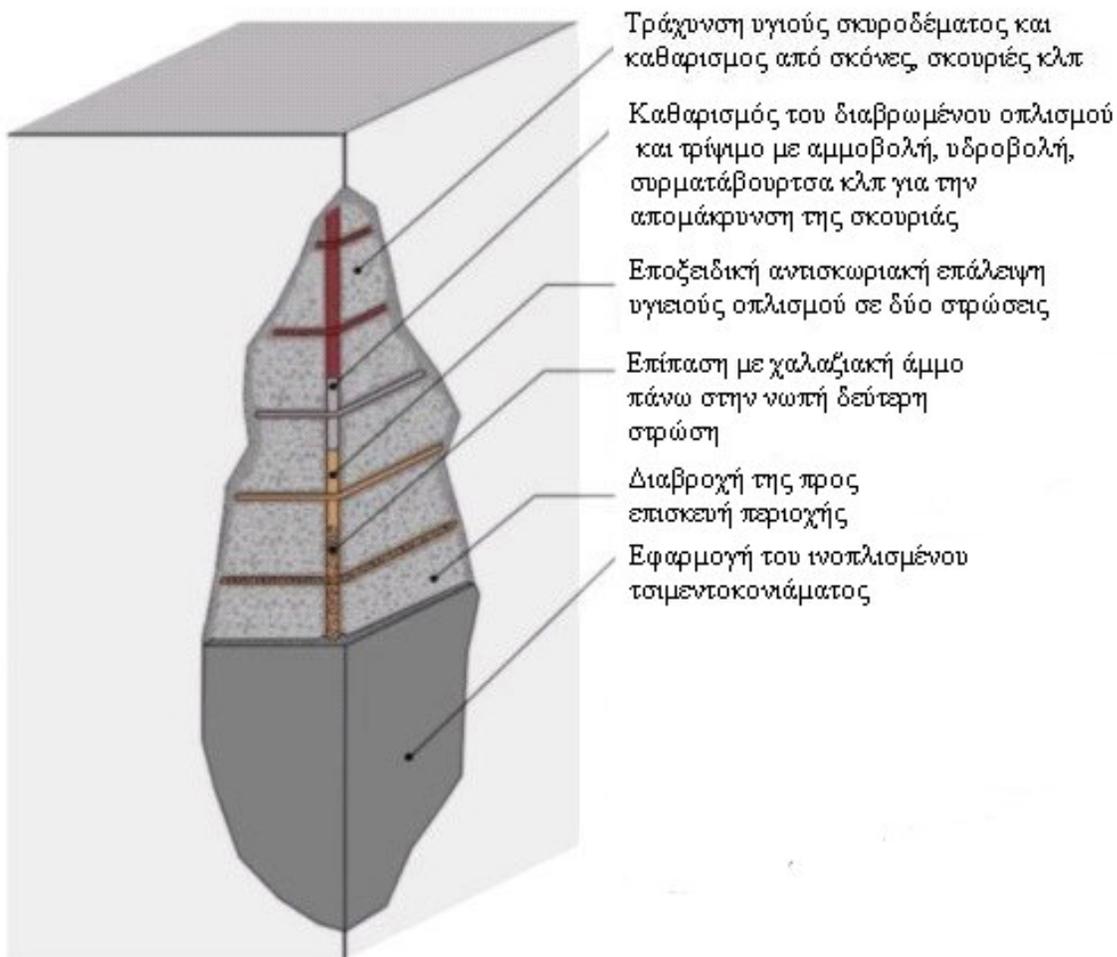
β) Το αποκαλυμμένο υγιές σκυρόδεμα εκτραχύνεται και καθαρίζεται από σκόνες, σκουριές κλπ.

γ) Ο διαβρωμένος οπλισμός καθαρίζεται και τρίβεται με κατάλληλο μέσο ανάλογα με το βαθμό και την έκταση της βλάβης (αμμοβολή, υδροβολή, συρματόβουρτσα κλπ.) ώστε να απομακρυνθεί πλήρως η σκουριά, προκειμένου να ακολουθήσει η εφαρμογή εποξειδικής αντισκωριακής επάλειψης ή τσιμεντοειδούς αντιδιαβρωτικής επάλειψης. δ) Ο υγιής αποκαλυμμένος οπλισμός (ή και ο νέος πρόσθετος που πιθανόν να τοποθετηθεί αν ο εναπομείναντας δεν επαρκεί) επαλείφεται με εποξειδικής αντισκωριακής επάλειψης σε 2 στρώσεις. Η δεύτερη στρώση ακολουθεί αφού στεγνώσει η πρώτη. Μετά την επάλειψη της δεύτερης στρώσης και όσο αυτή είναι ακόμη νωπή, γίνεται επίταση με χαλαζιακή άμμο

κοκκομετρίας 0-0,8 mm, ώστε να εξασφαλισθεί η πρόσφυση του επισκευαστικού κονιάματος στην επιφάνεια του οπλισμού.

ε) Μετά την παρέλευση 48 ωρών στην περίπτωση χρήσης εποξειδικής αντισκωριακής επάλειψης ή αφού έχει στεγνώσει η τσιμεντοειδής αντιδιαβρωτική επάλειψη, γίνεται καλή διαβροχή και κατόπιν εφαρμόζεται το ινοπλισμένο, επισκευαστικό τσιμεντοκονίαμα.

Τα μειονεκτήματα είναι ότι εκτενείς αφαιρέσεις σκυροδέματος απαιτούν προσωρινή υποστήλωση η οποία αυξάνει το κόστος όπως επίσης και την πολυπλοκότητα της μεθόδου. Επιπλέον αν η ενανθράκωση έχει προχωρήσει σε μεγάλο βαθμό τότε η εφαρμογή της μεθόδου είναι πρακτικά αδύνατη. Τέλος, ένας άλλος κίνδυνος είναι ότι η ίδια η επέμβαση μπορεί να οδηγήσει σε επιτάχυνση της διάβρωσης, αφού με την αφαίρεση των διαβρωμένων ανόδων θα αφαιρεθούν αναπόφευκτα και κάθοδοι και νέοι άνοδοι θα δημιουργηθούν με την τοποθέτηση του καινούργιου υλικού (Ειδικά κατά την συγκόλληση των ράβδων εφόσον αυτή δεν γίνει σωστά).



- **Καθοδική προστασία**

Όπως είδαμε παραπάνω υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την αντιμετώπιση της διαδικασίας της διάβρωσης. Παρ' όλα αυτά η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η καθοδική προστασία, η οποία χρησιμοποιείται και ως μέθοδος πρόληψης. Το μεγάλο της πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε υφιστάμενες κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος ανεξαρτήτως από την περιεκτικότητά τους σε χλωριόντα.

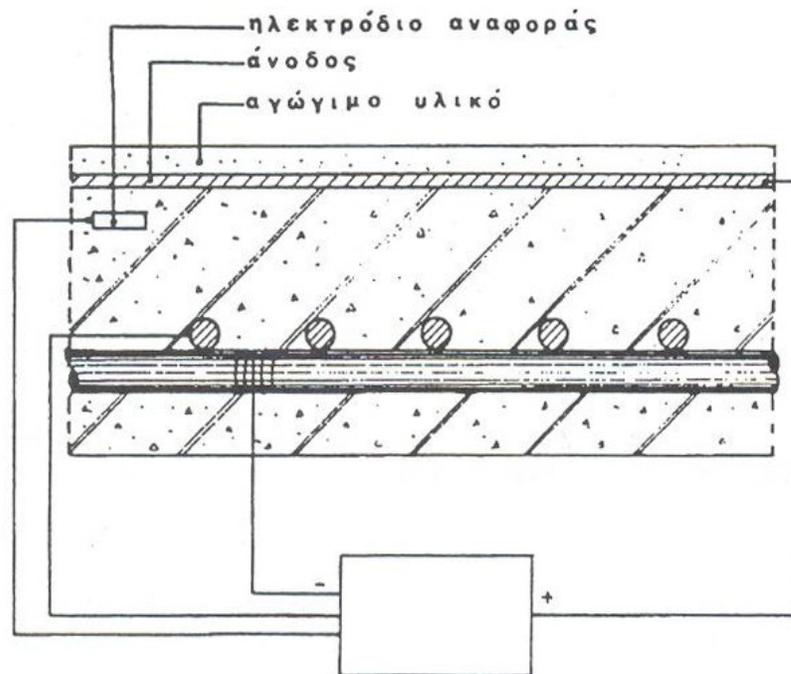
Η αρχή της μεθόδου είναι η “αναίρεση” της διαφοράς δυναμικού μεταξύ ανοδικής και καθοδικής περιοχής του χάλυβα, ώστε να εμποδίζεται η μεταφορά ηλεκτρονίων από την άνοδο προς την κάθοδο και να αναστέλλεται η διαδικασία διάβρωσης του οπλισμού. (Θ. Π. Τάσιος, Κ. Αλιγιάκη) Η καθοδική προστασία εφαρμόζεται στις κατασκευές με τα εξής δύο συστήματα:

- α) Σύστημα με εφαρμοζόμενο ρεύμα**

Η καθοδική προστασία συνίσταται στη 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. Η ένταση του συνεχούς ρεύματος ρυθμίζεται έτσι ώστε τα ανιόντα υδροξυλίου,  $(OH)^-$ , τα οποία σχηματίζονται στην κάθοδο (δηλ. στους οπλισμούς) με την αντίδραση του νερού των πόρων με το οξυγόνο και με ελεύθερα ηλεκτρόνια από την κάθοδο (όπως ακριβώς και κατά την διάβρωση) να κινούνται προς την επιφάνεια του σκυροδέματος, αντί προς τις τυχόν ανόδους (θέσεις διάβρωσης) κατά μήκος της ράβδου. Προς την επιφάνεια-άνοδο αντί προς τους οπλισμούς, κινούνται επίσης υπό την επίδραση της τάσης συνεχούς ρεύματος και τα τυχόν χλωριόντα της μάζας του σκυροδέματος και του νερού των πόρων. Έτσι τελικά η οξειδωση, δηλ. η εξουδετέρωση των παραπάνω ανιόντων, γίνεται στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος αντί στους οπλισμούς με διάβρωση του χάλυβα.

Για την επιτυχία της καθοδικής προστασίας πρέπει να δημιουργηθεί εξωτερική άνοδος κοντά σε όλες τις ράβδους οπλισμού. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με την επάλειψη μεγάλου τμήματος της επιφάνειας του σκυροδέματος με ένα συνεχές στρώμα ηλεκτρικά αγωγίμης μογιγιάς (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 σε ένα συνεχές ηλεκτρικό κύκλωμα δεν είναι εντελώς απαραίτητη. Η επαφή των ράβδων ή η σύνδεσή τους μέσω των συρμάτων επαρκεί. Αντίθετα εντελώς απαραίτητο είναι να μην υπάρχουν μεταξύ επιφανειακού αγωγίμου στρώματος και ράβδων οπλισμού σύρματα, καβίλιες, και άλλα στοιχεία που μπορούν να βραχυκυκλώσουν το ηλεκτρικό κύκλωμα. (Μ. Φαρδής)

Σε αυτή τη μέθοδο η άνοδος είναι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία. Χρησιμοποιώντας σχετικά αδρανή υλικά, όπως για παράδειγμα τιτάνιο, η κατανάλωση της ανόδου είναι περιορισμένη. Βάση πειραματικών δεδομένων έχει βρεθεί ότι η διάρκεια ζωής των ανόδων τιτανίου μπορεί εύκολα να ξεπεράσει τα 40 χρόνια για υφιστάμενες κατασκευές. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής των ανόδων και το γεγονός ότι μπορούν να εφαρμοστούν ποικίλες τιμές ρεύματος ώστε να αναστείλουμε πλήρως τη διάβρωση του χάλυβα. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι, όπως και στην αφαίρεση χλωριόντων από το σκυροδέμα, για υψηλές πυκνότητες ρεύματος παρατηρείται μείωση του σιδηροπλισμού με το σκυροδέμα λόγω συσσώρευσης ιόντων νατρίου ( $Na^+$ ) και καλίου ( $K^+$ ) στη διεπιφάνεια του σκυροδέματος με το χάλυβα, ως επακόλουθο του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται. Επιπλέον ενδέχεται μείωση της ολκιμότητας του χάλυβα λόγω εκλύσεως υδρογόνου. Τέλος, το όλο σύστημα υπόκειται στις διακοπές ρεύματος και για αυτό απαιτείται τακτικός έλεγχος και ρύθμιση.



Σχ.90: Διάταξη για την καθοδική προστασία οπλισμού με σύστημα εφαρμοζόμενου ρεύματος (ACI 222 R-85).

### β) Σύστημα γαλβανικής ανόδου

Σε αυτή τη μέθοδο ο σιδηροοπλισμός συνδέεται με ένα μέταλλο, του οποίου το δυναμικό διαβρώσεως είναι μικρότερο του δυναμικού διαβρώσεως του οπλισμού, που λειτουργεί ως “θυσιαζόμενη άνοδος”. Όπως είναι προφανές υπάρχει μικρή δυνατότητα επιλογής ανόδων καθώς ο χάλυβας έχει μικρό δυναμικό. Έτσι λοιπόν ως “θυσιαζόμενοι άνοδοι” χρησιμοποιούνται συνήθως κράματα μαγνησίου (Mg), ψευδαργύρου (Zn), αλουμινίου (Al), ή ένα κράμα Al-Zn-In, που λόγω του ότι έχουν μικρότερο δυναμικό διαβρώσεως από το χάλυβα, εξασφαλίζουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Η θυσιαζόμενη άνοδος θα διαβρωθεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας με αποτέλεσμα την πλήρη κατανάλωσή της. Η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος ακολουθεί την εξής πορεία: Από την άνοδο, δια μέσου του σκυροδέματος προς το διαβρωμένο οπλισμό. Η εγκατάσταση της γαλβανικής ανόδου, μπορεί να γίνει με έκχυση ή με θερμικό ψεκασμό σε ατμοσφαιρικά εκτεθειμένο σκυρόδεμα με σκοπό τη διαμόρφωση ενός θυσιαζόμενου μανδύα. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι η εγκατάστασή της είναι εύκολη, απαιτεί ασήμαντη συντήρηση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε προεντεταμένο σκυρόδεμα, αφού δεν υπάρχει ο κίνδυνος έκλυσης υδρογόνου και ψαθυροποίησης του χάλυβα όπως στο σύστημα με εφαρμοζόμενο ρεύμα. Μειονεκτήματα είναι η μικρή διάρκεια ζωής της ανόδου και άρα η αντικατάστασή της κάθε λίγα χρόνια, απαιτείται δε μεγάλος αριθμός ανόδων για να εξασφαλίσουμε προστασία σε όλους τους οπλισμούς. Επιπλέον το γεγονός ότι το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (υγρασία, θερμοκρασία κλπ) δεν μας επιτρέπει να ελέγξουμε ή να ρυθμίσουμε την ένταση του.

Παρακάτω παρατίθεται ενδεικτικά ένας πίνακας με διάφορα υλικά ανόδου και συνηθισμένες εφαρμογές τους

| <b>Τύπος Ανόδου</b>   | <b>Εφαρμογή</b>   | <b>Σχόλια</b>  |
|---|---|--|
| Πλέγμα τιτανίου με επικάλυψη από σκυρόδεμα ή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα | Καταστρώματα γεφυρών και υποδομή, χώροι στάθμευσης, αποβάθρες, τοίχοι συγκράτησης (γύρω από δεξαμενή αποθήκευσης) | Είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό. Εξαιρετικό για οριζόντιες εφαρμογές. Παρ' όλα αυτά έχει παρατηρηθεί περιστασιακά αποκόλληση της στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από υποστρώματα ή τοίχους. Σχετικά ακριβή, όμως έχει πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής.   |
| Αγώγιμη επένδυση, π.χ. μπογιά με σκόνη γραφίτη                      | Χώροι στάθμευσης, Καταστρώματα γεφυρών, υποστρώματα, τοίχοι.  | Εφαρμόζεται με επάλειψη ή ψεκασμό. Παρ' όλα αυτά συνιστάται το υλικό επένδυσης να έχει δοκιμαστεί εκτενώς, διότι στο παρελθόν είχε παρατηρηθεί μη ικανοποιητική απόδοση του υλικού λόγω ακατάλληλης σύνθεσής του. Είναι από τα πιο οικονομικά υλικά εφόσον το απαιτούμενο ικρίωμα δεν είναι εκτενές ή ακριβό.        |
| Επάλειψη με αγώγιμη σκόνη οπτάνθρακα (κωκ)                          | Καταστρώματα γεφυρών  | Έχει χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία από κάποια υπουργεία μεταφορών, ειδικά στο Οχάιο. Παρ' όλα αυτά επιβαρύνει την κατασκευή με επιπλέον μόνιμο φορτίο. Σχετικά φθηνή λύση με καλή απόδοση.   |
| Κράμα ψευδαργύρου (Zn)  | Καταστρώματα γεφυρών, υποστρώματα. Ενδέχεται και η χρησιμοποίησή της σε χώρους στάθμευσης (γαλβανική άνοδος)      | Καλή ιστορία εφαρμογής σε όλα τα συστήματα στα οποία δοκιμάστηκε. Μεγάλη διάρκεια ζωής και ακριβή λύση αν χρησιμοποιηθεί σε σύστημα με εφαρμοζόμενο ρεύμα, ενώ μπορεί να εφαρμοστεί με χαμηλό κόστος ως γαλβανική άνοδος όταν το σκυρόδεμα είναι σχετικά υγρό και με μικρή επικάλυψη, όπως έχει φανεί από πειράματα. |

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διάβρωση του χάλυβα του οπλισμένου σκυροδέματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και για αυτό ακριβώς το λόγο είναι ένα τόσο πολύπλοκο φαινόμενο του οποίου η φύση αρκετά συχνά δύσκολα προβλέψιμη. Συνήθως γίνεται δύσκολα αντιληπτή σε πρώιμο στάδιο και έχει μεγάλες επιπτώσεις στην κατασκευή τόσο όσον αφορά τη φέρουσα ικανότητά, όσο και από οικονομικής απόψεως. Αρκεί μόνο να αναφερθεί ότι το 1/4 περίπου της παγκόσμιας παραγωγής σιδήρου και χάλυβα, καταστρέφεται από τη διάβρωση. Καταλαβαίνει λοιπόν κανείς πόσο σημαντικές είναι οι μέθοδοι επισκευής έναντι διαβρώσεως.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Ανθεκτικότητα του (οπλισμένου) σκυροδέματος σε διάρκεια  
Μ. Φαρδής
- [2] Η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος  
Γ.Μπατής, Ε.Ρακαντά, Ι.Κάλου
- [3] Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος  
Θ.Π.Τάσιος, Κ.Αλιγιζάκη
- [4] Ολοκληρωμένα συστήματα ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά  
Διαφημιστικό φυλλάδιο από την εταιρία isomat
- [5] Περιοδικό Κτίριο
- [6] The repair of reinforced concrete  
Dr John Broomfield
- [7] Understanding corrosion and cathodic protection of reinforced concrete structures  
Steven F.Daily
- [8] Cathodic Protection for Steel Reinforcement  
R. Brousseau
- [9] <http://www.mbtaus.com.au/corrosn/corros2.htm>