



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
“ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ”  
ΤΟΜΕΑΣ ΙΙΙ: ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΤΟΠΙΚΗ ΚΑΘΟΔΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΘΥΣΙΑΖΟΜΕΝΕΣ ΑΝΟΔΟΥΣ**



**ΕΡΩΤΟΚΡΙΤΟΥ ΜΙΧΑΛΗΣ  
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ**

**Επιβλέπων Καθηγητής:**

**Γ. ΜΠΑΤΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**Αθήνα 2013**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
“ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ”  
ΤΟΜΕΑΣ ΙΙΙ: ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΤΟΠΙΚΗ ΚΑΘΟΔΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΘΥΣΙΑΖΟΜΕΝΕΣ ΑΝΟΔΟΥΣ**

**ΕΡΩΤΟΚΡΙΤΟΥ ΜΙΧΑΛΗΣ  
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ**

**Τριμελής Επιτροπή:**

**Γ. ΜΠΑΤΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)**

**Σ. ΤΣΙΜΑΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π**

**Χ. ΖΕΡΗΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π**

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου Κο Γεώργιο Μπατή που μου εμπιστεύτηκε την εργασία αυτή, δίνοντας μου την ευκαιρία να αναζητήσω πηγές πληροφοριών για ένα τόσο σημαντικό θέμα, τόσο για τον πολιτικό μηχανικό αλλά και γενικά για τη μηχανική. Καθώς επίσης την διδακτορικό μου Αγγελική Ζαχαροπούλου για την επιστημονική καθοδήγηση της, με σκοπό πάντα την επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Ευχαριστώ το καλό μου φίλο Κυριάκο Μαμμού για τη βοήθεια που μου πρόσφερε τα δύο αυτά χρόνια καθώς του οφείλω πολλά για την ένταξη μου στο συγκεκριμένο πρόγραμμα. Και τέλος ευχαριστώ την οικογένεια μου για την στήριξη που μου παρέχει σε οποιοδήποτε ακαδημαϊκό ή επαγγελματικό μου βήμα.

Αθήνα, 15 Ιουλίου 2013

Ερωτοκρίτου Μιχάλης

*«Ανοξείδωτες αγάπες δεν υπάρχουν  
όλα τα πράγματα τα τρώει ο καιρός  
με οξείδωση σκουριάς θα συνυπάρχουν  
μίσος και έρωτας ο ίδιος ο χορός»*

*ΗΛΙΑΣ ΜΑΣΤΟΡΗΣ*



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα φαινόμενο που συναντά πολλές φορές ο πολιτικός μηχανικός είναι η διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος, φαινόμενο το οποίο απαντάται πολύ συχνά στη χώρα μας εξαιτίας των κλιματολογικών συνθηκών . Η διάβρωση αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα που προκαλεί φθορές και διάφορα άλλα προβλήματα σε κατασκευές , κυρίως σε παραθαλάσσιες περιοχές όπου έχουμε υψηλό βαθμό προσβολής από χημικές ουσίες. Η διάβρωση του οπλισμού πλήττει μεγάλο αριθμό κατασκευών και αποτελεί σημαντικό παράγοντα φθοράς τόσο από άποψη λειτουργικότητας όσο και στατικότητας. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της τοπικής καθοδικής προστασίας του οπλισμού του σκυροδέματος με θυσιαζόμενες ανόδους. Η συνολική καθοδική προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα είναι άκρως αποτελεσματική αλλά έχει υψηλό κόστος. Τον τελευταίο καιρό έχουν κατασκευαστεί θυσιαζόμενες άνοδοι ψευδαργύρου για περιπτώσεις επιδιορθώσεων κατασκευών όπου το πρόβλημα της διάβρωσης του οπλισμού γίνεται προσπάθεια να αντιμετωπισθεί τοπικά. Η εργασία αυτή έχει σκοπό να διαπιστώσει την αποτελεσματικότητα και την έκταση της προστασίας των τοπικά εφαρμοζόμενων θυσιαζόμενων ανόδων . Για τον σκοπό αυτό θα κατασκευαστούν κατάλληλα δοκίμια με θυσιαζόμενες ανόδους και θα παρακολουθείται η αποτελεσματικότητα της καθοδικής προστασίας μέσω ηλεκτροχημικών μετρήσεων και των κριτηρίων μέτρησης δυναμικού ON-OFF.

## **ABSTRACT**

A common problem of engineering is the corrosion of reinforced concrete, a phenomenon which occurs very often in our country due to the climatic conditions. Corrosion of steel in concrete is a very important factor that causes damage and various other problems in structures, especially in coastal areas where we have a high degree of attack by chemicals. Corrosion of reinforced concrete affects a lot of structures and is an important factor wear both in terms of functionality and static. The purpose of this paper is to examine the effectiveness of local cathodic protection of steel reinforcement with sacrificial anodes. Cathodic protection of reinforcement in concrete is highly effective but is costly. Lately been made sacrificial zinc anodes for construction repairs, cases where the problem of corrosion of reinforcement is an effort to deal locally. This paper aims to determine the effectiveness and scope of protection of locally applied sacrificial anodes. For this purpose will be make samples of concrete with sacrificial anodes and will monitor the effectiveness of cathodic protection through electrochemical measurement and the criteria for measuring potential ON-OFF.

## Περιεχόμενα

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	1
1. Σκυρόδεμα – Οπλισμένο Σκυρόδεμα .....	1
1.1 Γενικά για το σκυρόδεμα .....	1
1.2 Νωπό Σκυρόδεμα .....	1
1.2.1 Αναλογία ανάμιξης των υλικών.....	2
1.2.2 Πρόσθετα του σκυροδέματος .....	3
1.3 Σκληρυνθέν Σκυρόδεμα .....	5
1.3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες του σκληρυνθέντος σκυροδέματος .....	5
1.3.2 Ιδιότητες του σκληρυνθέντος σκυροδέματος .....	7
1.4 Οπλισμένο Σκυρόδεμα .....	8
1.4.1 Γενικά.....	8
1.4.2 Σχεδιασμός και υπολογισμός .....	9
2. Διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα .....	12
2.1 Εισαγωγή.....	12
2.2 Οι Επιπτώσεις της Διάβρωσης στον Σιδηροπλισμό.....	14
2.3 Μηχανισμός της διάβρωσης.....	16
2.3.1 Ενανθράκωση του σκυροδέματος.....	20
2.3.2 Επίδραση χλωριόντων.....	21
2.3.3 Ρωγμές.....	22
2.4 Εντοπισμός Διαβρωμένου Οπλισμού σε στοιχεία Οπλισμένου Σκυροδέματος 22	
2.5 Ποσοτικοποίηση της Διάβρωσης .....	28
3. Προστασία από τη Διάβρωση.....	32
3.1 Γενικές υποδείξεις .....	32
3.2 Σειρά εργασιών αποκατάστασης.....	34

3.3	Εργασίες σε περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατό να αφαιρεθεί το σκυρόδεμα	35
3.3.1	Επανακαλικοποίηση του σκυροδέματος.....	35
3.3.2	Ανασταλτικά διαβρώσεως .....	35
3.3.3	Οργανικές επικαλύψεις .....	39
3.3.4	Καθοδική Προστασία.....	40
4.	Καθοδική Προστασία .....	41
4.1	Γενικά.....	41
4.2	Με θυσιαζόμενες ανόδους .....	42
4.3	Με επιβαλλόμενα εξωτερικά ρεύματα .....	45
4.4	Ηλεκτρόδια Αναφοράς.....	50
4.5	Κριτήρια για την ορθή λειτουργία .....	51
4.5.1	Επιπλέον απαιτήσεις .....	51
4.5.2	Βασικές αρχές σχεδιασμού .....	52
4.5.3	Προβλήματα που πρέπει να αποφευχθούν.....	53
	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	54
1.	Γενικά .....	54
1.1	Υλικά.....	54
1.2	Καθαρισμός και ζύγιση χαλύβων.....	55
1.3	Κατασκευή δοκιμίων με οπλισμένης τσιμεντοκονίας.....	55
1.4	Μέθοδοι εκτίμησης της διάβρωσης .....	58
1.4.1	Εισαγωγή.....	58
1.4.2	Μετρήσεις απώλειας μάζας .....	59
1.4.3	Μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης.....	60
2.	Μετρήσεις – Αποτελέσματα .....	63
2.1	Ηλεκτροχημικές μετρήσεις πειραματικών δοκιμίων .....	63
2.1.1	Δοκίμιο 1 «μάρτυρας» .....	63

2.1.2 Δοκίμιο 2 με καθοδική προστασία .....	65
2.1.3 Δοκίμιο 3 με καθοδική προστασία .....	69
2.1.4 Δοκίμιο 4 με καθοδική προστασία .....	78
3. Συζήτηση – Συμπεράσματα .....	94
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	98
ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ .....	99

## **ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

### **1. Σκυρόδεμα – Οπλισμένο Σκυρόδεμα**

#### **1.1 Γενικά για το σκυρόδεμα**

Το σκυρόδεμα, όπως το λέει και η λέξη, είναι ένα «δέμα» από τα εξής υλικά: χαλίκι, γαρμπίλι, άμμος, τσιμέντο και νερό. Όταν τα υλικά αν αναδευτούν για λίγο σχετικά χρόνο και σε κατάλληλες αναλογίες, δημιουργούν το σκυρόδεμα. Το χαρακτηριστικό του σκυροδέματος είναι η σκλήρυνση μέσα σε λίγες ώρες και η απόκτηση υψηλής αντοχής μέσα σε λίγα 24ωρα. Το νερό πρέπει να είναι καθαρό, δηλαδή να μην περιέχει επιβλαβείς ουσίες, οι οποίες θα προκαλούσαν προβλήματα στη σκλήρυνση, στην αντοχή, στην προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση ή θα επηρεάζουν δυσμενώς άλλες ιδιότητες του σκυροδέματος. Ανάλογα με τις πρόσθετες ιδιότητες που μπορεί να ζητηθούν από το σκυρόδεμα, χρησιμοποιούνται κατά την ανάδευσή του και διάφορα άλλα πρόσθετα υλικά επιβραδυντικά ή/και υπερευστοποιητικά για αύξηση της εργασιμότητας, ή ακόμα και χαλύβδινες ή σύνθετες (composites) ίνες, για να δώσουν στο μίγμα πρόσθετη θλιπτική και εφελκυστική αντοχή.

#### **1.2 Νωπό Σκυρόδεμα**

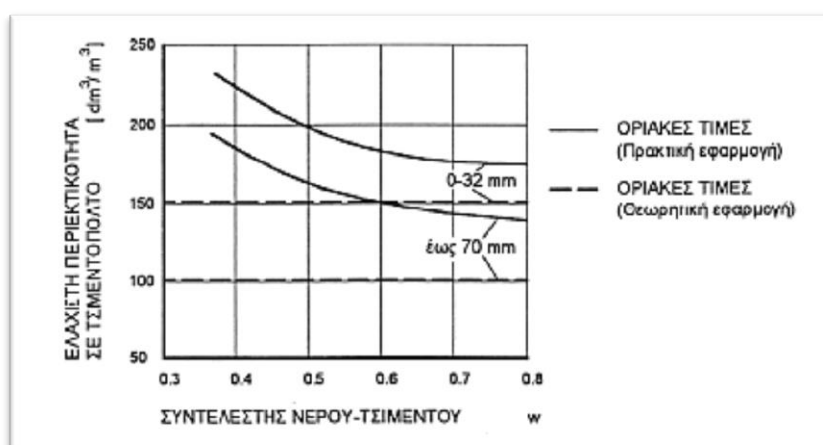
Νωπό σκυρόδεμα ονομάζεται το σκυρόδεμα, το οποίο προκύπτει από την ανάμιξη των πρώτων υλών του και για όσο χρονικό διάστημα διατηρεί το εργάσιμο, δηλαδή όδο είναι δυνατόν να μεταφέρεται και να διαστρώνεται.

Όταν το τσιμέντο ενωθεί με το νερό, αρχίζει η ενυδάτωση του και δημιουργείται ο τσιμεντοπολτός, ο οποίος είναι η συνδετική ύλη του σκυροδέματος. Κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου γίνονται διάφορες χημικές αντιδράσεις και δημιουργούνται ένυδροι κρύσταλλοι. Ο τσιμεντοπολτός αρχίζει να πήζει, γεμίζει τα κενά μεταξύ των κόκκων των αδρανών και καλύπτει την επιφάνειά τους.

Με την πάροδο του χρόνου ο τσιμεντοπολτός γίνεται πιο συμπαγής και συνεκτικός, αποκτά αυξημένες αντοχές, δηλαδή αρχίζει η σκλήρυνση με τη στερεοποίηση του σκυροδέματος, η οποία διαρκεί πάρα πολύ χρόνο [Κορωναίος, Πουλάκος, 2005].

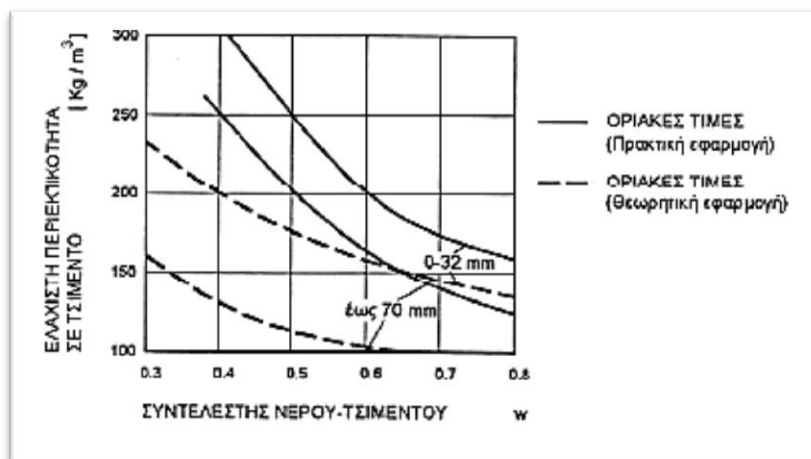
### 1.2.1 Αναλογία ανάμιξης των υλικών

Η αναλογία ανάμιξης των υλικών για την παρασκευή του σκυροδέματος, πρέπει να εξασφαλίζει σε κάθε περίπτωση την ομοιογένεια του μίγματος, το κατάλληλο εργάσιμο για ικανοποιητική διάστρωση και συμπύκνωση του σκυροδέματος, καθώς και πρόσθετες ιδιότητές του, όπως είναι η αντλησιμότητα, η στεγανότητα, η ανθεκτικότητα, κ.τ.λ. Η μέση αντοχή του σκυροδέματος,  $f_m$ , πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με την απαιτούμενη αντοχή,  $f_a$ . Η αναλογία ανάμιξης των υλικών για την παρασκευή του σκυροδέματος δίνεται σε τσιμέντο : αδρανή : νερό κατά βάρος, δηλαδή,  $Z : K : W$ . Η αναλογία ανάμιξης επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες του σκυροδέματος. Πολύ μεγάλη σημασία έχει η περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Η απαιτούμενη ποσότητα του τσιμεντοπολτού πρέπει να γεμίσει τα κενά μεταξύ των κόκκων και να περιβάλλει τους κόκκους, ώστε να είναι δυνατόν να γίνει η επεξεργασία του σκυροδέματος. Στο Σχήμα 1 δίνεται η ελάχιστη ποσότητα του τσιμεντοπολτού σε σχέση με το συντελεστή νερού – τσιμέντου,  $w$ .



Σχήμα 1. Ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμεντοπολτό για «κατάλληλη» κοκκομετρική σύνθεση σε σχέση με το συντελεστή,  $w$  [Κορωναίος, Πουλάκος, 2005].

Από την ποσότητα του τσιμεντοπολλτού προκύπτει η απαιτούμενη ποσότητα του τσιμέντου. Το αποτέλεσμα δείχνεται στο Σχήμα 2.



**Σχήμα 2.** Ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο για «κατάλληλη» κοκκομετρική σύνθεση σε σχέση με το συντελεστή,  $w$  [Κορωναίος, Πουλάκος, 2005].

Η ανάμιξη των πρώτων υλών γίνεται με κατάλληλο αναμικτήρα, ώστε το παρασκευαζόμενο σκυρόδεμα να γίνει όσο το δυνατόν περισσότερο ομοιόμορφο. Ο χρόνος ανάμιξης, γενικά, δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 1 min. Μετά την ανάμιξη απαγορεύεται η προσθήκη υλικών στο μίγμα.

### 1.2.2 Πρόσθετα του σκυροδέματος

**Τα πρόσθετα του σκυροδέματος** είναι διάφορες ουσίες, οι οποίες προστίθενται σε μικρές ποσότητες στο παρασκευαζόμενο σκυρόδεμα και βελτιώνουν, κατά περίπτωση, κάποια ιδιότητά του.

Τα πρόσθετα μπορεί να είναι ανόργανης προέλευσης, όπως η θηραϊκή γη, η άσβεστος, οι τέφρες, τα χρώματα κ.ά. ή οργανικής προέλευσης, όπως τα πλαστικά, το καουτσούκ, η ασφαλτος, κ.ά.

Τα πρόσθετα, τα οποία μεταβάλλουν τις ιδιότητες του σκυροδέματος με φυσικές ή χημικές δράσεις, διακρίνονται σε :



### **Επιταχυντικά Πρόσθετα**

Τα επιταχυντικά πρόσθετα αυξάνουν την ταχύτητα ενυδάτωσης του τσιμέντου, επιταχύνουν την πήξη και τη σκλήρυνση του σκυροδέματος και αυξάνουν την αρχική αντοχή του. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις, όπου απαιτείται να αναπτυχθούν αυξημένες αρχικές αντοχές στο δομικό έργο. Το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι ότι προκαλούν μείωση της τελικής αντοχής του σκυροδέματος.

### **Επιβραδυντικά Πρόσθετα**

Τα επιβραδυντικά πρόσθετα επιβραδύνουν την ενυδάτωση του τσιμέντου και συνεπώς την πήξη και τη σκλήρυνση του σκυροδέματος. Επίσης, βοηθούν στη διατήρηση του εργάσιμου και χρησιμοποιούνται για να αυξηθεί ο διαθέσιμος χρόνος για τη μεταφορά και τη διάστρωση του σκυροδέματος. Η αρχική αντοχή του σκυροδέματος εμφανίζεται μειωμένη, αλλά η τελική αντοχή του δεν επηρεάζεται από τα επιβραδυντικά πρόσθετα. Χρησιμοποιούνται όταν επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες, γιατί επιβραδύνουν το ρυθμό ανάπτυξης της θερμοκρασίας, καθώς και για την παρασκευή μεγάλων έργων χωρίς αρμούς εργασίας.

### **Αερακτικά Πρόσθετα**

Τα αερακτικά πρόσθετα δημιουργούν μέσα στη μάζα του νωπού σκυροδέματος μικρές φυσαλίδες με αποτέλεσμα να αυξηθεί το πορώδες του. Συνεπώς, αυξάνεται η αντοχή του στον παγετό και βελτιώνεται σημαντικά το εργάσιμό του. Όταν, όμως, η περιεκτικότητα σε αέρα ξεπεράσει τα καθορισμένα όρια είναι δυνατόν να μειωθεί η τελική αντοχή του σκυροδέματος.

### **Ρευστοποιητικά Πρόσθετα**

Τα ρευστοποιητικά πρόσθετα αυξάνουν τη ρευστότητα και την ομοιομορφία του σκυροδέματος και επιτρέπουν τη μείωση του νερού ανάμιξης με αποτέλεσμα την αύξηση του εργάσιμου και της αντοχής του σκυροδέματος. Επίσης, βελτιώνουν την υδατοπερατότητα και την αντοχή του στον παγετό. Είναι δυνατόν όμως, να εμφανιστεί αύξηση της συστολής ξήρανσης, καθώς και ανεπιθύμητη αύξηση των πόρων με συνέπεια καθυστέρηση της πήξης και μείωση της αντοχής.

## **Στεγανοποιητικά Πρόσθετα**

Τα στεγανοποιητικά πρόσθετα μειώνουν την ποσότητα του νερού, το οποίο απορροφάται ή εισχωρεί στο σκυρόδεμα, αυξάνοντας τη στεγανότητά του. Αποφεύγεται η δημιουργία μικροκοιλοτήτων στη μάζα του σκυροδέματος, καθώς και οι μικρορηγματώσεις και μειώνεται σημαντικά το ποσοστό των πόρων και των τριχοειδών αγγείων.. Είναι δυνατόν, όμως, να μεταβληθεί η χρονική εξέλιξη της πήξης και να μειωθεί η αντοχή του σκυροδέματος.

### **Πρόσθετα για το σκυρόδεμα υπό πίεση**

Τα πρόσθετα για το σκυρόδεμα υπό πίεση βελτιώνουν τη ρευστότητα και το εργάσιμό του και αυξάνουν την αντοχή του στον παγετό. Ο σωλήνας προέντασης πρέπει να γεμίζεται πλήρως χωρίς να σχηματίζονται κενά.

## **1.3 Σκληρυνθέν Σκυρόδεμα**

**Σκληρυνθέν σκυρόδεμα** ονομάζεται το σκυρόδεμα, το οποίο έχει σκληρυνθεί και έχει αποκτήσει την οριστική μορφή του, δηλαδή έχει μετατραπεί σε τεχνητό λίθο.

### **1.3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες του σκληρυνθέντος σκυροδέματος**

Οι ιδιότητες του σκληρυνθέντος σκυροδέματος επηρεάζονται από τους εξής παράγοντες:

#### **Ο βαθμός ενυδάτωσης**

Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός ενυδάτωσης, δηλαδή όσο πιο ολοκληρωμένη είναι η ενυδάτωση των κόκκων του τσιμέντου, τόσο πιο συμπαγές, στερεό και ανθεκτικό είναι το σκληρυνθέν σκυρόδεμα.

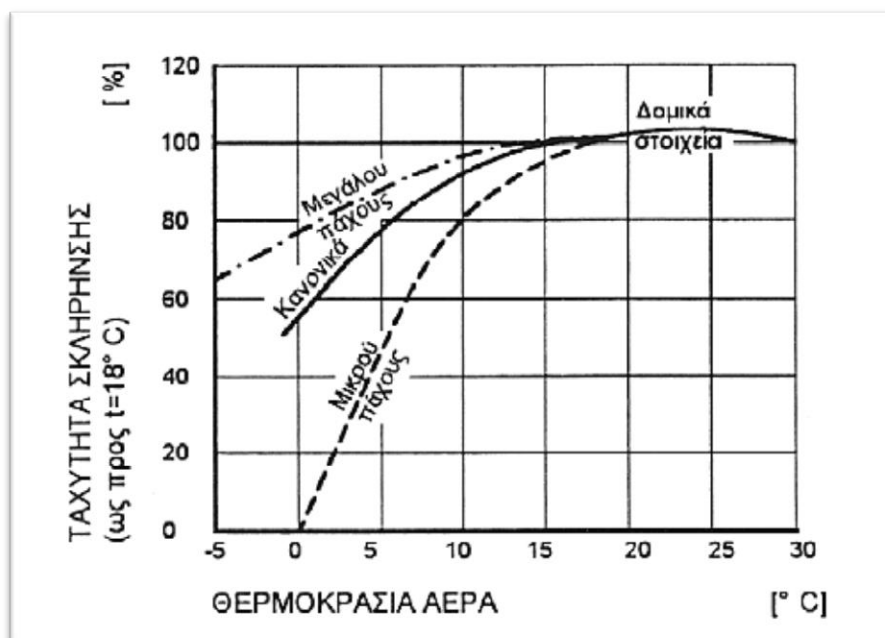
#### **Ο συντελεστής νερού – τσιμέντου, w**

Η τιμή του συντελεστή w επηρεάζει σημαντικά την πλαστικότητα και την αντοχή του σκυροδέματος. Ο συντελεστής αυτός έχει καθορισμένη τιμή ανάλογα με την

απαιτούμενη αντοχή του παρασκευαζόμενου σκυροδέματος και την ποιότητα του τσιμέντου. Μεγαλύτερες ή μικρότερες τιμές από την απαιτούμενη τιμή του  $w$  επιδρούν αρνητικά στην αντοχή του σκυροδέματος.

### Η θερμοκρασία

Η θερμοκρασία επηρεάζει την ταχύτητα σκλήρυνσης του σκυροδέματος για θερμοκρασίες αέρα μέχρι και τους  $18^{\circ}\text{C}$  περίπου. Για τις θερμοκρασίες αυτές η ταχύτητα σκλήρυνσης μειώνεται, καθώς μειώνεται η θερμοκρασία, και μάλιστα η μείωση είναι μεγαλύτερη για λεπτά δοκίμια. Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τους  $18^{\circ}\text{C}$  η ταχύτητα σκλήρυνσης παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα από το πάχος του δοκιμίου (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα στην ταχύτητα σκλήρυνσης του σκυροδέματος [Κορωναίος, Πουλάκος, 2005]

### Η υγρασία

Η γρήγορη ξήρανση του σκυροδέματος έχει ως αποτέλεσμα να αναπτυχθούν τάσεις λόγω της συστολής ξήρανσης, οι οποίες προκαλούν ρηγμάτωση ή μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό του σκυροδέματος.

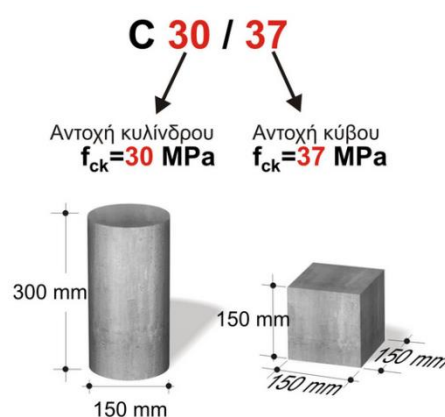
## Η συντήρηση του σκυροδέματος

Η συντήρηση του σκυροδέματος αποβλέπει στην προστασία του σκυροδέματος από την επίδραση της θερμοκρασίας, του ανέμου, του νερού και των κραδασμών, καθώς και από τις χημικές επιδράσεις.

Η συντήρηση είναι υποχρεωτική για κάθε έργο. Αρχίζει αμέσως μετά τη διάστρωση του σκυροδέματος και η χρονική διάρκειά της εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες και τις ειδικές απαιτήσεις του έργου [Κορωνάιος, Πουλάκος, 2005].

### 1.3.2 Ιδιότητες του σκληρυνθέντος σκυροδέματος

Η ταξινόμηση των κατηγοριών σκυροδέματος γίνεται ανάλογα με την αντοχή τους σε θλίψη. Κάθε ποιότητα σκυροδέματος (Concrete) π.χ. C30/37, χαρακτηρίζεται από δύο ισοδύναμες μεταξύ τους αντοχές, που στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι 30 MPa και 37 MPa. Η πρώτη αντοχή είναι η χαρακτηριστική αντοχή  $f_{ck}$  πρότυπου κυλινδρικού δοκιμίου και η δεύτερη αντοχή είναι η χαρακτηριστική αντοχή πρότυπου κυβικού δοκιμίου.



Οι κατηγορίες σκυροδέματος που υποστηρίζει ο Ευρωκώδικας 2 και το EN 206-1 είναι:

δευτερεύουσες χρήσεις	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	
<b>συνήθεις χρήσεις</b>	<b>C30/37</b>	<b>C35/45</b>	<b>C40/50</b>	<b>C45/55</b>	<b>C50/60</b>
ειδικές χρήσεις	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105

Στην Ελλάδα, μέχρι το 1994 συστηματικά και μέχρι το 1997 περιστασιακά, χρησιμοποιούνταν οι παλιές ποιότητες σκυροδέματος (B). Οι πιο συνηθισμένες ήταν η B160 (που αντιστοιχούσε περίπου στο C12/15), η B225 (που αντιστοιχούσε σε

ενδιάμεση ποιότητα μεταξύ C12/15 και C16/20) και η B300 (που αντιστοιχούσε περίπου στο C20/25).

Ο ΕΚΩΣ 2000 περιείχε τις ίδιες κατηγορίες σκυροδέματος με μέγιστη την C50/60 και πρακτικά ελάχιστη την C20/25, η οποία χρησιμοποιούνταν συνήθως μέχρι το 2010.

Με βάση τους Ευρωκώδικες, πρακτικά, η ελάχιστη ενδεδειγμένη κατηγορία σκυροδέματος είναι η C30/37.

## 1.4 Οπλισμένο Σκυρόδεμα

### 1.4.1 Γενικά

**Οπλισμένο σκυρόδεμα**  
ονομάζεται το σκυρόδεμα μέσα στο οποίο τοποθετούνται κατάλληλοι ράβδοι από χάλυβα. Το οπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει



βελτιωμένες ιδιότητες και κυρίως σημαντική αύξηση στην αντοχή σε εφελκυσμό, οι οποίες οφείλονται στην πολύ καλή συνεργασία του σκυροδέματος με το χάλυβα.

Το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί το κυριότερο δομικό υλικό των τεχνικών έργων και κυρίως εκείνων που προορίζονται για κατοικίες. Αποτελεί μια μίξη δύο υλικών, του σκυροδέματος και του χάλυβα.

Το σκυρόδεμα ως λέξη από μόνη της υποδηλώνει και το περιεχόμενό της (δέμα από σκύρα).

Σαν υλικό θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένας λίθος κατασκευασμένος με τεχνητά μέσα (ανάμιξη σε κατάλληλες αναλογίες κυρίως τσιμέντου, πετρωμάτων και νερού). Ο λίθος αυτός όπως και οι φυσικοί λίθοι παρουσιάζει πολύ μεγάλη αντοχή στην θλίψη (πίεση). Όμως κατά την εφέλκηση (συνθήκες κατά τις οποίες τα

συστατικά του υλικού τείνουν να απομακρυνθούν μεταξύ τους) επέρχεται εύκολα ρηγματώση και αστοχία.

Αυτή του την αδυναμία έρχεται να καλύψει ο χάλυβας ένα υλικό το οποίο έχει μεγάλη αντοχή στον εφελκυσμό και μπορεί να παραμορφωθεί αρκετά πριν αστοχήσει. Ο κατάλληλος συνδυασμός των δύο αυτών υλικών αποτελεί το οπλισμένο σκυρόδεμα, ένα σύμμικτο υλικό δόμησης το οποίο έχει τη δυνατότητα να μορφωθεί κατάλληλα και να πάρει διάφορα σχήματα τα οποία συνθέτουν και το σκελετό ενός κτιρίου.

#### **1.4.2 Σχεδιασμός και υπολογισμός**

Ο σχεδιασμός ενός έργου από οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί ένα σύνθετο οικονομοτεχνικό πρόβλημα η λύση του οποίου πρέπει παράλληλα να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της λειτουργικότητας, της αισθητικής αλλά προπάντων της ασφάλειας καθώς η χώρα μας όσο και η ευρύτερη βαλκανική περιοχή παρουσιάζει έντονη σεισμική δράση.

Επιπλέον ο σωστός σχεδιασμός προϋποθέτει ένα επαναλαμβανόμενο κύκλο συνεργασίας μεταξύ του μηχανικού που ασχολείται με την αρχιτεκτονική μελέτη και εκείνου που επιτελεί τον υπολογισμό του σκελετού καθώς υπάρχει στενή αλληλεξάρτηση μεταξύ της μορφής και της κατασκευής.

Στον Ελλαδικό χώρο η σπουδαιότητα του κύκλου αυτού στο τελικό αποτέλεσμα κατασκευής ενός σκελετού από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι υποβαθμισμένη και πολλές φορές ανύπαρκτη. Πολλές φορές ο υπολογισμός του σκελετού (τοποθέτηση υποστυλωμάτων και δοκαριών κατάλληλων διαστάσεων) γίνεται βάση κάποιου αρχιτεκτονικού σχεδίου το οποίο εξ αρχής δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (Ε.Α.Κ.) και του Ελληνικού Κανονισμού Οπλισμένου Σκυροδέματος. Στην περίπτωση δε που η επιλογή των διατομών γίνει σύμφωνα με τους κανονισμούς χωρίς να γίνουν ριζικές αλλαγές στο αρχιτεκτονικό σχέδιο το αποτέλεσμα είναι άσχημο όχι μόνο αισθητικά αλλά και λειτουργικά. Σχεδόν πάντα υπάρχει δυνατότητα τροποποίησης και των δύο μελετών σύμφωνα πάντα και

με τις απαιτήσεις του ιδιοκτήτη, έτσι ώστε να προκύψει το βέλτιστο αποτέλεσμα και εξαρτάται κυρίως από τις επιλογές που θα κάνει ο μηχανικός-μελετητής.

Ένα άλλο στοιχείο που είναι πολύ σημαντικό στη φάση του σχεδιασμού είναι η επιλογή των υλικών. Τα συστατικά του οπλισμένου σκυροδέματος, σκυροδέμα και χάλυβας, κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με την αντοχή τους.

Ο χάλυβας διακρίνεται από τις κατηγορίες-ονομασίες: S400, S500, S400s, S500s και B500C (που αποτελεί πρόσφατο προϊόν στην αγορά των χαλύβων)

Οι ευρύτερα συναντώμενες είναι οι πρώτες δύο με την S500 να αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς. Το ζητούμενο είναι να συμφωνεί η ποιότητα χάλυβα της μελέτης με αυτή του προμηθευτή ο οποίος πρέπει να προσκομίσει τις κατάλληλες πιστοποιήσεις στον μηχανικό του έργου αλλά και η μορφή του χάλυβα να είναι τέτοια (κατάλληλα μήκη) ώστε να πληρεί τις προϋποθέσεις της μελέτης. Έτσι κρίνεται σημαντική η επιλογή του ιδιοκτήτη για τον προμηθευτή χάλυβα (μάντρα σιδήρου) καθώς αυτός θα πρέπει να ανταποκριθεί πλήρως στις απαιτήσεις της μελέτης.

Αντίθετα με τους προμηθευτές σκυροδέματος οι οποίοι αποτελούν μεγάλες βιομηχανικές μονάδες οι οποίες υπόκεινται σε σκληρότερους όρους λειτουργίας και ελέγχου, οι προμηθευτές του σιδήρου οπλισμού (χάλυβας) αποτελούνται από μικρότερες επιχειρήσεις (μάντρες σιδήρου) οι οποίες μπορούν να προμηθεύονται χάλυβα χαμηλότερης ποιότητας ενώ παράλληλα τίθεται και ζήτημα εγκαταστάσεων (χάλυβες που δεν προστατεύονται από τις καιρικές συνθήκες κ.λπ.

Η προστασία του χάλυβα οπλισμού από διάβρωση εξαρτάται από το πορώδες, την ποιότητα και το πάχος της επικάλυψης του σκυροδέματος. Η πυκνότητα και η ποιότητα της επικάλυψης θεωρείται ότι επιτυγχάνεται με την κατηγορία ελάχιστης αντοχής του σκυροδέματος. Στον επόμενο πίνακα εμφανίζεται μία πρακτική σύνοψη του συνδυασμού ελάχιστης ενδεδειγμένης ποιότητας σκυροδέματος και της ελάχιστης επικάλυψης για τις κυριότερες συνθήκες περιβάλλοντος ενός κτιρίου.

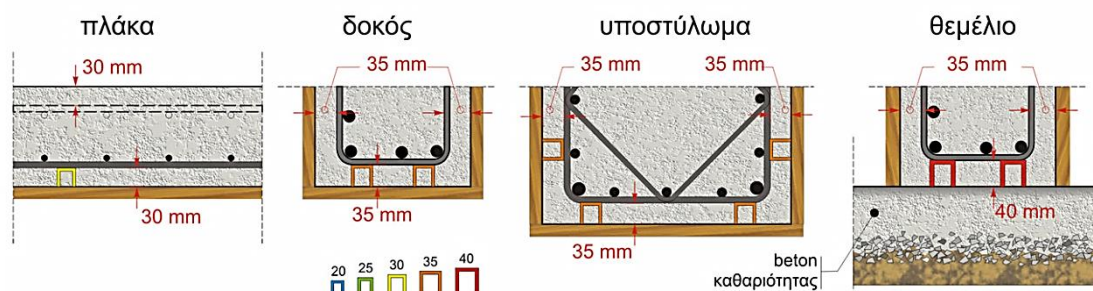
	Κατηγορία συνθηκών περιβάλλοντος κτιρίου			
	Συνήθειες συνθήκες (XC2/XC3)	Δυσμενείς συνθήκες (XC4)	Παραθαλάσσιες (XD1/XS1)	ΠΙΣΙΝΕΣ (XD2)
Ελάχιστη ενδεδειγμένη κατηγορία σκυροδέματος	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37
Ελάχιστα πάχη επικαλύψεων	25 mm	30 mm	35 mm	40 mm
Ελάχιστη ευνοϊκή κατηγορία σκυροδέματος	C35/45	C40/50	C40/50	C40/50
Ελάχιστα πάχη επικαλύψεων	20 mm	25 mm	30 mm	35 mm

**Πίνακας 1.** Ελάχιστη επικάλυψη του χάλυβα οπλισμού και ελάχιστη ενδεδειγμένη κατηγορία σκυροδέματος

- Στις πλάκες αφαιρούνται 5 mm.
- Σε περίπτωση διασφάλισης ειδικού ελέγχου παραγωγής του σκυροδέματος, αφαιρούνται 5 mm. Σε περίπτωση σχεδιασμού του κτιρίου για χρόνο ζωής 100 έτη, προστίθενται 10 mm.
- Στις επιφάνειες των πελμάτων των θεμελίων με χυτό σκυρόδεμα που έρχονται σε επαφή με το έδαφος, αν υπάρχει κατάλληλη διαμόρφωση, ή σκυρόδεμα καθαριότητας πρέπει η επικάλυψη να είναι  $\geq 40$  mm, ενώ αν γίνεται επί του εδάφους, πρέπει να είναι  $\geq 75$  mm.

Παρακάτω δίδεται παράδειγμα:

Κατασκευή σε παραθαλάσσια περιοχή με σκυρόδεμα C30/37

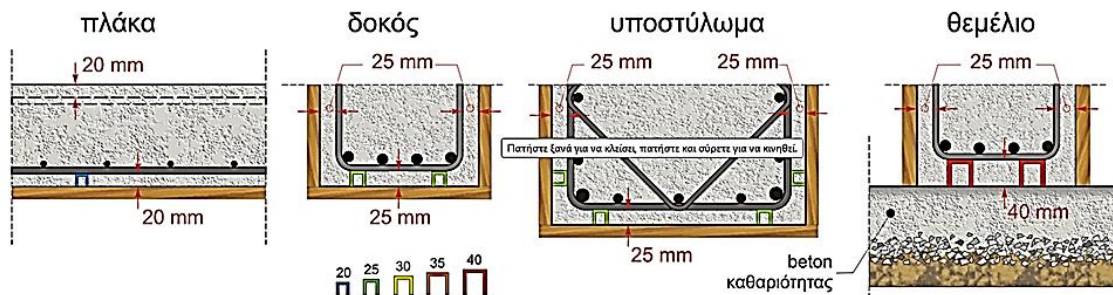




Αν χρησιμοποιηθεί σκυρόδεμα C40/50 με σύστημα ειδικού ελέγχου παραγωγής, τότε οι αναγκαίες επικαλύψεις μειώνονται κατά  $5\text{ mm}+5\text{ mm}=10\text{ mm}$  και επομένως γίνονται:

20 mm, 25 mm, 25 mm, 40 mm, όπως στο επόμενο σχήμα.

Κατασκευή σε παραθαλάσσια περιοχή με σκυρόδεμα C40/50 και ειδικό σύστημα ελέγχου της παραγωγής του



## 2. Διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα

### 2.1 Εισαγωγή

Η διάβρωση του σιδήρου του οπλισμού του σκυροδέματος είναι σοβαρό πρόβλημα το οποίο απειλεί την ασφάλεια και αυτή την καταλληλότητα των κατασκευών. Ειδικές μελέτες έδειξαν ότι στις ΗΠΑ θα εξασφαλιζόταν τεράστιες οικονομίες μόνο από την αναστολή της διάβρωσης σε εγκατεστημένες γέφυρες (450 – 500 εκ. Δολάρια το 1988).

Τα προβλήματα της διάβρωσης σε κατασκευές σε βόρεια κλίματα οξύνονται από την χρήση του αλατιού για το λιώσιμο του χιονιού. Έτσι οξύτητα εμφανίζουν τα προβλήματα σε στεγασμένα γκαράζ στα οποία εισέρχονται αυτοκίνητα από δρόμους στους οποίους έχει πέσει αλάτι. Σημαντικός επίσης κίνδυνος από την παρουσία αλατιού υπάρχει και στις παράκτιες κατασκευές. Στις περιπτώσεις αυτές η προστασία επιτυγχάνεται με επικαλύψεις με ρητίνες και χρήση αναστολέων. Για κόστος νέας γέφυρας 730 δολ. ΗΠΑ / κ.μ υπολογίσθηκε ότι το κόστος αυξάνει κατά 52 δολάρια αν χρησιμοποιηθεί προστασία (π.χ. αναστολείς) σε σύγκριση με το κόστος

αποκατάστασης που ανέρχεται σε 2.600 δολάρια / κ.μ. Στην Αυστραλία, σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις κόστους, το κόστος από την διάβρωση του σιδηρού οπλισμού ανέρχεται στο 3-4% του ΑΕΠ.

Η διάβρωση του χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα, αποτελεί ένα παγκόσμιο πρόβλημα των κατασκευών στις οποίες το κύριο δομικό υλικό είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. Το πρόβλημα αυτό είναι δυνατόν να προκαλέσει καταστροφές οι οποίες κυμαίνονται από απλές παραμορφώσεις μέχρι ολοκληρωτικές δομικές καταστροφές, παρά την σημασία του οι σχετικές συζητήσεις για το σοβαρό αυτό θέμα ήσαν ανύπαρκτες. Μόλις το 1979 συνήλθε το πρώτο σχετικό συνέδριο [Corrosion and Steel Reinforcements in Concrete Construction, Society of the Chemical Industry], το οποίο και συγκέντρωσε τεράστιο ενδιαφέρον συμμετοχής. Στο διάστημα που μεσολάβησε το ενδιαφέρον όχι μόνον δεν μειώθηκε αλλά και αναδείχθηκε ακόμη περισσότερο αφού υιοθετήθηκε από το Ινστιτούτο Πολιτικών Μηχανικών (Institute of Civil Engineers), την Ομοσπονδία Τσιμέντου (Concrete Society) και από την Συνομοσπονδία Μηχανικών Διάβρωσης (NACE).

Από καθαρά θεωρητική άποψη είναι δυνατός ο σχεδιασμός και η παραγωγή σκυροδέματος κατά τρόπον ώστε ο ενσωματωμένος χάλυβας να μην διαβρώνεται. Στην πράξη όμως, είτε λόγω κατασκευαστικών αναγκών οι οποίες επιβάλλουν διακλαδώσεις είτε λόγω αποκλίσεων από τις προδιαγραφές παρασκευής επιτρέπουν την δημιουργία διαύλων διεισδύσεως οξυγόνου και υγρασίας, δημιουργώντας έτσι τις προϋποθέσεις διάβρωσης του χάλυβα. Κατ' επέκταση το πρόβλημα της διάβρωσης είναι δυνατόν να καταλήξει ακόμη και στην αποκάλυψη του χάλυβα, την μείωση της μάζας του και τελικά την μείωση της αντοχής του συνθέτου συστήματος σκυρόδεμα-σιδηροπλισμός. Τα προβλήματα αυτά επιτείνονται με την παρουσία ιόντων χλωρίου. Στον κατασκευαστικό τομέα, περισσότερη έμφαση δίνεται στις παραμέτρους αντοχής παρά στην διάρκεια ζωής. Σπάνια έρχονται στο φως ερωτήσεις για μια κατασκευή σχετικά με το πόση ζωή έχει και ακόμα σπανιότερα ακούμε απαντήσεις για τα ερωτήματα αυτά. Η διάχυτη ιδέα είναι πως ένα κτίριο ή μια κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα δεν θα χρειασθεί, καλώς εχόντων των πραγμάτων, να επισκευασθεί ή να επιθεωρηθεί. Αυτό όμως έχει ως αποτέλεσμα, όταν απαιτείται να γίνει έλεγχος ή επισκευή, τα πράγματα να γίνονται δύσκολα και το κόστος να είναι υψηλό, διότι δεν έχει προβλεφθεί, στην φάση του σχεδιασμού πρόσβαση ή επέμβαση σε δομικά στοιχεία. Υπήρξαν περιπτώσεις κατά τις οποίες προβλήματα διάβρωσης σε

οπλισμένο σκυρόδεμα επέβαλαν την κατεδάφιση του κτιρίου λόγω του υψηλού κόστους αλλά και της δυσκολίας απομάκρυνσης των διαβρωμένων στοιχείων [R.J. Currie, 1983].

Η ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα αυξάνεται, τόσο εντός όσο και εκτός σκυροδέματος με [Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος ΚΤΧ, 2008 ]:

- Την αύξηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας
- Την μείωση του pH
- Την αύξηση της παρουσίας αλάτων (π.χ. θαλάσσιο περιβάλλον)
- Την επαφή του χάλυβα με το έδαφος, το νερό κ.λ.π.
- Την επαφή του χάλυβα με διαφορετικά υλικά ή περιβάλλοντα

Οι συχνές μεταβολές των πιο πάνω παραγόντων επηρεάζουν περαιτέρω την ταχύτητα διάβρωσης.

Άλλοι παράγοντες αύξησης της ταχύτητας διάβρωσης είναι:

- Η ύπαρξη ενεργών «κέντρων» στην επιφάνεια του χάλυβα (όπως π.χ. οξείες αιχμές ή πληγές, κάμψεις με μικρή ακτίνα καμπυλότητας κ.λ.π)
- Η ύπαρξη επιφανειακής αλλοίωσης λόγω προϋπάρχουσας διάβρωσης
- Η επαφή χαλύβων διαφορετικού είδους και διαφορετικού ηλεκτροχημικού δυναμικού
- Η επαφή χαλύβων διαφορετικού βαθμού διάβρωσης
- Η ψυχρή κατεργασία (ολκή, έλαση κ.λ.π)
- Το αυξημένο πορώδες του σκυροδέματος

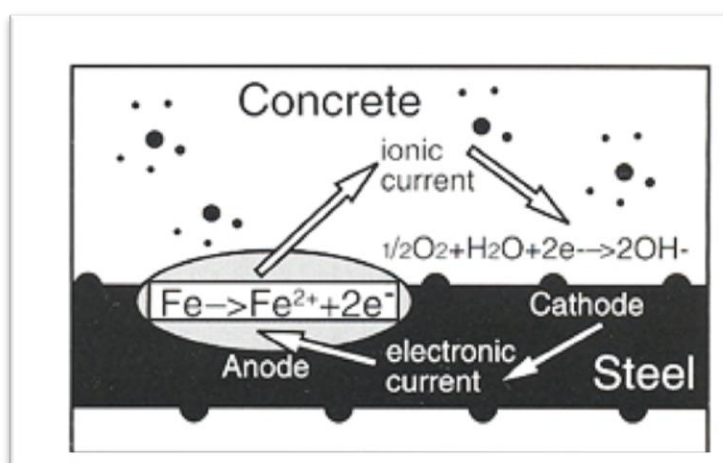
## **2.2 Οι Επιπτώσεις της Διάβρωσης στον Σιδηροπλισμό**

Η γενική διάβρωση η οποία εμφανίζεται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος των ράβδων του σιδηρού οπλισμού έχει ως συνέπεια αφ' ενός την μείωση της διατομής του χάλυβα και αφετέρου την δημιουργία ασυνέχειας στην επιφάνεια του χάλυβα. Το

είδος αυτό της διάβρωσης μειώνει την αντοχή σε εφελκυσμό του χάλυβα ανάλογα με την μείωση της διατομής και μειώνει επίσης την αντίσταση του χάλυβα στην κόπωση.

*Ομοιόμορφη διάβρωση:* Συμβαίνει στις περιπτώσεις στις οποίες η ενανθράκωση του τσιμέντου φθάνει στο βάθος εκείνο στο οποίο ευρίσκονται οι χαλύβδινες ράβδοι και μικρές ποσότητες υγρασίας. Η φθορά που ακολουθεί φαίνεται στα δομικά στοιχεία ως μια λεπτή σχισμή παράλληλη προς την τοποθέτηση της ράβδου του χάλυβα. Το είδος αυτό είναι εύκολα ορατό και είναι έτσι δυνατόν να ληφθούν διορθωτικά μέτρα.

*Τοπική διάβρωση:* Αυτή συμβαίνει σε ορισμένες θέσεις και έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της διατομής ενώ η υπόλοιπη ράβδος μπορεί να μείνει ανέπαφη. Η περίπτωση είναι συνήθης σε περιπτώσεις τοπικά αυξημένης συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου. Επίσης σε περιπτώσεις προεκτάσεων ή συγκολλήσεων των ράβδων του σιδήρου εμφανίζεται το είδος αυτό της διάβρωσης. Οι συνέπειες είναι η τοπική μείωση της διατομής των ράβδων κι η μείωση της ικανότητάς τους να φέρουν φορτίο. Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η μείωση της διατομής οφείλεται στην τοπική διάβρωση η ράβδος του σιδήρου γίνεται πλέον εύθραυστη και είναι δυνατόν με τον τρόπο αυτό να μην υπάρχουν ορατές προειδοποιήσεις για την μείωση της αντοχής της κατασκευής. Σε άλλες περιπτώσεις πάλι τοπικής διάβρωσης είναι δυνατόν να προκληθούν ρηγματώσεις στο σκυρόδεμα.



**Σχήμα 4.** Καθοδική και Ανοδική Αντίδραση

[<http://www.buildingconservation.com/articles/concrete/concrete.htm>].

## 2.3 Μηχανισμός της διάβρωσης

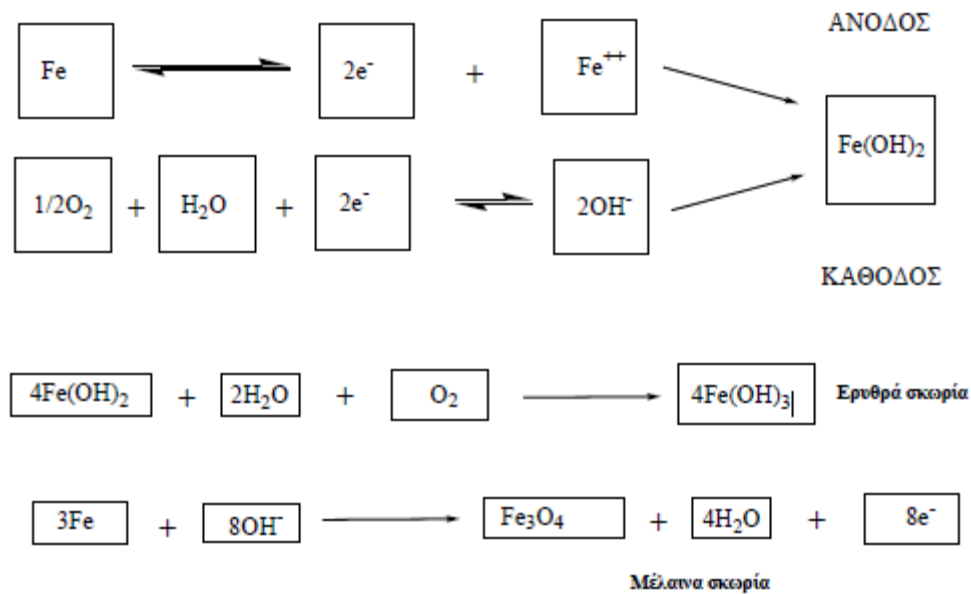
Η διάβρωση του χάλυβα συμβαίνει με διάφορους μηχανισμούς. Παρόλο ότι γενικά, η διάβρωση του χάλυβα οφείλεται στην οξείδωση του σιδήρου στο σκυρόδεμα η διάβρωση του χάλυβα οφείλεται κατά κύριο λόγο στην παρουσία διαφόρων ειδών ή ανομοιομορφής σύστασης μετάλλων (ηλεκτροχημική διάβρωση).

Γενικά η διάβρωση του χάλυβα στο σκυρόδεμα ακολουθεί δύο γενικά σχήματα:

- I. Μείωση της αλκαλικότητας λόγω απελευθέρωσης αλκαλικών ειδών και συναφών αντιδράσεων στα ποζολανικά υλικά ή μερική εξουδετέρωση της αλκαλικότητας με διοξείδιο του άνθρακα ή άλλα όξινα χημικά είδη [M. Hamada, 1969 & A. Volkwein, R. Springenschmid, 1981].
- II. Ηλεκτροχημική δράση λόγω της παρουσίας ιόντων χλωρίου και οξυγόνου [F.Gunther, G. Ruprich, 1966 & N. Anschau, S. Palm, 1968].

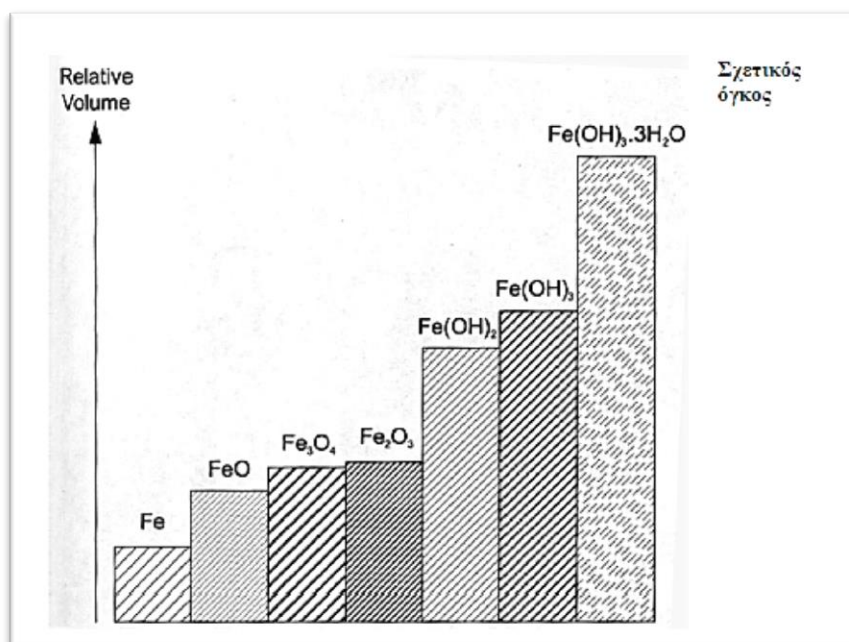
Από ηλεκτροχημική άποψη η διάβρωση είναι μια κλασσική περίπτωση αντιδράσεως την οποία λαμβάνει χώρα μεταφορά φορτίου. Κάθε αντίδραση οξείδωσης είναι συζευγμένη με μια αντίδραση αναγωγής. Στην περίπτωση του χάλυβα έχουμε τόσο περιοχές στις οποίες λαμβάνει χώρα αποβολή ηλεκτρονίων ή οξείδωση (ανοδικές περιοχές) όσο και περιοχές όπου προσλαμβάνονται ηλεκτρόνια, γίνεται δηλαδή αναγωγή (καθοδικές περιοχές).

Παρουσία νερού και οξυγόνου στο χάλυβα έχουμε ροή ηλεκτρικού ρεύματος από τις ανοδικές προς τις καθοδικές περιοχές. Συνέπεια της ροής αυτής είναι η παραγωγή υδροξυλιόντων ( $OH^-$ ) στην κάθοδο. Η επαφή των ανιόντων αυτών με το μέταλλο της καθόδου (σίδηρος) έχει ως συνέπεια τον σχηματισμό οξειδίων του σιδήρου σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα:



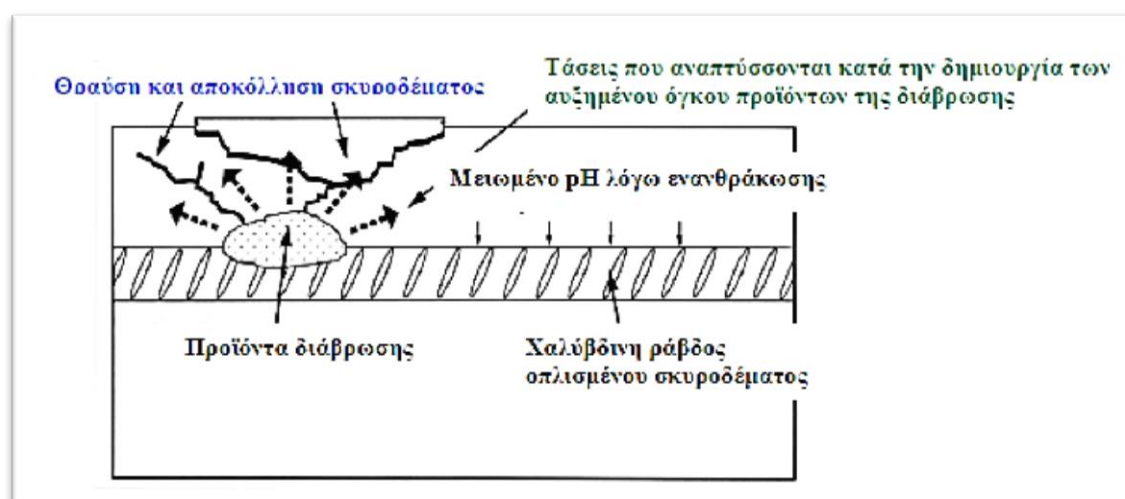
**Σχήμα 5.** Σειρά ηλεκτροχημικών αντιδράσεων οι οποίες περιγράφουν την δημιουργία της σκωρίας.

Οποιαδήποτε μέθοδος προστασίας εφαρμόζεται θα πρέπει να περιλαμβάνει ενέργειες ή χημικά μέσα τα οποία μετατοπίζουν τις αντιδράσεις του Σχ.5 από τα δεξιά προς τα αριστερά. Εναλλακτικά, αναστολή των αντιδράσεων που οδηγούν στην διάβρωση είναι δυνατόν να επιτευχθεί με απομάκρυνση ενός των αντιδρώντων (αριστερό μέλος των αντιδράσεων). Τα προϊόντα της αντιδράσεως παρουσιάζουν σημαντική αύξηση όγκου με αποτέλεσμα ο σχηματισμός τους να έχει καταστροφικές επιπτώσεις στο σκυρόδεμα. Στο σχήμα 6 παρουσιάζεται η σχετική αύξηση του όγκου των διαφόρων οξειδίων του σιδήρου τα οποία είναι δυνατόν να σχηματισθούν από τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις διάβρωσης του χάλυβα.

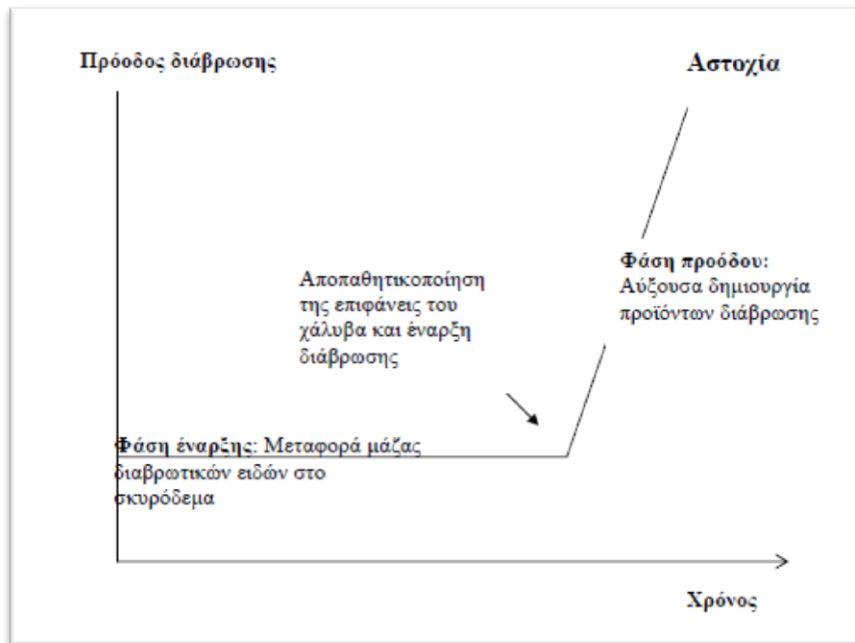


**Σχήμα 6.** Σχετικός όγκος οξειδίων του σιδήρου τα οποία σχηματίζονται στην επιφάνεια του χάλυβα όταν διαβρώνεται.

Η καταστροφή η οποία επέρχεται στο σκυροδέμα λόγω της αύξησης του όγκου των προϊόντων διάβρωσης αποδίδεται σχηματικά στο σχήμα 7:

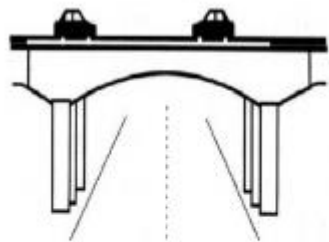


**Σχήμα 7.** Σχηματική απεικόνιση καταστροφής σκυροδέματος λόγω σχηματισμού προϊόντων διάβρωσης του χάλυβα.



**Σχήμα 8.** Εξέλιξη της διάβρωσης του οπλισμένου σκυροδέματος.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 8, η εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης του χάλυβα είναι δυνατόν να είναι ταχεία.



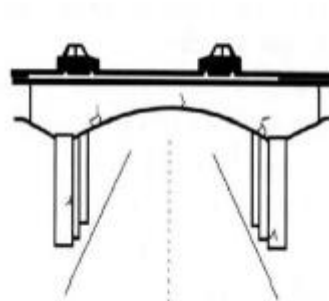
**Στάδιο 1<sup>ο</sup>** : Δεν υφίσταται ορατή ζημιά

Το περιβάλλον: Κυκλικές μεταβολές ψύξης – θέρμανσης

Εήρανσης – εφύγρανσης

Καταπόνησης

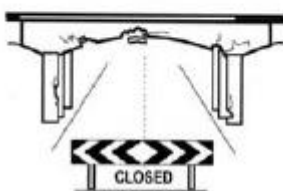
Συνέπεια: Σύνδεση μικρορωγμών – πόρων



**Στάδιο 2<sup>ο</sup>** : Έναρξη και πρόοδος φθοράς

Το περιβάλλον: διείσδυση διαβρωτικών χημικών ειδών, διείσδυση ύδατος

Συνέπειες: το σκυρόδεμα διογκώνεται. Λόγω της πίεσης η οποία αναπτύσσεται από την διάβρωση του χάλυβα, το νερό που παγώνει και από την χημική προσβολή του σκυροδέματος.



**Στάδιο 3<sup>ο</sup>** : Απώλεια αντοχής, Σοβαρές ρηγματώσεις, απώλεια μάζας, Επικίνδυνη κατάσταση

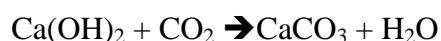


Οι τρεις βασικοί λόγοι διάβρωσης του χάλυβα είναι:

- Ενανθράκωση του σκυροδέματος
- Επίδραση χλωριόντων
- Ρωγμές

### 2.3.1 Ενανθράκωση του σκυροδέματος

Κατά την πήξη του τσιμέντου παράγεται ως γνωστόν υδροξείδιο του ασβεστίου  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Το υδροξείδιο του ασβεστίου αυτό πλεονάζει στο σκυρόδεμα. 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  $\text{CO}_2$ . Αυτό αφομοιώνεται τριχοειδώς από την επιφάνεια του μπετόν, διαλυμένο στο νερό της βροχής, συχνά μαζί και με  $\text{SO}_2$  (σε βιομηχανικές και μολυσμένες περιοχές). Το αποτέλεσμα της απορρόφησης του  $\text{CO}_2$  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.

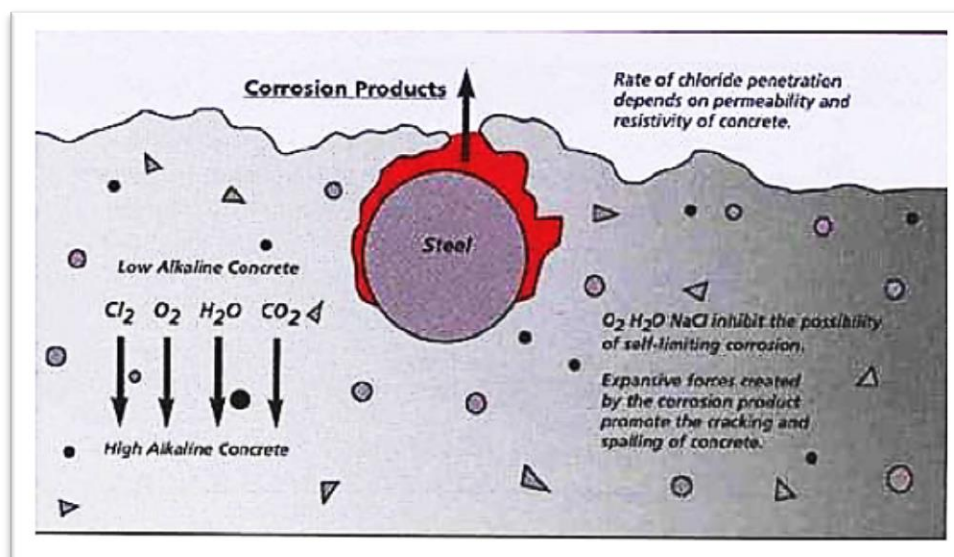
Η αντίδραση πραγματοποιείται παρουσία μικρής ποσότητας νερού. Το νερό που δημιουργείται μετά την αντίδραση διαχέεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος όπως επίσης και το CO<sub>2</sub> μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Αποτέλεσμα είναι το pH του σκυροδέματος να μειώνεται σε τιμές κάτω του 9 (περίπου 8.3). Με την διαδικασία της ενανθράκωσης, ο χάλυβας αποπαθητικοποιείται οπότε πλέον η διάβρωση είναι βέβαιη.

#### **2.3.2 Επίδραση χλωριόντων**

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 οξειδωσής του [Μ. Φαρδής, 10<sup>ου</sup> φοιτητικού συνεδρίου, 2004]

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 9.** Απεικόνιση διείσδυσης χλωριόντων  
[[www.cathodicprotection.com/pdf.lifejacket.pdf](http://www.cathodicprotection.com/pdf.lifejacket.pdf)].

### 2.3.3 Ρωγμές

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 Εντοπισμός Διαβρωμένου Οπλισμού σε στοιχεία Οπλισμένου Σκυροδέματος

Ο εντοπισμός των αιτιών τρωτότητας των κατασκευών έγκαιρα είναι πολύ σημαντικός για τις ενισχύσεις και τις επισκευές. Στην περίπτωση της διάβρωσης του χάλυβα επιβάλλεται να είμαστε σε ετοιμότητα, διότι μπορεί να δημιουργήσει μεγάλες

φθορές στην κατασκευή ή κατάρρευση σε περίπτωση σεισμού. Ο εντοπισμός του διαβρωμένου οπλισμού σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να γίνει είτε οπτικά, είτε ενόργανα.

➤ **Οπτικός εντοπισμός**

Η διάβρωση των οπλισμών του σκυροδέματος εντοπίζεται από τις συνέπειες της πάνω στο σκυρόδεμα. Τα σημάδια τα οποία μαρτυρούν ύπαρξη διαβρωμένου οπλισμού σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος είναι:

○ *Ρηγματώση παράλληλα στους οπλισμούς*

Τα προϊόντα της αντίδρασης που συμβαίνει κατά την διάβρωση του χάλυβα παρουσιάζουν σημαντική αύξηση του όγκου, δηλαδή ο όγκος των προϊόντων είναι 40% μεγαλύτερος από τον αρχικό όγκο του χάλυβα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ρωγμών παράλληλα με τον οπλισμό [Φαρδής Μ, 2004 & Κουτσούκος Π, 2004].



**Φωτογραφία 1.** Μικρορηγματώσεις σε κατακόρυφα στοιχεία κατασκευής [Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών, Νοέμβριος 2004].

○ *Αποφλοίωση σκυροδέματος*

Υπάρχει απόσπαση μεγάλου επιφανειακού κομματιού σκυροδέματος (τάξης μεγέθους επιφάνειας 100 cm) σε βάθος ίσο περίπου με την επικάλυψη του οπλισμού [Φαρδής Μ, 2004].



**Φωτογραφία 2.** Άποψη δοκού που έχει υποστεί αποφλοίωση [Ημερίδα: Θέματα τεχνολογίας σκυροδέματος και δομικών χαλύβων με τα νέα ευρωπαϊκά πρότυπα ΕΛΟΤ EN, Τ.Ε.Ε., Οκτώβριος 2004].

ο *Κηλίδες σκουριάς στην επιφάνεια του σκυροδέματος*

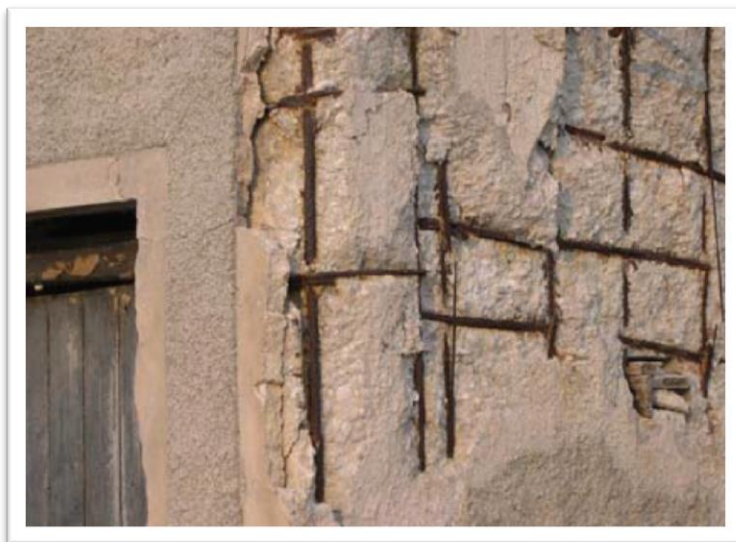
Οι κηλίδες σκουριάς έχουν καφέ χρώμα και εμφανίζονται συνήθως στις παρειές ή στον πυθμένα στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα (δοκοί, πλάκες). Οφείλεται στην διάβρωση του χάλυβα και εμφανίζεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος είτε όταν το εξωτερικό νερό εισδύει στην μάζα του σκυροδέματος και παρασύρει τη σκουριά έξω, είτε από μόνη την εσωτερική πίεση που δημιουργείται λόγω αύξησης του όγκου [Φαρδής Μ, 2004].



**Φωτογραφία 3.** Κηλίδες σκουριάς στον πυθμένα δοκού [Τάσιος Π.Θ., Αλιγιάκη Κ., 1993].

ο *Εκτίναξη επικάλυψης*

Λόγω των μεγάλων εφελκυστικών τάσεων που ασκούνται στο σκυρόδεμα από το χάλυβα μπορεί να συμβεί εκτίναξη της επικάλυψης. Αυτό συνήθως συμβαίνει όταν έχουμε χαμηλής ποιότητας σκυρόδεμα και μεγάλη πυκνότητα οπλισμών σε αυτή την περιοχή.



**Φωτογραφία 4.** Εκτίναξη της επικάλυψης λόγω διάβρωσης του χάλυβα [Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών, Νοέμβριος 2004].

➤ *Ενόργανος εντοπισμός*

Μετά τον οπτικό έλεγχο υπάρχουν κάποια ενδεικτικά στοιχεία για την διάβρωση του οπλισμού και μάλιστα για ελάχιστα μέρη της κατασκευής. Χρειάζεται λοιπόν να γίνουν κάποιες συγκεκριμένες μετρήσεις είτε στο σκυρόδεμα, είτε στο χάλυβα, είτε σε ολόκληρη την κατασκευή.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μετρήσεις που γίνονται σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος με διαβρωμένο οπλισμό, καθώς και τα όργανα με τα οποία πραγματοποιείται η κάθε μέθοδος.

Μετρήσεις	Όργανα μέτρησης
Ενανθράκωση	Ψεκασμός με φαινολοφθαλείνη
Πορώδες	Απορρόφηση νερού
Εύρος ρωγμών	Φορητό μικροσκόπιο
Βάθος ρωγμών	Υπέρηχοι
Εμπεριεχόμενη υγρασία	Θερμογράφος
Πάχος επικάλυψης	Παχύμετρο
Διάμετρος ράβδων	Παχύμετρο
Βαθμός διάβρωσης	Μέθοδος του ημι-δυναμικού

## **Σκυροδέμα**

### i. Ενανθράκωση

Το βάθος ενανθράκωσης μετράτε με ψεκάσμο με φαινολοφθαλείνη πάνω σε φρεσκοθραυσμένη επιφάνεια σκυροδέματος. Η φαινολοφθαλείνη είναι ένας άχρωμος δείκτης που χρωματίζεται με κόκκινο χρώμα σε αλκαλικό περιβάλλον ( $\text{pH} > 9$ ), δηλαδή σε ενανθρακωμένο σκυροδέμα [Τάσιος Π.Θ., Αλιγιζάκη Κ., 1993].

### ii. Πορώδες

Το πορώδες του σκυροδέματος μετράτε με την μέτρηση της απορρόφησης του νερού από αυτό. Προσαρμόζεται ένας βαθμονομημένος σωλήνας γεμάτος με νερό στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Μετράται η ποσότητα νερού που απορροφάται από το σκυρόδεμα κατά την διάρκεια κάποιου συμβατικά ορισμένου χρόνου [Τάσιος Π.Θ., Αλιγιζάκη Κ., 1993].

### iii. Εύρος ρωγμών

### iv. Βάθος ρωγμών

Η μέτρηση γίνεται με την χρήση συσκευής υπέρηχων, αφού εντοπιστεί η ρωγμή [Τάσιος Π.Θ., Αλιγιζάκη Κ., 1993].

### v. Εμπεριεχόμενη υγρασία

Η υγρασία του σκυροδέματος μπορεί να μετρηθεί με θερμογράφο, ο οποίος λειτουργεί με υπέρυθρες ακτίνες και προσδιορίζει τις 'θερμές' (υγρές) περιοχές και τις 'ψυχρές' (ξηρές) περιοχές του σκυροδέματος [Τάσιος Π.Θ., Αλιγιζάκη Κ., 1993].

## **Χάλυβας**

### i. Πάχος επικάλυψης

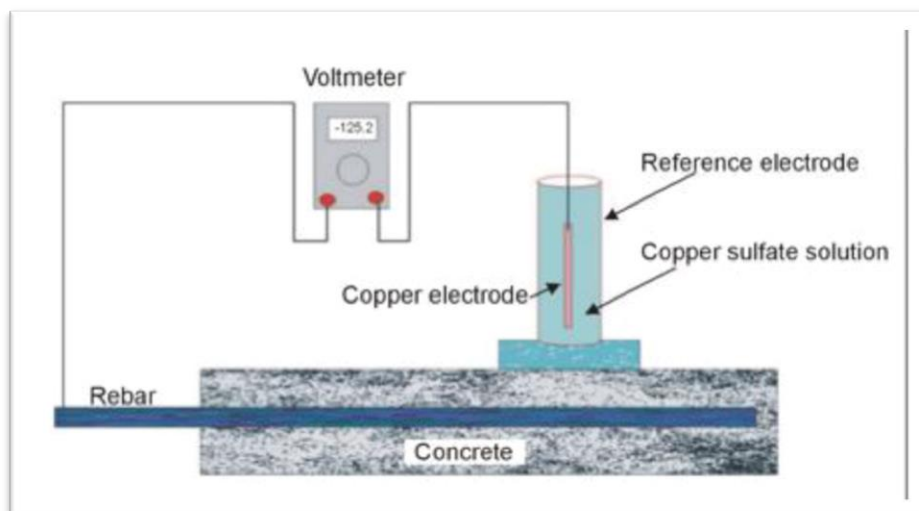
### ii. Διάμετρος ράβδων

### iii. Βαθμός διάβρωσης

Στόχος της μεθόδου του ημι-δυναμικού είναι να εντοπισθούν σημεία επάνω στο σκυρόδεμα όπου έχει αρχίσει σημαντικά η διάβρωση του οπλισμού. Αυτό επιτυγχάνεται με την μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του οπλισμού και του σκυροδέματος με την χρήση μιας κλασσικής διάταξης φυσικού δυναμικού με «απόλωτα» ηλεκτρόδια θεικού χαλκού. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η διάταξη μέτρησης. Μεγάλες αρνητικές τιμές στην διαφορά δυναμικού σε κάποια περιοχή (-350 mV) φανερώνουν ότι στην περιοχή αυτή έχει αρχίσει να διαβρώνεται ο οπλισμός. Τιμές κάτω από -200 mV δείχνουν ότι ο οπλισμός είναι σε καλή κατάσταση και ότι

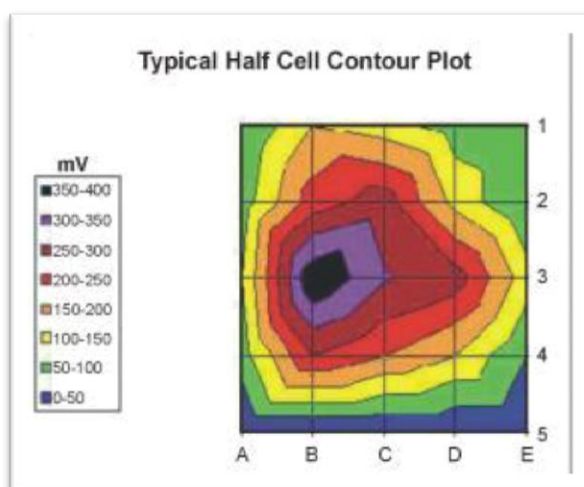


δεν έχει αρχίσει η διάβρωση.[ [www.geoservice.gr](http://www.geoservice.gr) ( Ιστοσελίδα Εταιρίας Γεωλογικών & Γεωφυσικών Ερευνών)]



**Σχήμα 10.** Κύκλωμα ημιδυναμικού για τον έλεγχο της διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα [ [www.geoservice.gr](http://www.geoservice.gr) ( Ιστοσελίδα Εταιρίας Γεωλογικών & Γεωφυσικών Ερευνών)].

Τα δεδομένα μπορούν να εισαχθούν σε ένα διάγραμμα ισοδυναμικών καμπυλών για πύο εύκολη αναγνώριση των σημείων διάβρωσης. Από εμπειρία έχει εξακριβωθεί ότι τα δυναμικά με μέγεθος μεγαλύτερο από -350 mV αντιστοιχούν σε περιοχές οπλισμού με πιθανότητα 90 % να υπάρχει ενεργή οξείδωση. Δυναμικά με τιμές κατώτερες από -200 mV υποδηλώνουν με πιθανότητα περίπου 90 % ότι δεν υπάρχει οξείδωση.

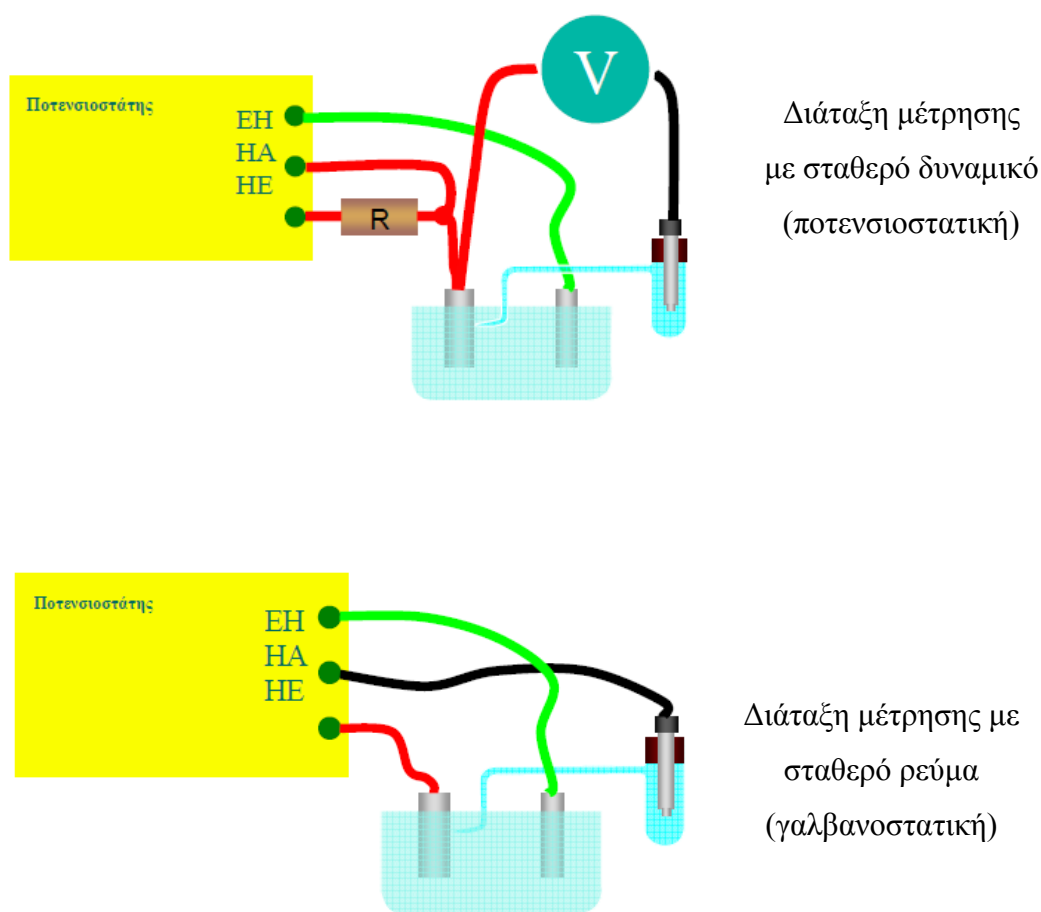


**Σχήμα 11.** Παράδειγμα διαγράμματος ημιδυναμικού [ [www.geoservice.gr](http://www.geoservice.gr) ( Ιστοσελίδα Εταιρίας Γεωλογικών & Γεωφυσικών Ερευνών)].



## 2.5 Ποσοτικοποίηση της Διάβρωσης

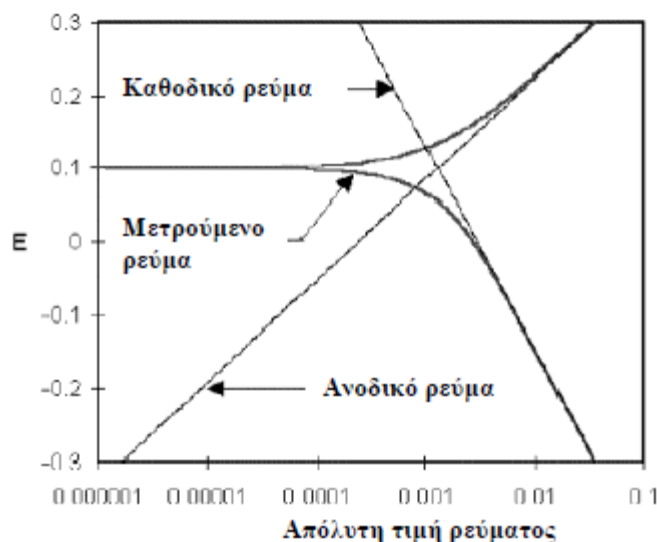
Ο απλούστερος τρόπος για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με την ταχύτητα διάβρωσης είναι ο υπολογισμός της από τα λεγόμενα διαγράμματα πόλωσης. Τα διαγράμματα αυτά λαμβάνονται με την βοήθεια πειραματικών διατάξεων μέτρησης του δυναμικού με σταθερό ρεύμα (γαλβανοστατικές μετρήσεις) ή μέτρησης του ρεύματος με σταθερό δυναμικό (ποτενσιοστατικές μέθοδοι).



**Σχήμα 12.** Διατάξεις μέτρησης πόλωσης μεταλλικών ηλεκτροδίων. EH: ενδεικτικό ηλεκτρόδιο (Pt), HA: ηλεκτρόδιο αναφοράς, HE: ηλεκτρόδιο εργασίας (πχ υπό εξέταση χάλυβας)

Οι λαμβανόμενες μετρήσεις επιτρέπουν την σχεδίαση διαγραμμάτων δυναμικού ρεύματος όπως αυτό του Σχ.13. Τα διαγράμματα αυτά, γνωστά και ως καμπύλες πόλωσης έχουν στον κατακόρυφο άξονα το δυναμικό και στον οριζόντιο το

λογάριθμο της απόλυτης τιμής του μετρούμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Οι θεωρητικές τιμές του ρεύματος για την ανοδική και την καθοδική αντίδραση είναι ευθείες γραμμές. Η καμπύλη είναι το συνολικό ρεύμα, το οποίο μετριέται κατά την σάρωση των δυναμικών ενός μετάλλου με την βοήθεια του ποτενσιοστάτη.



**Σχήμα 13.** Καμπύλες πόλωσης. Φαίνονται οι ευθείες οι οποίες αντιστοιχούν στο καθοδικό, το ανοδικό ρεύμα καθώς και η καμπύλη του συνολικού μετρούμενου ρεύματος.

Το δυναμικό ισορροπίας το οποίο αποκτά το μέταλλο απουσία ηλεκτρικών συνδέσεων ονομάζεται **δυναμικό ανοικτού κυκλώματος**,  $E_{oc}$ . Στις περισσότερες ηλεκτροχημικές μετρήσεις το πρώτο βήμα είναι η μέτρηση της παραμέτρου αυτής. Η τιμή του ανοδικού ή του καθοδικού ρεύματος στο  $E_{oc}$ , ονομάζεται **ρεύμα διάβρωσης**,  $I_{corr}$ . Η γνώση της τιμής του ρεύματος διάβρωσης συνδέεται με τον ρυθμό διάβρωσης. Η μέτρηση του μεγέθους αυτού γίνεται με την βοήθεια μετρήσεων του λογαρίθμου του ρεύματος σε μια περιοχή δυναμικών περίπου 500 mV. Με βάση την παραδοχή ότι οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις καθορίζονται από την μεταφορά ηλεκτρονίων στην επιφάνεια του μετάλλου, η πυκνότητα του ρεύματος δίνεται από την εξίσωση Tafel:

$$I = I_o \exp\left(\frac{2.303(E-E_o)}{b}\right) \quad (1)$$

όπου  $I$  το ρεύμα το οποίο οφείλεται στην ηλεκτροχημική αντίδραση  $I_o$  το ρεύμα ανταλλαγής (σταθερά, ανεξάρτητη της αντίδρασης),  $E$  το δυναμικό του ηλεκτροδίου,  $E_o$  το δυναμικό ισορροπίας ( για την συγκεκριμένη αντίδραση) και  $b$  η σταθερά Tafel

για την αντίδραση (για ορισμένη αντίδραση). Οι εξισώσεις Tafel τόσο για την καθοδική όσο και για την ανοδική, αντιδράσεις σε ένα σύστημα διάβρωσης συνδυάζονται στην εξίσωση Butler – Volmer:

$$I = I_{corr} \exp\left(\frac{2.303(E - E_{corr})}{b_a}\right) \exp\left(-\frac{2.303(E - E_{corr})}{b_c}\right) \quad (2)$$

όπου  $I$  το μετρούμενο ρεύμα,  $I_{corr}$  το ρεύμα διάβρωσης,  $E$  το δυναμικό του ηλεκτροδίου,  $E_{corr}$  το δυναμικό διάβρωσης,  $b_a$  η ανοδική σταθερά Tafel και  $b_c$  η καθοδική σταθερά Tafel. Τα διαγράμματα του λογαρίθμου του ρεύματος,  $\log I$ , συναρτήσει του δυναμικού,  $E$ , ονομάζεται διάγραμμα Tafel. Η εξίσωση (2) μπορεί να απλουστευθεί εάν περιορισθούμε σε τιμές του δυναμικού πλησίον της τιμής του  $E_{corr}$ . Στην περιοχή αυτή, η καμπύλη μπορεί να προσεγγισθεί με ευθεία η κλίση της οποίας έχει μονάδες αντίστασης (ohms). Η κλίση ως εκ τούτου ονομάζεται **Αντίσταση Πόλωσης**,  $R_p$ . Η τιμή της  $R_p$  είναι δυνατόν να συνδυασθεί με εκτίμηση των συντελεστών  $\beta$  και κατ' επέκταση να υπολογισθεί το ρεύμα διάβρωσης. Η εξίσωση (2) με γραμμικοποίηση των εκθετικών όρων γίνεται:

$$I_{corr} = \frac{1}{R_p} \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)} \quad (3)$$

Η εξίσωση (3) είναι μια μορφή της γνωστής εξίσωσης Stern-Geary.

Οι υπολογισμοί της απώλειας μάζας λόγω διάβρωσης στηρίζονται στην παραδοχή ότι για την αντίδραση η οποία περιγράφει την διάβρωση ενός είδους  $S$  κατά το σχήμα:



Το ρεύμα το οποίο δημιουργείται, υπολογίζεται από τον νόμο του Nernst:

$$Q = nFM \quad (4)$$

Όπου  $Q$  είναι το ηλεκτρικό φορτίο το οποίο προκύπτει από την αντίδραση του είδους  $S$ ,  $n$  ο αριθμός των ηλεκτρονίων τα οποία μεταφέρονται ανά μόριο ή άτομο του  $S$ ,  $F$  η σταθερά του Faraday (= 96.4867 coulombs/mole) και  $M$  ο αριθμός των moles του  $S$

τα οποία αντιδρούν. Αν το ισοδύναμο βάρους,  $EW$ , είναι η μάζα του είδους  $S$  που θα αντιδράσει με φορτίο 1 Faraday:  $EW = AW/n$  (όπου  $AW$  το ατομικό βάρος του είδους). Επειδή  $M = W/AW$  αντικατάσταση στην 4 δίνει:

$$W = \frac{EW \cdot Q}{F} \quad (5)$$

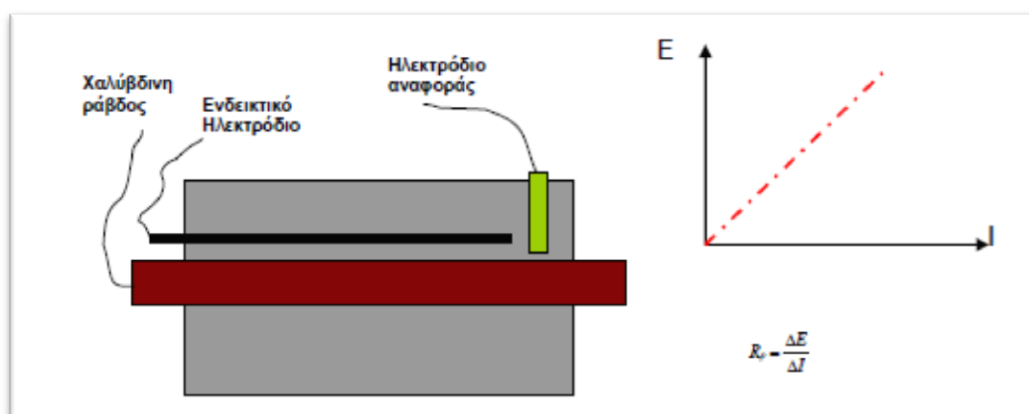
όπου  $W$  η μάζα του  $S$  που αντέδρασε.

Η μετατροπή της απώλειας βάρους σε ρυθμό διάβρωσης,  $CR$ , είναι εύκολη. Απαιτείται γνώση της πυκνότητας,  $d$  και της επιφάνειας του δείγματος,  $A$ . Το ηλεκτρικό φορτίο δίνεται από την  $Q=I t$ , όπου  $t$  ο χρόνος και  $I$  το ρεύμα. Αντικατάσταση στην εξίσωση 5 δίνει:

$$CR = \frac{I_{corr} \cdot K \cdot EW}{d \cdot A} \quad (6)$$

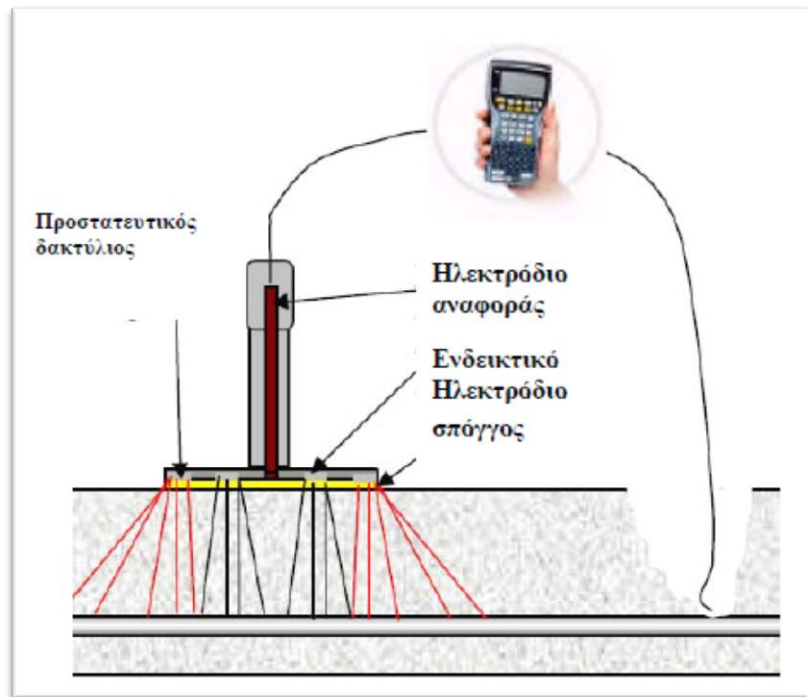
όπου  $K$  σταθερά για την μετατροπή των μονάδων.

Στην πράξη, η διάταξη μέτρησης της αντίστασης πόλωσης αποδίδεται στο σχήμα 14:



**Σχήμα 14.** Πειραματική διάταξη για την μέτρηση της αντίστασης πόλωσης σε δοκίμιο οπλισμένου σκυροδέματος

Μια ενδιαφέρουσα παραλλαγή για την μέτρηση της αντιστάσεως πολώσεως και του ρυθμού διάβρωσης σιδήρου οπλισμού σε σκυρόδεμα συνίσταται στην δημιουργία παλμών (γαλβανοστατικοί παλμοί) [O. Klinghoffer, 2000]. Η διάταξη που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή δίνεται στο σχήμα 15:



**Σχήμα 15.** Διάταξη μέτρησης της διάβρωσης σε χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος με γαλβανοστατικούς παλμούς.

Ο εντοπισμός των αιτιών τρωτότητας των κατασκευών έγκαιρα είναι πολύ σημαντικός για τις ενισχύσεις και τις επισκευές. Στην περίπτωση της διάβρωσης του χάλυβα επιβάλλεται να είμαστε σε ετοιμότητα, διότι μπορεί να δημιουργήσει μεγάλες φθορές στην κατασκευή ή κατάρρευση σε περίπτωση σεισμού. Ο εντοπισμός του διαβρωμένου οπλισμού σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να γίνει είτε οπτικά, είτε ενόργανα.

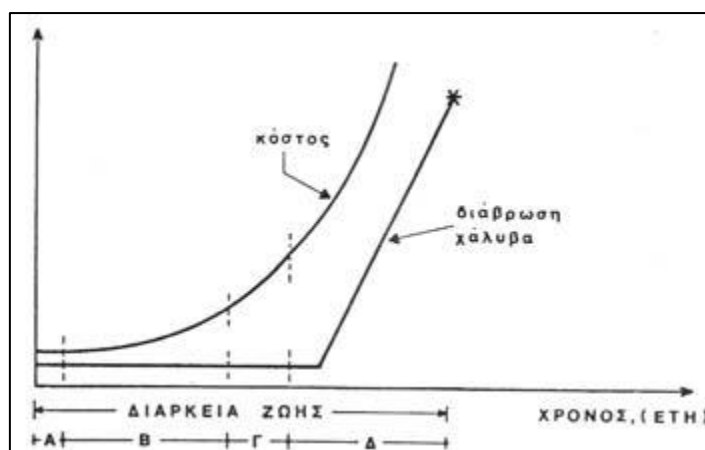
### **3. Προστασία από τη Διάβρωση**

#### **3.1 Γενικές υποδείξεις**

Σε μία υπάρχουσα κατασκευή η οποία υφίσταται τις περιβαλλοντικές επιδράσεις, ελαχιστοποίηση του γενικευμένου κόστους γίνεται με την λήψη έγκαιρων αποφάσεων. Πότε θα επέμβουμε, αλλά και με ποιόν τρόπο, έχει μεγάλη σημασία για

την πρόληψη αστοχίας και για την ελαχιστοποίηση της καταβαλλόμενης δαπάνης . Πολλές φορές γίνεται "προληπτική" επισκευή, άλλοτε γίνεται τελική παρέμβαση για επισκευή, ή πλήρης αντικατάσταση, ανάλογα με το κόστος κάθε λύσεως.

Υπάρχουν τέσσερις φάσεις που μπορούμε να κατατάξουμε το μέγεθος της διάβρωσης και να αξιολογήσουμε τον τρόπο επέμβασης (σχήμα 16). Στη φάση Α (φάση σχεδιασμού, κατασκευής, συντηρήσεως σκυροδέματος ), δεν έχει συμβεί διάβρωση του οπλισμού. Εδώ συνίστανται η τακτή συντήρηση με τα κατάλληλα υλικά ανάλογα με τη διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος.



**Σχήμα 16.** Διάβρωση χάλυβα και το αντίστοιχο κόστος επισκευής ως συνάρτηση του χρόνου επέμβασης [ Τάσιος Π.Θ., Αλιγιάκη Κ., 1993].

Στη φάση Β έχει συμβεί ενανθράκωση του σκυροδέματος ή διείδυση χλωριόντων ή άλλες βλαβερές ουσίες έχουν διαπεράσει την επικάλυψη, χωρίς να έχει συμβεί διάβρωση του οπλισμού. Επαρκή μέτρα για να προστατευθεί ο χάλυβας είναι πχ η αφαίρεση της επικάλυψης και η κατασκευή νέας με μεγαλύτερο πάχος. Στη φάση Γ έχει αρχίσει η διεργασία διαβρώσεως του οπλισμού και έχει αρχίσει η διαμήκης ρηγμάτωση και μερική αποφλοιώση της επικάλυψης. Η επέμβαση περιλαμβάνει αφαίρεση όλου του κατεστραμμένου σκυροδέματος, κατασκευή νέου και επίχριση της επιφάνειας του σκυροδέματος. Οι δε οπλισμοί θα πρέπει να καθαριστούν ως είναι δυνατόν, να βαφτούν και να εμποτιστεί το περιβάλλον σκυρόδεμα με αναστολείς διάβρωσης ή να επανακαλιτικοποιηθεί. Στη φάση Δ ο οπλισμός έχει διαβρωθεί σε

εκτεταμένες περιοχές. Πρέπει να αφαιρεθούν και να αντικατασταθούν τμήματα της κατασκευής [ Τάσιος Π.Θ., Αλιγιζάκη Κ., 1993].

### **3.2 Σειρά εργασιών αποκατάστασης**

Η σωστή προετοιμασία των επιφανειών είναι απαραίτητη. Οι επιφάνειες που θα δεχθούν τα επισκευαστικά υλικά πρέπει να είναι καθαρές, υγιείς και συνεκτικές. Ο σίδηρος οπλισμός πρέπει να είναι καθαρός, απαλλαγμένος από κάθε σκουριά. Όταν το πρόβλημα είναι η ενανθράκωση και δεν υπάρχουν χλωριόντα, οι απαιτήσεις δεν είναι τόσο αυστηρές και η ελαφριά σκουριά είναι ανεκτή. Η απομάκρυνση του ενανθρακωμένου μπετόν γίνεται προσεκτικά με σφυροκάλεμο. Οι οπλισμοί αποκαλύπτονται εάν είναι δυνατόν πανταχόθεν. Οι επιφάνειες σκάβονται κάθετα κι αν είναι δυνατόν, σε αμβλείες γωνίες για να αγκυρωθεί καλά το επισκευαστικό κονίαμα. Οι οπλισμοί καθαρίζονται χειρωνακτικά με κατάλληλη συρματοβουρτσα. Το ζητούμενο είναι να φθάσουμε σε καθαρό μέταλλο. Δουλειές μεγάλης έκτασης θα απαιτήσουν αμμοβολή. Εάν η πλήρης αποκάλυψη του οπλισμού είναι ανέφικτη, μπορεί να γίνει μια τοπική επάλειψη με εμποτιστικούς αναστολείς διάβρωσης. Για τις εργασίες καθαρισμού απαιτούνται κατάλληλες καιρικές συνθήκες: Σ.Υ. περιβάλλοντος  $\leq 70\%$  - όχι απειλή βροχής.

Οι οπλισμοί προστατεύονται με επαλειφόμενα κονιάματα που περιέχουν αναστολείς διάβρωσης, συνήθως απαιτούνται δύο στρώσεις. Τα υλικά αυτά προσφύονται τέλεια στους οπλισμούς, στο μπετόν και στα κάθε είδους επισκευαστικά κονιάματα. Ως κυρίως επισκευαστικό υλικό χρησιμοποιούνται τσιμεντοειδούς βάσης υλικά τροποποιημένα με πολυμερή και πιθανώς ενισχυμένα με προσθήκη ινών. Αυτά τα υλικά θα γεμίσουν τη διατομή και θα έρθουν πρόσωπο με το μπετόν εάν το φινίρισμά τους, τους επιτρέπει να δεχθούν βαφή. Είναι άκρως επιθυμητό αυτά τα κονιάματα να διαθέτουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά: Μηδενική συρρίκνωση ώστε να μην παρουσιάσουν ρωγμές πλαστικής συρρίκνωσης και δεν θα διαχωριστούν από το συνορεύον μπετόν. Λείο φινίρισμα, έτσι αποφεύγεται το κόστος και ο χρόνος που απαιτεί η εφαρμογή πρόσθετης εξομαλυντικής στρώσης πριν από τη βαφή. Στεγανότητα έναντι του νερού, των υδρατμών και χημικών παραγόντων. Μέτρο ελαστικότητας, μηχανικές αντοχές και συντελεστής θερμικής διαστολής παρόμοιο με

του μπετόν, έτσι ώστε το σύστημα να έχει μια ομοιογένεια. Τα επισκευαστικά τσιμεντοειδή ανάλογα με την κοκκομετρία τους τοποθετούνται σε στρώσεις ορισμένου πάχους.

Για να ολοκληρωθεί η επισκευή, συνήθως χρειάζεται μια στρώση προστασίας έναντι της ενανθράκωσης. Επιθυμητά χαρακτηριστικά μιας τέτοιας στρώσης είναι: Η πλήρης φραγή στο CO<sub>2</sub>. Πλήρης ατμοδιαπερατότητα. Αυτή η ισορροπία μπορεί να επιτευχθεί σχετικά εύκολα μιας και το μόριο του CO<sub>2</sub> είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό των υδρατμών.

### **3.3 Εργασίες σε περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατό να αφαιρεθεί το σκυρόδεμα**

#### **3.3.1 Επανακαλιτικοποίηση του σκυροδέματος**

Η επανακαλιτικοποίηση είναι μια διαδικασία η οποία εφαρμόζεται στο σκυρόδεμα με σκοπό να αυξήσει την αλκαλικότητα του σκυροδέματος. Η μέθοδος στηρίζεται στην αρχή της ηλεκτροσμώσεως παρουσία εξωτερικού δυναμικού. Πάνω στην επιφάνεια του σκυροδέματος απλώνεται ένα αλκαλικό υλικό και ένα ηλεκτρόδιο το οποίο λειτουργεί ως άνοδος. Ο χάλυβας του σκυροδέματος λειτουργεί ως κάθοδος. Με την εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού δυναμικού το αλκαλικό υγρό διεισδύει στους πόρους του σκυροδέματος αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο το pH του σκυροδέματος. Το μειονέκτημά της είναι ότι μπορεί να μείνουν ενανθρακωμένες περιοχές του σκυροδέματος, χωρίς "θεραπεία". Ενδεικτικά αναφέρεται ότι απαιτείται ποσότητα αλκαλικού υλικού 2lt ανά 1 m<sup>2</sup> σκυροδέματος για να επανακαλιτοποιηθεί σκυρόδεμα 1 cm με πορώδες περίπου 12%. Η μέθοδος εφαρμόζεται για 14 ημέρες [ Τάσιος Π.Θ., Αλιγιζάκη Κ., 1993].

#### **3.3.2 Ανασταλτικά διαβρώσεως**

Χρησιμοποιούνται επιχρίσματα πάνω στον χάλυβα με σκοπό να εμποδίσουν τον χάλυβα να έρθει σε επαφή με οξυγόνο, υγρασία ή χλωριόντα. Τα επιχρίσματα



εφαρμόζονται πάνω σε χάλυβα ο οποίος είναι απολύτως καθαρός, απαλλαγμένος από ελαιώδεις ουσίες, σκόνη ή σκουριά. Αναστολέας είναι μια χημική ουσία ο οποίος όταν προστίθεται σε μικρή συγκέντρωση σε ένα περιβάλλον, μειώνει αποτελεσματικά το ρυθμό διάβρωσης. Ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα στην προστασία μετάλλων με χρήση αναστολέων είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί ή να αλλαχθεί *in situ* χωρίς να αναστατώσει τη διαδικασία. Απαραίτητη είναι μια τυποποίηση που θα μας λέει ότι ανάλογα με το βαθμό ενανθράκωσης, το pH, το είδος του χάλυβα, και την σύνθεση του σκυροδέματος θα πρέπει να εφαρμόσουμε συγκεκριμένο αναστολέα για καταπολέμηση των αιτιών της διάβρωσης [ Γ. Μπατής, Εισήγηση στην ημερίδα του ΤΕΕ Ενίσχυση κτιρίων με σύγχρονα υλικά].

Οι αναστολείς διάβρωσης μπορούν να επηρεάσουν είτε τις ανοδικές, είτε τις καθοδικές αντιδράσεις, είτε και τις δύο. Θα πρέπει να γίνεται σαφής διάκριση μεταξύ των αναστολέων διάβρωσης και άλλων προσθέτων του σκυροδέματος τα οποία βελτιώνουν την αντοχή σε διάβρωση του σκυροδέματος με τη μείωση της διεύδυσης των ιόντων χλωρίου, όπως π.χ. η πυριτική παιπάλη.

Οι αναστολείς διάβρωσης χωρίζονται, ανάλογα με το τρόπο δράσης τους σε πέντε κατηγορίες, ως εξής:

- **Ανοδικοί αναστολείς διάβρωσης:** Τα υλικά αυτά αναστέλλουν τη διάβρωση, σταθεροποιώντας το προστατευτικό φιλμ του οπλισμού και το οποίο έχει τη τάση να διασπάται όταν ανεβαίνει η περιεκτικότητα των χλωριδίων. Χαρακτηριστικό δείγμα τέτοιων αναστολέων είναι αυτοί που περιέχουν νιτρώδες ασβέστιο και οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε κονιάματα επισκευών. Το νιτρώδες ασβέστιο όμως έχει σαν παράπλευρη δράση την επιτάχυνση της πήξης και θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για την αποφυγή φαινομένων «άμεσης πήξης» (flash setting).
- **Καθοδικοί αναστολείς διάβρωσης:** Αυτοί προσροφώνται από τον οπλισμό και σχηματίζουν στην επιφάνειά του ένα φράγμα στη μείωση οξυγόνου, που είναι η κύρια αιτία καθοδικής αντίδρασης του χάλυβα στο σκυρόδεμα. Όμως, οι πιο πολλοί καθοδικοί αναστολείς, όπως οι αμίνες και τα φωσφορικά, έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη επιβράδυνση της πήξης του σκυροδέματος.
- **Οργανικοί αναστολείς διάβρωσης:** Ονομάζονται επίσης και προσροφητικοί αναστολείς διάβρωσης και η δράση τους συνδυάζει ανοδική και καθοδική

προστασία. Τυπικό είδος αυτών των αναστολέων είναι οι οργανικές αμίνες όπως π.χ. οι αμινοαιθανόλες.

- **Αναστολείς διάβρωσης φάσης ατμού:** Έχουν παρόμοια δράση με τους προσροφητικούς αναστολείς αλλά επίσης προκαλούν υψηλή πίεση υδρατμών, η οποία λειτουργεί σαν φράγμα στη διείσδυση διαβρωτικών ουσιών από την ατμόσφαιρα στο σκυρόδεμα.
- **Οξειδωτικοί αναστολείς διάβρωσης:** Οι ουσίες αυτές, όπως τα χρωμικά άλατα, δρούν σαν αναστολείς διάβρωσης με πολλούς τρόπους. Η κύρια χρήση τους είναι η αναστολή διάβρωσης σε μέταλλα τα οποία επιδεικνύουν ενεργητική παθητική μετάλλαξη, όπως ο σίδηρος και τα κράματα του.

Απ' όλα τα παραπάνω είδη, αυτό που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις επισκευές οπλισμένου σκυροδέματος, είναι οι οργανικοί αναστολείς διάβρωσης, καθώς μπορούν να διεισδύουν μέσα από το σκληρυμένο σκυρόδεμα μέσω διάχυσης.

Όταν ο αναστολέας αυτός έλθει σε επαφή με το χάλυβα οπλισμού, σχηματίζει ένα μονομοριακό προστατευτικό φιλμ, το οποίο μειώνει δραματικά τη διάβρωση, παρουσιάζοντας διπλή δράση, τόσο ανοδική όσο και καθοδική.

### **Επιλογή του σωστού αναστολέα διάβρωσης**

Οι ιδιότητες ενός αναστολέα διάβρωσης που έχει επιλεγθεί για την επισκευή στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, θα πρέπει να ικανοποιεί τουλάχιστον τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Θα πρέπει να είναι μην είναι τοξικός και δεν θα πρέπει να μολύνει το περιβάλλον στο οποίο εφαρμόζεται.
- Θα πρέπει να μπορεί να διαχέεται διαμέσω του σκληρυμένου σκυροδέματος.
- Η προστασία του θα πρέπει να είναι αποτελεσματική και μεγάλης διάρκειας.
- Θα πρέπει να αναστέλλει τη διάβρωση ανεξάρτητα από διαφοροποιήσεις στη πυκνότητα της μάζας του σκυροδέματος.
- Δεν θα πρέπει να έχει παράπλευρες επιπτώσεις στις ιδιότητες τόσο του φρέσκου όσο και του σκληρυμένου σκυροδέματος.

## Διαδικασία εφαρμογής

Η μέχρι τώρα παραδοσιακή διαδικασία επισκευής διαβρωμένων ράβδων οπλισμού, περιελάμβανε τρία επισκευαστικά προϊόντα:

- Αντιδιαβρωτική προστασία οπλισμού: Εφαρμόζεται μετά το καθαρισμό των οπλισμών από τη διάβρωση με αμμοβολή ή με τρίψιμο.
- Γέφυρα πρόσφυσης: Εφαρμόζεται έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η πρόσφυση του επόμενου στρώματος αποκατάστασης της αρχικής διατομής.
- Επισκευαστικό κονίαμα: Είναι το τελικό προϊόν που εφαρμόζεται έτσι ώστε να αποκατασταθεί η αρχική διατομή του στοιχείου και αυτό να είναι στατικά επαρκές και ανθεκτικό.

Όταν η διάβρωση προκαλείται λόγω επίθεσης χλωριδίων ή λόγω ενανθράκωσης, συνήθως εμφανίζεται νέα διάβρωση στους οπλισμούς στα άκρα της επισκευής, ακριβώς δίπλα στην επισκευασμένη περιοχή. Έτσι η τεχνική επισκευής με τη χρήση διεισδυτικών αναστολέων διάβρωσης (MCI's – Migrating Corrosion Inhibitors), έχει ως εξής:

- Γίνεται καθαρισμός των αποσαθρωμένων τμημάτων σκυροδέματος.
- Γίνεται καθαρισμός τόσο της επιφάνειας των οπλισμών από τη σκουριά όσο και της επιφάνειας σκυροδέματος που έχει προκύψει μετά το αρχικό καθαρισμό. Ο καθαρισμός θα πρέπει να γίνεται είτε με αμμοβολή είτε με υδροβολή.
- Εφαρμόζεται αντιδιαβρωτική προστασία του οπλισμού, η οποία είναι προτιμότερο να περιέχει έναν αναστολέα διάβρωσης.
- Γίνεται εφαρμογή του αναστολέα διάβρωσης με ψεκασμό ή με ρολό στη προετοιμασμένη επιφάνεια του σκυροδέματος, μέχρι το σκυρόδεμα να εμποτιστεί πλήρως και έτσι να περιοριστεί η αρχική ανοδική επίδραση.
- Εφαρμόζεται η γέφυρα πρόσφυσης στο υπόστρωμα (η οποία ενδείκνυται να περιέχει αναστολέα διάβρωσης) και η οποία θα βοηθήσει τη σύνδεση παλαιού με νέο σκυρόδεμα.
- Εφαρμόζεται το ειδικό επισκευαστικό κονίαμα (η οποία ενδείκνυται να περιέχει αναστολέα διάβρωσης).

- Τέλος εφαρμόζεται στην αποκατεστημένη διατομή μία προστατευτική επικάλυψη.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το αντιδιαβρωτικό οπλισμού, η γέφυρα πρόσφυσης και το επισκευαστικό κονίαμα, καλό θα είναι να περιέχουν διεισδυτικό αναστολέα διάβρωσης. Με το τρόπο αυτό, ο αναστολέας διάβρωσης διεισδύει μέσα στο σκυρόδεμα σε όλη τη περιοχή γύρω από την επισκευή, προσδίδοντας προστασία ακόμα και στους οπλισμούς οι οποίοι δεν θεραπεύθηκαν, παρατείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής της κατασκευής.

### 3.3.3 Οργανικές επικαλύψεις

Η μέθοδος των οργανικών επικαλύψεων (χρωμάτων) είναι μια απλή και φθηνή λύση. Οι οργανικές επικαλύψεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρεμπόδιση της εισόδου του νερού, διοξειδίου του άνθρακα, οξυγόνου και χλωριόντων στους πόρους του σκυροδέματος, προστατεύοντας τόσο τον οπλισμό όσο και το σκυρόδεμα. Απαραίτητη προϋπόθεση για την σωστή εφαρμογή της, είναι η χρήση του κατάλληλου υποστρώματος (αστάρι) πριν την εφαρμογή της επικάλυψης. Η παράλειψη της χρήσης υποστρώματος (αστάρι) θα οδηγήσει στην αποκόλληση του χρώματος από την επιφάνεια του σκυροδέματος και αστοχία της επικάλυψης. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι όλες οι οργανικές επικαλύψεις προσβάλλονται από την υπεριώδη ακτινοβολία που περιέχεται στο ηλιακό φως. Επομένως η επαναβαφή τμημάτων της κατασκευής τα οποία «βλέπει» ο ήλιος είναι απαραίτητη για την σωστή προστασία της κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα [ Γ. Μπατής, Εισήγηση στην ημερίδα του ΤΕΕ Ενίσχυση κτιρίων με σύγχρονα υλικά, 2007].

Προκειμένου οι οργανικές επικαλύψεις να μπορούν να προστατεύσουν επιτυχώς το σκυρόδεμα, πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Να έχουν καλή συνάφεια με το σκυρόδεμα ακόμη και όταν το σκυρόδεμα είναι υγρό.
- Να είναι ανθεκτικά στην υψηλή αλκαλικότητα του σκυροδέματος.

- Να μπορούν να διεισδύουν στους πόρους και τις ρωγμές (μικρότερες από 0,3 mm) του σκυροδέματος.
- Να έχουν καλή αντοχή στην υπεριώδη (UV) ακτινοβολία.
- Να έχουν καλή μηχανική αντοχή.
- Να παρεμποδίζουν την είσοδο νερού.
- Να επιτρέπουν την διέλευση υδρατμών.
- Να παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση στην διέλευση διοξειδίου του θείου και διοξειδίου του άνθρακα.

Κατηγορίες χρωμάτων όπως τα χρώματα σιλοξάνης, σιλικόνης, ακρυλικές διασπορές, πολυμεριζόμενα χρώματα, χρώματα πολυπροσθήκης και χλωριομένου καουτσούκ εκπληρούν τις απαιτήσεις αυτές. Στην πράξη οι ακρυλικές διασπορές και το χλωριομένο καουτσούκ εφαρμόζονται για την προστασία από την ενανθράκωση και τα χρώματα εποξεικών ρητινών, πολυουρεθάνης και χλωριομένου καουτσούκ εφαρμόζονται για την προστασία από την διείσδυση χλωριόντων [Γ. Μπατής, Εισήγηση στην ημερίδα του ΤΕΕ Ενίσχυση κτιρίων με σύγχρονα υλικά, 2007].

### **3.3.4 Καθοδική Προστασία**

Η καθοδική προστασία χρησιμοποιείται ευρέως ως μέθοδος προστασίας των οπλισμών έναντι διαβρώσεως σε σημαντικές κατασκευές (λ.χ. γέφυρες, θαλάσσιες εξέδρες, υπόγειες σωληνώσεις από σκυρόδεμα οι οποίες υφίστανται διάβρωση λόγω εγκαταστάσεως γεωηλεκτρικών στοιχείων). Σε περίπτωση που το περιβάλλον είναι πολύ διαβρωτικό (ή αν υπάρχει αβεβαιότητα ως προς την τελική ποιότητα του σκυροδέματος), συνιστάται να εγκαθίστανται οι αναγκαίες "διευκολύνσεις" κατά τη φάση της κατασκευής, για μίαν ενδεχόμενη εκ των υστέρων εφαρμογή καθοδικής προστασίας. 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 διαβρώσεως του οπλισμού [Γ. Μπατής, Εισήγηση στην ημερίδα του ΤΕΕ Ενίσχυση κτιρίων με σύγχρονα υλικά, 2007].

Η μέθοδος παρέχει την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της κατασκευής, η οποία μπορεί να φθάσει μέχρι και 500 χρόνια. Είναι σχετικά ακριβή λύση. Για την σωστή εφαρμογή της απαιτείται σωστή αναλογία μεταξύ της επιφάνειας των ανόδων και της επιφάνειας του οπλισμού. Στην περίπτωση που παρέχεται εξωτερικά, (μέσω μετασχηματιστή ανορθωτή) συνεχές ρεύμα, απαιτείται και παρακολούθηση της λειτουργίας της καθοδικής προστασίας [ Γ. Μπατής et all, 2004].

Άρα όπως αναφέρθηκε πιο πάνω η καθοδική προστασία μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους:

- a) με επιβαλλόμενο ρεύμα και
- b) με θυσιαζόμενες ανόδους

Αναλυτικότερη αναφορά για τις δύο μεθόδους γίνεται στο παρακάτω κεφάλαιο.

## **4. Καθοδική Προστασία**

### **4.1 Γενικά**

Ένας από τους πιο συνηθισμένους τρόπους προστασίας των κατασκευών από την διάβρωση είναι η 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. Η εξωτερική άνοδος μπορεί να είναι ένα σύστημα τεχνητών ανόδων, όπου το ρεύμα είναι αποτέλεσμα της διαφοράς δυναμικού των δύο μετάλλων ή μπορεί να γίνει απ' ευθείας σύνδεση με μία εξωτερική πηγή παροχής συνεχούς ρεύματος. Η τελική επιλογή μεταξύ των δύο συστημάτων εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες που υπάρχουν, αλλά εάν στο ίδιο έργο χρησιμοποιηθούν και τα δύο συστήματα θα πρέπει να προσέξουμε ιδιαίτερα να μην υπάρξει αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

Το δυναμικό του μετάλλου μετατοπίζεται σε πιο αρνητικές τιμές, ώστε να αποτελέσει την κάθοδο ενός ηλεκτρολυτικού κελιού. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι αν το δυναμικό του μετάλλου μετατοπιστεί πολύ αρνητικά, προκαλείται υπερπροστασία με την έννοια των αυξημένων τιμών της ταχύτητας καθοδικής αντίδρασης. Αποτέλεσμα της υπερπροστασίας είναι είτε η αύξηση του pH με δυσμενείς συνέπειες στην αντοχή των χρωμάτων, είτε στην παραγωγή υδρογόνου που προκαλεί ευθραστοποίηση του μετάλλου [N. Κουλουμπή, 2010, R.W. Revie, H. H. Uhlig, 2008, W. Baeckmann et al, 1989].

#### 4.2 Με θυσιαζόμενες ανόδους

Σε συστήματα τεχνητών ανόδων χρησιμοποιούνται ενεργά μέταλλα σαν βοηθητικές άνοδοι οι οποίες είναι απ' ευθείας ηλεκτρικά συνδεδεμένες στο μέταλλο το οποίο θέλουμε να προστατευτεί. Προκειμένου να καταλάβουμε πως λειτουργεί το σύστημα θα πρέπει να έχουμε υπ' όψιν μας την σειρά αναγωγικής ισχύος των μετάλλων, όπως αυτή παρουσιάζεται στον διπλανό πίνακα. Η διαφορά στη φυσική διαφορά δυναμικού, όπως αυτή φαίνεται από τις σχετικές θέσεις των μετάλλων στην σειρά, δημιουργεί παροχή ρεύματος στον ηλεκτρολύτη, το οποίο στην περίπτωση μας είναι το νερό

<b><u>Ηλεκτροθετικό</u></b>
Λευκόχρυσος
Τιτάνιο
Ανοξείδωτο
ατσάλι
Χαλκός
Μόλυβδος
Σίδηρος ή ατσάλι
Κάδμιο
Ψευδάργυρος
Αλουμίνιο
Μαγνήσιο
<b><u>Ηλεκτροαρνητικό</u></b>

των πόρων που περιβάλλει τον οπλισμό, από την άνοδο στο μέταλλο. Δηλαδή θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε, ως άνοδο, υλικά τα οποία είναι πιο ηλεκτροαρνητικά από τον χάλυβα και έτσι μπορέσουν να προμηθεύσουν ηλεκτρόνια τον πιο ηλεκτροθετικό χάλυβα, όταν είναι σε επαφή με το νερό των πόρων. Τα μέταλλα τα οποία χρησιμοποιούνται συνηθέστερα είναι αλουμίνιο, ψευδάργυρος και μαγνήσιο ή κράματα αυτών προκειμένου να βελτιωθεί η προστασία μακροπρόθεσμα.

Άρα η καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους βασίζεται στη δημιουργία γαλβανικού κελιού μεταξύ του μετάλλου που λειτουργεί ως κάθοδος και της θυσιαζόμενης ανόδου που είναι από υλικό πιο ανοδικό σε σχέση με το μέταλλο (Σχ. 17).

Οι απαιτήσεις που έχουν τα συστήματα τεχνητών ανόδων είναι ότι οι τεχνητές άνοδοι, θα πρέπει είτε να συνδεθούν απ' ευθείας με την κατασκευή είτε μέσω ενός αγωγού ο οποίος θα συνδέει την άνοδο με την κατασκευή όπως επίσης και η χρήση ασφαλών και μικρής αντίστασης συνδέσμων μεταξύ αγωγού και ανόδου.

Τα συστήματα τεχνητών ανόδων έχουν πλεονέκτημα ότι είναι απλά στην τοποθέτηση τους, δεν απαιτούν την ύπαρξη πηγής για παροχή εξωτερικού ρεύματος, είναι ιδιαίτερα χρήσιμα αν θέλουμε τοπική προστασία σε μια κατασκευή και είναι σχετικά δύσκολο να δημιουργήσουν αλληλεπιδράσεις με γειτονικές κατασκευές.

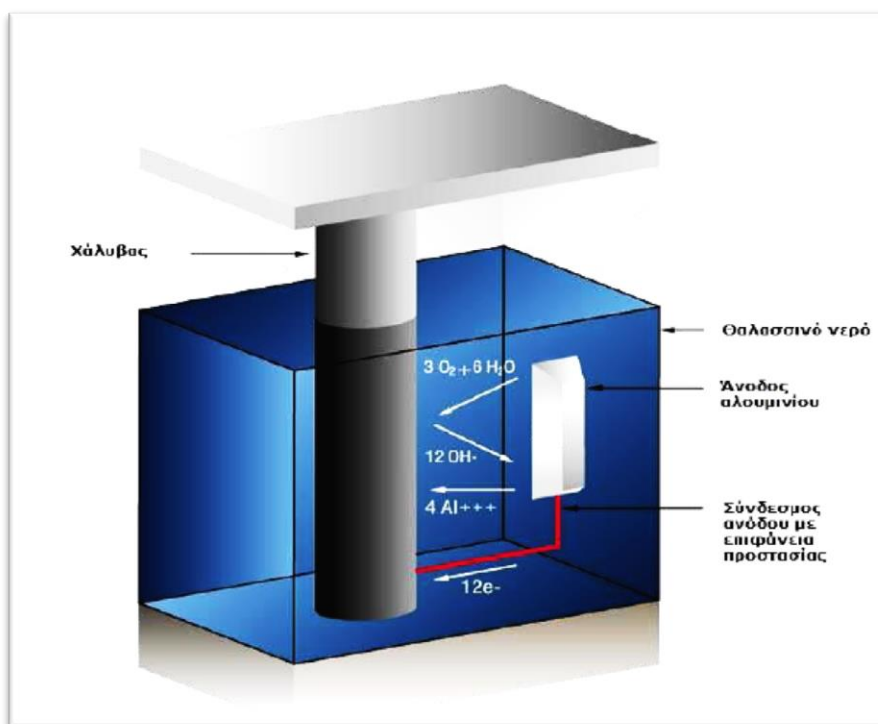
Παρ' όλα αυτά το τελικό ποσοστό ρεύματος το οποίο μπορούμε να πάρουμε από ένα πρακτικό μέγεθος ανόδων είναι σχετικά μικρό και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ειδική αντίσταση του ηλεκτρολύτη. Επιπλέον το τελικό ποσό ρεύματος που παίρνουμε από την άνοδο είναι συνήθως μικρότερο από το μέγιστο που μπορούν να δώσουν και εξαρτάται από την διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο μετάλλων. Το ηλεκτρικό ρεύμα από την άνοδο δεν είναι κανονικά ελεγχόμενο και επιπλέον μια μείωση της επικάλυψης, που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απαιτούμενης προστασίας, μπορεί να κάνει απαραίτητη την τοποθέτηση επιπλέον ανόδων για να πετύχουμε την απαραίτητη προστασία. Μετά από μακροχρόνια χρήση των ανόδων μπορεί να τις αποπαθητικοποιήσει και να δημιουργήσει ένα μη αγωγίμο στρώμα στην επιφάνεια τους ώστε να μην μπορούν να παράγουν ρεύμα. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με προσεκτικό έλεγχο των συγκεντρώσεων από διάφορες προσμίξεις και με την χρήση κραμάτων. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι ίσως χρειαστεί ένας μεγάλος αριθμός ανόδων για να προστατευτεί όλος ο οπλισμός μιας κατασκευής.

Η καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους μειονεκτεί σε σχέση με την καθοδική προστασία με εξωτερικά εφαρμοζόμενο ρεύμα, γεγονός που οφείλεται 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. Η αντικατάσταση των ανόδων γίνεται σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, συνήθως 20-25 χρόνια [Γ. Μπατής, Ε. Ντάφλος, 2006].

Τέλος ως μειονέκτημα αναφέρεται και η περιορισμένη δυνατότητα επιλογής ανόδων καθώς ο χάλυβας που χρησιμοποιείται κατά κόρον στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος έχει μικρό δυναμικό διάβρωσης. Ως θυσιαζόμενες άνοδοι



χρησιμοποιούνται συνήθως άνοδοι ψευδαργύρου υπό μορφή πλέγματος ή μεμονωμένων ανόδων.



**Σχήμα 17.** Σχηματική αναπαράσταση συστήματος καθοδικής προστασίας θυσιαζόμενης ανόδου σε θαλασσινό νερό [<http://www.cathodicprotection101.com>].

Συνοψίζοντας λοιπόν το τρόπο εφαρμογής της μεθόδου και τεχνικής, η καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

- **Πλεονεκτήματα**

- i. Εύκολη εγκατάσταση
- ii. Ασήμαντη συντήρηση
- iii. Χρήση και σε προεντεταμένο σκυρόδεμα
- iv. Δεν απαιτούν την ύπαρξη πηγής για παροχή εξωτερικού ρεύματος
- v. Χρήσιμα για τοπική προστασία σε μία κατασκευή
- vi. Δύσκολο σχετικά να δημιουργήσουν αλληλεπιδράσεις με γειτονικές κατασκευές

- **Μειονεκτήματα**

- i. Μικρή διάρκεια ζωής της ανόδου (συχνή αντικατάσταση αφού μακροχρόνια χρήση των ανόδων μπορεί να τις αποπαθητικοποιήσει και να δημιουργήσει ένα μη αγώγιμο στρώμα στην επιφάνειά τους, ώστε να μην μπορούν να παράγουν ρεύμα).
- ii. Χρειαζόμαστε μεγάλο αριθμό ανόδων για προστασία όλων των οπλισμών
- iii. 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).

### **4.3 Με επιβαλλόμενα εξωτερικά ρεύματα**

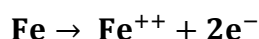
Με αυτό τον τρόπο παρέχεται μέσω μιας πηγής συνεχούς ρεύματος (ανορθωτής) συνεχές ρεύμα στο σύστημα, που αποτελείται από βοηθητικό ηλεκτρόδιο, ως αναλώσιμο υλικό, που είναι η άνοδος (+) του συστήματος Κ.Π, από το υπό προστασία μέταλλο που λειτουργεί ως κάθοδος (-) και από το ηλεκτρόδιο αναφοράς που είναι απαραίτητο για τη ρύθμιση-έλεγχο του επιβαλλόμενου (καθορισμένου) ηλεκτροδιακού δυναμικού (Σχ. 18).

Στην περίπτωση των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος οι οπλισμοί συνδέονται με τον αρνητικό πόλο μιας 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

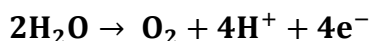
οξειδωτικές δράσεις δεν πραγματοποιούνται στην επιφάνεια της προς προστασίας κατασκευής αλλά στην άνοδο η οποία υφίσταται την επίδραση των διαβρωτικών παραγόντων. Επομένως η εφαρμογή της καθοδικής προστασίας απαιτεί την ύπαρξη κατάλληλων ανόδων οι οποίες καθορίζουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου [Γ. Μπατής et all, 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, 2009 ].

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 [Γ. Μπατής, Π. Καρύδης, 13ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, 1999, Γ. Μπατής, Ε. Ντάφλος, 2008, Γ. Μπατής, Ε. Ρακαντά, Σκυρόδεμα, Τεύχος 3, 2006].

Έχουμε λοιπόν το χάλυβα σαν κάθοδο και το ηλεκτρόδιο σαν άνοδο, το οποίο πολλές φορές αποτελείται από θραύσματα σιδήρου όπου σε αυτή την περίπτωση λαμβάνει χώρα η ακόλουθη αντίδραση:



Εάν ως μέταλλο χρησιμοποιηθεί ευγενές μέταλλο ή ένα ηλεκτροχημικά αδρανές υλικό, το γύρω περιβάλλον θα οξειδωθεί και σε περίπτωση που υπάρχει νερό θα πραγματοποιηθεί η ακόλουθη αντίδραση:



Σε αλατούχα διαλύματα παρ' όλα αυτά μπορεί να παραχθεί στην άνοδο χλώριο και έτσι ενδέχεται να παρουσιαστούν προβλήματα σε κλειστούς χώρους.

Οι απαιτήσεις που έχουν αυτά τα συστήματα είναι οι αδρανείς άνοδοι, η πηγή παροχής συνεχούς ρεύματος, αγωγούς χαμηλής αντίστασης και με καλή ηλεκτρική μόνωση μεταξύ ανόδου και πηγής χαμηλής αντίστασης συνδέσεις μεταξύ πηγής και κατασκευής.

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από υλικά τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως άνοδοι. Οι ιδιότητες που πρέπει να έχουν αυτά τα υλικά είναι να έχουν καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, χαμηλό ρυθμό διάβρωσης, καλές μηχανικές ιδιότητες ώστε να μπορούν να παραλάβουν τις φορτίσεις που ενδέχεται να παρουσιαστούν κατά την τοποθέτηση και λειτουργία τους, να μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν σε διάφορα

σχήματα, να έχουν χαμηλό κόστος και να μπορούν να αντέξουν υψηλές εντάσεις ρεύματος χωρίς να σχηματίζουν ανθεκτικά στρώματα οξειδίων. Ως άνοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί μαγνητίτης, ανθρακούχα μέταλλα όπως γραφίτης, σίδηρος υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο (14-18% Si), μόλυβδος όπως και οξειδία και κράματα μολύβδου, επιλευκοχρυσωμένα υλικά όπως ταντάλιο και τιτάνιο. Ο λευκόχρυσος λόγω της υψηλής ανθεκτικότητας του στην διάβρωση θα ήταν ιδανικός ως υλικό ανόδου, αλλά έχει το σημαντικό μειονέκτημα του υψηλού κόστους.

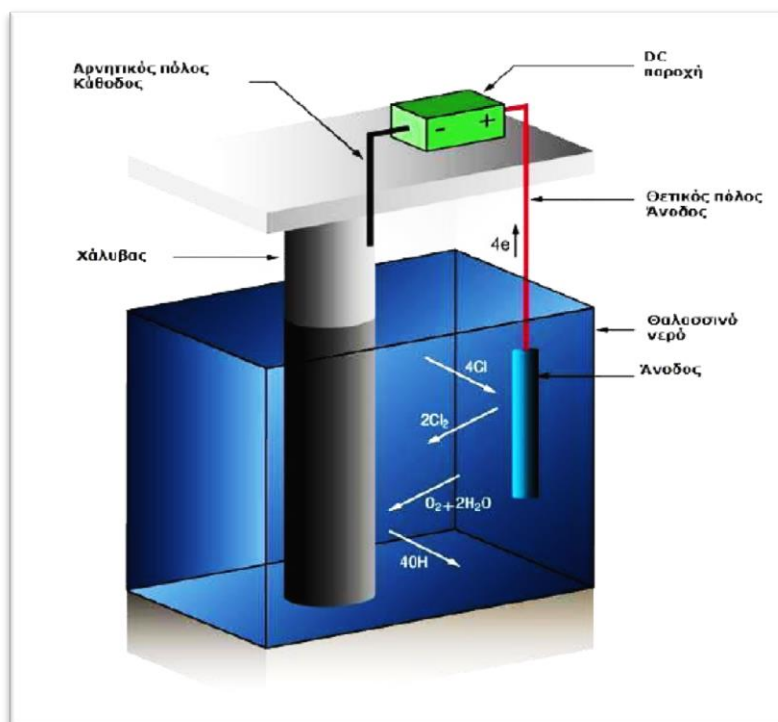
Σε περίπτωση υπόγειων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος μέσα σε υδατοκορεσμένα εδάφη, τα ρεύματα μειώνονται πολύ γρήγορα και μπορεί να πάρουν τιμές οι οποίες να είναι 1000 φορές μικρότερες από την αρχική τιμή. Σε καλώς αεριζόμενα εδάφη, απαιτούνται μεγάλες τιμές καθοδικού ρεύματος λόγω της μεγάλης διαθεσιμότητας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

Τα συστήματα αυτά έχουν σαν πλεονέκτημα ότι μπορούν να παρέχουν σχετικά υψηλά ποσά ρεύματος και να προστατευτεί μεγάλο μέρος της κατασκευής από μία άνοδο, όπως επίσης και υψηλές τάσεις, έως 100V, ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται και έτσι η άνοδος μπορεί να τοποθετηθεί μακριά από την κατασκευή. Επιπρόσθετα με αυτή την μέθοδο μπορούν διάφορες αλλαγές στην κατασκευή να προστατευτούν.

Επίσης ως μέθοδος προστασίας έχει το πλεονέκτημα ότι μπορούν να δοθούν ποικίλες τιμές ρεύματος ώστε να αναστείλουμε πλήρως την διάβρωση του χάλυβα. Μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε καινούριες όσο και σε παλιές κατασκευές, ενώ με κατάλληλη επιλογή ανόδων ο χρόνος προστασίας είναι εξαιρετικά μεγάλος (άνω των 100 χρόνων).

Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι το σύστημα είναι δυνατόν να υπόκειται σε διακοπές ρεύματος, έτσι καθίσταται απαραίτητος ο τακτικός έλεγχος και η ρύθμισή του από εξειδικευμένο προσωπικό. Επίσης η καθοδική προστασία με εφαρμοζόμενο ρεύμα δεν μπορεί να εφαρμοσθεί εύκολα στην περίπτωση των προεντεταμένων χαλύβων λόγω του κινδύνου της ψαθυροποίησης.

Τέλος θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ηλεκτρική συνέχεια όλου του οπλισμού και στην σωστή τοποθέτηση των ανόδων ώστε να μην υπάρχει ηλεκτρικά αγωγίμη επαφή μεταξύ οπλισμού και ανόδων. Επίσης θα πρέπει να γίνει προσεκτική και κατάλληλη τοποθέτηση των ηλεκτροδίων αναφοράς για τον έλεγχο της εύρυθμης λειτουργίας του συστήματος.



**Σχήμα 18.** Σχηματική αναπαράσταση συστήματος καθοδικής προστασίας με επιβολή εξωτερικού ρεύματος σε θαλασσινό νερό [<http://www.cathodicprotection101.com>].

Συνοψίζοντας λοιπόν το τρόπο εφαρμογής της μεθόδου και τεχνικής, η καθοδική προστασία με επιβαλλόμενα εξωτερικά ρεύματα έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

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

- **Μειονεκτήματα**
  - i. Απαιτεί συχνή ρύθμιση και προσαρμογή (πιθανή διακοπή ρεύματος, διακύμανση ιδιοτήτων διαβρωτικού περιβάλλοντος)
  - ii. Ασυνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος
  - iii. Μειώνει την ολκιμότητα σε χάλυβες υψηλής αντοχής λόγω εκλύσεως υδρογόνου
  - iv. Ακριβότερη από την μέθοδο με θυσιαζόμενες ανόδους (χρησιμοποίηση δαπανηρότερων δυναμοστατών σε διαβρωτικό περιβάλλον με μεγάλες διακυμάνσεις των ιδιοτήτων του)
  - v. Αλληλεπιδρά με γειτονικές εγκαταστάσεις προκαλώντας τους διάβρωση
  - vi. Πρέπει να γίνεται σωστή εκλογή των ορίων τιμών της καθοδικής τάσης με προηγούμενη εργαστηριακή έρευνα
  - vii. 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).
  - viii. 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.

Εφαρμόζεται πολύ περισσότερο σε σχέση με την μέθοδο θυσιαζόμενων ανόδων, 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



**Φωτογραφία 5.** Καθοδική προστασία σε θαλάσσιες κατασκευές [www.marpo.gr]



**Φωτογραφία 6.** Καθοδική προστασία σε βιομηχανική περιοχή [www.marpo.gr]

#### **4.4 Ηλεκτρόδια Αναφοράς**

Στην καθοδική προστασία χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια αναφοράς για την ρύθμιση του δυναμικού και τον έλεγχο της καλής λειτουργίας. Τα πλέον χρησιμοποιούμενα ηλεκτρόδια αναφοράς είναι:

- Το ηλεκτρόδιο χαλκού/θειικού χαλκού ( $\text{CuSO}_4$ )
- Το ηλεκτρόδιο καλομέλινα ( $\text{Hg} | \text{Hg}_2\text{Cl}_2 / \text{KCl}$ )
- Το ηλεκτρόδιο αργύρου/χλωριούχου αργύρου ( $\text{Ag} / \text{AgCl}$ )

Στην περίπτωση του σκυροδέματος το ηλεκτρόδιο χαλκού/θειικού χαλκού δεν χρησιμοποιείται διότι η αύξηση της περιεκτικότητας σε  $\text{SO}_4^{2-}$  έχει δυσάρεστες

επιπτώσεις. Η χρησιμοποίηση του ηλεκτροδίου καλομέλανα και αργύρου/χλωριούχου αργύρου έχουν το μειονέκτημα της αύξησης της συγκέντρωσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Παρά τα μειονεκτήματα, αυτό το ηλεκτρόδιο του αργύρου/χλωριούχου αργύρου έχουν συχνά χρησιμοποιηθεί σαν ηλεκτρόδια αναφοράς στην καθοδική προστασία του σπλισμού στο σκυρόδεμα.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί το ηλεκτρόδιο του οξειδίου του μαγνησίου σαν ηλεκτρόδια αναφοράς. Το ηλεκτρόδιο του οξειδίου του μαγνησίου (  $C | MnO_2 / KOH$  ) παρουσιάζει το πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης του υδροξυλίου ( $OH^-$ ) σαν ανιόν. Η παρουσία του υδροξυλίου στο σκυρόδεμα δεν έχει αρνητικές επιδράσεις παρά μόνο θετικές. [Σημειώσεις μαθήματος Φθορά και Προστασία Υλικών Μπατής, 2006]

## **4.5 Κριτήρια για την ορθή λειτουργία**

### **4.5.1 Επιπλέον απαιτήσεις**

Πέρα από τις απαιτήσεις που έχει η κάθε μέθοδος ξεχωριστά υπάρχουν και κάποιες επιπλέον λεπτομέρειες τις οποίες θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας κατά την εφαρμογή της μεθόδου καθοδικής προστασίας. Πρώτα απ' όλα θα πρέπει να έχουμε εξασφαλίσει την ηλεκτρική συνέχεια της κατασκευής. Η αντίσταση τόσο του αγωγού όσο και της κατασκευής θα πρέπει να είναι τόση ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πτώση τάσης και άρα της έντασης του ρεύματος, μέσα στην κατασκευή.

Επιπλέον η χρησιμοποίηση μίας προστατευτικής και μονωτικής επίστρωσης στην κατασκευή μειώνει σε μεγάλο βαθμό το ρεύμα που χρειάζεται για την προστασία της, αλλά και αυξάνει την επιφάνεια την οποία μπορούμε να προστατέψουμε. Ο συνδυασμός της εφαρμογής καθοδικής προστασίας και επίστρωσης συνήθως καταλήγει σε μια ένα πιο λειτουργικό και οικονομικό αποτέλεσμα. Ιδανικές επιστρώσεις είναι αυτές που έχουν υψηλή ηλεκτρική αντοχή, είναι συνεχείς και προσκολλούνται ισχυρά στην επιφάνεια που θέλουμε να προστατέψουμε. Ακόμα επιπλέον επιθυμητά χαρακτηριστικά είναι η αντοχή σε φθορά και η συμβατότητα στο αλκαλικό περιβάλλον το οποίο δημιουργείται από την μέθοδο καθοδικής προστασίας.



Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό είναι η απομόνωση της κατασκευής, ώστε να μην υπάρξει αλληλεπίδραση με διπλανές, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της χρησιμοποίησης μονωτικών φλαντζών, που είναι μία αρκετά συχνή λύση, οι οποίες όμως χρειάζονται συχνή συντήρηση.

Τέλος θα πρέπει κατά τον σχεδιασμό της μεθόδου να λάβουμε υπ' όψιν μας και τον τρόπο με τον οποίο θα γίνεται έλεγχος. Δηλαδή θα πρέπει να επιλέξουμε το μέρος όπου θα τοποθετήσουμε τους σταθμούς ελέγχου της διάβρωσης, τους δοκιμαστικούς σταθμούς οι οποίοι ίσως κριθούν απαραίτητοι και τον τρόπο με τον οποίο τα δεδομένα θα συλλέγονται και θα μελετώνται.

#### 4.5.2 Βασικές αρχές σχεδιασμού

Στην πράξη η διαφορά δυναμικού μεταξύ οπλισμού κατασκευής και ηλεκτρολύτη μετριέται χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς το οποίο βασίζεται στον λόγο χαλκού προς θειικό άλας χαλκού. Προκειμένου να πετύχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα θα πρέπει το ηλεκτρόδιο αναφοράς να είναι κοντά στην περιοχή όπου θέλουμε να μετρήσουμε την διαφορά δυναμικού. Έχει βρεθεί ότι για χάλυβα σε αερόβιο ηλεκτρολύτη σχεδόν ουδέτερου pH είναι απαραίτητη διαφορά δυναμικού - 850 mV, ενώ αν εκτεθεί σε βακτήρια τα οποία καταναλίσκουν θειικό άλας χρειάζεται διαφορά δυναμικού ίση με -950 mV για να μην υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης.

Προκειμένου να διατηρήσουμε αυτές τις τιμές διαφοράς δυναμικού, ώστε να προστατέψουμε τον χάλυβα, χρειάζεται να περάσουμε μία ποσότητα ρεύματος που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τοπικές συνθήκες. Αυξημένη διαθεσιμότητα οξυγόνου στην επιφάνεια του μετάλλου αυξάνει άμεσα την αναγκαιότητα σε ρεύμα. Επίσης ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η τιμή του pH του περιβάλλοντος. Τυπικές τιμές της ζητούμενης ποσότητας ρεύματος φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα, όπου παρατηρούμε την επίδραση των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή όπου κάνουμε την επέμβαση.

Συνθήκες	Παροχή ρεύματος A/m <sup>2</sup>
Όξινα διαλύματα	350-500
Αλατούχα διαλύματα	0.3-10
Νερό θάλασσας	0.05-0.15

Έχοντας αποφασίσει την απαιτούμενη ποσότητα έντασης ρεύματος, η συνολική ποσότητα ρεύματος από την άνοδο θα καθοριστεί από την επιφάνεια της κατασκευής. Τελικά το μέγεθος της ανόδου θα καθοριστεί από τις ιδιότητες της, δηλαδή την ποσότητα ρεύματος που μπορεί να δώσει ανά ποσότητα μάζας, λαμβάνοντας υπ' όψιν μας βέβαια και την διάρκεια ζωής του υλικού της ανόδου. Χαρακτηριστικές τιμές, στην περίπτωση που χρησιμοποιήσουμε τεχνητές ανόδους, φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Υλικά ανόδου	Πυκνότητα g/cm <sup>3</sup>	Amp-hrs per kg	Τυπική τιμή έντασης ρεύματος ανόδου A/m <sup>2</sup>
Ψευδάργυρος	7.1	780	0.5-2
Αλουμίνιο	2.7	2700	0.6-2.5
Μαγνήσιο	1.7	1230	1.05-5.6

#### 4.5.3 Προβλήματα που πρέπει να αποφευχθούν

Υπάρχουν συγκεκριμένοι περιορισμοί στην χρήση της μεθόδου καθοδικής προστασία. Υψηλές τιμές αρνητικών δυναμικών μπορεί να προκαλέσει αυξημένη διάβρωση κατασκευών από μόλυβδο και αλουμίνιο εξ' αιτίας του αλκαλικού περιβάλλοντος που δημιουργείται στην άνοδο. Εκτός από αυτό το αλκαλικό περιβάλλον μπορεί να αποδειχθεί καταστροφικό σε συγκεκριμένα συστήματα επιστρώσεων όπου μπορεί να προκαλέσει απώλεια της συγκόλλησης της επίστρωσης. Επιπλέον έκλυση υδρογόνου στην κάθοδο μπορεί, σε χάλυβες υψηλής αντοχής, να προκαλέσει μείωση της αντοχής του, με καταστροφικά σε μερικές περιπτώσεις αποτελέσματα. Ακόμα μπορεί να προκαλέσει απώλεια συνάφειας των επιστρώσεων, οι οποίες τότε λειτουργούν ως μόνωση από το ρεύμα της καθοδικής προστασίας.

Επίσης προσοχή πρέπει να δοθεί στον κίνδυνο πρόκλησης σπινθήρων σε επικίνδυνο περιβάλλον. Αξίζει να σημειωθεί ότι γενικά η μέθοδος των τεχνητών ανόδων δεν δημιουργεί τέτοια προβλήματα.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 1. Γενικά

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της διάβρωσης του οπλισμού μέσα στο σκυρόδεμα παρουσία χλωριόντων και κυριότερα η μελέτη καθοδικής προστασίας τοπικά με θυσιαζόμενες ανόδους Zn. Για τη μελέτη αυτή κατασκευάστηκαν 4 πρισματικά δοκίμια εκ των οποίων, 3 με διάσταση 10x10x10 και το τέταρτο με διάσταση 10x20x10. Τα δοκίμια εκτέθηκαν σε διαβρωτικό περιβάλλον μερικής εμβάπτισης σε υδατικό διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl.

#### 1.1 Υλικά

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινοι οπλισμοί σκυροδέματος τύπου B500c, διαμέτρου Φ10 (διαμέτρου 10 mm) και ύψους 10cm, η χημική σύσταση των οποίων φαίνεται στο πίνακα 1.

C	Mn	S	P	Si	N	Ni	Cr	Cu	Mo
0.18	0.99	0.047	0.023	0.15	0.009	0.09	0.09	0.21	0.021

Πίνακας 1. Χημική σύσταση των χαλύβδινων ράβδων τύπου B500c.

Για την κατασκευή των τσιμεντοκονιαμάτων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο πόρτλαντ του οποίου η χημική σύσταση δίνεται στον πίνακα 2.

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CaO <sub>(f)</sub>	LOI
20.67	4.99	3.18	63.60	2.73	0.37	0.29	2.414	2.41	2.52

Πίνακας 2. Χημική σύσταση τσιμέντου Πόρτλαντ.

Ως αδρανή χρησιμοποιήθηκε πρότυπη άμμος AFNOUR.

Για την μελέτη καθοδικής προστασίας χρησιμοποιήθηκαν φύλλα Zn με διάσταση 5x5 τα οποία προηγουμένως είχαν ζυγιστεί.

## **1.2 Καθαρισμός και ζύγιση χαλύβων**

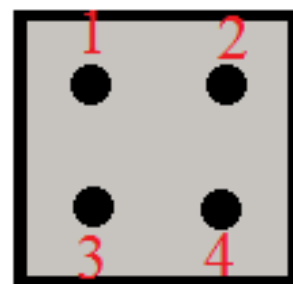
Οι χαλύβδινοι οπλισμοί πριν τον εγκλεισμό τους στα δοκίμια τσιμεντοκονίας καθαρίστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ISO/DIS 8407.3. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής: Οι χαλύβδινοι οπλισμοί τοποθετήθηκαν σε διάλυμα HCl με αναστολέα διάβρωσης (Dreca) για χρόνο περίπου 10 min, έτσι ώστε να απομακρυνθούν τυχόν οξειδία από την επιφάνειά τους. Στη συνέχεια ξεπλένονται με νερό βρύσης, με απιονισμένο νερό και γίνεται εμβάπτιση σε ακετόνη. Τέλος οι οπλισμοί ζυγίστηκαν με ακρίβεια τετάρτου δεκαδικού ψηφίου 0,1mg.

## **1.3 Κατασκευή δοκιμίων με οπλισμένης τσιμεντοκονίας**

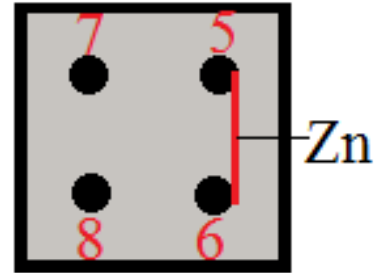
Για την κατασκευή δοκιμίων Ο.Σ. αναμείχθηκαν καθαρό τσιμέντο OPC, αδρανή (άμμος) και νερό της βρύσης. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν με λόγο τσιμέντο/άμμος/νερό=1/3/0.5. Το μείγμα της τσιμεντοκονίας αφού αναμείχθηκε καλά τοποθετήθηκε στα καλούπια. Στο πρώτο δοκίμιο διάστασης 10x10 που είναι και ο “μάρτυρας” τοποθετήθηκαν 4 οπλισμοί στις τέσσερις γωνίες του δοκιμίου (αρίθμηση οπλισμών από 1-4). Το δεύτερο δοκίμιο διάστασης 10x10 κατασκευάστηκε με τον ίδιο τρόπο με τη διαφορά ότι στους δύο πρώτους οπλισμούς του τοποθετήθηκε το φύλλο Zn (αρίθμηση οπλισμών από 5-8). Στο τρίτο δοκίμιο διάστασης εξίσου 10x10 τοποθετήθηκαν 6 οπλισμοί και στους δύο πρώτους τοποθετήθηκε το φύλλο Zn (αρίθμηση οπλισμών από 9-14). Και τέλος, στο τέταρτο δοκίμιο διάστασης 10x20 τοποθετήθηκαν 8 οπλισμοί και στους δύο πρώτους τοποθετήθηκε το φύλλο Zn (αρίθμηση οπλισμών από 15-22). Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται τα δοκίμια με την αρίθμηση τους. Οι οπλισμοί τοποθετήθηκαν έτσι ώστε να απέχουν 15mm από τη βάση, δηλαδή να εξέχουν κατά 1,5cm από την πάνω επιφάνεια των ορθογωνικών καλουπιών. Στη συνέχεια χτυπήσαμε πλευρικά τα καλούπια για την ομοιογενή

κατανομή του σκυροδέματος. Στο τμήμα του χάλυβα που εξέχει περάσαμε λεπτό σύρμα χαλκού ώστε να εξασφαλιστεί η αναγκαία ηλεκτρική επαφή για την διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών μετρήσεων. Οι εξέχοντες οπλισμοί και η πάνω επιφάνεια των δοκιμίων του οπλισμένου σκυροδέματος μονώθηκαν με εποξειδική ρητίνη Araldite, ώστε να μην επηρεάζεται η διάβρωσή τους από το εξωτερικό περιβάλλον.

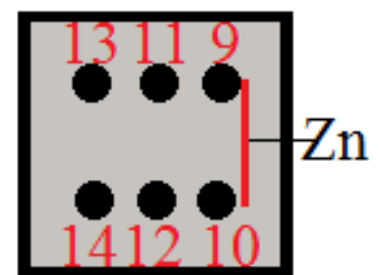
Τα δοκίμια του οπλισμένου σκυροδέματος παρέμειναν στα καλούπια για 24 ώρες ώστε να ολοκληρωθεί η σκλήρυνση του τσιμεντοκονιάματος. Η ωρίμανση των τσιμεντοκονιαμάτων πραγματοποιήθηκε σε θάλαμο για 24 ώρες, υπό σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας  $T=25^{\circ}\text{C}$  και σχετικής υγρασίας  $\text{RH}>98\%$ . Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν εκτός θαλάμου σε συνθήκες περιβάλλοντος για μια ημέρα πριν την τοποθέτησή τους στο διαβρωτικό περιβάλλον ώστε να επιτευχθούν οι συνθήκες ισορροπίας αυτών. Στη συνέχεια τα δοκίμια και των δυο πειραματικών κατηγοριών εκτέθηκαν σε διαβρωτικό περιβάλλον μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl.



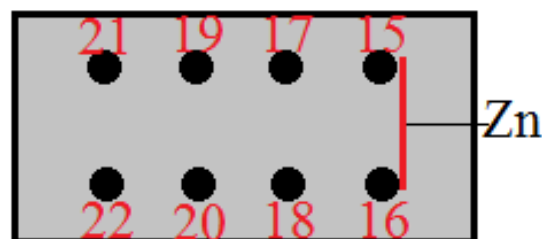
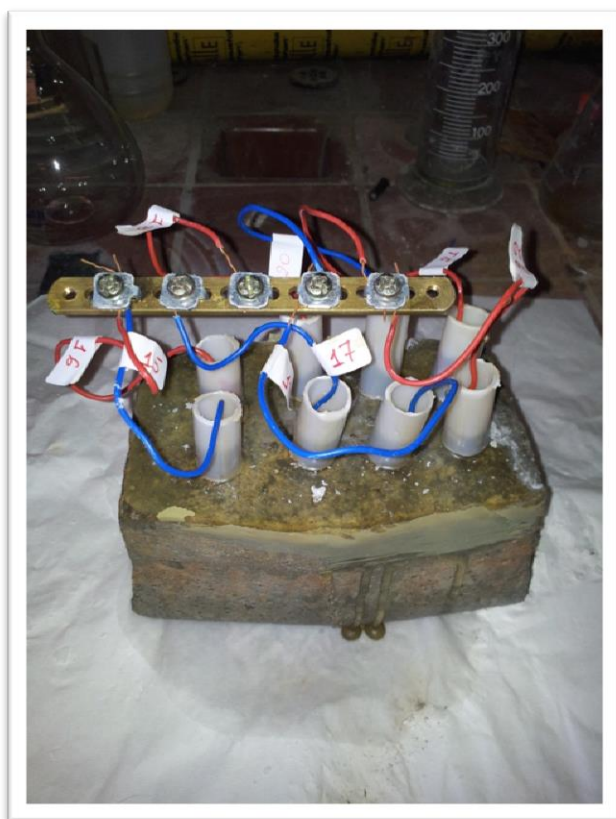
**Φωτογραφία 1.** Δοκίμιο 1 με οπλισμούς από 1-4 που λειτουργεί ως «μάρτυρας»



**Φωτογραφία 2.** Δοκίμιο 2 με σπλισμούς από 5-8 με φύλλο Zn στους δύο πρώτους



**Φωτογραφία 3.** Δοκίμιο 3 με σπλισμούς από 9-14 με φύλλο Zn στους δύο πρώτους



**Φωτογραφία 4.** Δοκίμιο με οπλισμούς από 15-22 με φύλλο Zn στους δύο πρώτους

Για την επαφή όλων των χάλκινων συρμάτων, δημιουργώντας ένα κύκλωμα χρησιμοποιήθηκε κλέμα γείωσης όπως φαίνεται και στις πιο πάνω φωτογραφίες. Η κλέμα χρησιμοποιείται για να πετύχουμε τη καλύτερη σύνδεση μεταξύ των οπλισμών, αλλά και για να μπορούμε πιο εύκολα να παίρνουμε τιμές για το καθένα οπλισμό ξεχωριστά και το συνολικό δυναμικό του δοκιμίου.

## 1.4 Μέθοδοι εκτίμησης της διάβρωσης

### 1.4.1 Εισαγωγή

Η εκτίμηση της ανθεκτικότητας των δοκιμίων έναντι της διάβρωσης σε περιβάλλον χλωριόντων πραγματοποιήθηκε με τις παρακάτω μεθόδους:

- Μετρήσεις απώλειας μάζας σύμφωνα με την μέθοδο ISO/DIS 8407.3, ώστε να προσδιοριστεί ο ρυθμός διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα .
- Ηλεκτροχημική μέτρηση, η οποία είναι μη καταστρεπτική μέθοδος εκτίμησης της διάβρωσης. Μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl με σκοπό να προσδιοριστεί η κατάσταση των οπλισμών συναρτήσει του χρόνου έκθεσης των δοκιμών στο διαβρωτικό περιβάλλον, καθώς επίσης και τη μελέτη καθοδικής προστασίας και κατά πόσο ο Zn προστατεύει τον οπλισμό των δοκιμών.

Χρησιμοποιήθηκε όργανο μέτρησης της Fluke το οποίο έχει τη δυνατότητα διαγράμματος δυναμικού ως προς το χρόνο κατά την επαφή του οπλισμού με τους υπόλοιπους, αλλά και κατά την αποσύνδεση και μέτρηση δυναμικού καθ' αυτού του οπλισμού.

Το όργανο το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι το Fluke 123 Industrial Scopemeter. Το συγκεκριμένο όργανο έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί ως βολτόμετρο, ως αμπερόμετρο αλλά κι ως καταγραφικό μαζί. Με το όργανο αυτό δηλαδή μετρήσαμε δυναμικά αλλά πήραμε και διαγράμματα  $E_{on}$  και  $E_{off}$  για την αξιολόγηση της καθοδικής προστασίας όπως αυτό φαίνεται στις παρακάτω παραγράφους.

#### **1.4.2 Μετρήσεις απώλειας μάζας**

Η μέτρηση απώλεια μάζας ανήκει στις καταστροφικές μεθόδους εκτίμησης της διάβρωσης. Για να μετρηθεί η απώλεια μάζας σπάμε τα δοκίμια μετά την τοποθέτησή τους στο διαβρωτικό περιβάλλον αφού περάσει κάποιο χρονικό διάστημα.

Για την εκτίμηση της διάβρωσης του χάλυβα γίνονται μετρήσεις βάρους των οπλισμών του χάλυβα πριν και μετά την έκθεσή τους στο διαβρωτικό περιβάλλον και κατόπιν υπολογισμός της διαφοράς βάρους. Το τελικό βάρος των οπλισμών υπολογίστηκε αφού πρώτα οι οπλισμοί καθαρίστηκαν χημικά και μηχανικά με την διαδικασία που έχει ήδη αναφερθεί. Η διαφορά βάρους προκύπτει από την διαφορά της αρχικής μείον της τελικής μάζας του οπλισμού. Η εκτίμηση της διάβρωσης δίνεται με τον υπολογισμό του ποσοστού επί της εκατό κατά βάρος μεταβολής των οπλισμών, καθώς επίσης και από τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης.



Το ποσοστό επί της εκατό μεταβολής κατά βάρος των οπλισμών δίνεται από την σχέση (1).

$$(m_{\text{αρχ}} - m_{\text{τελ}}) / m_{\text{αρχ}} \quad (1)$$

όπου:  $m_{\text{αρχ}}$  η αρχική μάζα του οπλισμού πριν την έκθεση του στο διαβρωτικό περιβάλλον

$m_{\text{τελ}}$  η τελική μάζα του οπλισμού μετά την έκθεση του στο διαβρωτικό περιβάλλον

Ο ρυθμός διάβρωσης του οπλισμού δίνεται από την σχέση (2)

$$\text{Ρυθμός διάβρωσης (}\mu\text{m/y)} = 8.76 \cdot 10^7 W / (A \cdot T \cdot D) \quad (2)$$

Όπου:  $W$  η διαφορά μάζας του οπλισμού σε g

$A$  η επιφάνεια του οπλισμού σε  $\text{cm}^2$ , η οποία δίνεται από τον τύπο  $A = 2\pi r h + \pi r^2$ .

$T$  ο χρόνος έκθεσης των δοκιμίων στο διαβρωτικό περιβάλλον σε ώρες

$D$  η πυκνότητα του δομικού χάλυβα, η οποία δίνεται ίση με  $7,8 \text{g/mL}$ .

### 1.4.3 Μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης

Όλες οι δράσεις διάβρωσης περιλαμβάνουν μικτά ηλεκτρόδια, το δυναμικό ενός τέτοιου μικτού ηλεκτροδίου απουσία ρεύματος ονομάζεται δυναμικό διάβρωσης ( $E_{\text{corr}}$ ) και είναι το δυναμικό που αποκτά αυθόρμητα ένα μέταλλο όταν εκτεθεί στο περιβάλλον. Το  $E_{\text{corr}}$  μετράται ως προς ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς και ο υπολογισμός του παρέχει σημαντικές πληροφορίες, καθώς η μετατόπισή του προς σχετικά θετικότερη κατεύθυνση δηλώνει προδιάθεση μειωμένης διάβρωσης –**Παθητική κατάσταση** (π.χ. αναστολή της διάβρωσης, σχηματισμός παθητικού στρώματος στην επιφάνεια του χάλυβα), ενώ η μετατόπισή του προς αρνητικότερες τιμές δηλώνει προδιάθεση αυξημένης διάβρωσης – **Ενεργητική κατάσταση** (π.χ. βελονισμοί, παρουσία ενός επιταχυντή διάβρωσης κ.λ.π.).

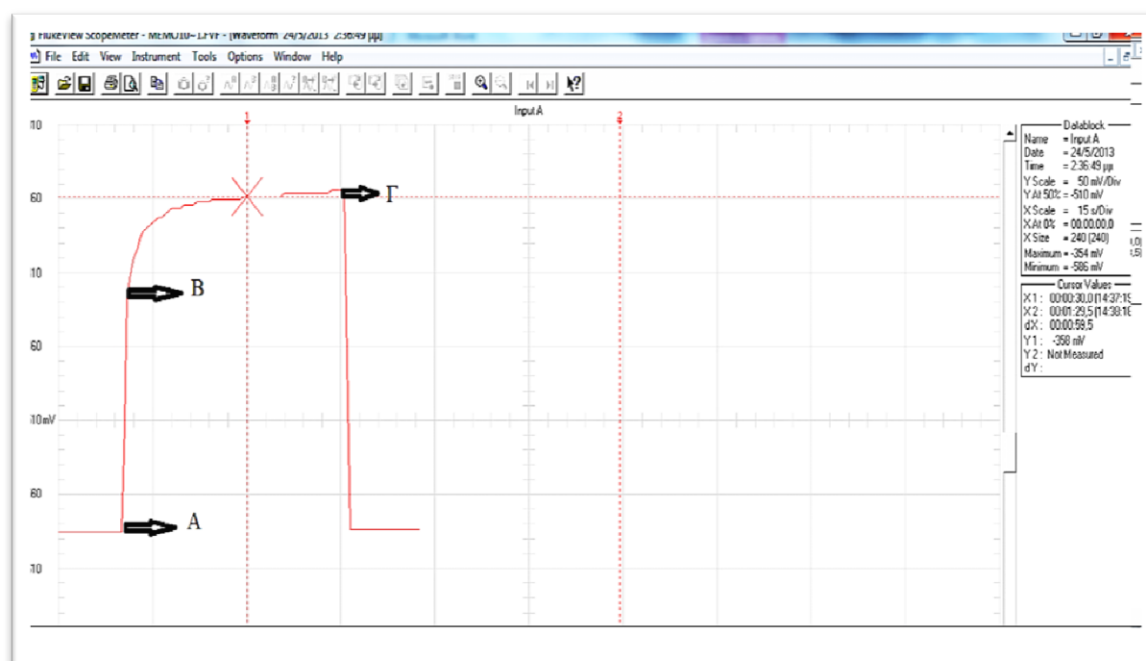
Στον πίνακα 3 δίνεται η κατάσταση των οπλισμών στο σκυρόδεμα αναλόγως την τιμή του δυναμικού σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87.

Δυναμικό Διάβρωσης ανοικτού κυκλώματος (Ag/AgCl)	Ερμηνεία
$E_{\text{corr}} > -150 \text{ mV}$	Ο οπλισμός βρίσκεται σε παθητική κατάσταση 90% πιθανότητα
$-300 \text{ mV} < E_{\text{corr}} < -150 \text{ mV}$	Κατάσταση οπλισμού μη προσδιορίσιμη
$E_{\text{corr}} < -350 \text{ mV}$	Ο οπλισμός βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση διάβρωσης

**Πίνακας 3.** Κατάσταση οπλισμών στο σκυρόδεμα σύμφωνα με την τιμή του δυναμικού

Δυναμικό διάβρωσης μπορούμε να μετρήσουμε μόνο για το δοκίμιο 1, αφού στα υπόλοιπα έχουμε το Zn, μελετάμε δηλαδή καθοδική προστασία και δεν έχουμε  $E_{\text{corr}}$ . Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε σωστά τη καθοδική προστασία με τη βοήθεια του οργάνου, παίρνουμε κάποια διαγράμματα από τα οποία παίρνουμε τιμές δυναμικού  $E_{\text{on}}$  και  $E_{\text{off}}$  κι από τις δύο αυτές τιμές υπολογίζω τη διαφορά.

Κατά την μέτρηση του δυναμικού με το όργανο της Fluke View Scopemeter παίρνουμε διαγράμματα της μορφής όπως φαίνονται στο σχήμα 1.



**Σχήμα 1.** Διάγραμμα  $E_{\text{on}}$  και  $E_{\text{off}}$  από FlukeView ScopeMeter

Έχοντας συνδεδεμένο τον οπλισμό με όλο το υπόλοιπο σύστημα και μετρώντας συνολικό δυναμικό το όργανο ξεκινά να καταγράφει. Μόλις ο οπλισμός αποσυνδεθεί από το υπόλοιπο σύστημα, ξεκινά να πέφτει το δυναμικό. Περιμένοντας έως ότου σταθεροποιηθεί ξανά, συνδέουμε τον οπλισμό με το υπόλοιπο σύστημα και το δυναμικό επανέρχεται στο αρχικό συνολικό δυναμικό του δοκιμίου. Για τον κάθε ένα οπλισμό ξεχωριστά, η τιμή σταθεροποίησης δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ελεύθερο δυναμικό για το λόγο ότι παίρνω τιμές για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Το σύστημα βρίσκεται υπό πίεση και υπάρχει ένα δυναμικό το οποίο επιβάλλεται. Για να πάρω ελεύθερο δυναμικό, πρέπει να αποδεσμεύσω το κάθε ένα οπλισμό αλλά σε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα (2-3 ημερών) θα πάρω τη τιμή αυτή, γιατί υπάρχει μεγάλη συσσώρευση ηλεκτρονίων τη οποία χάνει σιγά σιγά.

Τα σημεία τα οποία ερευνούμε όπως φαίνονται στο σχήμα 1 είναι το Α και Β. Το Α είναι το σημείο κατά το οποίο το σύστημα είναι συνδεδεμένο, όποτε σε αυτό το σημείο παίρνω τιμή  $E_{on}$ , η οποία τιμή, είναι ίδια για όλους τους οπλισμούς του συγκεκριμένου δοκιμίου. Το Β είναι το σημείο κατά το οποίο στο διάγραμμα, η ευθεία γραμμή ξεκινάει να καμπυλώνει ( $E_{off}$ ) και το Γ είναι η τιμή δυναμικού σταθεροποίησης του αντίστοιχου οπλισμού. Το  $E_{off}$  είναι το δυναμικό που μελετάμε για τον συγκεκριμένο οπλισμό καθώς αυτό το σημείο αντιστοιχεί στο δυναμικό κατά το οποίο θα συγκρίνουμε με το  $E_{on}$  βρίσκοντας έτσι μια διαφορά δυναμικού  $\Delta E$ . Αν η συγκεκριμένη διαφορά έχει τιμή που κυμαίνεται από 0 έως -100mV τότε μας δίνει τη πληροφορία ότι η καθοδική προστασία λειτουργεί και το σύστημα μου προστατεύεται.

Επιλέγουμε τη τιμή  $E_{off}$  για να ελέγξουμε το σύστημα μας κι όχι το δυναμικό σταθεροποίησης, γιατί είναι η τιμή αυτή του δυναμικού που αντιστοιχεί στον οπλισμό μας, καθώς το σύστημα καταναλώνει ένα ποσό ρεύματος (πχ. ως θερμότητα) έως ότου το δυναμικό του οπλισμού αυτού σταθεροποιηθεί.

## 2. Μετρήσεις – Αποτελέσματα

### 2.1 Ηλεκτροχημικές μετρήσεις πειραματικών δοκιμίων

Για το πρώτο δοκίμιο αναφοράς (μάρτυρας) οπλισμένου σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης ( $E_{corr}$ ) συναρτήσει ηλεκτροδίου αναφοράς Ag.AgCl, ώστε να διερευνηθεί η εξέλιξη της διάβρωσης των δοκιμίων παρουσία χλωριόντων. Για τα υπόλοιπα τρία δοκίμια, πήραμε τιμές  $E_{on}$  και  $E_{off}$ , αφού στις συγκεκριμένες περιπτώσεις όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω δεν έχουμε δυναμικό διάβρωσης λόγω παρουσίας του Zn στα δοκίμια μας. Οι μετρήσεις δυναμικού γίνονταν μία φορά κάθε εβδομάδα.

Λόγω του ότι μελετάμε πιο πολύ την καθοδική προστασία των οπλισμών, σε όλα τα δοκίμια παίρνω μια συνολική τιμή δυναμικού για όλους τους οπλισμούς ενώ για τα τρία δοκίμια που φέρουν το φύλλο Zn παίρνω τιμές για τον κάθε ένα οπλισμό ξεχωριστά.

Συνολικά δηλαδή από τα τέσσερα δοκίμια εκτός του μάρτυρα, παίρνω τιμές για 12 οπλισμούς. Στη διάρκεια όμως των μετρήσεων μας, ο οπλισμός Νο. 7 και Νο. 13 έδιναν μηδενικές τιμές δυναμικού οπότε κι αποκλείονται από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

#### 2.1.1 Δοκίμιο 1 «μάρτυρας»

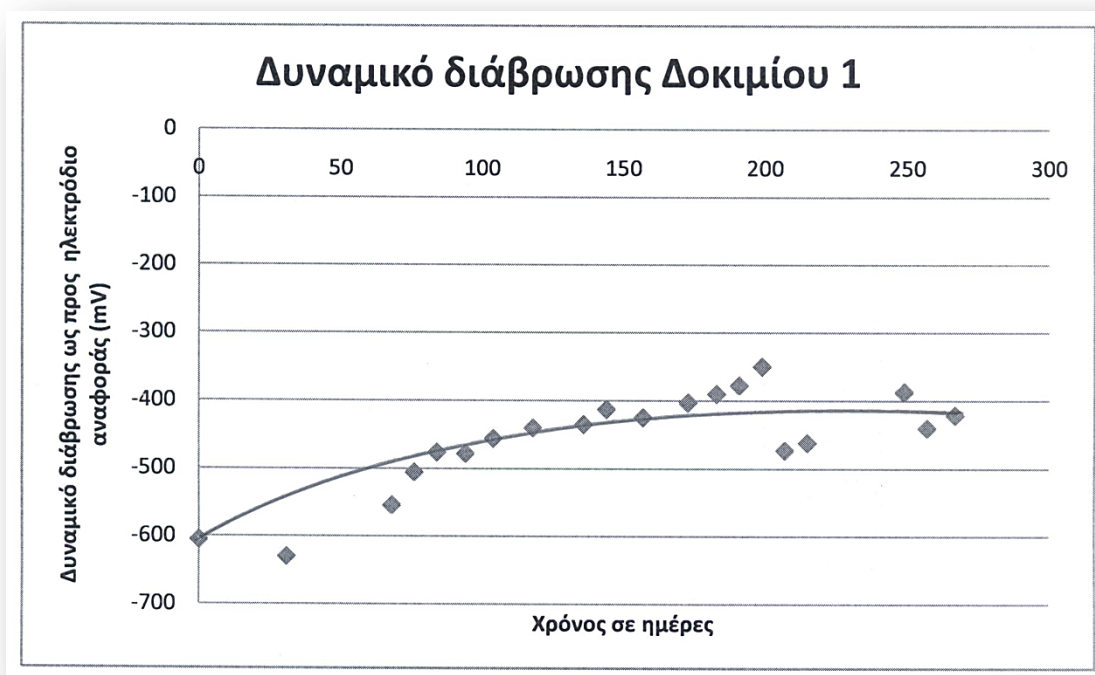
Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω το πρώτο δοκίμιο διαστάσεως 10x10 ονομάζεται μάρτυρας και χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης των υπολοίπων οπλισμών. Το δοκίμιο 1 φέρει τέσσερεις οπλισμούς με αρίθμηση από 1,2,3 και 4. Πιο κάτω δίδεται πίνακας με τις μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης του πρώτου δοκιμίου στις αντίστοιχες μέρες:

Συνολικό Δυναμικό Διάβρωσης για Δοκίμιο 1	
Χρόνος σε ημέρες	Δυναμικό σε mV
31	-630
68	-554
76	-505
84	-476
94	-478

104	-456
118	-440
136	-435
144	-413
157	-425
173	-403
183	-390
191	-377
199	-350
207	-473
215	-462
249	-387
257	-440
267	-421

**Πίνακας 4.** Δυναμικό διάβρωσης ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για το δοκίμιο 1.

Παρακάτω δίνεται το Διάγραμμα Δυναμικού διάβρωσης του δοκιμίου 1 συναρτήσει του χρόνου σε ημέρες.



**Σχήμα 2.** Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για δοκίμιο 1.

Όπως βλέπουμε κατά τις πρώτες μέρες των μετρήσεων παρατηρούνται αρνητικότερες τιμές δυναμικού κι όσο περνάει ο χρόνος οι τιμές ανεβαίνουν. Αυτό φανερώνει μια τάση των οπλισμών να προστατεύονται. Όλες οι τιμές δυναμικού όμως είναι μικρότερες από -350mV πράγμα που φανερώνει ότι ο οπλισμός βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση διάβρωσης.

### 2.1.2 Δοκίμιο 2 με καθοδική προστασία

Το δοκίμιο 2 φέρει τέσσερεις οπλισμούς με αρίθμηση 5,6,7 και 8 εκ των οποίων ο 5 και 6 φέρει την άνοδο Zn. Για αυτό το δοκίμιο έχω ένα διάγραμμα του δυναμικού  $E_{on}$  συναρτήσει του χρόνου και παίρνω τιμές δυναμικού  $E_{off}$  για τους δύο οπλισμούς που δεν φέρουν άνοδο Zn (οπλισμοί 7 και 8). Κατά τη πορεία των μετρήσεων ο οπλισμός 7 σταμάτησε να έχει επαφή και δεν έδινε μετρήσεις γι αυτό και αφαιρέθηκε τελείως από τους υπολογισμούς μας. Από τις δύο τιμές  $E_{on}$  και  $E_{off}$  υπολογίζω μια διαφορά δυναμικού ( $\Delta E = E_{on} - E_{off}$ ) που από αυτή τη τιμή μπορώ να καταλάβω αν η καθοδική προστασία λειτουργεί.

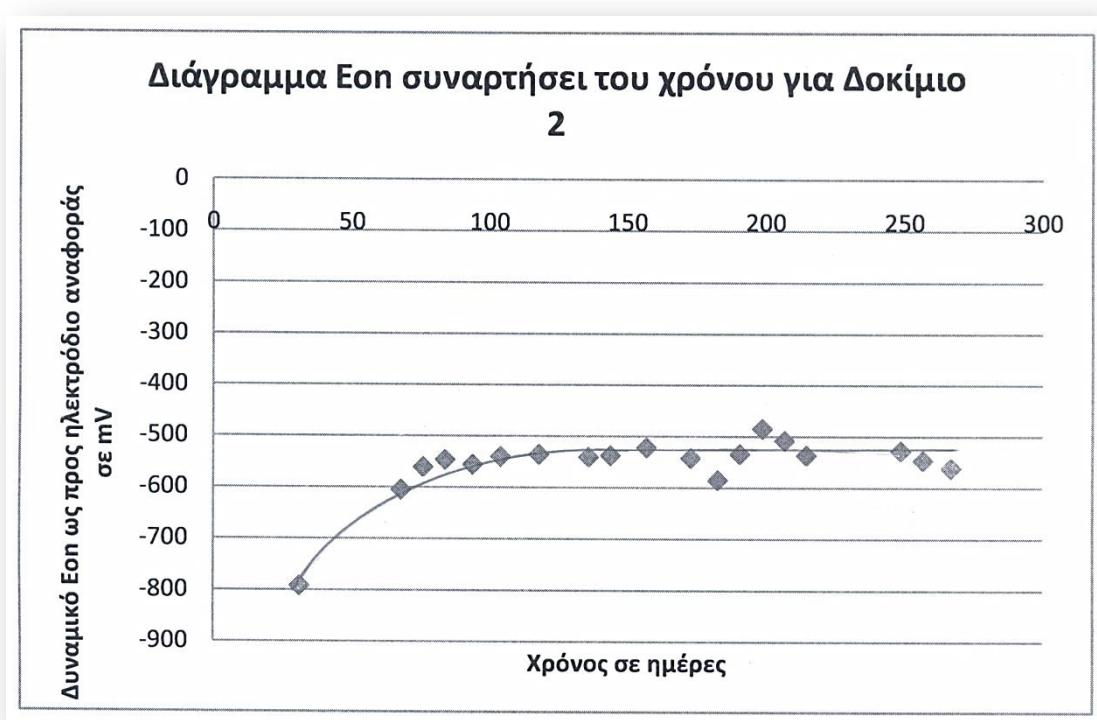
Πιο κάτω δίδεται πίνακας με τις μετρήσεις δυναμικού  $E_{on}$  για το δοκίμιο 2 που ελέγχεται η καθοδική προστασία για τις αντίστοιχες μέρες:

Χρόνος σε ημέρες	Δυναμικό $E_{on}$ για Δοκίμιο 2 (mV)
31	-792
68	-605
76	-560
84	-547
94	-556
104	-540
118	-535
136	-540
144	-537
157	-522
173	-542
183	-585
191	-534
199	-485

207	-508
215	-536
249	-528
257	-546
267	-562

**Πίνακας 5.** Δυναμικό  $E_{on}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για το δοκίμιο 2.

Παρακάτω δίδεται το Διάγραμμα Δυναμικού  $E_{on}$  συναρτήσεως του χρόνου για το δοκίμιο 2.

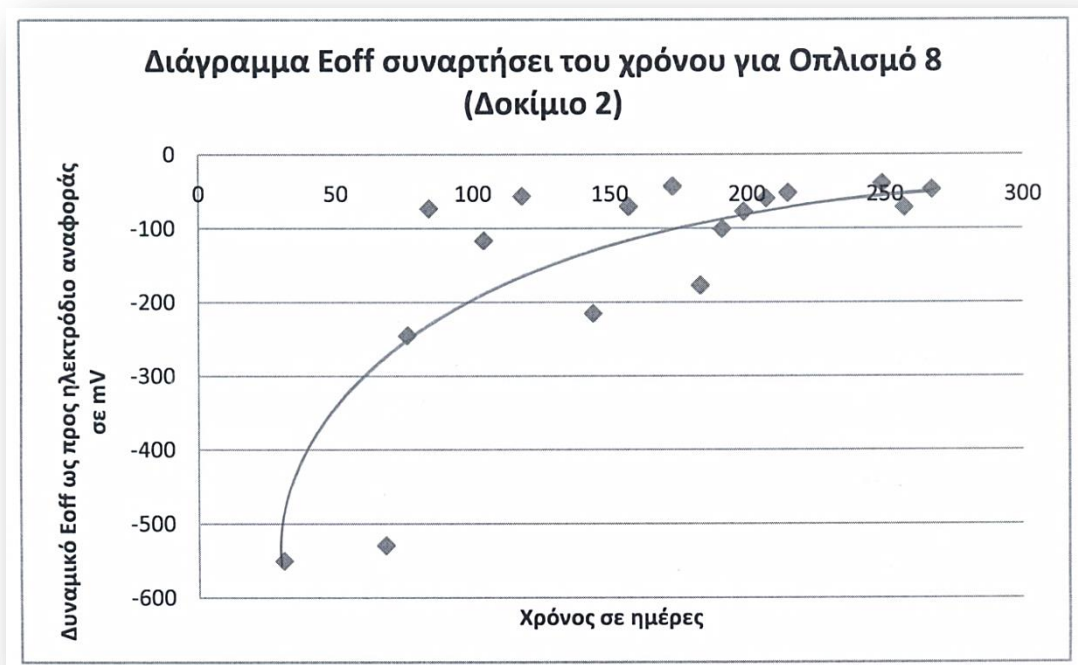


**Σχήμα 3.** Διάγραμμα δυναμικού  $E_{on}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για δοκίμιο 2.

Πιο κάτω δίδεται πίνακας με τις μετρήσεις δυναμικού  $E_{off}$  και το διάγραμμα του συναρτήσεως του χρόνου για τον σπλισμό 8 του δοκιμίου 2 που ελέγχεται η καθοδική προστασία για τις αντίστοιχες μέρες:

Χρόνος σε ημέρες	Δυναμικό $E_{off}$ για οπλισμό 8 Δοκιμίου 2 (mV)
31	-550
68	-529
76	-245
84	-73
104	-116
118	-56
144	-215
157	-70
173	-43
183	-177
191	-100
199	-77
207	-59
215	-52
249	-39
257	-71
267	-47

**Πίνακας 6.** Δυναμικό  $E_{off}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 8 δοκιμίου 2.



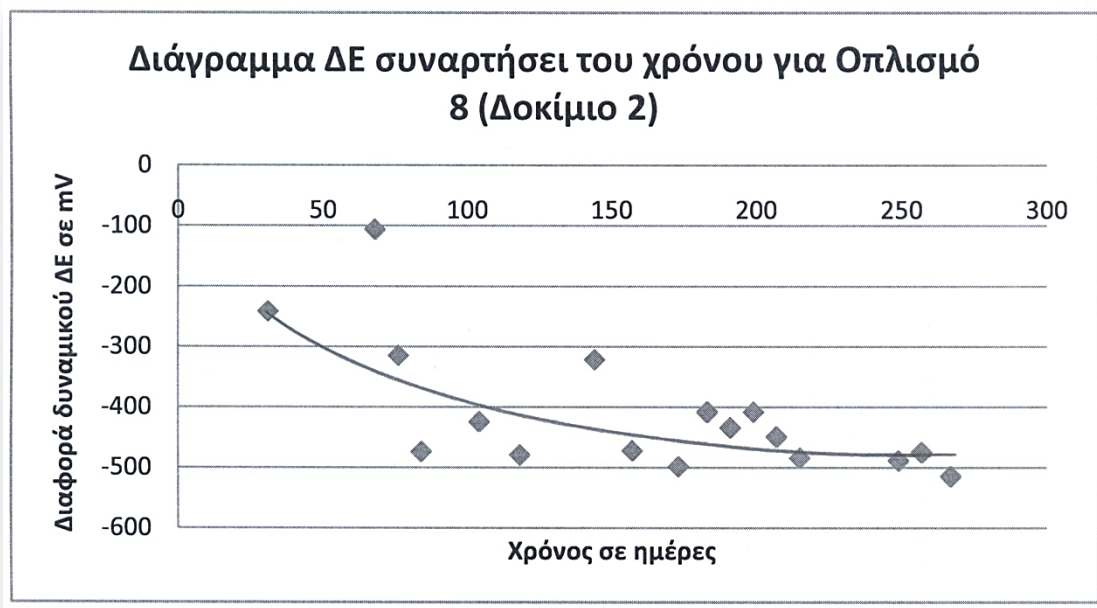
**Σχήμα 4.** Διάγραμμα δυναμικού  $E_{off}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 8 δοκιμίου 2.



Για να ελέγξω τη καθοδική προστασία πρέπει να υπολογίσω τη διαφορά δυναμικού  $\Delta E$  των  $E_{on}$  και  $E_{off}$ .

<b>Χρόνος σε ημέρες</b>	<b>Διαφορά δυναμικού <math>\Delta E</math> για οπλισμό 8 δοκιμίου 2 (mV)</b>
<b>31</b>	-242
<b>68</b>	-106
<b>76</b>	-315
<b>84</b>	-474
<b>104</b>	-424
<b>118</b>	-479
<b>144</b>	-322
<b>157</b>	-472
<b>173</b>	-499
<b>183</b>	-408
<b>191</b>	-434
<b>199</b>	-408
<b>207</b>	-449
<b>215</b>	-484
<b>249</b>	-489
<b>257</b>	-475
<b>267</b>	-515

**Πίνακας 7.** Διαφορά δυναμικού  $\Delta E$  για τον οπλισμό 8 δοκιμίου 2.



**Σχήμα 5.** Διάγραμμα διαφοράς δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 8 δοκιμίου 2.

Από την πορεία της διαφοράς δυναμικού συναρτήσει του χρόνου, προκύπτει ότι αυτή συναρτήσει του χρόνου μεγαλώνει σε απόλυτες τιμές και σταθεροποιείται γύρω στα  $-500\text{mV}$ . Η τιμή αυτή δεν είναι ικανοποιητική κι επομένως η καθοδική προστασία δε λειτουργεί (έχουμε και το πρόβλημα ότι ο οπλισμός 7 δε λειτούργησε). Υπενθυμίζουμε ότι για να λειτουργεί η καθοδική προστασία, η διαφορά δυναμικού ΔΕ πρέπει να δίνει τιμές από 0 έως και  $-100\text{mV}$ .

### 2.1.3 Δοκίμιο 3 με καθοδική προστασία

Το δοκίμιο 3 φέρει έξι οπλισμούς με αρίθμηση 9,10,11,12,13 και 14 εκ των οποίων ο 9 και 10 φέρει την άνοδο Zn. Για αυτό το δοκίμιο έχω ένα διάγραμμα του δυναμικού  $E_{on}$  συναρτήσει του χρόνου και παίρνω τιμές δυναμικού  $E_{off}$  για τους οπλισμούς που δεν φέρουν άνοδο Zn (οπλισμοί 11 έως 14). Κατά τη πορεία των μετρήσεων ο οπλισμός 13 σταμάτησε να έχει επαφή και δεν έδινε μετρήσεις γι αυτό και αφαιρέθηκε τελείως από τους υπολογισμούς μας. Από τις δύο τιμές  $E_{on}$  και  $E_{off}$  για το

κάθε ένα σπλισμό υπολογίζω μια διαφορά δυναμικού ( $\Delta E = E_{on} - E_{off}$ ) που από αυτή τη τιμή μπορώ να καταλάβω αν η καθοδική προστασία λειτουργεί.

Πιο κάτω δίδεται πίνακας με τις μετρήσεις δυναμικού  $E_{on}$  για το δοκίμιο 3 που ελέγχεται η καθοδική προστασία για τις αντίστοιχες μέρες:

<b>Χρόνος σε ημέρες</b>	<b>Δυναμικό <math>E_{on}</math> για Δοκίμιο 3 (mV)</b>
<b>31</b>	-742
<b>68</b>	-699
<b>76</b>	-725
<b>84</b>	-569
<b>94</b>	-513
<b>104</b>	-553
<b>118</b>	-630
<b>136</b>	-545
<b>144</b>	-718
<b>157</b>	-686
<b>173</b>	-603
<b>183</b>	-581
<b>191</b>	-595
<b>199</b>	-581
<b>207</b>	-587
<b>215</b>	-546
<b>249</b>	-538
<b>257</b>	-533
<b>267</b>	-544

**Πίνακας 8.** Δυναμικό  $E_{on}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για το δοκίμιο 3.



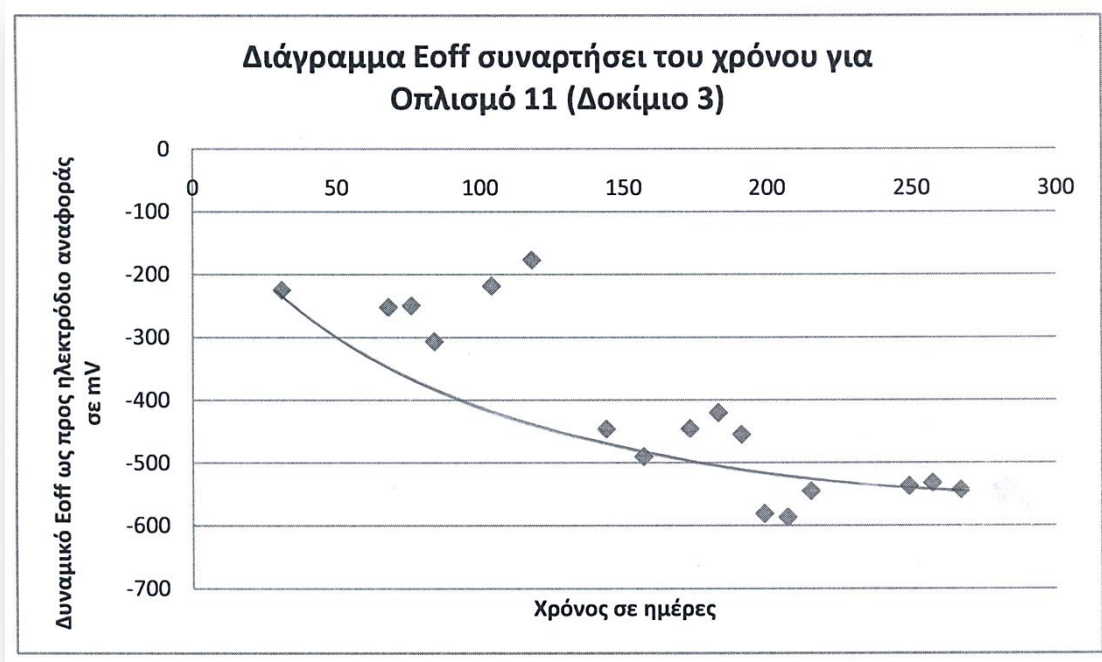
**Σχήμα 6.** Διάγραμμα δυναμικού E<sub>on</sub> ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl για δοκίμιο 3.

Πιο κάτω δίδεται πίνακας με τις μετρήσεις δυναμικού E<sub>off</sub> και το διάγραμμα του συναρτήσει του χρόνου για τον οπλισμό 11 του δοκιμίου 3 που ελέγχεται η καθοδική προστασία για τις αντίστοιχες μέρες:

Χρόνος σε ημέρες	Δυναμικό E <sub>off</sub> για οπλισμό 11 Δοκιμίου 3 (mV)
31	-225
68	-252
76	-250
84	-307
104	-218
118	-177
144	-446
157	-490
173	-445
183	-420
191	-455
199	-581
207	-587
215	-545

<b>249</b>	<b>-537</b>
<b>257</b>	<b>-532</b>
<b>267</b>	<b>-543</b>

**Πίνακας 9.** Δυναμικό E<sub>off</sub> ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 11 δοκιμίου 3.



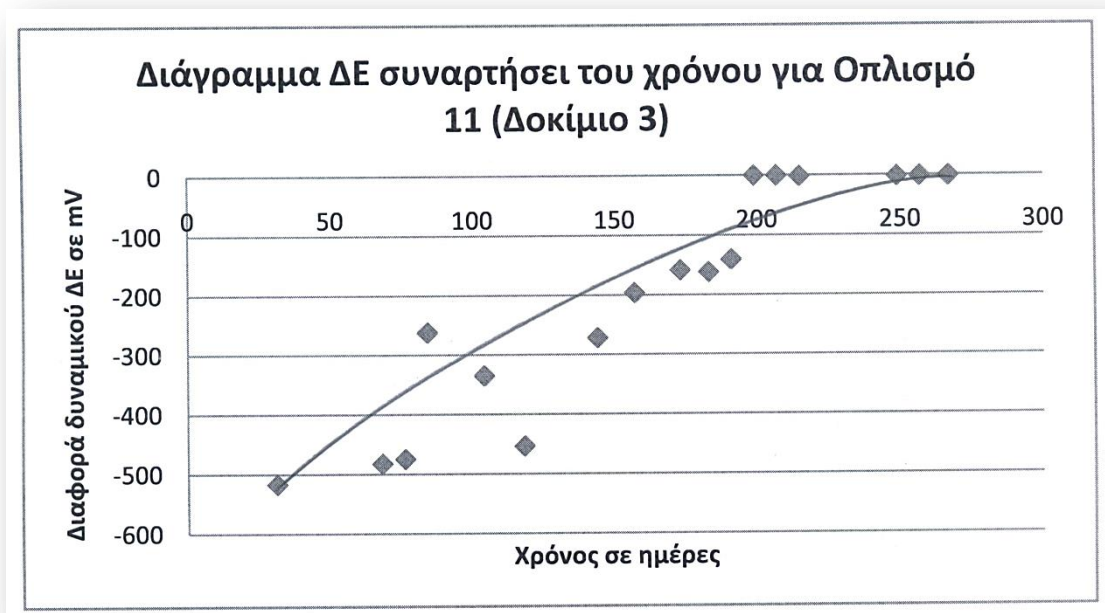
**Σχήμα 7.** Διάγραμμα δυναμικού E<sub>off</sub> ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 11 δοκιμίου 3.

Για να ελέγξω τη καθοδική προστασία πρέπει να υπολογίσω τη διαφορά δυναμικού ΔE των E<sub>on</sub> και E<sub>off</sub>.

<b>Χρόνος σε ημέρες</b>	<b>Διαφορά δυναμικού ΔE για οπλισμό 11 δοκιμίου 3 (mV)</b>
<b>31</b>	<b>-517</b>
<b>68</b>	<b>-482</b>
<b>76</b>	<b>-475</b>
<b>84</b>	<b>-262</b>
<b>104</b>	<b>-335</b>
<b>118</b>	<b>-453</b>
<b>144</b>	<b>-272</b>

157	-196
173	-158
183	-161
191	-140
199	0
207	0
215	-1
249	-1
257	-1
267	-1

**Πίνακας 10.** Διαφορά δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 11 δοκιμίου 3.



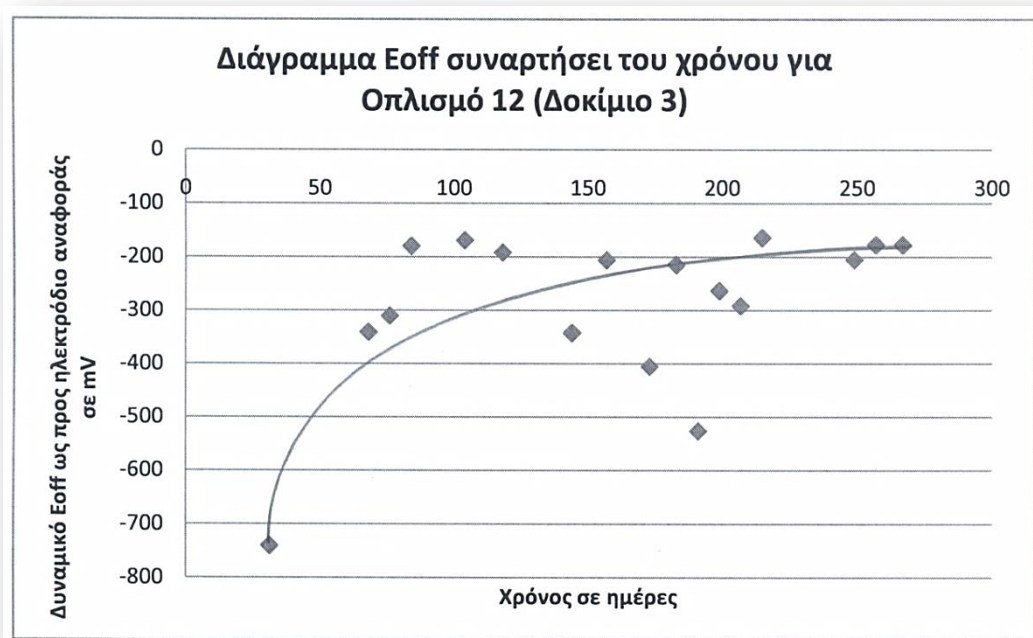
**Σχήμα 8.** Διάγραμμα διαφοράς δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 11 δοκιμίου 3.

Από την πορεία διαφοράς δυναμικού συναρτήσεως του χρόνου για τον οπλισμό 11 του δοκιμίου 3, παρατηρούνται υψηλές τιμές για τις πρώτες περίπου 150 μέρες. Από τις 200 ημέρες και πέρα η τιμή της διαφοράς γίνεται μικρότερη από  $-100\text{mV}$  (κατ' απόλυτη τιμή) και επομένως η καθοδική προστασία είναι ικανοποιητική.

Ακολουθούν αντίστοιχοι πίνακες και διαγράμματα για τους οπλισμούς 12 και 14 του δοκιμίου 3.

Χρόνος σε ημέρες	Δυναμικό $E_{off}$ για οπλισμό 12 Δοκιμίου 3 (mV)
31	-741
68	-341
76	-310
84	-180
104	-169
118	-191
144	-342
157	-205
173	-405
183	-214
191	-526
199	-263
207	-291
215	-164
249	-205
257	-177
267	-177

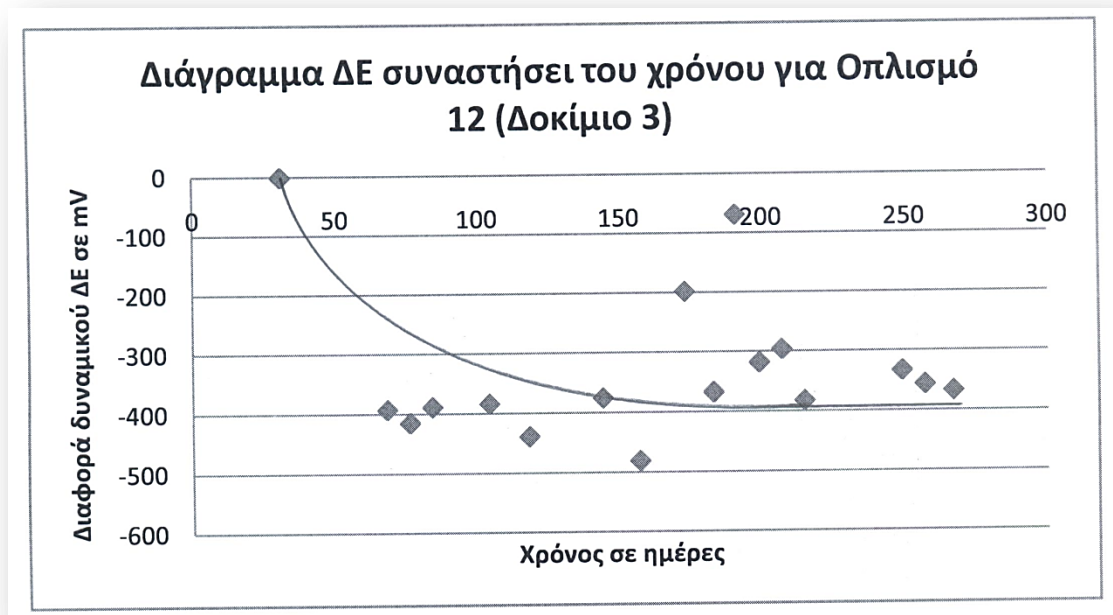
**Πίνακας 11.** Δυναμικό  $E_{off}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 12 δοκιμίου 3.



**Σχήμα 9.** Διάγραμμα δυναμικού  $E_{off}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 12 δοκιμίου 3.

Χρόνος σε ημέρες	Διαφορά δυναμικού ΔΕ για οπλισμό 12 δοκιμίου 3 (mV)
31	-1
68	-393
76	-415
84	-389
104	-384
118	-439
144	-376
157	-481
173	-198
183	-367
191	-69
199	-318
207	-296
215	-382
249	-333
257	-356
267	-367

Πίνακας 12. Διαφορά δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 12 δοκιμίου 3.



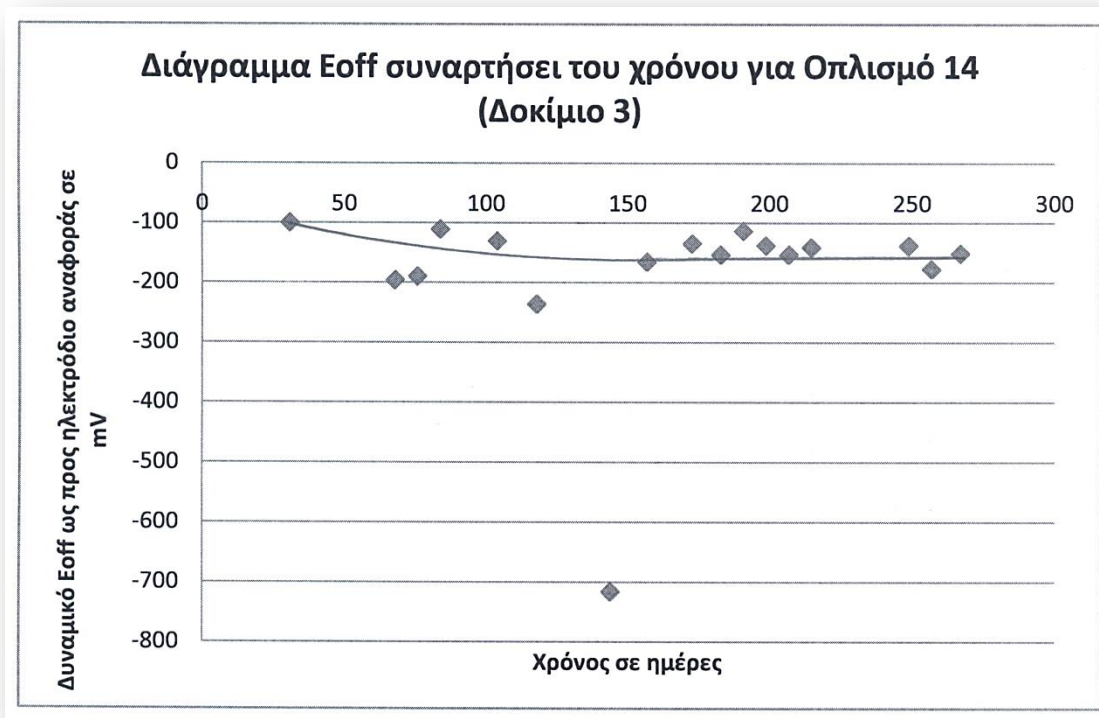
Σχήμα 10. Διάγραμμα διαφοράς δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 12 δοκιμίου 3.



Στη περίπτωση του οπλισμού 12, εμφανίζει υψηλές κατ' απόλυτο τιμές διαφοράς δυναμικού και συγκεκριμένα γύρω στα 400mV, τιμές μη ικανοποιητικές για να έχω καθοδική προστασία.

<b>Χρόνος σε ημέρες</b>	<b>Δυναμικό <math>E_{off}</math> για οπλισμό 14 Δοκιμίου 3 (mV)</b>
<b>31</b>	-100
<b>68</b>	-196
<b>76</b>	-190
<b>84</b>	-111
<b>104</b>	-130
<b>118</b>	-236
<b>144</b>	-716
<b>157</b>	-165
<b>173</b>	-135
<b>183</b>	-153
<b>191</b>	-113
<b>199</b>	-138
<b>207</b>	-153
<b>215</b>	-141
<b>249</b>	-138
<b>257</b>	-177
<b>267</b>	-151

**Πίνακας 13.** Δυναμικό  $E_{off}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 14 δοκιμίου 3.

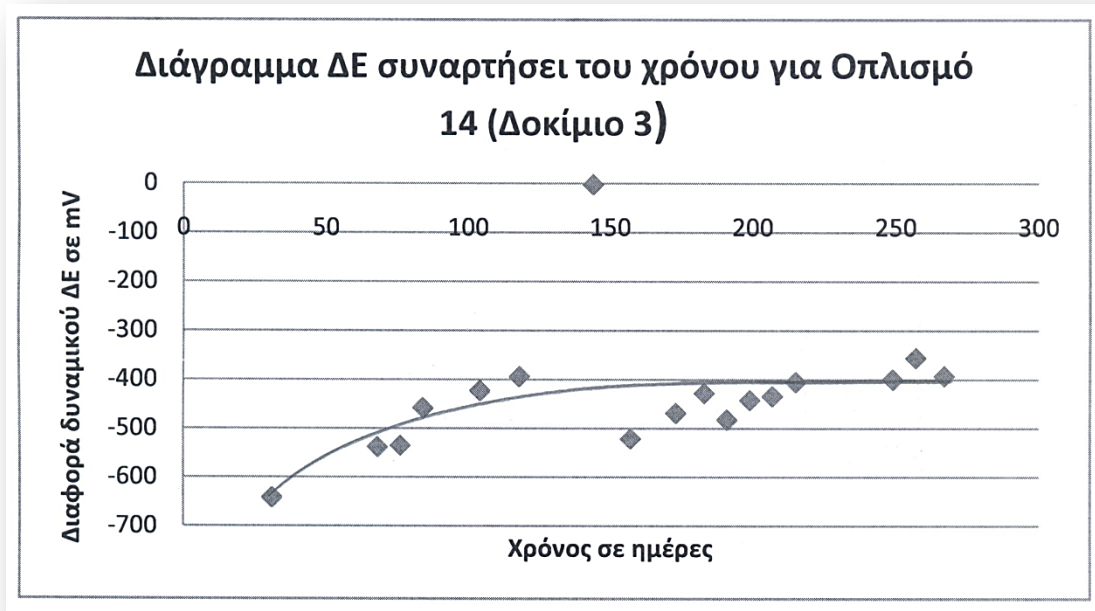


**Σχήμα 11.** Διάγραμμα δυναμικού  $E_{off}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 14 δοκιμίου 3.

Χρόνος σε ημέρες	Διαφορά δυναμικού ΔΕ για οπλισμό 14 δοκιμίου 3 (mV)
31	-642
68	-538
76	-535
84	-458
104	-423
118	-394
144	-2
157	-521
173	-468
183	-428
191	-482
199	-442
207	-434
215	-405
249	-400

257	-356
267	-393

Πίνακας 14. Διαφορά δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 14 δοκιμίου 3.



Σχήμα 12. Διάγραμμα διαφοράς δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 14 δοκιμίου 3.

Για τον οπλισμό 14 η διαφορά δυναμικού δίνει υψηλές τιμές και με τη πάροδο του χρόνου σταθεροποιείται σε μια τιμή γύρω στα -400mV, τιμή και πάλι μη ικανοποιητική για να έχω καθοδική προστασία.

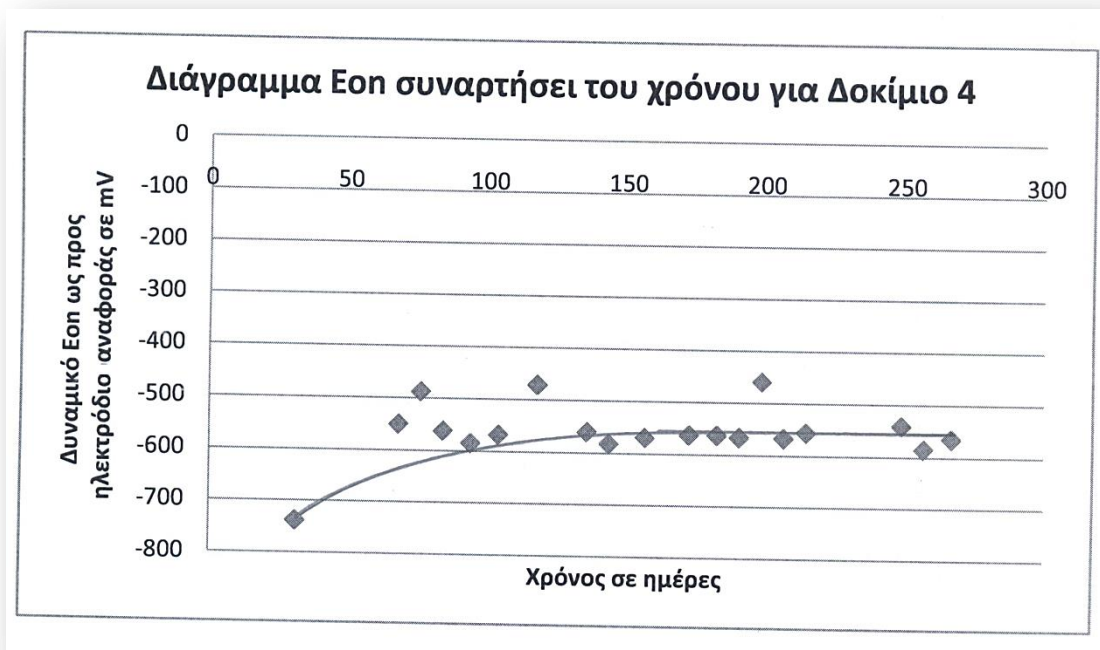
#### 2.1.4 Δοκίμιο 4 με καθοδική προστασία

Το δοκίμιο 4 φέρει οκτώ οπλισμούς με αρίθμηση 15,16,17,18,19,20,21 και 22 εκ των οποίων ο 15 και 16 φέρει την άνοδο Zn. Για αυτό το δοκίμιο έχω ένα διάγραμμα του δυναμικού  $E_{on}$  συναρτήσει του χρόνου και παίρνω τιμές δυναμικού  $E_{off}$  για τους οπλισμούς που δεν φέρουν άνοδο Zn (οπλισμοί 17 έως 22). Από τις δύο τιμές  $E_{on}$  και  $E_{off}$  για το κάθε ένα οπλισμό υπολογίζω μια διαφορά δυναμικού ( $\Delta E = E_{on} - E_{off}$ ) που από αυτή τη τιμή μπορώ να καταλάβω αν η καθοδική προστασία λειτουργεί.

Πιο κάτω δίδεται πίνακας με τις μετρήσεις δυναμικού  $E_{on}$  για το δοκίμιο 4 που ελέγχεται η καθοδική προστασία για τις αντίστοιχες μέρες:

<b>Χρόνος σε ημέρες</b>	<b>Δυναμικό <math>E_{on}</math> για Δοκίμιο 4 (mV)</b>
<b>31</b>	<b>-738</b>
<b>68</b>	<b>-550</b>
<b>76</b>	<b>-487</b>
<b>84</b>	<b>-562</b>
<b>94</b>	<b>-585</b>
<b>104</b>	<b>-568</b>
<b>118</b>	<b>-471</b>
<b>136</b>	<b>-560</b>
<b>144</b>	<b>-582</b>
<b>157</b>	<b>-569</b>
<b>173</b>	<b>-563</b>
<b>183</b>	<b>-563</b>
<b>191</b>	<b>-566</b>
<b>199</b>	<b>-459</b>
<b>207</b>	<b>-567</b>
<b>215</b>	<b>-556</b>
<b>249</b>	<b>-541</b>
<b>257</b>	<b>-585</b>
<b>267</b>	<b>-565</b>

**Πίνακας 15.** Δυναμικό  $E_{on}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για το δοκίμιο 4.

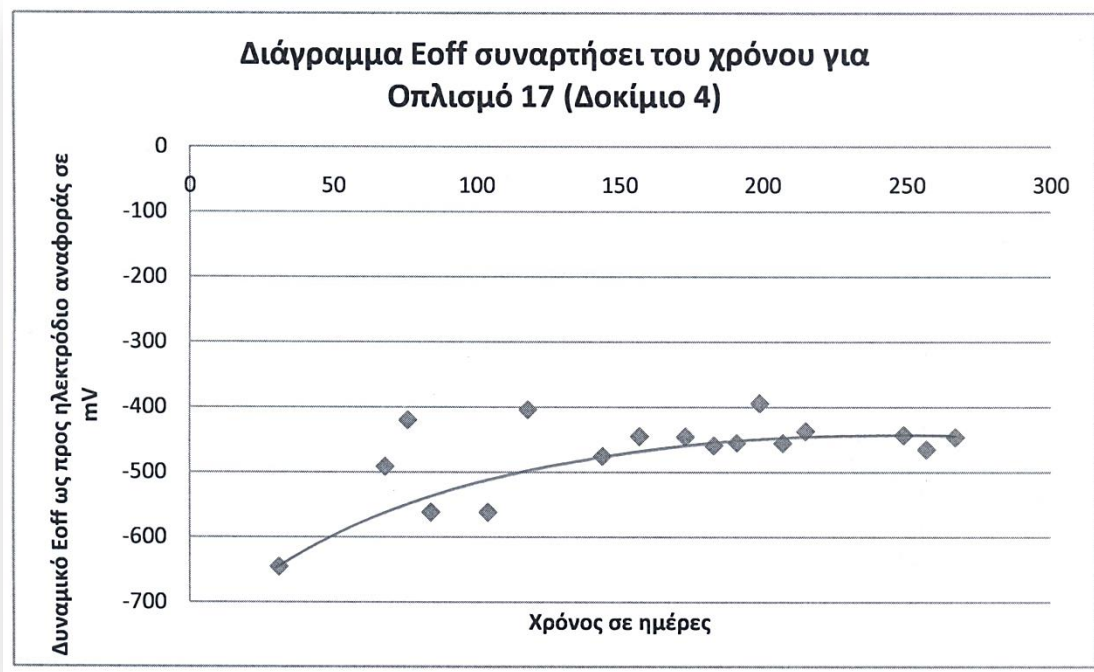


**Σχήμα 13.** Διάγραμμα δυναμικού  $E_{on}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για δοκίμιο 4.

Ακολουθούν πίνακες και διαγράμματα για τους σπλισμούς 17 έως 22 του δοκιμίου 4 για τα  $E_{off}$  και  $\Delta E$ .

Χρόνος σε ημέρες	Δυναμικό $E_{off}$ για σπλισμό 17 Δοκιμίου 4 (mV)
31	-646
68	-491
76	-420
84	-562
104	-562
118	-404
144	-475
157	-445
173	-445
183	-459
191	-455
199	-394
207	-455
215	-437
249	-443
257	-465

**Πίνακας 16.** Δυναμικό  $E_{\text{off}}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 17 δοκιμίου 4.

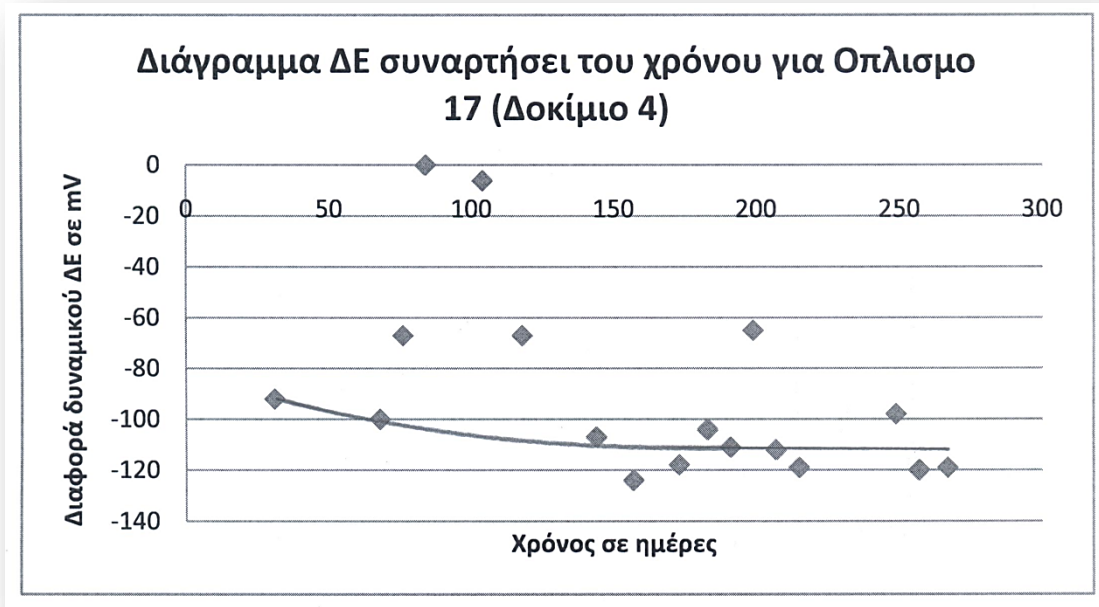


**Σχήμα 14.** Διάγραμμα δυναμικού  $E_{\text{off}}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 17 δοκιμίου 4.

Χρόνος σε ημέρες	Διαφορά δυναμικού $\Delta E$ για οπλισμό 17 δοκιμίου 4 (mV)
31	-92
68	-100
76	-67
84	0
104	-6
118	-67
144	-107
157	-124
173	-118
183	-104
191	-111
199	-65

207	-112
215	-119
249	-98
257	-120
267	-119

**Πίνακας 17.** Διαφορά δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 17 δοκιμίου 4.



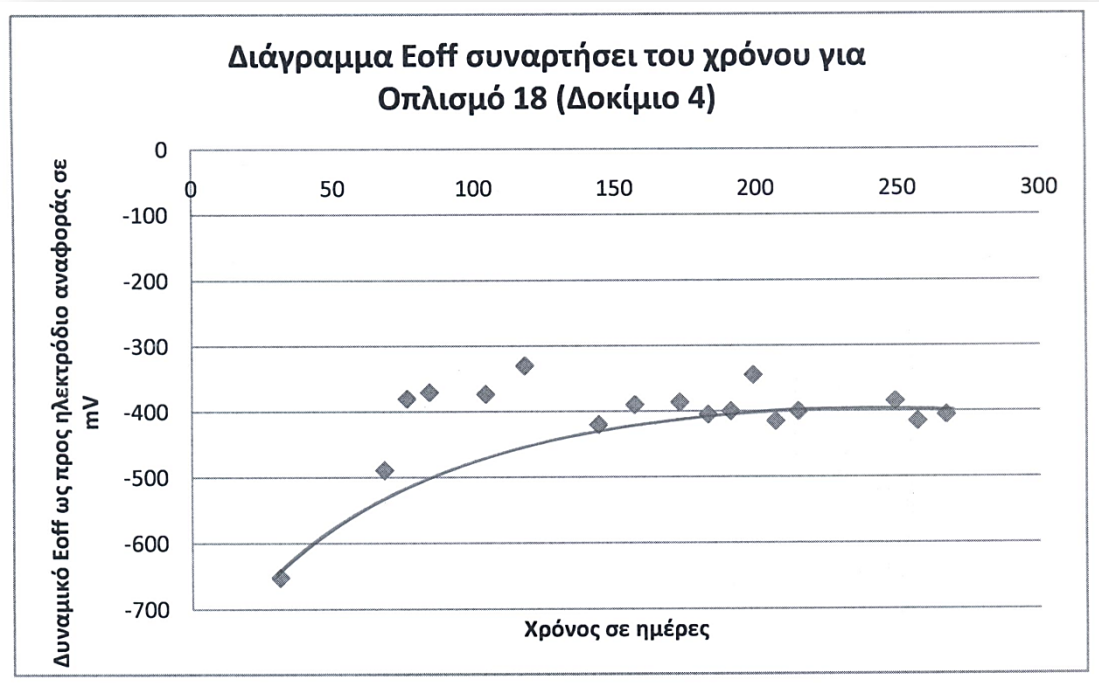
**Σχήμα 15.** Διάγραμμα διαφοράς δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 17 δοκιμίου 4.

Για τον οπλισμό 17 ενώ σχετικά σε σύγκριση με άλλους οπλισμούς έχουμε χαμηλές τιμές διαφοράς δυναμικού, οι τιμές αυτές σταθεροποιούνται περίπου στα -120mV, τιμή για την οποία δεν ισχύει η καθοδική προστασία.

Χρόνος σε ημέρες	Δυναμικό $E_{off}$ για οπλισμό 18 Δοκιμίου 4 (mV)
31	-652
68	-489
76	-380
84	-370
104	-373
118	-330

144	-420
157	-390
173	-386
183	-405
191	-400
199	-345
207	-415
215	-400
249	-385
257	-415
267	-405

**Πίνακας 18.** Δυναμικό  $E_{\text{off}}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 18 δοκιμίου 4.



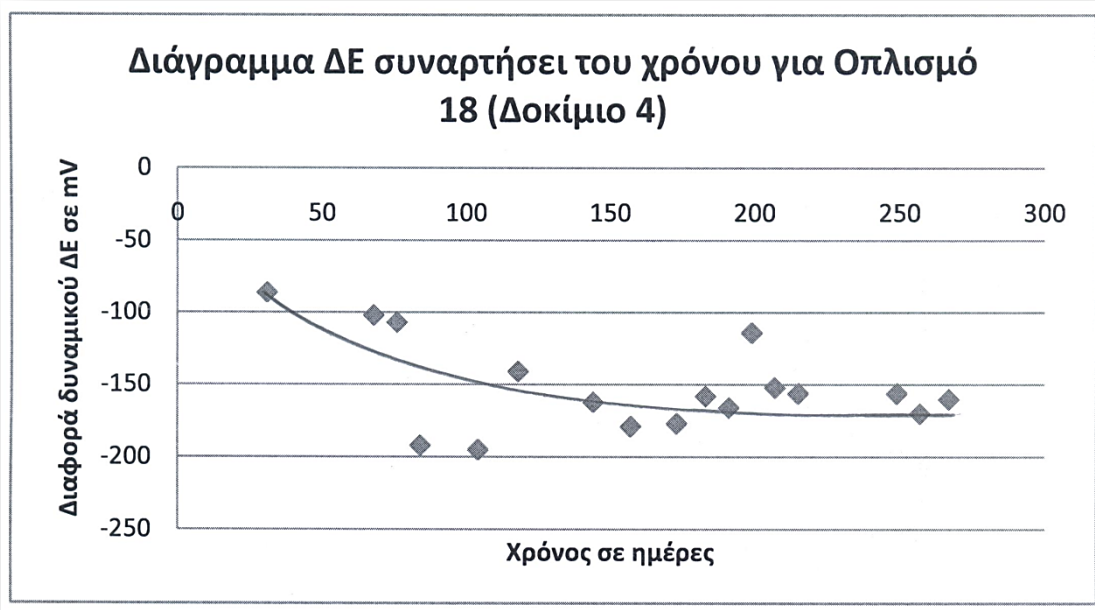
**Σχήμα 16.** Διάγραμμα δυναμικού  $E_{\text{off}}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 18 δοκιμίου 4.

Χρόνος σε ημέρες	Διαφορά δυναμικού $\Delta E$ για οπλισμό 18 δοκιμίου 4 (mV)
31	-86
68	-102



76	-107
84	-192
104	-195
118	-141
144	-162
157	-179
173	-177
183	-158
191	-166
199	-114
207	-152
215	-156
249	-156
257	-170
267	-160

**Πίνακας 19.** Διαφορά δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 18 δοκιμίου 4.

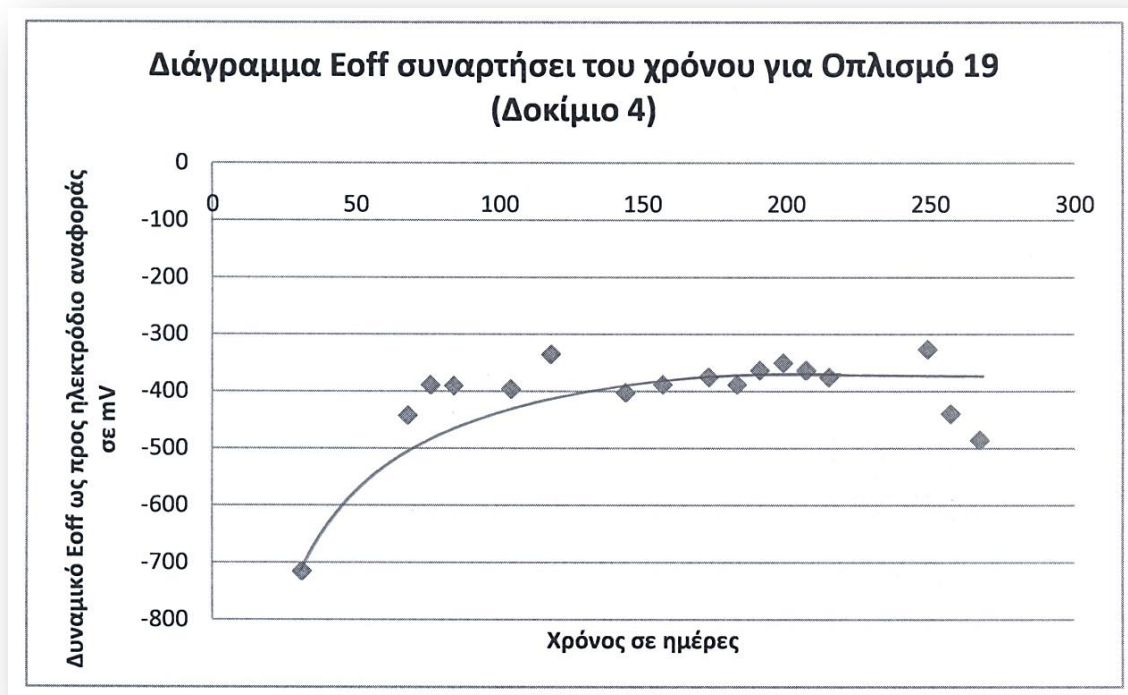


**Σχήμα 17.** Διάγραμμα διαφοράς δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 18 δοκιμίου 4.

Για τον οπλισμό 18, η πορεία της διαφοράς δυναμικού συναρτήσει του χρόνου μεγαλώνει σε απόλυτες τιμές και σταθεροποιείται γύρω στα 150mV, τιμή μη ικανοποιητική κι επομένως η καθοδική προστασία δε λειτουργεί.

Χρόνος σε ημέρες	Δυναμικό $E_{off}$ για οπλισμό 19 Δοκιμίου 4 (mV)
31	-715
68	-442
76	-389
84	-390
104	-396
118	-335
144	-402
157	-388
173	-375
183	-388
191	-363
199	-350
207	-363
215	-375
249	-326
257	-440
267	-485

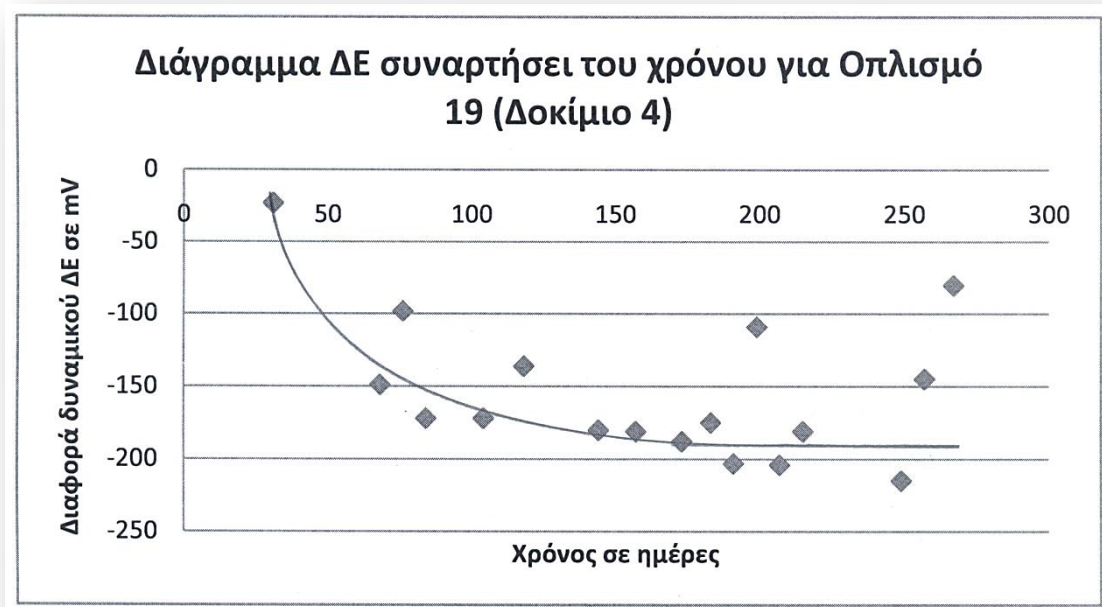
**Πίνακας 20.** Δυναμικό  $E_{off}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 19 δοκιμίου 4.



**Σχήμα 18.** Διάγραμμα δυναμικού  $E_{off}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 19 δοκιμίου 4.

Χρόνος σε ημέρες	Διαφορά δυναμικού ΔΕ για οπλισμό 19 δοκιμίου 4 (mV)
31	-23
68	-149
76	-98
84	-172
104	-172
118	-136
144	-180
157	-181
173	-188
183	-175
191	-203
199	-109
207	-204
215	-181
249	-215
257	-145
267	-80

Πίνακας 21. Διαφορά δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 19 δοκιμίου 4.

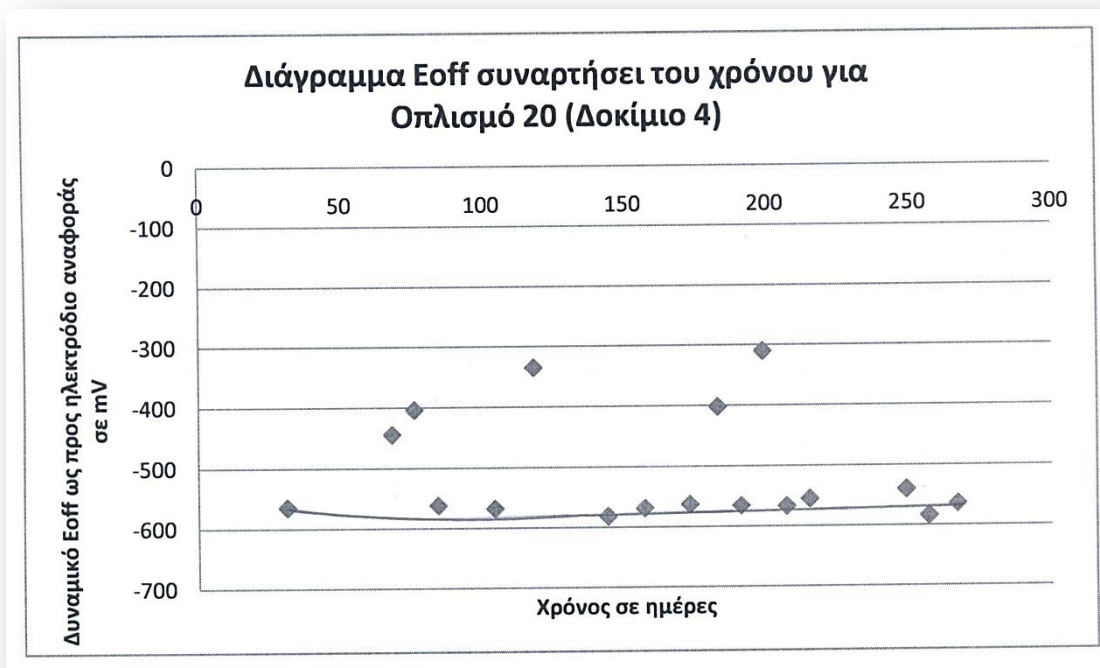


Σχήμα 19. Διάγραμμα διαφοράς δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 19 δοκιμίου 4.

Στον οπλισμό 19 παρατηρείται αύξηση των τιμών διαφοράς δυναμικού έως και -200mV τιμή για την οποία η καθοδική προστασία δεν ισχύει άρα ο οπλισμός μου δεν προστατεύεται.

<b>Χρόνος σε ημέρες</b>	<b>Δυναμικό <math>E_{off}</math> για οπλισμό 20 Δοκιμίου 4 (mV)</b>
<b>31</b>	<b>-565</b>
<b>68</b>	<b>-445</b>
<b>76</b>	<b>-404</b>
<b>84</b>	<b>-562</b>
<b>104</b>	<b>-568</b>
<b>118</b>	<b>-335</b>
<b>144</b>	<b>-582</b>
<b>157</b>	<b>-569</b>
<b>173</b>	<b>-563</b>
<b>183</b>	<b>-402</b>
<b>191</b>	<b>-566</b>
<b>199</b>	<b>-310</b>
<b>207</b>	<b>-567</b>
<b>215</b>	<b>-555</b>
<b>249</b>	<b>-540</b>
<b>257</b>	<b>-584</b>
<b>267</b>	<b>-564</b>

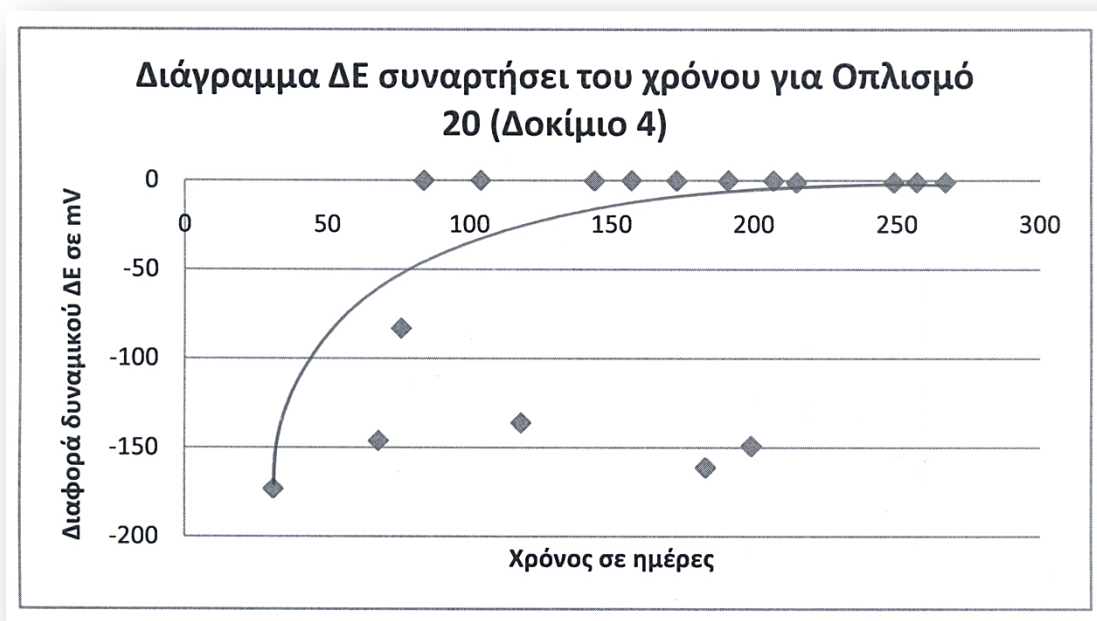
**Πίνακας 22.** Δυναμικό  $E_{off}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 20 δοκιμίου 4.



**Σχήμα 20.** Διάγραμμα δυναμικού  $E_{off}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 20 δοκιμίου 4.

Χρόνος σε ημέρες	Διαφορά δυναμικού ΔΕ για οπλισμό 20 δοκιμίου 4 (mV)
31	-173
68	-146
76	-83
84	0
104	0
118	-136
144	0
157	0
173	0
183	-161
191	0
199	-149
207	0
215	-1
249	-1
257	-1
267	-1

**Πίνακας 23.** Διαφορά δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 20 δοκιμίου 4.



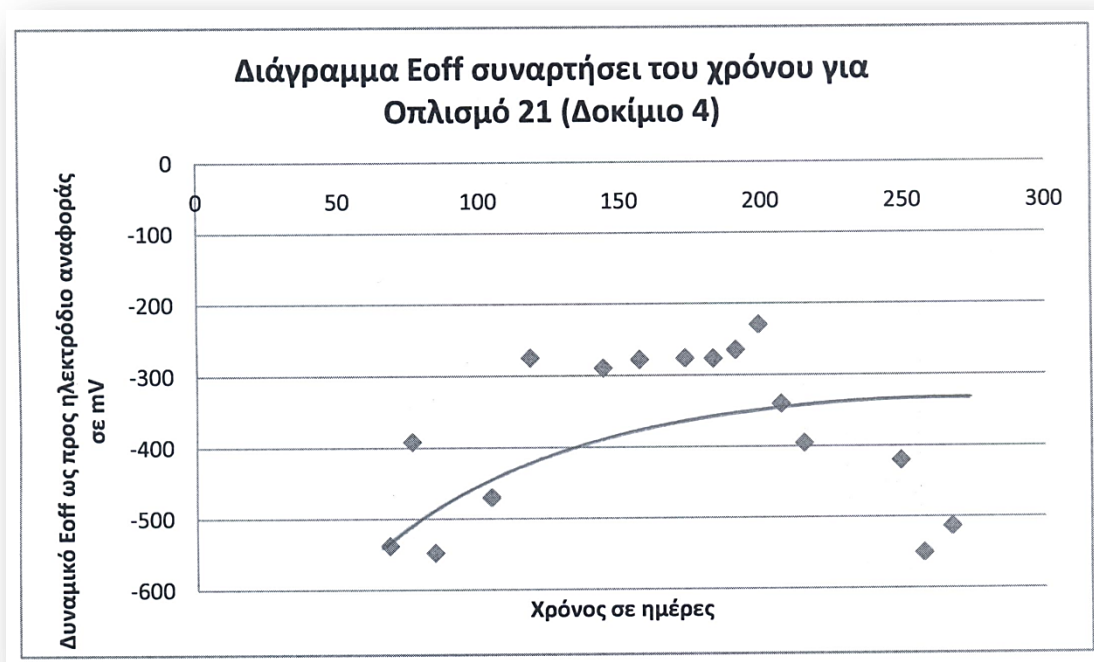
**Σχήμα 21.** Διάγραμμα διαφοράς δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 20 δοκιμίου 4.

Από τη πορεία δυναμικού συναρτήσει του χρόνου του οπλισμού 20, παρατηρείται υψηλή διαφορά δυναμικού η οποία όμως μετά τις 200 μέρες γίνεται μικρότερη από 100 mV και επομένως η καθοδική προστασία είναι ικανοποιητική.

<b>Χρόνος σε ημέρες</b>	<b>Δυναμικό <math>E_{off}</math> για οπλισμό 21 Δοκιμίου 4 (mV)</b>
<b>31</b>	-
<b>68</b>	-538
<b>76</b>	-392
<b>84</b>	-548
<b>104</b>	-470
<b>118</b>	-275
<b>144</b>	-290
<b>157</b>	-278
<b>173</b>	-276
<b>183</b>	-277
<b>191</b>	-265
<b>199</b>	-229
<b>207</b>	-340

215	-395
249	-420
257	-550
267	-513

**Πίνακας 24.** Δυναμικό  $E_{off}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 21 δοκιμίου 4.

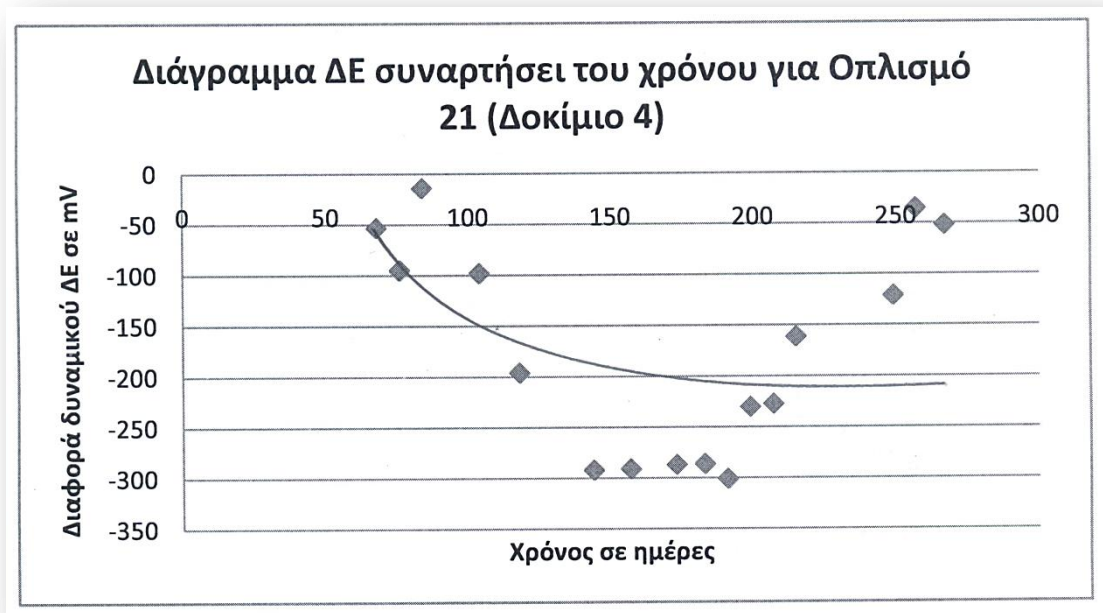


**Σχήμα 22.** Διάγραμμα δυναμικού  $E_{off}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 21 δοκιμίου 4.

Χρόνος σε ημέρες	Διαφορά δυναμικού $\Delta E$ για οπλισμό 21 δοκιμίου 4 (mV)
31	-
68	-53
76	-95
84	-14
104	-98
118	-196
144	-292
157	-291
173	-287

183	-286
191	-301
199	-230
207	-227
215	-161
249	-121
257	-35
267	-52

**Πίνακας 25.** Διαφορά δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 21 δοκιμίου 4.



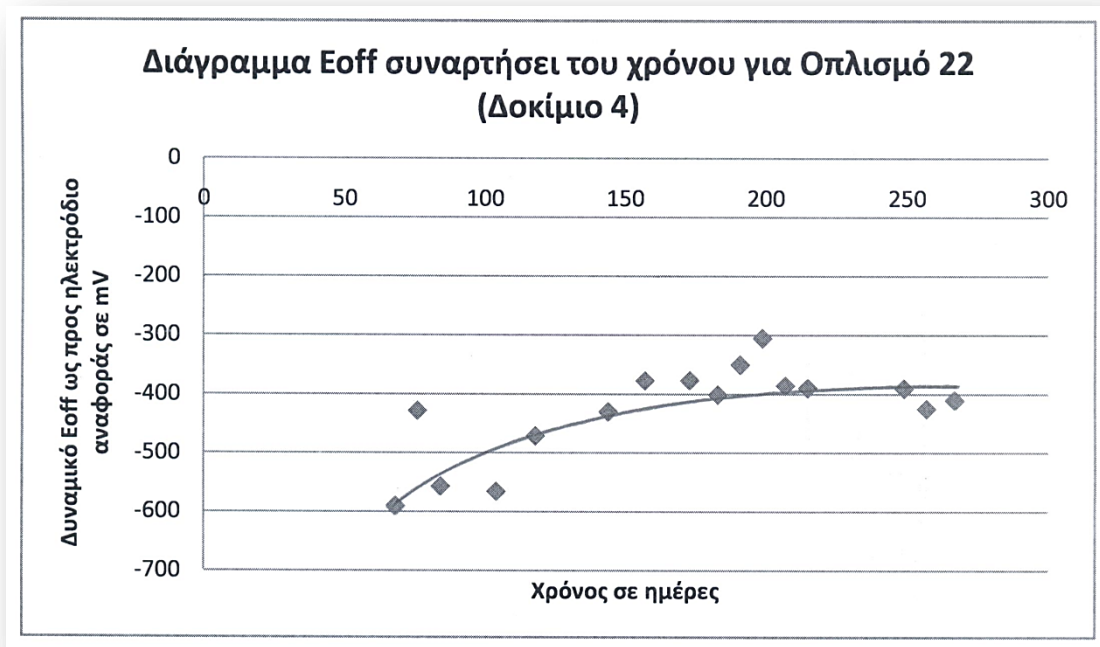
**Σχήμα 23.** Διάγραμμα διαφοράς δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 21 δοκιμίου 4.

Για τον οπλισμό 21 παρατηρείται μια μη ικανοποιητική πορεία της διαφοράς δυναμικού. Ενώ τις πρώτες μέρες παρουσίαζε μια συμπεριφορά με τιμές ικανοποιητικές για τη καθοδική προστασία, στις 120 ημέρες είχαμε τιμές μεγαλύτερες των 100mV και μετά τις 250 ημέρες είχαμε τιμές μικρότερες κατ' απόλυτη τιμή των 100mV. Γενικά παρουσιάζει μια ασταθής κατάσταση, πράγμα μη ικανοποιητικό για τη καθοδική προστασία.



Χρόνος σε ημέρες	Δυναμικό $E_{off}$ για οπλισμό 22 Δοκιμίου 4 (mV)
31	-
68	-591
76	-428
84	-557
104	-566
118	-471
144	-430
157	-377
173	-376
183	-401
191	-350
199	-305
207	-385
215	-390
249	-390
257	-425
267	-410

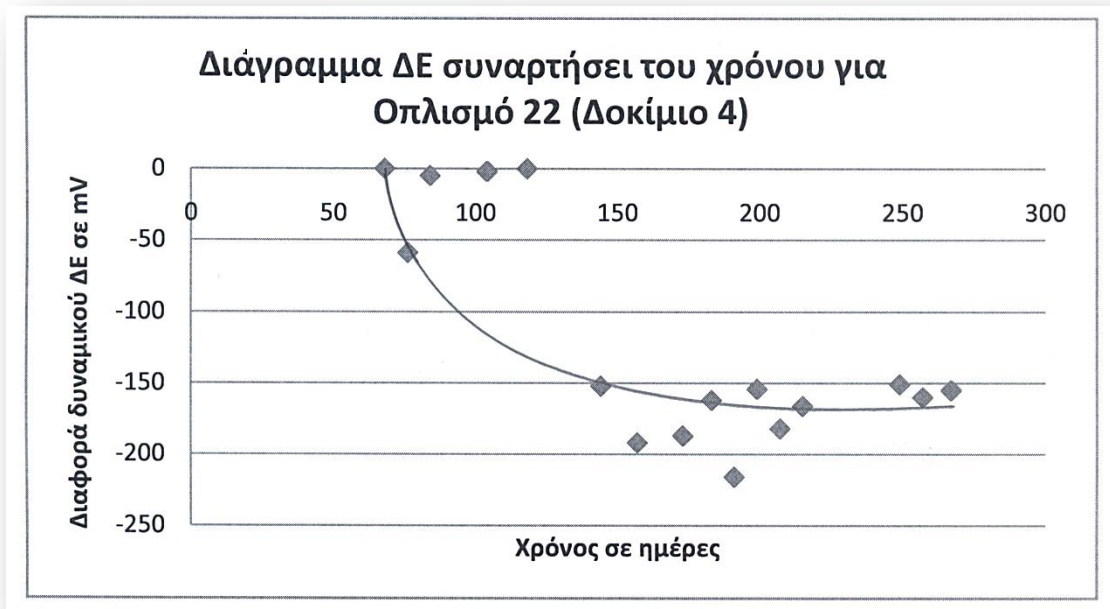
**Πίνακας 26.** Δυναμικό  $E_{off}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 22 δοκιμίου 4.



**Σχήμα 24.** Διάγραμμα δυναμικού  $E_{off}$  ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag.AgCl για τον οπλισμό 22 δοκιμίου 4.

Χρόνος σε ημέρες	Διαφορά δυναμικού ΔΕ για οπλισμό 22 δοκιμίου 4 (mV)
31	-
68	0
76	-59
84	-5
104	-2
118	0
144	-152
157	-192
173	-187
183	-162
191	-216
199	-154
207	-182
215	-166
249	-151
257	-160
267	-155

Πίνακας 27. Διαφορά δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 22 δοκιμίου 4.



Σχήμα 25. Διάγραμμα διαφοράς δυναμικού ΔΕ για τον οπλισμό 22 δοκιμίου 4.

Στον οπλισμό 22 η πορεία της διαφοράς δυναμικού συναρτήσει του χρόνου μεγαλώνει κατ' απόλυτη τιμή και σταθεροποιείται στα 150mV περίπου. Ενώ αρχικά έδειχνε να προστατεύεται, στις 150 ημέρες χάσαμε τη προστασία αυτή. Η τιμή των -150mV δεν είναι ικανοποιητική και επομένως η καθοδική προστασία δεν λειτουργεί.

### 3. Συζήτηση – Συμπεράσματα

Η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της καθοδικής προστασίας έγινε με βάση το κριτήριο της NACE σύμφωνα με το οποίο η διαφορά δυναμικού πρέπει να είναι μικρότερη από 100mV.

Εφαρμόζοντας το κριτήριο αυτό οι περισσότεροι οπλισμοί δεν προστατεύονται ικανοποιητικά. Οι πιθανοί λόγοι της αστοχίας αυτής είναι:

- Η κακή ποιότητα της συγκόλλησης φύλλου ψευδαργύρου και οπλισμού που βασίζεται σε μία απλή οργανική κόλλα.
- Έστω και εάν η ποιότητα της πρώτης επαφής είναι σωστή, υπάρχει πάντα το πρόβλημα ότι μπορεί να καταστραφεί λόγω της εισόδου διαβρωτικών παραγόντων μεταξύ ψευδαργύρου και οπλισμού. Ιδιαίτερα πιθανή είναι η είσοδος  $Cl^-$  που διαλύουν το ψευδάργυρο και επομένως αδυνατίζουν την ηλεκτρική επαφή.

Η επιτυχία της καθοδικής προστασίας σε μερικούς οπλισμούς δείχνει ότι η καθοδική προστασία υπάρχει για ένα μικρό τμήμα επιφάνειας του οπλισμού. Μπορούμε να εκτιμήσουμε ότι επαφή μήκους  $a$  μπορεί να προστατεύσει μήκος  $2a$  ( $a$  δεξιά και αριστερά). Είναι φανερό όμως ότι η επιτυχία αυτή είναι πολύ μικρή για να εφαρμοστεί στη πράξη.

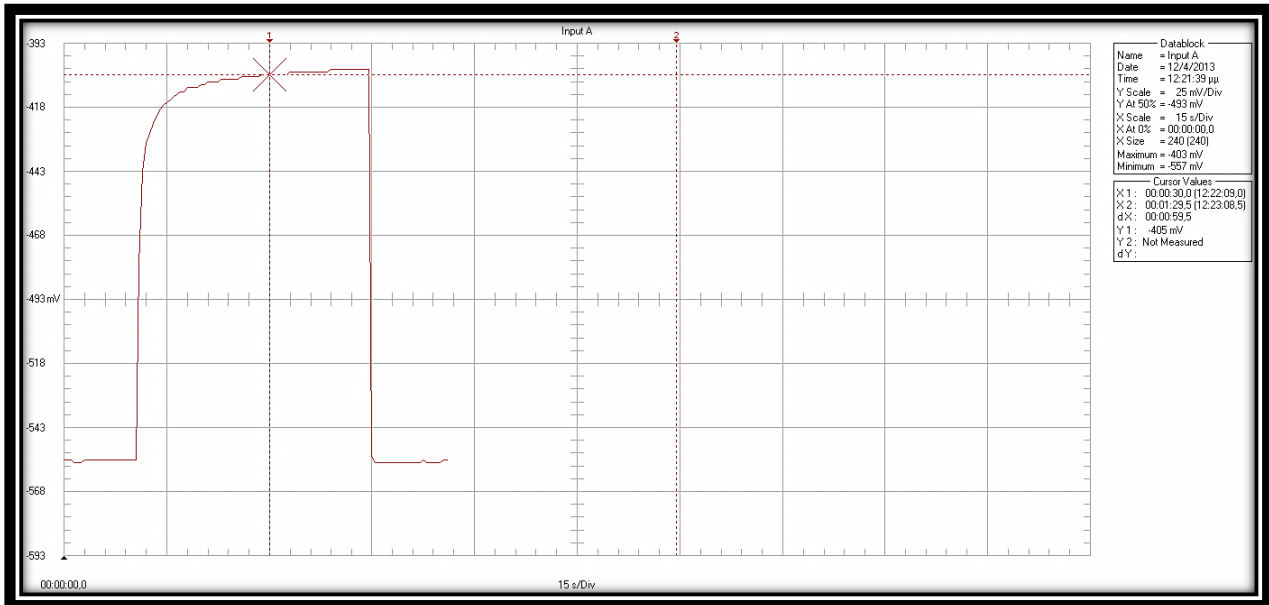
## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αιμ. Κορωνάιος, Γ. Πουλάκος, «Τεχνικά Υλικά Τόμος Ι», 2005, Αθήνα
2. “*Corrosion and Steel Reinforcements in Concrete Construction*”, Society of the Chemical Industry, 1979
3. R.J. Currie, “*The Implications of Reinforcement Corrosion for Safety and Serviceability Structures, In Corrosion of Reinforcement In Concrete Construction*”, A.P. Crane, Editor, Society of Chemical Industry and Ellis Horwood Ltd., London, 1983, pp. 13-15
4. M. Hamada, “*Neutralization (carbonation) of concrete and corrosion of reinforcing steel, Proceedings of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cemen*”t, Part III, Properties of Cement Paste and Concrete, Tokyo, Dec. 1969, pp. 343-383
5. A. Volkwein, R. Springenschmid, “*Corrosion of Reinforcement in Concrete Bridges at Different Ages due to Carbonation and Chloride Penetratio, Proceedings, 2nd International Conference on the Durability of Buildings, Materials and Components, September 14-16, 1981, NBS, Gaithesburg, MD, pp 199-209*
6. F. Gunther, G. Ruprich, “*Einfluss des Cl Gehaltes des Betons auf das Korrosionverhalten von Spannstahl*”, Baustoffindustrie,8, 1966, 226-229
7. N. Anschan, S. Palm, “*Electrochemical testing of the Effects of Admixtures on Corrosion of Reinforcement*”, Tiedotue, Sarja III-Rakenmus 124, The State Institute of Technical Research, Finland, Helsinki, 1968
8. Φαρδής Ν. Μιχαήλ, «*Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος (Μέρος ΙΙΙ)*», Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2004
9. Κουτσούκος Γ. Πέτρος, «*Η διάβρωση και η προστασία του χάλυβα*», Ημερίδα: Θέματα τεχνολογίας σκυροδέματος και δομικών χαλύβων με τα νέα ευρωπαϊκά πρότυπα ΕΛΟΤ EN, Τ.Ε.Ε., Οκτώβριος 2004

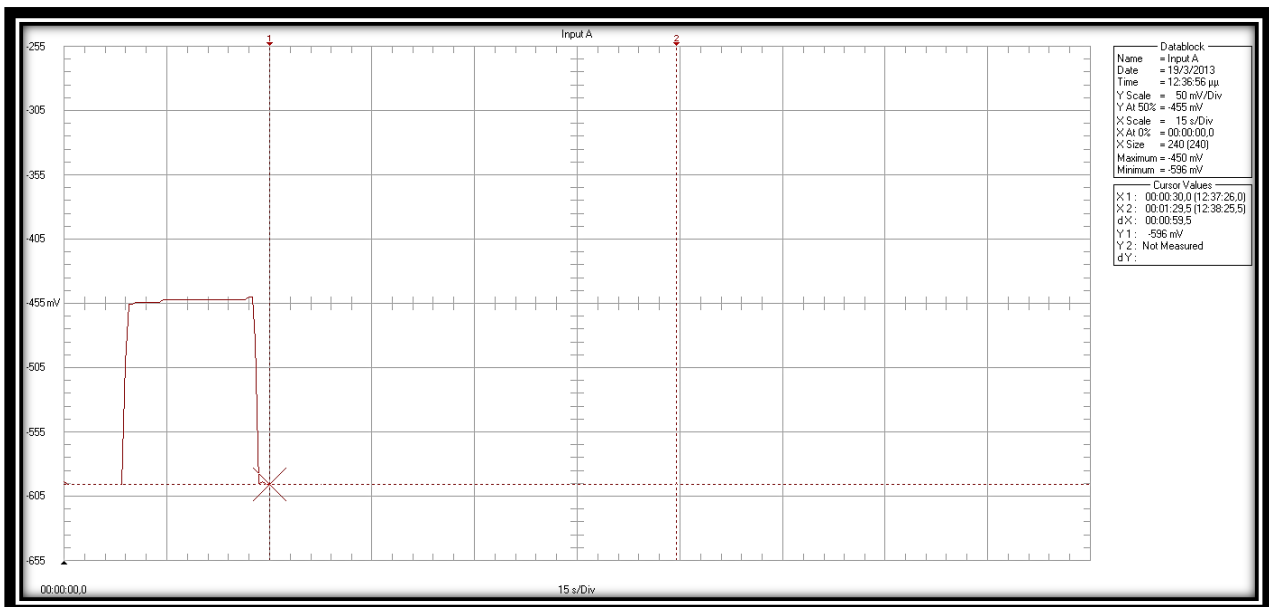
10. Αποστολόπουλος Αλ. Χάρης , Κερμανίδης Θ. Αλέξης , « *Επίδραση της διάβρωσης στις ιδιότητες εφελκυσμού και κόπωσης χαλύβων tempcore S500s*», 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών, Νοέμβριος 2004
11. Αποστολόπουλος Χάρης, «*Μηχανική συμπεριφορά διαβρωμένων χαλύβων*», Ημερίδα: Θέματα τεχνολογίας σκυροδέματος και δομικών χαλύβων με τα νέα ευρωπαϊκά πρότυπα ΕΛΟΤ EN, Τ.Ε.Ε., Οκτώβριος 2004
12. Τάσιος Π.Θ., Αλιγιζάκη Κ., «*Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος έναντι περιβαλλοντικών δράσεων*», Αθήνα 1993
13. Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος ΚΤΧ, 2008
14. [www.buildingconservation.com](http://www.buildingconservation.com)
15. Τσώνη Ν., «*Η διάβρωση του χάλυβα στο σκυρόδεμα-Πρόληψη-Ελεγχος και επεμβάσεις σε υφιστάμενες κατασκευές-Τρωτότητα των ενισχύσεων*», 16<sup>ο</sup> Φοιτητικό συνέδριο Επισκευές Κατασκευών” Πάτρα, Φεβρουάριος 2010
16. Γ. Μπατής, «*Χρήση νέων υλικών για την αύξηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών*», Εισήγηση στην ημερίδα του ΤΕΕ Ενίσχυση κτιρίων με σύγχρονα υλικά Νοέμβριος, 2007.
17. Ervin Poulsen, Jorgen E. Risberg and Jesper E. Stilling, “*Migration Corrosion Inhibiting Admixtures – Some documentation and a model for the increase of service lifetime*”, CANMET/ACI Conference, Nice 2000
18. Γ. Μπατής, Ε. Ρακαντά, Β. Θεοδορίδης, Κ. Σίδερης, «*Επίδραση του αναστολέα διάβρωσης με βάση την Ν, Ν-διμεθυλαμινοαιθανόλη στη προστασία του οπλισμού σκυροδέματος λόγω ενανθράκωσης και ταυτόχρονης παρουσίας χλωριόντων*», 14ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Κως 2003
29. Martin S. McGovern, “*An effective weapon against corrosion*”, World of Concrete Show Daily, Jan 1997
20. D. Bjegovic, Boris Miksic, “*Topically applied migrating corrosion inhibitors for reinforced concrete protection*”

21. Eydelnant, B. Miksic, L. Gelner, “*Migrating corrosion inhibitors for reinforced concrete*”, 1993
22. [www.cortecvci.com](http://www.cortecvci.com) CORTEC CORPORATION
23. Γ. Μπατής, «*Φθορά και προστασία υλικών*», Σημειώσεις ΕΜΠ, 2006.
24. Γ. Μπατής, Ε. Ρακαντά, Κ. Μελετίου, «*Προβλήματα διάβρωσης οπλισμού κτιρίων ΟΣ στην Ελλάδα*», Σκυρόδεμα, Τεύχος 8, σελ 10-18, 2004.
25. Ν. Κουλουμπή, «*Διάβρωση και Προστασία*», Ε.Μ.Π, Αθήνα 2010
26. 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
27. W. Baeckmann, W. Schwenk, W. Prinz, “*Handbook of Cathodic Corrosion Protection*”, VCH, Weinheim, 1989
28. Γ. Μπατής, Ε. Ντάφλος, «*Μελέτη Καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενες ανόδους υποστηλωμάτων κτηρίου Τράπεζας*», 2006
29. [www.cathodicprotection.com](http://www.cathodicprotection.com)
30. [www.marpo.gr](http://www.marpo.gr)
31. Γ. Μπατής, Α. Μοροπούλου, Ε. Ρακαντά, Π. Μούνδουλας, Ε. Αγγελικοπούλου, «*Καθοδική Προστασία του Καθολικού του Ναού Νέας Μονής Χίου*», 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, Πάφος 2009
32. Γ. Μπατής, Π. Καρύδης, «*Καθοδική Προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα*», 13ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Ρέθυμνο, 1999
33. Γ. Μπατής, Ε. Ντάφλος, «*Μελέτη Καθοδικής Προστασίας Γενικού Κρατικού Νοσοκομείου Νίκαιας*», 2008
34. Γ. Μπατής, Ε. Ρακαντά, «*Η καθοδική προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα*», Σκυρόδεμα, Τεύχος 3, 2006
35. [www.renovat.gr](http://www.renovat.gr)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Διάγραμμα από το όργανο Fluke Scopemeter για σπλισμό 17 (δοκίμιο 4) στις 144 ημέρες όταν χάνω πλέον τη προστασία ( $\Delta E > 100\text{mV}$ ).



Διάγραμμα από το όργανο Fluke Scopemeter για σπλισμό 11 (δοκίμιο 2) στις 191 ημέρες, λίγο πριν τη προστασία του ( $\Delta E = -140\text{mV}$ ).

## **ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ**

### **ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΠΕ**

**Όνοματεπώνυμο:** ΕΡΩΤΟΚΡΙΤΟΥ ΜΙΧΑΛΗΣ

**Ημερομηνία γέννησης:** 12 Οκτωβρίου 1982

**Τόπος γέννησης:** Λάρνακα, Κύπρος

**Τόπος κατοικίας:** Κανάρη 1, Αγ. Βαρβάρα 12351

**Τηλέφωνα επικοινωνίας:** 6947716410

**Ηλεκτρονική Διεύθυνση:** [erwtokritou82@hotmail.com](mailto:erwtokritou82@hotmail.com)

**Υπηκοότητα:** Κυπριακή

**Εθνικότητα:** Ελληνική

**Στρατιωτικές Υποχρεώσεις:** Εκπληρωμένες

**Επάγγελμα:** ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΠΕ

**Ειδικότητα:** Μελέτες- Επιβλέψεις- Κατασκευές Οικοδομικών μελετών-Δημόσια Έργα

**Σπουδές:** **Οκτώμβριος 2002 – Ιούλιος 2008**

Πανεπιστήμιο Πατρών  
Πολυτεχνική Σχολή  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

**Οκτώμβριος 2010 – Μάιος 2011**

Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Πρόγραμμα e-learning για εξειδίκευση στην  
Περιβαλλοντική Διοίκηση

**Οκτώμβριος 2011 – Ιούλιος 2013**

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Μεταπτυχιακό πρόγραμμα  
Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών



**Ξένες γλώσσες:** Αγγλικά (Καλό επίπεδο)

**Εργασίες - Σεμινάρια - Ερευνητικά Ενδιαφέροντα:**

**Ιανουάριος 2006 :** Εργασία στο Πανεπιστήμιο Πατρών με θέμα:  
«Χάραξη Οδού Κατηγορίας III (Δευτερεύον Δίκτυο Εθνικών Οδών) τύπου Δ.»

**Φεβρουάριος 2006**

Παρακολούθηση 12-ώρου σεμιναρίου με θέμα τρόποι για αποσυμφόρηση της κυκλοφορίας των μεγαλουπόλεων.

**Μάιος 2007:** Εργασία στο Πανεπιστήμιο Πατρών με θέμα:  
«Έρευνα - Μελέτη Για Ανάπλαση της Ακτής Δυμαίων Στη Πάτρα. »

**Σεπτέμβριος 2007 - Ιούνιος 2008:**

Πτυχιακή Εργασία με θέμα:  
«Ενίσχυση Κτιρίου Με Σύνθετα Υλικά. »  
(Ανάλυση Κτιρίου με Statics 2006 και Ενίσχυση αυτού με FRPstrength)

**Οκτώμβριος 2008 (08/10/2008-05/11/2008)**

Παρακολούθηση 35-ώρου σεμιναρίου με θέμα σχέδιο ασφάλειας και υγείας στις κατασκευές.

«Παροχή υπηρεσιών για την ενδυνάμωση του τμήματος επιθεώρησης εργασίας καθώς και του ευρύτερου δημοσίου τομέα και των ιδιωτικών επιχειρήσεων με σκοπό την βελτίωση των συνθηκών εργασίας στους τομείς των κατασκευών, των εξορυκτικών βιομηχανιών και των λιμενικών εργασιών. »

**Σεπτέμβριος 2010 (01/09/10-Μάιο 2011)**

Σπουδές για εξειδίκευση με θέμα Περιβαλλοντική Διοίκηση του Καποδιστριακού Πανεπιστημίου. Εμπλουτισμός γνώσεων σε θέματα Βιωσιμότητας και Βιώσιμης Ανάπτυξης, Περιβαλλοντικής Στρατηγικής, Περιβαλλοντικής Πολιτικής κ.α.

**Οκτώμβριος 2012 (01/10/12-Ιούλιο 2013)**

Εκπόνηση μεταπτυχιακής εργασίας με θέμα «*ΤΟΠΙΚΗ ΚΑΘΟΔΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΘΥΣΙΑΖΟΜΕΝΕΣ ΑΝΟΔΟΥΣ*»

**Εμπειρία σε Η/Υ:**

Χρήστης των ακολούθων διαδεδομένων επαγγελματικών

Εφαρμογών :

MS EXCEL, MS WORD, MS ACCESS, MS POWERPOINT, MS INTERNET 5.0 & OUTLOOK EXPRESS, CAD Software: AUTOCAD

**ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ - ΠΡΟΫΠΗΡΕΣΙΑ**

**Μάιος 2008 - Ιούλιος 2008 :**

**Αρχιτεκτονικό γραφείο και γραφείο στατικών μελετών Μηνά και Δημητρίου στη Κύπρο**

**Στατικές Μελέτες**

«Έρευνα και στατική μελέτη για την ανέγερση κατοικιών»

- Σύνταξη Μελετών με πρόγραμμα STEREOSTATICA
- Επίβλεψη στα συγκεκριμένα εργοτάξια

**Σεπτέμβριος 2008 - Δεκέμβριος 2008:**

**Εταιρία Μιλτιάδης Νεοφύτου** (Εταιρία που έχει αναλάβει δημόσια έργα στη Κύπρο)

**Ανέγερση 7 πολυτελών κατοικιών**

- Επιβλέπων μηχανικός στο συγκεκριμένο εργοτάξιο

**Δεκέμβριος 2008- Σεπτέμβριος 2009:**

**Εταιρία Μιλτιάδης Νεοφύτου** (Εταιρία που έχει αναλάβει δημόσια έργα στη Κύπρο)

**Ανέγερση του τμήματος Κοινωνικών Δραστηριοτήτων του Πανεπιστημίου Κύπρου**

- Επιβλέπων μηχανικός στο συγκεκριμένο εργοτάξιο
1. Υπεύθυνος για τη σωστή ροή εργατών
  2. Υπεύθυνος στο συντονισμό υπεργολάβων
  3. Επιμετρήσεις με τη βοήθεια AUTOCAD και επιτόπου μετρήσεις
  4. Υπεύθυνος στο κομμάτι των μονώσεων
  5. Καταγραφή εργατικού προσωπικού και έλεγχος εργατικών κόστων
  6. Υπεύθυνος στο Σύστημα Διαχείρισης Ποιότητας (ISO) και συμπλήρωσης των εντύπων
  7. Υπεύθυνος για την παραγγελία υλικών

**Σεπτέμβριος 2009-Ιούλιο 2013**

**IKEA - Όμιλος Φουρλή**

- Πωλητής και σχεδιαστής κουζινών

**Ενδιαφέροντα:** Μουσική, Διάβασμα, Κινηματογράφος, Θέατρο, Εκδρομές - Περιηγήσεις, Ζωγραφική, Καταδύσεις.