

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



**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ**  
**ΑΝΑΣΤΟΛΕΩΝ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΗΝ**  
**ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ**  
**ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**  
**ΕΥΓΕΝΙΑ ΒΟΥΛΓΑΡΗ**  
Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός, MSc

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ**  
**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΠΑΤΗΣ**  
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, 2020**



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

*Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή*

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

Α. Μοροπούλου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Α. Καραντώνης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

*Επταμελής Επιτροπή*

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

Α. Μοροπούλου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Α. Καραντώνης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χ.-Σ. Καραγιάννη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Μ. Μπεάζη - Κατσιώτη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Α. Καραγιάννης – Μπακόλας, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ε. Μπαδογιάννης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

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

Αντικείμενο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι η πειραματική διερεύνηση της προστατευτικής ικανότητας οργανικών επικαλύψεων και αναστολέων διάβρωσης για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας και την προστασία από τη διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος.

Η Διδακτορική Διατριβή *απαρτίζεται* από:

***Το θεωρητικό μέρος***, όπου γίνεται συνολική ανασκόπηση των δομικών συστατικών και στοιχείων που αποτελούν το οπλισμένο σκυρόδεμα. Αναλύονται οι παράγοντες που επιδρούν στη διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος καθώς και οι μέθοδοι προστασίας του. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους αναστολείς διάβρωσης οι οποίοι προστίθενται στο οπλισμένο σκυρόδεμα με σκοπό την προστασία του οπλισμού. Επίσης, αναλύονται οι παράγοντες που επιδρούν στην υποβάθμιση των ιδιοτήτων του Οπλισμένου Σκυροδέματος κατά την παραμονή του στην ατμόσφαιρα αλλά και σε περιβάλλον υψηλής συγκέντρωσης  $Cl^-$ , καθώς επίσης και οι μέθοδοι προστασίας του.

***Το πειραματικό μέρος***, όπου παρουσιάζονται τα υλικά, οι μέθοδοι εκτίμησης της διάβρωσης, οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν, οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών και η συζήτηση των αποτελεσμάτων για κάθε μια από τα στάδια εξέτασης του αντικειμένου της διδακτορικής διατριβής.

***Τη συζήτηση αποτελεσμάτων***, όπου αναλύονται τα στάδια του πειραματικού μέρους της διδακτορικής διατριβής και γίνεται συσχέτιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με τη διεθνή και Ελληνική βιβλιογραφία.

***Τα συμπεράσματα***, όπου γίνεται η συνολική αποτίμηση των αποτελεσμάτων του πειραματικού μέρους της Διδακτορικής Διατριβής.

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

Η εκπόνηση και η ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής θα ήταν αδύνατη χωρίς τη συμβολή και τη συνεργασία πλήθους ατόμων τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω ονομαστικά:

Τον Ομότιμο Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. Γεώργιο Μπατή, επιβλέποντα της Διδακτορικής διατριβής, για την κατανόηση και εμπιστοσύνη που μου έχει δείξει τόσο κατά την ανάθεση, όσο και κατά την εξέλιξη της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής, καθώς και για την επιστημονική υποστήριξη που διαρκώς μου παρείχε και η οποία αποτέλεσε προϋπόθεση για την περαίωση της έρευνας.

Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά, τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής την Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. κα Αντωνία Μοροπούλου και τον Αναπληρωτή καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Αντώνη Καραντώνη για την καθοδήγηση που μου παρείχαν στην εκπόνηση της Διδακτορικής Διατριβής.

Τη Δρ. Χημικό Μηχανικό Αγγελική Ζαχαροπούλου, στο Εργαστήριο «Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών», της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, για την άριστη συνεργασία και την πολύτιμη επιστημονική βοήθεια της κατά διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων, καθώς επίσης και στην εξαγωγή των συμπερασμάτων της Διδακτορικής Διατριβής.

Ευχαριστίες επίσης εκφράζονται σε όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου «Φυσικοχημείας και Εφαρμοσμένης Ηλεκτροχημείας» του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για τη βοήθεια που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση της διατριβής και ειδικότερα τον Αναπληρωτή καθηγητή Ε.Μ.Π κ. Α. Καραντώνη, για την πολύτιμη συνεργασία στο πλαίσιο τόσο της ηλεκτροχημικής όσο και της συνολικής αποτίμησης της διάβρωσης δομικού χάλυβα Ο.Σ.

Επίσης, εκφράζονται ευχαριστίες προς τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, την Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. κα Χ. Καραγιάννη, την Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. κα Μ. Μπεάζη-Κατσιώτη, τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Α. Μπακόλα και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π κ. Ε. Μπαδογιάννη για την πολύ σημαντική επιστημονική υποστήριξη τους.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η πειραματική μελέτη και διερεύνηση της προστατευτικής ικανότητας οργανικών επικαλύψεων και αναστολέων διάβρωσης με σκοπό την προστασία του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος (ΧΟΣ). Στο πρώτο μέρος εξετάστηκε η χρησιμοποίηση μιας οργανικής επικάλυψης η οποία περιέχει αναστολείς διάβρωσης, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στην επιφάνεια του οπλισμού όσο και του σκυροδέματος και αξιολογήθηκε η προστασία που μπορεί να προσφέρει από την διάβρωση σε περιβάλλον χλωριόντων. Στο δεύτερο μέρος, εξετάστηκε η χρήση του νιτρικού ασβεστίου σαν αναστολέα διάβρωσης (είτε σαν πρόσμικτος είτε σαν ψεκαζόμενος) σε περιβάλλον χλωριόντων και αξιολογήθηκε η δυνατότητα προστασίας σε σύγκριση με δύο άλλους εμπορικούς αναστολείς διάβρωσης.

Στη διδακτορική διατριβή, καταρχήν, έγινε αναφορά στον όρο σκυρόδεμα και τσιμέντο και αναπτύχθηκαν αναλυτικά οι πρώτες ύλες, τα είδη, οι ιδιότητες, οι παράγοντες που τα επηρεάζουν την ποιότητά τους και οι τρόποι παρασκευής τους. Επίσης, αναλύθηκαν οι παράγοντες που επιδρούν στη διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος, η ανθεκτικότητα τους σκυροδέματος στο περιβάλλον, καθώς και οι μέθοδοι προστασίας του. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη χρήση οργανικών επικαλύψεων, καθώς και αναστολέων διάβρωσης ως τρόπος προστασίας του οπλισμού από τη διάβρωση.

Στο πρώτο μέρος της διατριβής, η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε κατασκευή οπλισμένων κυλινδρικών δοκιμίων τσιμεντοκονίας. Εφαρμόστηκε οργανική επικάλυψη είτε στην επιφάνεια του κονιάματος, είτε στην επιφάνεια του οπλισμού, είτε και στην επιφάνεια του κονιάματος και στην επιφάνεια του οπλισμού. Για λόγους σύγκρισης μελετήθηκε η διάβρωση των χαλύβων σε δοκίμια χωρίς οργανική επικάλυψη. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε επιταχυνόμενες συνθήκες διάβρωσης (θάλαμος αλατονέφωσης), σε ελεγχόμενες συνθήκες σε εργαστηριακό περιβάλλον (μερική εμβάπτιση) και σε αστικό περιβάλλον (στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου).

Η εκτίμηση της προστατευτικής ικανότητας που προσέφερε η οργανική επικάλυψη, εκτιμήθηκε με τις ακόλουθες μεθόδους:

- Μέτρηση ηλεκτροχημικών παραμέτρων διάβρωσης ( $i_{corr}$ ,  $R_p$ ) και δυναμικού Διάβρωσης ( $E_{corr}$ ) των οπλισμών συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον,
- Υπολογισμός της ποσοστιαίας απώλειας μάζας και της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας των οπλισμών.

Στο δεύτερο μέρος της διατριβής, κατασκευάστηκαν οπλισμένα κυβικά δοκίμια με αναλογία τσιμέντο:άμμος:νερό 1:3:0.5 και με αναλογία τσιμέντο:άμμος:νερό 1:3:0.65. Στη μια ομάδα δοκιμίων έχει προστεθεί στη σύσταση του τσιμεντοκονιάματος αναστολέας διάβρωσης ως πρόσμικτο σε δύο διαφορετικές περιεκτικότητες (4g/100g τσιμέντου και 8g/100g τσιμέντου, της ποσότητας του νερού που προστέθηκε), ενώ στις άλλες ομάδες δοκιμίων οπλισμών εγκιβωτισμένων στο σκυρόδεμα, έχουν προστεθεί στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος, ως ψεκαζόμενοι, τέσσερις διαφορετικοί τύποι αναστολέων διάβρωσης, από τους οποίους οι δύο βασίζονται στο Νιτρικό Ασβέστιο και οι άλλοι δύο στη Διμεθυλ-αιθανόλ-αμίνη και στο Νιτρώδες Ασβέστιο.

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε ελεγχόμενες συνθήκες σε εργαστηριακό περιβάλλον (μερική εμπάπτιση σε 3.5% κ.β. NaCl). Η προστατευτική ικανότητα των παραπάνω μεθόδων προστασίας σε σύγκριση με τον χάλυβα χωρίς προστασία εκτιμήθηκε ηλεκτροχημικά με τον προσδιορισμό ηλεκτροχημικών παραμέτρων διάβρωσης. Συγκεκριμένα προσδιορίστηκε:

- Το Δυναμικό διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου (στον οπλισμό)
- Η πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης  $i_{corr}$
- Η αντίσταση γραμμικής πόλωσης  $R_p$
- Η ηλεκτροχημική απώλεια μάζας (στον οπλισμό)

Επιπρόσθετα έγινε σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος. Τέλος, παραγματοποιήθηκε μακροσκοπική και μικροσκοπική παρατήρηση των διαβρωμένων τσιμεντοκονιαμάτων με τη χρησιμοποίηση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

Από την διατριβή αυτή προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η οργανική επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις προσδίδει προστασία στον οπλισμό και το σύστημα με εφαρμογή

της οργανικής επικάλυψης με αναστολέα διάβρωσης (i και ii επικαλυπτικού) τόσο στην επιφάνεια του κονιάματος όσο και στην επιφάνεια του οπλισμού προσέφερε καλύτερη προστασία σε σχέση με τα άλλα δύο συστήματα (εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης με αναστολέα διάβρωσης (i και ii επικαλυπτικού) μόνο στην επιφάνεια του κονιάματος, ή μόνο στην επιφάνεια του οπλισμού.

2. Οι αναστολείς που χρησιμοποιήθηκαν ως πρόσμικτοι στα δοκίμια με αναλογία τσιμέντου/αδρανών/νερό: 1/3/0.5 είχαν καλύτερη προστατευτική δράση απ'ότι οι αναστολείς που χρησιμοποιήθηκαν ως ψεκαζόμενοι, ενώ στα δοκίμια με αναλογία τσιμέντου/αδρανών/νερό: 1/3/0.65 καλύτερη προστατευτική δράση είχαν οι αναστολείς που χρησιμοποιήθηκαν ως ψεκαζόμενοι των Ομάδων III και IV, των οποίων οι αναστολείς διάβρωσης βασίζονται στη Διμεθυλ-αιθανόλ-αμίνη και στο Νιτρώδες Ασβέστιο αντίστοιχα.
3. Σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ο αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο νιτρικό ασβέστιο προσέφερε προστασία είτε χρησιμοποιήθηκε ως πρόσμικτος είτε ως ψεκαζόμενος.

## ABSTRACT

The object of this thesis is the experimental study of protection of steel reinforcement and the increase of mechanical properties of concrete with the use of organic coatings and corrosion inhibitors. The thesis consists of two parts. The first part examined the use of an organic coating containing corrosion inhibitors, which can be used both on the reinforcement surface and the mortar surface, and evaluated the protection it can offer from corrosion in the environment of chlorides. In the second part, the use of calcium nitrate as corrosion inhibitor (either as an admixture or as a spray) was examined in chloride environment and the protection rate was evaluated to two other commercial corrosion inhibitors.

It is done a comprehensive review for concrete and cement and it is developed in detail the factors that affect the properties and their ways of preparation. Also, the factors that influence corrosion of the reinforced concrete, the resistance of the concrete to the environment and the methods of its protection are analyzed. Particular emphasis was put on the use of organic coatings and corrosion inhibitors as a way of steel reinforcement protection.

The experimental process of first part consisted in the construction of reinforced cylindrical cement specimens and reinforced cubic cementspecimens. The protection study was applied to two different types of specimens, which included reinforced concrete specimens. An organic coating was applied either on the surface of the mortar or on the surface of the reinforcement, or on the surface of the mortar and on the surface of the reinforcement. For comparison purposes, the corrosion of steels in non-organic painted specimens was studied.

The experimental process was carried out in accelerated corrosion conditions (salting chamber), under controlled conditions in a laboratory environment (partial immersion) and in an urban environment (in the Zografou Polytechnic School).

The assessment of the protective capability of the organic coating was evaluated by the following methods:

- Measurement of electrochemical corrosion parameters ( $i_{corr}$ ,  $R_p$ ) and corrosion potential ( $E_{corr}$ ) of reinforcements as a function of exposure time to the corrosive environment,
- Calculation of percentage loss of mass and electrochemical mass loss of reinforcements.

In the second part were made specimens with a ratio of cement: sand: water 1: 3: 0.5 and with a ratio of cement: sand: water 1: 3: 0.65. In one group of specimens, the corrosion inhibitor  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  was added in two different ratios (0.4g / 100g of cement and 0.8g / 100g of cement of the amount of water added), while in the other groups of reinforced concrete specimens four different types of corrosion inhibitors have been added to the outer surface of the mortar, two of which are based on calcium nitrate and the other two on dimethylethanolamine and calcium nitrite.

The experimental procedure was performed under controlled conditions in a laboratory environment (partial immersion in 3.5 wt% NaCl). The protective capability of the above protection methods compared to unprotected steel was evaluated electrochemically by the determination of electrochemical corrosion parameters. In particular, it was determined:

- Corrosion potential versus time
- The density of the erosion current  $i_{\text{corr}}$
- Linear polarization resistance  $R_p$
- Electrochemical mass loss

In addition, a mass determination of the mass loss of concrete reinforcement steel was made. Finally, macroscopic and microscopic observation of corroded cement mortars was carried out using a scanning electron microscope (SEM).

From this thesis resulted in the following conclusions:

1. The organic coating that contains corrosion inhibitor in all the cases gives protection to the reinforcement and the system by applying the organic coating with the corrosion inhibitor (i and ii coating) both on the surface of the mortar and on the surface of the reinforcement provided better protection in relation to the other two systems (application of the organic coating (i and ii coating) only on the surface of the mortar, or only on the surface of the reinforcement).
2. The inhibitors that were used as admixtures in cement / sand / water: 1/3/0.5 specimens had a better protective effect than the inhibitors that were used as sprays, while in cement / sand / water: 1/ 3/ 0.65 specimens better protective effect had the inhibitors used as Sprays of Groups III and IV in which corrosion inhibitor was based on dimethylethanolamine and calcium nitrite respectively.

3. In all the cases inhibitor that was based on calcium nitrate provide protection either it was used as admixture either as a spray.

|   |    |
|---|----|
| ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....  | 1  |
| 1. ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ.....   | 2  |
| 1.1. Ορισμός κονιάματος .....   | 2  |
| 1.2. Κατηγορίες κονιαμάτων.....   | 3  |
| 1.3. Ιδιότητες κονιαμάτων.....  | 4  |
| 2. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....   | 6  |
| 2.1 Ορισμός.....  | 6  |
| 2.2. Πρώτες ύλες σκυροδέματος .....   | 8  |
| 2.2.1. Τσιμέντο.....  | 8  |
| 2.2.2. Αδρανή υλικά.....  | 21 |
| 2.2.3. Το νερό ανάμειξης .....  | 25 |
| 2.2.4. Βελτιωτικά πρόσμικτα .....   | 26 |
| 2.2.5. Πρόσθετα συστατικά .....   | 27 |
| 2.3. Ιδιότητες σκυροδέματος.....  | 28 |
| 2.4. Μηχανισμοί φθοράς σκυροδέματος.....  | 32 |
| 3. ΧΑΛΥΒΕΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....  | 38 |
| 3.1. Γενικά για τους χάλυβες .....  | 38 |
| 3.2. Παραγωγή χάλυβων .....   | 40 |
| 3.3. Κατηγοριοποίηση χάλυβων.....   | 41 |
| 3.4. Συγκολλησιμότητα.....  | 47 |
| 3.5. Συνάφεια οπλισμού - σκυροδέματος.....  | 49 |
| 4. ΔΙΑΒΡΩΣΗ .....   | 50 |
| 4.1. Εισαγωγή .....   | 50 |
| 4.2. Διαβρωτικό περιβάλλον.....   | 51 |
| 4.3. Διάβρωση μετάλλων.....   | 53 |
| 4.4. Μορφές διάβρωσης.....  | 54 |
| 4.4.1. Διάβρωση από μηχανική καταπόνηση (stress corrosion cracking) .....         | 55 |
| 4.4.2. Διάβρωση χωρίς μηχανική καταπόνηση.....                                    | 57 |
| 4.4.3. Άλλα είδη διάβρωσης .....  | 61 |
| 4.5. Διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος.....  | 62 |
| 4.6. Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση του σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα ..... | 64 |
| 4.6.1. Το είδος και η δομή του σκυροδέματος.....                                  | 64 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.6.2. Το πάχος επικάλυψης.....  | 65  |
| 4.6.3. Η παρουσία νερού στο σκυρόδεμα .....  | 66  |
| 4.6.4. Η παρουσία ρωγμών .....   | 67  |
| 4.7. Μηχανισμός Διάβρωσης του χάλυβα .....   | 67  |
| 4.7.1. Ενανθράκωση του σκυροδέματος.....   | 70  |
| 4.7.2. Επίδραση χλωριόντων .....   | 75  |
| 4.7.3. Ρωγμές .....  | 82  |
| 4.8. Αποτίμηση βαθμού διάβρωσης σε υπάρχουσες κατασκευές.....  | 84  |
| 5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ .....  | 86  |
| 5.1. Εισαγωγή .....  | 86  |
| 5.2. Μέθοδοι προστασίας από την διάβρωση.....  | 90  |
| 5.2.1 Ηλεκτροχημικές μέθοδοι προστασίας.....   | 90  |
| 5.2.2. Επικαλύψεις σκυροδέματος.....   | 99  |
| 5.2.3. Προσθήκη στο σκυρόδεμα αναστολέων διάβρωσης .....   | 104 |
| 5.2.4. Χρήση ειδικών χαλύβων.....  | 113 |
| 5.2.5. Χρήση ορυκτών πρόσθετων .....   | 117 |
| ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....  | 122 |
| 6. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....   | 123 |
| 7. ΥΛΙΚΑ .....   | 124 |
| 7.1. Χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος .....   | 124 |
| 7.2. Τσιμέντο.....   | 126 |
| 7.3. Αδρανή.....   | 127 |
| 7.4. Νερό .....  | 127 |
| 7.5. Οργανική επικάλυψη και Αναστολείς διάβρωσης.....  | 128 |
| 8. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ<br>ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....  | 130 |
| 8.1. Ηλεκτροχημικές μετρήσεις.....   | 130 |
| 8.1.1. Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης Ecorr.....  | 130 |
| 8.1.2. Ηλεκτροχημικός προσδιορισμός του ρυθμού διάβρωσης με τη μέθοδο της<br>γραμμικής πόλωσης (LPR).....                | 133 |
| 8.1.3. Προσδιορισμός του ρυθμού διάβρωσης μέσω της τεχνικής της γραμμικής<br>πόλωσης (Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας) ..... | 138 |
| 8.1.4. Μέτρηση της απώλειας μάζας.....   | 139 |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| 8.2.      | Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης .....                             | 140 |
| 8.3       | Οπτικός έλεγχος - Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) .....                     | 146 |
| 8.4       | Μετρήσεις αντίστασης σκυροδέματος.....  | 148 |
| 8.5       | Βαθμός προστασίας.....  | 151 |
| 9         | ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΚΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....                      | 153 |
| 9.1.      | Δοκίμια κυλινδρικά τσιμεντοκονιάματος .....                                       | 153 |
| 9.1.1.    | Κατασκευή δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος εκτεθειμένα σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον..... | 155 |
| 9.1.1.1.  | <i>Περιβάλλον έκθεσης</i> .....   | 155 |
| 9.1.1.2.  | <i>Μέθοδοι χαρακτηρισμού</i> .....  | 155 |
| 9.1.2.    | Κατασκευή δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος σε θάλαμο αλατονέφωσης.....                 | 155 |
| 9.1.2.1.  | <i>Περιβάλλον έκθεσης</i> .....   | 156 |
| 9.1.2.2.  | <i>Μέθοδοι χαρακτηρισμού</i> .....  | 158 |
| 9.1.3.    | Κατασκευή δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος σε διάλυμα 3,5% NaCl.....                   | 158 |
| 9.1.3.1.  | <i>Περιβάλλον έκθεσης</i> .....   | 159 |
| 9.1.3.2.  | <i>Μέθοδοι χαρακτηρισμού</i> .....  | 159 |
| 9.2       | Δοκίμια τσιμεντοκονιάματος κυβικά.....  | 162 |
| 9.2.1.    | Δοκίμια με αναλογία τσιμέντου:άμμου:νερού 1:3:0.50 και 1:3:0.65 .....             | 162 |
| 9.2.2.    | Περιβάλλον έκθεσης.....   | 166 |
| 9.2.3.    | Μέθοδοι χαρακτηρισμού .....   | 167 |
| 9.3.      | Δοκίμια άοπλα τσιμεντοκονιάματος διαστάσεων 28 x 20 x 5 εκ.....                   | 169 |
| 10.       | ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....  | 172 |
| 10.1.     | Κατηγορία I: Επίδραση οργανικής επικάλυψης στη διάβρωση οπλισμών.....             | 172 |
| 10.1.1.   | Διάβρωση μακράς διάρκειας στην ατμόσφαιρα .....                                   | 172 |
| 10.1.1.1. | <i>Χρονική εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης</i> .....                              | 172 |
| 10.1.1.2. | <i>Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας</i> .....                           | 175 |
| 10.1.2.   | Επιταχυνόμενη διάβρωση με μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5 % κ.β. NaCl .....       | 177 |
| 10.1.2.1. | <i>Χρονική εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης</i> .....                              | 178 |
| 10.1.2.2. | <i>Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας</i> .....  | 181 |
| 10.1.2.3. | <i>Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας</i> .....                           | 184 |
| 10.1.2.4. | <i>Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης</i> .....                      | 186 |

|   |      |
|---|------|
| 10.1.2.5. Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης.....  | 188  |
| 10.1.3. Επιταχυνόμενη διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης.....  | 192  |
| 10.1.3.1. Χρονική εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης.....  | 192  |
| 10.1.3.2. Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας του οπλισμού.....  | 195  |
| 10.1.4. Μετρήσεις ειδικής αντίστασης.....   | 198  |
| 10.2 Κατηγορία II: Επίδραση αναστολέα διάβρωσης στη διάβρωση οπλισμών.....  | 201  |
| 10.2.1. Επιταχυνόμενη διάβρωση με μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5 % κ.β. NaCl σε τσιμεντοκονιάματα με αναλογία νερού 0,5%.....  | 201  |
| 10.2.1.1. Χρονική εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης.....  | 201  |
| 10.2.1.2. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας.....  | 209  |
| 10.2.1.3. Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας.....   | 216  |
| 10.2.1.4. Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης.....  | 221  |
| 10.2.1.5. Διάχυση ψεκαζόμενου αναστολέα διάβρωσης στο σκυρόδεμα.....  | 222  |
| 10.2.2. Επιταχυνόμενη διάβρωση με μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5 % κ.β. NaCl σε τσιμεντοκονιάματα με αναλογία νερού 0,65%..... | 224  |
| 10.2.2.1. Χρονική εξέλιξη Δυναμικού Διάβρωσης.....  | 224  |
| 10.2.2.2. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας.....  | 228  |
| 10.2.2.3. Σταθμικός προσδιορισμός απώλειας μάζας.....   | 235  |
| 10.3 Επίδραση οργανικής επικάλυψης που περιέχει αναστολέα διάβρωσης στη διάβρωση οπλισμών σε κυβικά δοκίμια.....                | 238  |
| 10.3.1. Κατασκευή κυβικών δοκιμίων με εφαρμογή οργανικής επικάλυψης.....  | 238  |
| 10.3.1.1. Χρονική εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης.....  | 238  |
| 10.3.1.2. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας.....  | 240  |
| 10.3.1.3. Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας.....   | 216  |
| 11. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....   | 250  |
| 11.1 Βαθμός προστασίας οργανικής επικάλυψης.....  | 251  |
| 11.2 Βαθμός προστασίας αναστολέων διάβρωσης.....  | 255  |
| 11.3 Σύγκριση εφαρμογής οργανικής επικάλυψης και αναστολέα διάβρωσης.....   | 259  |
| 12. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....   | 267  |
| 13. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ.....  | 2733 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....  | 2744 |

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

|   |     |
|---|-----|
| Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής διεργασιών παραγωγής τσιμέντου .....                                  | 11  |
| Σχήμα 2.2. Συμβολισμός των διαφόρων τσιμέντων, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1 .....        | 14  |
| Σχήμα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα παρασκευής του τσιμέντου Portland.....                           | 17  |
| Σχήμα 2.4: Σχέση επιτελεστικότητας – διάρκειας ζωής κατασκευών από σκυρόδεμα .....              | 33  |
| Σχήμα 2.5: Μηχανισμοί φθοράς και πιθανός χρόνος εμφάνισης ρωγμών στο σκυρόδεμα.....             | 34  |
| Σχήμα 3.1: Σήμανση χάλυβα οπλισμού Σκυροδέματος με βάση της χώρας παραγωγής .....               | 47  |
| Σχήμα 4.1. Μηχανισμός γαλβανικής διάβρωσης.....   | 60  |
| Σχήμα 4.2: Μηχανισμοί έναρξης διάβρωσης οπλισμού σκυροδέματος .....                             | 63  |
| Σχήμα 4.3: Μηχανισμοί και αποτελέσματα διάβρωσης οπλισμού σκυροδέματος.....                     | 69  |
| Σχήμα 4.4: Διάβρωση οπλισμού σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα.....                                    | 71  |
| Σχήμα 4.5: Απεικόνιση διείσδυσης χλωριόντων .....   | 76  |
| Σχήμα 4.6: Απλοποιημένο προσομοίωμα της διάβρωσης του χάλυβα λόγω επίδρασης χλωριόντων. ....    | 78  |
| Σχήμα 4.7: Επίδραση του λόγου N/T στην διείσδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα...                    | 80  |
| Σχήμα 4.8: Διαφορετική συγκέντρωση χλωριόντων, δημιουργεί διαφορά δυναμικού                     | 82  |
| Σχήμα 4.9: Διάβρωση του οπλισμού σε ρωγμές του σκυροδέματος (ισοδιάβρωση) ..                    | 83  |
| Σχήμα 4.10: Η δημιουργία μακροστοιχείου διάβρωσης του οπλισμού σε μακροστοιχείο με ρωγμές ..... | 84  |
| Σχήμα 4.11: Μέτρηση Δυναμικού του χάλυβα.....   | 85  |
| Σχήμα 5.1.: Διάταξη για επαναλκαλοποίηση του σκυροδέματος.....                                  | 88  |
| Σχήμα 5.2.: Απεικόνιση συστήματος καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενη άνοδο                     | 93  |
| Σχήμα 5.3. : Καθοδική προστασία οπλισμού με εφαρμοζόμενο ρεύμα .....                            | 95  |
| Σχήμα 5.4.: Απεικόνιση συστήματος καθοδικής προστασίας με χρήση ηλεκτρικής πηγής.....           | 96  |
| Σχήμα 5.5. Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτροχημικής επαναλκαλοποίησης σκυροδέματος .....           | 98  |
| Σχήμα 8.1. : Σύστημα τριών ηλεκτροδίων σε ηλεκτροχημικό κελί.....                               | 134 |

|   |     |
|---|-----|
| Σχήμα 8.2: Ανοδική και καθοδική περιοχή των δυναμικών E συναρτήσει της πυκνότητας του ρεύματος.....   | 136 |
| Σχήμα 8.3. Διανυσματική παράσταση της σύνθετης αντίστασης.....  | 142 |
| Σχήμα 8.4. Παράσταση του απλούστερου RC ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος .....  | 144 |
| Σχήμα 8.5. Διάγραμμα Nyquist για ένα απλό ηλεκτροχημικό κελί.....   | 144 |
| Σχήμα 8.6. Μικτό Διάγραμμα Bode για ένα από ηλεκτροχημικό κελί.....   | 145 |
| Σχήμα 8.7. Διάγραμμα λειτουργίας μικροσκοπίου.....  | 147 |
| Σχήμα 8.8. Τρόπος λειτουργίας του Wenner probe .....  | 149 |
| Σχήμα 9.1. Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων τσιμεντοκονίας .....   | 153 |
| Σχήμα 9.2.: Μορφή των κυβικών δοκιμίων.....   | 164 |
| Σχήμα 9.3. Πειραματική διάταξη.....   | 169 |
| Σχήμα 10.1 Δυναμικό διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου για τα δοκίμια εκτεθειμένα σε ατμοσφαιρική διάβρωση .....   | 174 |
| Σχήμα 10.2 Απώλεια μάζας (g) των οπλισμών δοκιμίων και των τεσσάρων ομάδων σε ατμοσφαιρική διάβρωση .....   | 176 |
| Σχήμα 10.3 Απώλεια μάζας (%) οπλισμών δοκιμίων και των τεσσάρων ομάδων σε ατμοσφαιρική διάβρωση (χρόνος έκθεσης 18 μήνες).....  | 176 |
| Σχήμα 10.4 Απώλεια μάζας (%) οπλισμών δοκιμίων και των τεσσάρων ομάδων σε ατμοσφαιρική διάβρωση (χρόνος έκθεσης 24 μήνες).....  | 177 |
| Σχήμα 10.5.: Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε οπλισμένα δοκίμια με οργανική επικάλυψη μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl για διάστημα 960 ημερών..... | 180 |
| Σχήμα 10.6 Ηλεκτροχημική απώλεια για τους οπλισμούς δοκιμίων σε διάλυμα 3,5% NaCl.....  | 184 |
| Σχήμα 10.7 Απώλεια μάζας (g) μετά από 12, 18, 24 και 30 μήνες παραμονής σε διάλυμα 3,5% NaCl.....   | 186 |
| Σχήμα 10.8 Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης μετά από 10 μήνες σε διαβρωτικό περιβάλλον.....  | 187 |
| Σχήμα 10.9 Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης μετά από 18 μήνες σε διαβρωτικό περιβάλλον.....  | 187 |
| Σχήμα 10.10 Δυναμικό Διάβρωσης των οπλισμών δοκιμίων μετά από παραμονή σε θάλαμο αλατονέφωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε διάλυμα 3,5% NaCl....                                  | 194 |

|   |     |
|---|-----|
| Σχήμα 10.11 Απώλεια μάζας (g) των οπλισμών δοκιμίων μετά από 19 ημέρες σε θάλαμο αλατόνεφωσης .....   | 195 |
| Σχήμα 10.12 Απώλεια μάζας (%) σε οπλισμούς δοκιμίων μετά από 19 ημέρες παραμονής σε θάλαμο αλατόνεφωσης.....  | 196 |
| Σχήμα 10.13 Απώλεια μάζας (g) οπλισμών δοκιμίων μετά από 19 ημέρες σε θάλαμο αλατόνεφωσης και 125 και 255 ημέρες σε διάλυμα 3,5% NaCl. ....   | 197 |
| Σχήμα 10.14 Απώλεια μάζας (%) οπλισμών δοκιμίων μετά από 19 ημέρες σε θάλαμο αλατόνεφωσης και 125 και 255 ημέρες σε διάλυμα 3,5% NaCl. ....   | 197 |
| Σχήμα 10.15 Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε οπλισμένα δοκίμια με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl για διάστημα 720 ημερών ..... | 208 |
| Σχήμα 10.16 Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε οπλισμένα δοκίμια με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl για διάστημα 720 ημερών .....  | 209 |
| Σχήμα 10.17 Αντίσταση πόλωσης (Rp) δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα και αναλογία 0,5 συναρτήσει του χρόνου παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον .....  | 212 |
| Σχήμα 10.18 Αντίσταση πόλωσης (Rp) δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα και αναλογία 0,5 συναρτήσει του χρόνου παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον .....   | 212 |
| Σχήμα 10.19 Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,5 .....  | 215 |
| Σχήμα 10.20 Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,5 .....   | 215 |
| Σχήμα 10.21 Απώλεια μάζας (g) των οπλισμών δοκιμίων των δοκιμίων με αναλογία 0,5 μετά από 12, 18 και 24 μήνες .....   | 219 |
| Σχήμα 10.22 Απώλεια μάζας (%) οπλισμών δοκιμίων των δοκιμίων με αναλογία 0,5 μετά από 12, 18 μήνες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον.....   | 220 |
| Σχήμα.10.23 Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε δοκίμια με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,65 μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl.....                  | 227 |
| Σχήμα.10.24 Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε δοκίμια με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,65 μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl.....                   | 227 |

|  |     |
|--|-----|
| Σχήμα 10.25 Αντίσταση πόλωσης (Rp) δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,65 συναρτήσει του χρόνου παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.....   | 231 |
| Σχήμα 10.26 Αντίσταση πόλωσης (Rp) δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,65 συναρτήσει του χρόνου παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον .....   | 231 |
| Σχήμα 10.27. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα με αναλογία 0,65 .....  | 234 |
| Σχήμα 10.28 Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα με αναλογία 0,65 .....  | 234 |
| Σχήμα 10.29 Απώλεια μάζας (g) των οπλισμών δοκιμίων με αναλογία 0,65 μετά από 12, 18 και 24 μήνες.....   | 239 |
| Σχήμα 10.30 Απώλεια μάζας (%) οπλισμών δοκιμίων με αναλογία 0,65 μετά από 12, 18 και 24 μήνες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον .....  | 239 |
| Σχήμα.10.31 Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε κυβικά δοκίμια με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50 μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl.....             | 240 |
| Σχήμα 10.32 Μ.Ο. Αντίστασης Πόλωσης (Rp) συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε κυβικά δοκίμια με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50 μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl.....         | 242 |
| Σχήμα 10.33 Μ.Ο. Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας (g) συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε κυβικά δοκίμια με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50 μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl..... | 244 |
| Σχήμα 10.34 Απώλεια Μάζας (g) μετά από 12, 18 και 24 μήνες έκθεσης σε κυβικά δοκίμια με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50 μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl .....            | 246 |
| Σχήμα 10.35 Απώλεια Μάζας (%) μετά από 12, 18 και 24 μήνες έκθεσης σε κυβικά δοκίμια με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50 μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl.....             | 247 |

|   |      |
|---|------|
| Σχήμα 11.1 Βαθμοί προστασίας της οργανικής επικάλυψης στις 3 ομάδες δοκιμίων στις οποίες εφαρμόστηκε μετά από 12, 18, 24 και 32 μήνες παραμονής σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl.....                                  | 252  |
| Σχήμα 11.2. Βαθμοί προστασίας της οργανικής επικάλυψης στις 3 ομάδες δοκιμίων στις οποίες εφαρμόστηκε μετά από 18 και 24 μήνες παραμονής στην ατμόσφαιρα .....  | 2520 |
| Σχήμα 11.3. Βαθμοί προστασίας της οργανικής επικάλυψης στις 3 ομάδες δοκιμίων στις οποίες εφαρμόστηκε μετά από 19 ημέρες σε θάλαμο αλατονέφωσης και 125 και 255 μήνες παραμονής σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl ..... | 254  |
| Σχήμα 11.4 Ποσοστά προστασίας των αναστολέων διάβρωσης για αναλογία νερού 0,5.....  | 257  |
| Σχήμα 11.5 Ποσοστά προστασίας των αναστολέων διάβρωσης για αναλογία νερού 0,65.....   | 258  |
| Σχήμα 11.6 Ηλεκτροχημική απώλεια για τις ομάδες δοκιμίων με αναλογία 0,5 .....  | 260  |
| Σχήμα 11.7 Ηλεκτροχημική απώλεια για τις ομάδες δοκιμίων με αναλογία 0,65 ....  | 261  |
| Σχήμα 11.8: Διάγραμμα Δυναμικού Διάβρωσης για τις ομάδες δοκιμίων ΨΕΚ IV, ΠΡΟΣΜ.Π 4%, Ο.Ε.τσιμ. και Ο.Ε.οπλ. με αναλογία νερού 0,5.....   | 260  |
| Σχήμα 11.9: Διάγραμμα Αντίστασης Πόλωσης για τις ομάδες δοκιμίων ΨΕΚ IV, ΠΡΟΣΜ.Π 4%, Ο.Ε.τσιμ. και Ο.Ε.οπλ. με αναλογία νερού 0,5.....  | 260  |
| Σχήμα 11.10: Διάγραμμα Ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας (g) για τις ομάδες δοκιμίων ΨΕΚ IV, ΠΡΟΣΜ.Π 4%, Ο.Ε.τσιμ. και Ο.Ε.οπλ. με αναλογία νερού 0,5.....  | 261  |
| Σχήμα 11.11: Διάγραμμα απώλειας μάζας (g) για τις ομάδες δοκιμίων ΨΕΚ IV, ΠΡΟΣΜ.Π 4%, Ο.Ε.τσιμ. και Ο.Ε.οπλ. με αναλογία νερού 0,5 μετά από 12, 18 και 24 μήνες .....   | 262  |
| Σχήμα 11.12: : Ποσοστά προστασίας για τις ομάδες δοκιμίων ΨΕΚ IV, ΠΡΟΣΜ.Π 4%, Ο.Ε.τσιμ. και Ο.Ε.οπλ. με αναλογία νερού 0,5 μετά από 12, 18 και 24 μήνες.....  | 263  |

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

|  |     |
|--|-----|
| Εικόνα 2.1: Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικό προϊόν στη διεργασία παραγωγής τσιμέντου.....                   | 10  |
| Εικόνα 2.2: Διάγραμμα ροής διεργασιών παραγωγής τσιμέντου .....  | 11  |
| Εικόνα 4.1: Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση .....  | 55  |
| Εικόνα 4.2: Διάβρωση οπλισμού .....  | 73  |
| Εικόνα 4.3: Εμφάνιση ρωγμής στο σκυρόδεμα .....  | 83  |
| Εικόνα 7.1: Εγκάρσια τόμη ράβδου S500s Tempcore.....   | 127 |
| Εικόνα 8.1: Μέτρηση αντίστασης τεσσάρων ηλεκτροδίων.....   | 149 |
| Εικόνα 9.1: Θάλαμος αλατονέφωσης.....  | 157 |
| Εικόνα 9.2: Μέτρηση δυναμικού δοκιμίων.....  | 158 |
| Εικόνα 9.3: Πειραματική διάταξη για την διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών μετρήσεων .....                                   | 161 |
| Εικόνα 9.4: Πειραματική διάταξη για την διεξαγωγή των μετρήσεων ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης..... | 162 |
| Εικόνα 9.5 Κυβικό καλούπι απο ανοξείδωτο χάλυβα διαστάσεων 10cm X 10cm...  | 163 |
| Εικόνα 9.6 Ομάδες δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα.....  | 164 |
| Εικόνα 9.7: Ποτενσιοστάτης γραμμικής πόλωσης EG Model 263 .....  | 168 |
| Εικόνα 9.8: Δοκίμια άοπλα τσιμεντοκονιάματος διαστάσεων 28x20x5 εκ.....  | 170 |
| Εικόνα 9.9: Εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης σε άοπλα δοκίμια .....   | 171 |
| Εικόνα 10.1: Ανάλυση SEM σε δοκίμιο της Ομάδας Γ (περιέχει αναστολέα διάβρωσης).....                                   | 189 |
| Εικόνα 10.2: Χαρτογράφηση στοιχείου Ca σε δοκίμιο της Ομάδας Γ (περιέχει αναστολέα διάβρωσης).....                     | 189 |
| Εικόνα 10.3: Χαρτογράφηση στοιχείου N σε δοκίμιο της Ομάδας Γ (περιέχει αναστολέα διάβρωσης).....                      | 190 |
| Εικόνα 10.4: Χαρτογράφηση στοιχείου C σε δοκίμιο της Ομάδας Γ (περιέχει αναστολέα διάβρωσης).....                      | 190 |

|  |     |
|--|-----|
| Εικόνα 10.5: Ανάλυση SEM σε δοκίμιο της Ομάδας Δ (δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης).....                     | 191 |
| Εικόνα 10.6: Χαρτογράφηση στοιχείου Ca σε δοκίμιο της Ομάδας Δ (δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης).....       | 191 |
| Εικόνα 10.7: Χαρτογράφηση στοιχείου C σε δοκίμιο της Ομάδας Δ (δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης).....        | 191 |
| Εικόνα 10.8: Συσκευή μέτρησης της ειδικής αντίστασης σκυροδέματος.....                                       | 198 |
| Εικόνα 10.9: Μέτρηση ειδικής αντίστασης σκυροδέματος .....   | 199 |
| Εικόνα 10.10: Απεικόνιση οπλισμού δοκιμίου αναφοράς με αναλογία 0,5 και ανάλυση EDAX σημείου.....            | 221 |
| Εικόνα 10.11: Απεικόνιση οπλισμού δοκιμίου αναφοράς με ψεκαζόμενο αναστολέα #2 και ανάλυση EDAX σημείου..... | 222 |
| Εικόνα 10.12: Μέτρηση αντίχρευσσης νιτρικών σε δείγματα σκυροδέματος.....                                    | 223 |

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 2.1: Κατηγορίες σκυροδέματος.....  | 7   |
| Πίνακας 2.2: Τύποι τσιμέντου .....   | 14  |
| Πίνακας 2.3: Τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 197-1 .....  | 15  |
| Πίνακας 2.4: Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις τσιμέντων.....   | 16  |
| Πίνακας 2.5: Κατάταξη αδρανών με βάση το μέγεθος του κόκκου .....  | 23  |
| Πίνακας 2.6: Κατηγορίες έκθεσης σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206.....  | 35  |
| Πίνακας 2.7: Οριακές τιμές για κατηγορίες έκθεσης χημικής προσβολής από φυσικά εδάφη και υπόγεια νερά .....  | 37  |
| Πίνακας 3.1: Ονομαστικές διαμέτροι, ονομαστική μάζα και ανοχές για χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος με νευρώσεις.....   | 41  |
| Πίνακας 3.2: Απαιτήσεις μηχανικών ιδιοτήτων για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος.....  | 45  |
| Πίνακας 3.3: Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές για τη χημική σύσταση (περιεκτικότητα % κ.β.) κατά ΕΛΟΤ 10080 .....  | 48  |
| Πίνακας 7.1: Χημική σύσταση των χαλύβδινων ράβδων τύπου S500s Tempcore...  | 125 |
| Πίνακας 7.2: Μηχανικά χαρακτηριστικά των χαλύβδινων ράβδων τύπου S500s....   | 125 |
| Πίνακας 7.3: Χημική σύσταση των χαλύβδινων ράβδων τύπου S500s Tempcore...  | 125 |
| Πίνακας 7.4: Χημική σύσταση τσιμέντου CEM I και CEM II B-M.....  | 126 |
| Πίνακας 7.5: Ορυκτολογική σύνθεση τσιμέντου CEM I και CEM II B-M .....   | 127 |
| Πίνακας 7.6: Κοκκομετρική διάβαθμιση .....   | 127 |
| Πίνακας 7.7: Χημική σύσταση άμμου.....   | 127 |
| Πίνακας 7.8: Χημική σύσταση νερού μίξης των κονιαμάτων/σκυροδεμάτων.....   | 128 |
| Πίνακας 7.9: Φυσικοχημικές παράμετροι νερού ανάμιξης.....  | 128 |
| Πίνακας 8.1: Συσχέτιση μεταξύ τιμών του δυναμικού χαλύβδινου οπλισμού και της κατάστασης του σκυροδέματος .....  | 131 |
| Πίνακας 8.2: Συσχέτιση μεταξύ τιμών του δυναμικού χαλύβδινου οπλισμού και της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87..... | 132 |
| Πίνακας 8.3: Συνήθη ηλεκτρόδια αναφοράς για μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης..  | 132 |
| Πίνακας 8.4: Πιθανότητα διάβρωσης για διάφορα είδη ηλεκτροδίων .....   | 133 |
| Πίνακας 8.5: Εμπειρικός συσχετισμός της αντίστασης του σκυροδέματος που λαμβάνεται με το σύστημα των τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων.....                    | 151 |

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 8.6: Εμπειρικός συσχετισμός της αντίστασης του σκυροδέματος που λαμβάνεται με το σύστημα των δύο βοηθητικών ηλεκτροδίων..... | 151 |
| Πίνακας 9.1: Είδος και σύσταση κυλινδρικών δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος.....  | 154 |
| Πίνακας 9.2: Είδος και σύσταση δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα .....  | 165 |
| Πίνακας 9.3: Είδος και σύσταση δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα.....  | 166 |
| Πίνακας 10.1: Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης σε ατμοσφαιρική διάβρωση.....   | 173 |
| Πίνακας 10.2: Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων σε ατμοσφαιρική διάβρωση (χρόνος έκθεσης 18 μήνες) .....                               | 175 |
| Πίνακας 10.3: Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων σε ατμοσφαιρική διάβρωση (χρόνος έκθεσης 24 μήνες) .....                               | 175 |
| Πίνακας 10.4: Δυναμικό διάβρωσης για τις 4 ομάδες δοκιμίων μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl .....                           | 178 |
| Πίνακας 10.5: Τιμές ηλεκτροχημικής απώλειας για τις 4 ομάδες δοκιμίων σε διάλυμα 3,5% NaCl .....                                     | 183 |
| Πίνακας 10.6: Απώλεια μάζας των δοκιμίων μετά από 12 μήνες .....   | 185 |
| Πίνακας 10.7: Απώλεια μάζας των δοκιμίων μετά από 18 μήνες .....   | 185 |
| Πίνακας 10.8: Απώλεια μάζας των δοκιμίων μετά από 24 μήνες .....   | 185 |
| Πίνακας 10.9: Απώλεια μάζας των δοκιμίων μετά από 30 μήνες .....   | 185 |
| Πίνακας 10.10: Τιμές της αντίστασης πόλωσης (Rp) από την ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης.....                        | 188 |
| Πίνακας 10.11: Τιμές δυναμικού διάβρωσης για τις 4 ομάδες δοκιμίων .....   | 193 |
| Πίνακας 10.12: Απώλεια μάζας των δοκιμίων μετά από 19 ημέρες σε θάλαμο αλατονέφωσης .....  | 195 |
| Πίνακας 10.13: Απώλεια μάζας των δοκιμίων μετά από 125 ημέρες παραμονής στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl .....                             | 196 |
| Πίνακας 10.14: Απώλεια μάζας των δοκιμίων μετά από 255 ημέρες παραμονής στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl.....                              | 197 |
| Πίνακας 10.15: Μετρήσεις της ειδικής αντίστασης στην 1 <sup>η</sup> ομάδα δοκιμίων.....  | 199 |
| Πίνακας 10.16: Μετρήσεις της ειδικής αντίστασης στην 2 <sup>η</sup> ομάδα δοκιμίων.....  | 200 |
| Πίνακας 10.17: Τιμές δυναμικού διάβρωσης για τις ομάδες δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,5 .....            | 202 |
| Πίνακας 10.18: Τιμές δυναμικού διάβρωσης για τις ομάδες δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,5.....              | 205 |

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 10.19: Τιμές αντίστασης πόλωσης (Rp) για τις ομάδες δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,5 .....  | 210 |
| Πίνακας 10.20: Τιμές αντίστασης πόλωσης (Rp) για τις ομάδες δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,5 .....   | 211 |
| Πίνακας 10.21: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,5.....           | 213 |
| Πίνακας 10.22: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,5.....            | 214 |
| Πίνακας 10.23: Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με αναλογία 0,5 στους 12 μήνες.....   | 217 |
| Πίνακας 10.24: Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με αναλογία 0,5 στους 18 μήνες.....   | 218 |
| Πίνακας 10.25: Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με αναλογία 0,5 στους 24 μήνες.....   | 219 |
| Πίνακας 10.26: Αποτελέσματα μετρήσεων Νιτρικών.....  | 223 |
| Πίνακας 10.27: Τιμές δυναμικού διάβρωσης για τις ομάδες δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,65.....      | 225 |
| Πίνακας 10.28: Τιμές δυναμικού διάβρωσης για τις ομάδες δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,65.....       | 226 |
| Πίνακας 10.29: Τιμές αντίστασης πόλωσης (Rp) για τις ομάδες δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,65 ..... | 229 |
| Πίνακας 10.30: Τιμές αντίστασης πόλωσης (Rp) για τις ομάδες δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,65 .....  | 230 |
| Πίνακας 10.31: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,65.....          | 232 |
| Πίνακας 10.32: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία 0,65.....           | 233 |
| Πίνακας 10.33: Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με αναλογία 0,65 στους 12 μήνες.....  | 235 |
| Πίνακας 10.34: Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με αναλογία 0,65 στους 18 μήνες.....  | 236 |
| Πίνακας 10.35: Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με αναλογία 0,65 στους 24 μήνες.....  | 237 |

|   |     |
|---|-----|
| Πίνακας 10.36: Τιμές του μέσου όρου των δυναμικών διάβρωσης για τις ομάδες κυβικών δοκιμίων με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50..... | 239 |
| Πίνακας 10.37: Τιμές της αντίστασης πόλωσης (Rp) για τις ομάδες κυβικών δοκιμίων με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50.....            | 241 |
| Πίνακας 10.38: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών κυβικών δοκιμίων με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50..                           | 243 |
| Πίνακας 10.39: Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης με αναλογία νερού 0,50 στους 12 μήνες.....                                | 245 |
| Πίνακας 10.40: Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης με αναλογία νερού 0,50 στους 18 μήνες .....                               | 245 |
| Πίνακας 10.41: Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης με αναλογία νερού 0,50 στους 24 μήνες .....                               | 246 |

# ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

# 1. ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

## 1.1. Ορισμός κονιάματος

Κονίαμα ονομάζεται το μείγμα που αποτελείται από λεπτόκοκκα αδρανή (μέγιστη διάμετρος κόκκου αδρανούς 4 mm), κονίες, ως συνδετική ύλη και νερό επεξεργασίας, έχει δε βασική ιδιότητα να σκληρύνεται με τον χρόνο, ενώ κατά την διάρκεια της δόμησης έχει ρευστή μορφή.

Κονίες ονομάζονται τα υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται ως συνδετική ύλη των αδρανών υλικών. Είναι στερεά με τη μορφή σκόνης ή ρευστά, τα οποία όταν αναμιχθούν με ένα υγρό, που είναι συνήθως το νερό, μεταβάλλονται σε εύπλαστο πολτό. Ο πολτός αυτός αποκτά την οριστική μορφή και την τελική αντοχή του με την πάροδο του χρόνου, αφού περάσει διαδοχικά από το στάδιο της πήξης και το στάδιο της σκλήρυνσης.

Η πήξη της κονίας, που συνίσταται στη μεταβολή του ιξώδους της και στη μετάπτωση από μια ημίρευστη κατάσταση σε κατάσταση αναλλοίωτου σχήματος, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των μηχανικών αντοχών, η οποία ολοκληρώνεται με την πάροδο του χρόνου και την επίδραση διαφόρων φυσικοχημικών φαινομένων. Η διάρκεια της πήξης, η οποία χαρακτηρίζεται από τον αρχικό και τον τελικό χρόνο πήξης, προσδιορίζεται με διάφορες μεθόδους σύμφωνα με τον αντίστοιχο κανονισμό για κάθε κονία.

Σκλήρυνση είναι το φαινόμενο, το οποίο ακολουθεί την πήξη, οπότε ο πολτός μεταβάλλεται σε λίθωμα και αποκτά την τελική αντοχή του.

Οι κονίες διακρίνονται:

Ανάλογα με την προέλευσή τους σε:

**α) Φυσικές.** Είναι οι κονίες, οι οποίες υπάρχουν στη φύση και χρησιμοποιούνται αυτούσιες όπως π.χ. η θηραϊκή γη κ.ά.

**β) Τεχνητές.** Είναι οι κονίες, οι οποίες παρασκευάζονται με ειδικές κατεργασίες από φυσικές πρώτες ύλες, όπως π.χ. η άσβεστος, η άσφαλτος κ.ά.

Ανάλογα με τη φύση τους σε :

**α) Ανόργανες.** Ανόργανες κονίες είναι π.χ. η άσβεστος, η γύψος, το τσιμέντο κ.ά.

**β) Οργανικές.** Οργανικές κονίες είναι π.χ. η άσφαλτος, οι ρητίνες κ.ά.

Ανάλογα με τον τρόπο πήξης και σκλήρυνσής τους σε:

**α) Αερικές.** Αερικές είναι οι κονίες, οι οποίες πήζουν και σκληρύνονται στον ατμοσφαιρικό αέρα αποδίδοντας νερό και συντηρούνται μόνο στο περιβάλλον του. Είναι υδατοδιαλυτές, δηλαδή διαλύονται στο νερό ή ακόμα και σε περιβάλλον με αυξημένη υγρασία. Παραδείγματα τέτοιων κονιών είναι οι πηλοί, η άσβεστος, η γύψος, η μαγνησιακή κονία κ.ά.

**β) Υδραυλικές.** Υδραυλικές είναι οι κονίες, οι οποίες πήζουν και σκληραίνουν τόσο στον αέρα, όσο και μέσα στο νερό ή σε υγρό περιβάλλον, όπως η υδραυλική άσβεστος, η ρωμαϊκή κονία, το φυσικό τσιμέντο, η τεχνητή κονία Portland, τα ποζολανικά τσιμέντα, η θηραϊκή γη κ.ά.. Δεν διαλύονται στο νερό, διαφέρουν όμως μεταξύ τους ως προς την πήξη και τη σκλήρυνση. Για παράδειγμα η υδραυλική άσβεστος πήζει και σκληραίνει αρχικά στον αέρα, μετά όμως από ορισμένο χρονικό διάστημα είναι δυνατόν να διατηρηθεί στο νερό, όπου και συνεχίζεται η σκλήρυνση, ενώ το τσιμέντο μετά την ανάμιξή του με νερό πήζει και σκληραίνει και στον αέρα και στο νερό.

Η ιδιότητα των υδραυλικών κονιών να πήζουν και να σκληραίνουν μέσα στο νερό, όταν είναι με τη μορφή λεπτών κόκκων και αναμιχθούν με νερό, ονομάζεται υδραυλικότητα. Η υδραυλικότητα οφείλεται στην ύπαρξη των οξειδίων  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , τα οποία ονομάζονται υδραυλικοί συντελεστές, στη χημική σύσταση των υδραυλικών κονιών. (Κορωνάιος Α., 2006)

## 1.2. Κατηγορίες κονιαμάτων

Ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη κονία, τα κονιάματα διακρίνονται σε :

α) αερικά κονιάματα (ασβεστοκονίαμα, πηλοκονίαμα, ασβεστομαρμαροκονίαμα)

β) υδραυλικά κονιάματα (τσιμεντοκονιάματα)

γ) οργανικά κονιάματα (πλαστικά κονιάματα)

δ) ειδικά κονιάματα (κόλλες)

Ανάλογα με τη μηχανική αντοχή τους διακρίνονται σε :

α) χαμηλής αντοχής, δηλαδή κονιάματα με καμία απαίτηση αντοχής (πηλοκονίαμα, ασβεστοκονίαμα κ.λ.π.)

β) μέσης αντοχής, δηλαδή κονιάματα με αντοχή  $25 \text{ Kg/cm}^2$  περίπου (ασβεστοτσιμεντοκονίαμα κ.λ.π.)

γ) υψηλής αντοχής, δηλαδή κονιάματα με αντοχή  $100 \text{ Kg/cm}^2$  περίπου (τσιμεντοκονίαμα, οργανικό κονίαμα κ.λ.π.)

Βασικοί παράγοντες της ποιότητας του κονιάματος είναι η κοκκομετρική διαβάθμιση της άμμου (ώστε να επιτυγχάνεται ο μικρότερος δυνατός όγκος κενών), η κατάλληλη αναλογία της ποσότητας της κονιάς προς την άμμο, η μορφή των κόκκων της άμμου και το ποσοστό του νερού της επεξεργασίας.

Τα κονιάματα χρησιμοποιούνται γενικά ως συνδετικά υλικά, ως πρώτες ύλες για την κατασκευή τεχνητών λίθων, ως επικαλυπτικά και ως μονωτικά υλικά.

Ο έλεγχος καταλληλότητας ενός κονιάματος αφορά την αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό, την εργασιμότητά του, την ικανότητα συγκράτησης του νερού της επεξεργασίας και τις αναλογίες σύνθεσης. Με πρόσθετα επιτυγχάνεται βελτίωση των ιδιοτήτων των κονιαμάτων.

Τα συνηθέστερα κονιάματα που χρησιμοποιούνται στο χτίσιμο είναι τα ασβεστοκονιάματα, τα τσιμεντοκονιάματα, τα ασβεστοτσιμεντοκονιάματα και τα μαρμαροκονιάματα.

### **1.3. Ιδιότητες κονιαμάτων**

Η ανάμειξη των υλικών για την παρασκευή ενός κονιάματος γίνεται είτε μηχανικά (μικρές μπετονιέρες) είτε με τα χέρια. Για να αποφευχθεί το γρήγορο στέγνωμα του κονιάματος, οι οπτόπλινθοι, οι πέτρες ή άλλα υλικά της τοιχοποιίας πρέπει, ανάλογα με την απορροφητικότητά τους και την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, να καταβρέχονται προηγουμένως, ώστε να προκύψει απόλυτη πρόσφυση με το κονίαμα.

Σε περίπτωση θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατώτερης των 4 °C, πρέπει να διακόπτεται κάθε εργασία παρασκευής και χρήσης κονιάματος.

Τα κονιάματα έχουν πολλαπλές επιδράσεις στην τοιχοποιία και σχετίζονται με την:

- Επίδραση στη διεξαγωγή και την αποτελεσματικότητα των εργασιών  
Ένα καλής ποιότητας κονίαμα (π.χ. τσιμεντοκονίαμα) διευκολύνει την διεργασία δόμησης και μειώνει τον χρόνο κατασκευής.
- Αντοχή των κονιαμάτων  
Η αντοχή των κονιαμάτων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αντοχή των τοιχοποιιών. Υπερβολική όμως αντοχή κονιάματος μπορεί να προκαλέσει ρηγματώσεις λόγω συστολής.
- Αντίσταση σε παγετό  
Ο μεγαλύτερος κίνδυνος από παγετό υφίσταται στο στάδιο του κτισίματος, οπότε απαιτείται επαρκής μόνωση και προστασία.
- Δημιουργία ρωγμών  
Ισχυρά κονιάματα μπορεί να προκαλέσουν ρηγματώσεις κατά τις κινήσεις της τοιχοποιίας. Αντίθετα μαλακότερα κονιάματα, έχοντας μεγαλύτερη ευκαμψία, παρουσιάζουν μόνο τριχοειδείς ρωγμές.
- Δημιουργία εξανθημάτων  
Εξανθήματα ενδέχεται να εμφανιστούν από διαλυτά άλατα. Ο κίνδυνος προέρχεται από την άμμο και για αυτό πρέπει να αποφεύγεται η χρήση θαλάσσιας άμμου.

## 2. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

### 2.1 Ορισμός

Σκυρόδεμα είναι ένα τεχνητό δομικό υλικό που σχηματίζεται από την ανάμιξη τσιμέντου, χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών και νερού (με ή χωρίς την ενσωμάτωση των υλικών που χαρακτηρίζονται πρόσθετα και βελτιωτικά), το οποίο αναπτύσσει τις ιδιότητές του με σκλήρυνση της πάστας του τσιμέντου (τσιμέντο και νερό).

Ο όρος αδρανή περιλαμβάνει γενικά την άμμο, το γαρμπίλι και τα σκύρα ή χαλίκια. Με το νέο Ευρωπαϊκό Πρότυπο (EN 206), προβλέπεται κατά την παρασκευή του σκυροδέματος και η προσθήκη και άλλων ομάδων συστατικών (βελτιωτικά πρόσθετα και πρόσθετα συστατικά), οι οποίες τροποποιούν συγκεκριμένες ιδιότητες του σκυροδέματος. (Μοροπούλου Α., 1996)

Η ποιότητα του σκυροδέματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των υλικών από τα οποία συντίθεται, αλλά και από άλλους παράγοντες όπως η αναλογία και ο τρόπος ανάμιξης τους, η κατασκευή των καλουπιών και η συμπύκνωση του σκυροδέματος μέσα στα καλούπια.

Για να παρασκευασθεί ένα καλής ποιότητας σκυρόδεμα, εξίσου σημαντική με την καλή διαλογή και σύνθεση των συστατικών του, είναι η παρασκευή του, η διάστρωση του και η συντήρησή του σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές. Στον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος ΚΤΣ-2016, ο οποίος εγκρίθηκε με τη με αρ. Γ.Δ.Τ.Υ./οικ.3328/12.05.16 Απόφαση του Υπουργού, Μεταφορών και Δικτύων και αποτελεί αναθεώρηση του ΚΤΣ-1997, δίνονται λεπτομερείς οδηγίες, καθώς και πληροφορίες για τον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος.

Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται σε ένα αρκετά εκτεταμένο εύρος διαφορετικών ποιοτήτων για το σύνολο σχεδόν των κατασκευαστικών έργων, καθώς είναι εύκολο να κατασκευασθεί, να σχηματοποιηθεί, έχει χαμηλό κόστος και υψηλή αντοχή στη θλίψη. Η σπουδαιότητα των ιδιοτήτων του σκυροδέματος στην ασφάλεια ενός δομικού έργου είναι διαφορετική και εξαρτάται από το είδος της κατασκευής, το περιβάλλον που αυτή θα εκτεθεί και την ειδική χρήση που αυτή θα έχει.

Το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί ένα σύνθετο υλικό και αξιοποιεί τις ιδιότητες τόσο του τσιμέντου όσο και του οπλισμού. Η αντοχή σε θλίψη οφείλεται στην αντοχή του τσιμέντου και τη συνάφειά του με τα αδρανή, ενώ η αντοχή σε κάμψη οφείλεται στον οπλισμό που περιέχεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος.

Οι νεότεροι κανονισμοί ορίζουν κατηγορίες σκυροδέματος, με βάση την χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή,  $f_{ck}$ . Οι κατηγορίες σκυροδέματος σύμφωνα με τον νέο Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 2.1. Κατηγορίες σκυροδέματος**

| Κατηγορία σκυροδέματος | $f_{ck,κυλ.}$ (MPa) | $f_{ck,κύβου}$ (MPa) |
|------------------------|---------------------|----------------------|
| <b>C8/10</b>           | <b>8</b>            | <b>10</b>            |
| <b>C12/15</b>          | <b>12</b>           | <b>15</b>            |
| <b>C16/20</b>          | <b>16</b>           | <b>20</b>            |
| <b>C20/25</b>          | <b>20</b>           | <b>25</b>            |
| <b>C25/30</b>          | <b>25</b>           | <b>30</b>            |
| <b>C30/37</b>          | <b>30</b>           | <b>37</b>            |
| <b>C35/45</b>          | <b>35</b>           | <b>45</b>            |
| <b>C40/50</b>          | <b>40</b>           | <b>50</b>            |
| <b>C45/55</b>          | <b>45</b>           | <b>55</b>            |
| <b>C50/60</b>          | <b>50</b>           | <b>60</b>            |

Ο πρώτος αριθμός κάθε κατηγορίας ορίζει την χαρακτηριστική αντοχή κυλίνδρου ( $f_{ck}$ ), ενώ ο δεύτερος την χαρακτηριστική αντοχή κύβου ( $f_{ck,cube}$ ) σε MPa, στις 28 ημέρες.

Το ειδικό βάρος του σκυροδέματος μεταβάλλεται ανάλογα με τα αδρανή και το είδος του τσιμέντου που έχουν χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή του. Με βάση το φαινόμενο ειδικό βάρος το σκυρόδεμα διακρίνεται σε :

- Σύνηθες σκυρόδεμα με πυκνότητα  $\rho = 2200 - 2,600 \text{ kg/m}^3$ ,
- Ελαφροβαρές σκυρόδεμα με πυκνότητα  $\rho = 300 - 1850 \text{ kg/m}^3$ ,

- Βαρύ σκυρόδεμα με πυκνότητα  $\rho > 2600 \text{ kg/m}^3$ .

Το σκυρόδεμα που μόλις έχει παρασκευασθεί περιέχοντας όλα τα συστατικά του και το οποίο είναι ακόμα σε πλαστική κατάσταση δυνάμενο να συμπυκνωθεί και να μορφοποιηθεί στα καλούπια, ονομάζεται νωπό σκυρόδεμα, ενώ σκληρυμένο σκυρόδεμα είναι το σκυρόδεμα το οποίο βρίσκεται σε στερεά κατάσταση και έχει ήδη αναπτύξει αντοχές.

Επιτόπου παρασκευασμένο σκυρόδεμα είναι αυτό που δημιουργείται στον τόπο της εφαρμογής. Το έτοιμο σκυρόδεμα είναι αυτό που έχει παρασκευασθεί σε ένα σταθερό ή κινούμενο αναμικτήρα και προσάγεται φρέσκο στον τόπο της εφαρμογής του.

Κανονικού βάρους σκυρόδεμα είναι αυτό που έχει μία πυκνότητα μεταξύ 2100 και 2600 Kg/m<sup>3</sup>, ενώ ελαφροβαρές είναι το σκυρόδεμα με πυκνότητα μεταξύ 800 και 2100 Kg/m<sup>3</sup> που προκύπτει από την χρησιμοποίηση ελαφροβαρών αδρανών και βαρύ σκυρόδεμα όταν η πυκνότητα του είναι μεγαλύτερη των 2600 Kg/m<sup>3</sup>.

Επίσης, υψηλών αντοχών είναι το σκυρόδεμα με θλιπτικές αντοχές μεγαλύτερες της τάξης C55/67 στην περίπτωση, του κανονικού βάρους και του βαρέως σκυροδέματος και LC55/60 για την περίπτωση του ελαφροβαρούς σκυροδέματος.

Το είδος του σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από πολλούς παράγοντες μερικοί από τους οποίους είναι το περιβάλλον χρήσης, το είδος της κατασκευής και οι μηχανικές καταπονήσεις που θα υφίσταται. Επομένως, για την αποφυγή αστοχίας σε μια κατασκευή απαιτείται η χρήση καταλλήλου τύπου σκυροδέματος.

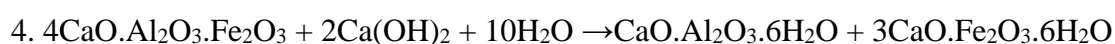
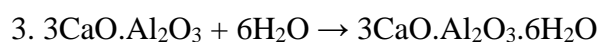
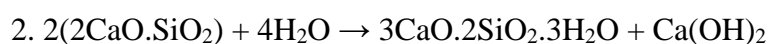
## **2.2. Πρώτες ύλες σκυροδέματος**

### **2.2.1. Τσιμέντο**

Τσιμέντο είναι μια υδραυλική κονία, δηλαδή ένα λεπτοαλεσμένο ανόργανο υλικό, που αποτελείται κυρίως από ενώσεις οξειδίου του ασβεστίου, οξειδίου του πυριτίου, οξειδίου του αργιλίου και οξειδίου του σιδήρου. Όταν αναμειχθεί με νερό σχηματίζει μια πάστα που λόγω των αντιδράσεων ενυδάτωσης πήζει και σκληρύνεται αποκτώντας συνδετικές ικανότητες και ανθεκτικότητα στο χρόνο. Μετά την

σκλήρυνση, δεν διαλύεται στο νερό και διατηρεί την αντοχή και τη σταθερότητά του ακόμη και μέσα στο νερό. (Μπατής Γ., 2006)

Οι βασικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την προσθήκη νερού στο τσιμέντο είναι οι ακόλουθες:



Από τα σχηματιζόμενα σύμφωνα με τις παραπάνω αντιδράσεις προϊόντα, η στερεότητα του σκυροδέματος οφείλεται στο **3CaO·2SiO<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O** και η αλκαλική φύση του στο **Ca(OH)<sub>2</sub>**.

Στη χημεία του τσιμέντου, ακολουθούνται συχνά οι εξής συντμήσεις για κωδικοποίηση των βασικών του συστατικών:

C=CaO, S=SiO<sub>2</sub>, A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, F=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, H=H<sub>2</sub>O, M=MgO

Η ανάμιξη του τσιμέντου με άμμο και νερό δημιουργεί την κονία του τσιμέντου (τσιμεντοκονίαμα). Το τσιμέντο που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος είναι βιομηχανικό κοκκώδες υλικό με τη μορφή σκόνης.

Όταν αναμειχθεί με κατάλληλη αναλογία αδρανών και νερού, μπορεί να δώσει σκυρόδεμα ή κονίαμα, το οποίο διατηρεί την εργασιμότητά του για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, αποκτά συγκεκριμένα επίπεδα αντοχών σε συνάρτηση με το χρόνο και διατηρεί τη σταθερότητα του όγκου.

Το τσιμέντο συνδυάζει μεγάλη υδραυλική ικανότητα και υψηλές αντοχές, γι' αυτό έχει ευρεία χρήση στις δομικές κατασκευές, όπως επίσης και στα υδραυλικά έργα. (Κορωνάιος Α., 2006)

### Συστατικά τσιμέντου

Το τσιμέντο καλύπτεται από το πρότυπο EN 197-1 και είναι μια τεχνητή λεπτόκοκκη κονία, η οποία παρασκευάζεται με λεπτή άλεση του κλίνκερ. Συνίσταται από τα κύρια συστατικά του, από τα δευτερεύοντα συστατικά του, από το θειικό ασβέστιο

και τα πρόσθετα. Για την παρασκευή του χρησιμοποιούνται ασβεστολιθικά πετρώματα σε ποσοστό περίπου 75-80% και αργιλικά πετρώματα σε ποσοστό περίπου 20-25%.



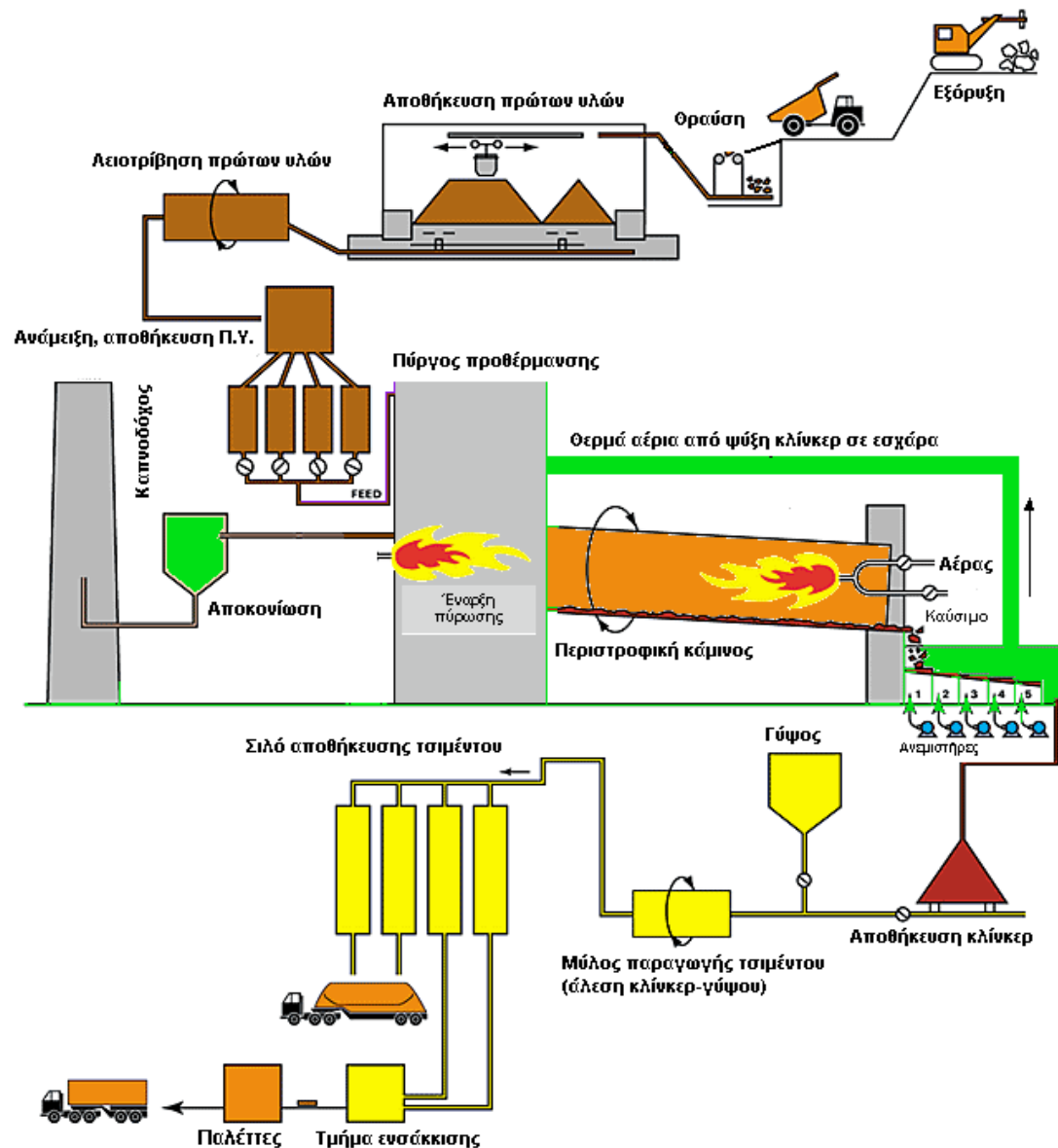
**Εικόνα 2.1** Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικό προϊόν στη διεργασία παραγωγής Τσιμέντου

Το μείγμα των πρώτων υλών (θραυσμένος ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα, χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομετάλλευμα, βωξίτης, κ.α.) αναμειγνύονται σε κατάλληλη αναλογία και λειοτριβούνται. Το λειοτριβημένο μείγμα, το οποίο ονομάζεται «φαρίνα», υφίσταται πυρομεταλλουργική κατεργασία μέσα σε περιστροφική κάμινο (rotary kiln). Οι λειοτριβημένες πρώτες ύλες, με τη χρήση καυσίμων (φυσικό αέριο, πετρέλαιο, γαιάνθρακες ή και εναλλακτικά καύσιμα), θερμαίνονται στην περιστροφική κάμινο, σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, με φυσικοχημικές διεργασίες, μετατρέπονται σε ένα υλικό γκριζοπράσινου χρώματος μορφής σφαιριδίων διαμέτρου 10-25 mm, το οποίο ονομάζεται κλίνκερ τσιμέντου. (Τσακαλάκης Κ., 2010)

Συνεπώς κλίνκερ ονομάζεται το προϊόν που προκύπτει από την όπτηση μίγματος ασβεστολιθικών και αργιλοπυριτικών πετρωμάτων. Οι ποσότητες των πρώτων υλών που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτώνται από τις χημικές και ορυκτολογικές τους ιδιότητες, καθώς και από τις απαιτήσεις του κλίνκερ που θα παραχθεί. Οι αναλογίες των πρώτων υλών καθορίζονται με τη βοήθεια τριών δεικτών ποιότητας κλίνκερ: του δείκτη κορεσμού με άσβεστο LSF (Lime Saturation Factor), του πυριτικού δείκτη SR

(Silica Ratio) και του αργλικού δείκτη AR (Alumina Ratio).

Η παραγωγή κλίνκερ ομοιόμορφης ποιότητας εξασφαλίζεται με την καλή ανάμειξη των πρώτων υλών στην τροφοδοσία του κυκλώματος θραύσης και λειοτρίβησης. (Τσακαλάκης Κ., 2010)



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής διεργασιών παραγωγής τσιμέντου (Τσακαλάκης)

Ως κύρια συστατικά, εκτός του κλίνκερ (K) το οποίο έχει και τον σημαντικότερο ρόλο, χρησιμοποιούνται η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων (S), διάφορα ποζολανικά υλικά φυσικά (P) ή τεχνητά (Q), διάφορες πυριτικές τέφρες (V) ή ασβεστικές (W), burnt shale (T), ασβεστόλιθος (L) και πυριτική παιπάλη (D).

Τα **δευτερεύοντα συστατικά** επιτρέπεται να προστεθούν σε μικρά ποσοστά (minor additional constituents-mac) μέσα στο τσιμέντο και σε αυτά περιλαμβάνονται και τα υλικά που είναι γνωστά και ως γεμιστικά (φίλερς –fillers). Επιτρέπεται η ενσωμάτωση των δευτερευόντων συστατικών έως 5% κατά βάρος στο τσιμέντο.

Τα **Fillers** είναι ειδικά επιλεγμένα φυσικά ή τεχνητά ανόργανα ορυκτά υλικά τα οποία μετά από κατάλληλη προετοιμασία που στοχεύει στη διαμόρφωση της κοκκομετρικής τους κατανομής, βελτιώνουν φυσικές ιδιότητες του τσιμέντου όπως π.χ. είναι η εργασιμότητά του, ενώ παράλληλα δεν αυξάνουν την απαίτησή του σε νερό και δεν επηρεάζουν αρνητικά την ανθεκτικότητα των σκυροδεμάτων ή των κονιαμάτων. Είναι αδρανή ή έχουν ασθενείς υδραυλικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ή ποζολανικές ιδιότητες χωρίς να πρέπει να υπακούουν σε συγκεκριμένες απαιτήσεις.

Το **θειικό ασβέστιο** προστίθεται στα άλλα συστατικά του τσιμέντου κατά την τελική άλεση του κλίνκερ με σκοπό να ρυθμίσει την πήξη του τσιμέντου. Το ακριβές ποσοστό προσθήκης εξαρτάται από την περιεκτικότητα των κύριων συστατικών σε SO<sub>3</sub> καθώς και από τα θειικά του καυσίμου. Το θειικό ασβέστιο μπορεί να προστεθεί κυρίως ως γύψος, που είναι και η περισσότερο συνηθισμένη μορφή.

Ως **πρόσθετα** χαρακτηρίζονται τα συστατικά που προστίθενται στο τσιμέντο και δεν ανήκουν σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες και έχουν σκοπό τη βελτίωση είτε της παραγωγικής διαδικασίας είτε των ιδιοτήτων του τσιμέντου. Η ποσότητα των προσθέτων δεν πρέπει να υπερβαίνει σε ξηρή βάση το 1% κ.β. του τσιμέντου για ανόργανα πρόσθετα ή το 0.5% κ.β. για οργανικά πρόσθετα. Τα πρόσθετα αυτά δεν πρέπει να προκαλούν διάβρωση του οπλισμού ή να επιβαρύνουν τις ιδιότητες του τσιμέντου καθώς και των σκυροδεμάτων ή κονιαμάτων που προκύπτουν από αυτό. (Τσίμας Σ., 2001)

Τα τσιμέντα περιέχουν προσμίξεις, οι οποίες με τη φυσική ή χημική δράση τους επηρεάζουν τις ιδιότητες του τσιμέντου.

Οι προσμίξεις που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι :

1. Φυσικές ποζολάνες
2. Τεχνητές ποζολάνες όπως :

- α. Ιπτάμενες τέφρες
- β. Πυριτική παιπάλη
- 3. Φυσικοί ηφαιστειακοί λίθοι
- 4. Σκωρίες υψικαμίνων
- 5. Τέφρα κελύφους ρυζιού

### **Τύποι τσιμέντου**

Τα διάφορα είδη τσιμέντου διακρίνονται ανάλογα με τη σύστασή τους συνήθως σε: Τσιμέντα Πόρτλαντ (Συνήθη τσιμέντα Πόρτλαντ και Λευκά τσιμέντα), Ποζολανικά, Θειομεταλλουργικά και Αργιλικά. Ανάλογα με τη χρήση τους διακρίνονται σε Τσιμέντα οργανικών σχιστολίθων, Υδροφόβα τσιμέντα, Διογκούμενα τσιμέντα και Τσιμέντα βαθέων γεωτρήσεων.

Στο πλαίσιο της έκδοσης κοινών Ευρωπαϊκών κανονισμών για όλες τις χώρες της CEN (Committee Europeenne de Normalisation) στην οποία μετέχει και η Ελλάδα, έχουν διαμορφωθεί σειρές προτύπων που αφορούν το τσιμέντο και το σκυρόδεμα. Τα Ευρωπαϊκά πρότυπα EN197-1: Τσιμέντο Μέρος 1: “Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα” και EN 197-2: Τσιμέντο Μέρος 2: “Αξιολόγηση συμμόρφωσης”, έχουν επικυρωθεί από τον ΕΛΟΤ και έχουν τεθεί σε ισχύ στην Ελλάδα από το 2001 (ΕΛΟΤ EN 197-1 και ΕΛΟΤ EN 197-2).

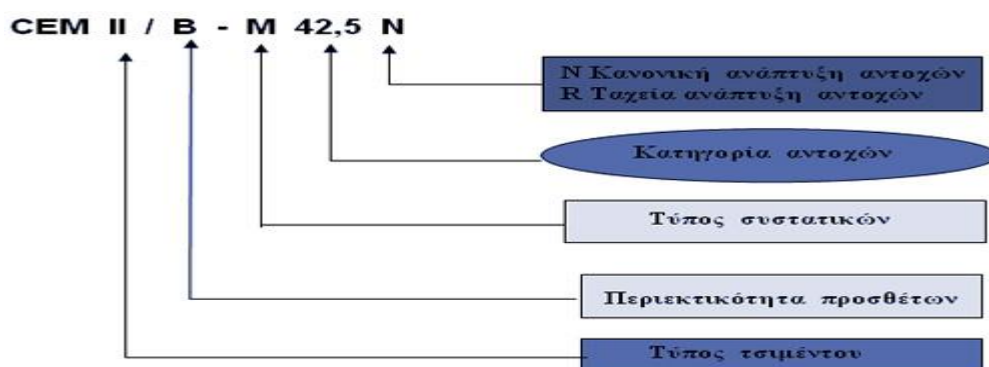
Σύμφωνα με την κοινή Υπουργική Απόφαση των Υπουργών ΠΕΧΩΔΕ και Ανάπτυξης 16462/29 (ΦΕΚ 917/Β/17.7.01) «Τσιμέντα για την κατασκευή έργων από σκυρόδεμα», από 1.01.02 τα τσιμέντα τα οποία προορίζονται για έργα από σκυρόδεμα οφείλουν να συμμορφώνονται στα παραπάνω πρότυπα.

Τα κοινά τσιμέντα που προδιαγράφονται στο πρότυπο EN 197-1 υποδιαιρούνται στους παρακάτω πέντε κύριους τύπους του Πίνακα 2.2:

**Πίνακας 2.2. Τύποι τσιμέντου**

| Τύποι τσιμέντου |                           |
|-----------------|---------------------------|
| CEM I,          | Τσιμέντο Portland         |
| CEM II          | Σύνθετα τσιμέντα Portland |
| CEM III         | Σκωριοτσιμέντα            |
| CEM IV          | Ποζολανικά τσιμέντα       |
| CEM V           | Σύνθετα τσιμέντα          |

Ο συμβολισμός των διαφόρων τσιμέντων, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1, ο οποίος καθορίζεται από: τον κύριο τύπο τσιμέντου, το ποσοστό clinker, τον τύπο του δεύτερου κύριου συστατικού, την κατηγορία αντοχής, το επίπεδο της πρώιμης αντοχής, φαίνεται στο σχήμα 2.3.



**Σχήμα 2.2: Συμβολισμός των διαφόρων τσιμέντων, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1**

Στους δύο πρώτους τύπους το κλίνκερ συμμετέχει τουλάχιστον κατά 65%, ενώ στους τρεις τελευταίους τύπους το κλίνκερ φθάνει έως το 64% κ.β. και δεν αποτελεί το κύριο συστατικό. Εξαιρείται το CEM IV IV/A στο οποίο το ποσοστό του κλίνκερ κυμαίνεται από 65 έως 89% κ.β.

Οι περαιτέρω υποδιαιρέσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 2.3. όπου τα ποσοστά αναφέρονται στο άθροισμα των κυρίων και δευτερευόντων συστατικών.

**Πίνακας 2.3. Τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1**

| Τύπος                            | Όνομασία | Κύρια συστατικά |       |       |       |   |       |       |       |       | Δευτ. συστ. |     |
|----------------------------------|----------|-----------------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------------|-----|
|                                  |          | K               | S     | D     | P     | Q | V     | W     | T     | L     |             |     |
| <b>ΤΣΙΜΕΝΤΑ PORTLAND</b>         |          |                 |       |       |       |   |       |       |       |       |             |     |
| CEM I                            | I        | 95-100          | -     | -     | -     | - | -     | -     | -     | -     | -           | 0-5 |
| <b>ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ PORTLAND</b> |          |                 |       |       |       |   |       |       |       |       |             |     |
| CEM II                           | II/A-S   | 80-94           | 6-20  | -     | -     | - | -     | -     | -     | -     | -           | 0-5 |
|                                  | II/B-S   | 65-79           | 21-35 | -     | -     | - | -     | -     | -     | -     | -           |     |
|                                  | II/A-D   | 90-94           | -     | 6-10  | -     | - | -     | -     | -     | -     | -           | 0-5 |
|                                  | II/A-P   | 80-90           | -     | -     | 6-20  | - | -     | -     | -     | -     | -           | 0-5 |
|                                  | II/B-P   | 65-79           | -     | -     | 21-35 | - | -     | -     | -     | -     | -           |     |
|                                  | II/A-Q   | 80-94           | -     | -     | -     | - | -     | -     | -     | -     | -           |     |
|                                  | II/B-Q   | 65-79           | -     | -     | -     | - | -     | -     | -     | -     | -           |     |
|                                  | II/A-V   | 80-94           | -     | -     | -     | - | 6-20  | -     | -     | -     | -           | 0-5 |
|                                  | II/B-V   | 65-79           | -     | -     | -     | - | 21-35 | -     | -     | -     | -           |     |
|                                  | II/A-W   | 80-94           | -     | -     | -     | - | -     | 6-20  | -     | -     | -           |     |
|                                  | II/A-W   | 65-79           | -     | -     | -     | - | -     | 21-35 | -     | -     | -           |     |
|                                  | II/A-T   | 80-94           | -     | -     | -     | - | -     | -     | 6-20  | -     | -           | 0-5 |
|                                  | II/B-T   | 65-79           | -     | -     | -     | - | -     | -     | 21-35 | -     | -           |     |
|                                  | II/A-L   | 80-94           | -     | -     | -     | - | -     | -     | -     | -     | 6-20        | 0-5 |
|                                  | II/B-L   | 65-79           | -     | -     | -     | - | -     | -     | -     | -     | 21-35       |     |
|                                  | II/A-LL  | 80-94           | -     | -     | -     | - | -     | -     | -     | -     | 6-20        |     |
| II/B-LL                          | 65-79    | -               | -     | -     | -     | - | -     | -     | -     | 21-35 |             |     |
| II/A-M                           | 80-94    | 6-20            |       |       |       |   |       |       |       |       | 0-5         |     |
| II/B-M                           | 65-79    | 21-35           |       |       |       |   |       |       |       |       |             |     |
| <b>ΣΚΩΡΙΟΤΣΙΜΕΝΤΑ</b>            |          |                 |       |       |       |   |       |       |       |       |             |     |
| CEM III                          | III/A    | 35-64           | 36-65 | -     | -     | - | -     | -     | -     | -     | -           | 0-5 |
|                                  | III/B    | 20-34           | 66-80 | -     | -     | - | -     | -     | -     | -     | -           |     |
|                                  | III/C    | 5-19            | 81-95 | -     | -     | - | -     | -     | -     | -     | -           |     |
| <b>ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ</b>       |          |                 |       |       |       |   |       |       |       |       |             |     |
| CEM IV                           | IV/A     | 65-89           | -     | 11-35 |       |   |       | -     | -     | -     | -           | 0-5 |
|                                  | IV/B     | 45-64           | -     | 36-55 |       |   |       | -     | -     | -     | -           |     |
| <b>ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ</b>          |          |                 |       |       |       |   |       |       |       |       |             |     |
| CEM V                            | V/A      | 40-64           | 18-30 | -     | 16-30 |   |       | -     | -     | -     | -           | 0-5 |
|                                  | V/B      | 20-39           | 31-50 | -     | 31-50 |   |       | -     | -     | -     | -           |     |

### Σημαντικές ιδιότητες του τσιμέντου

Το σύνολο των τσιμέντων πρέπει να καλύπτουν ένα σύνολο ιδιοτήτων προκειμένου να είναι αποδεκτά.

Οι κανονικές αντοχές του τσιμέντου είναι οι θλιπτικές που προσδιορίζονται σύμφωνα με το EN 196-1 στις 28 ημέρες και θα πρέπει να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις που δίνονται στον πίνακα 2.4.

Όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες προβλέπεται ο έλεγχος μόνο της αρχής χρόνου πήξης και της σταθερότητας του όγκου και θα πρέπει να καλύπτουν τις απαιτήσεις του πίνακα 2.4.

**Πίνακας 2.4. Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις τσιμέντων**

| Κατηγορία<br>αντοχών | Αντοχή σε θλίψη (N/ mm <sup>2</sup> ) |       |           | Αρχή πήξης<br>(min) | Διόγκωση<br>(mm) |
|----------------------|---------------------------------------|-------|-----------|---------------------|------------------|
|                      | 2 ημ.                                 | 7 ημ. | 28 ημ.    |                     |                  |
| 32.5 N               | -                                     | ≥ 16  | 32.5-52.5 | ≥ 75                | ≤ 10             |
| 32.5 R               | ≥ 10                                  | -     | 32.5-52.5 |                     |                  |
| 42.5 N               | ≥ 10                                  | -     | 42.5-62.5 | ≥ 60                |                  |
| 42.5 R               | ≥ 20                                  | -     | 42.5-62.5 |                     |                  |
| 52.5 N               | ≥ 20                                  | -     | ≥ 52.5    | ≥ 45                |                  |
| 52.5 R               | ≥ 30                                  | -     | ≥ 52.5    |                     |                  |

Όσον αφορά τις χημικές απαιτήσεις ελέγχονται μόνο η απώλεια πύρωσης, το αδιάλυτο υπόλειμμα, τα SO<sub>3</sub>, τα χλωριόντα και η ποζολανικότητα.

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 197-1, ισχύουν:

- Η περιεκτικότητα του τσιμέντου σε MgO δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 6% και του SO<sub>3</sub> το 3.5%. Στις περιπτώσεις που η ειδική επιφάνεια είναι μεγαλύτερη από 4000 cm<sup>2</sup>/g τότε η περιεκτικότητα σε SO<sub>3</sub> μπορεί να φτάσει μέχρι 4%.
- Η απώλεια πύρωσης του τσιμέντου δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 5% .
- Το αδιάλυτο υπόλειμμα του τσιμέντου πόρτλαντ δεν πρέπει να ξεπερνά το 3%, του ανθεκτικού στα θειικά το 1,5%, του τσιμέντου πόρτλαντ με ποζολάνη το 20% και του ποζολανικού το 40%.
- Η λεπτότητα άλεσης του τσιμέντου πρέπει να είναι τέτοια, ώστε το υπόλειμμα στο

κόσκινο των 4.900 βρογγίδων να μην ξεπερνά το 10%.

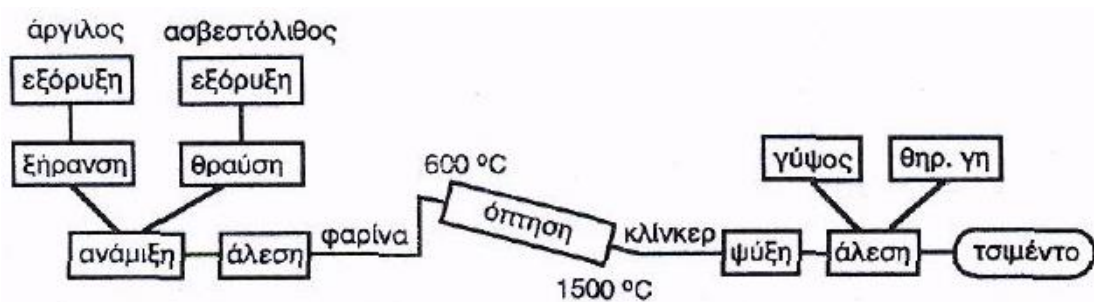
- Η ειδική επιφάνεια του τσιμέντου πρέπει να είναι τουλάχιστον 2.600 cm<sup>2</sup>/g.
- Το τσιμέντο πρέπει να παρουσιάζει σταθερότητα όγκου. Η διόγκωσή του πρέπει να είναι μικρότερη από 10 mm.

### Τσιμέντο Portland

Υπάρχουν διάφορα είδη τσιμέντων αλλά σήμερα στην αγορά κυριαρχεί ένα είδος τσιμέντου, το τσιμέντο Portland. Το τσιμέντο Portland και οι διάφοροι τύποι του είναι υδραυλικές κονίες, αφού δεν απαιτούν τη χρησιμοποίηση ποζολανικού υλικού για να αναπτύξουν αντοχές κάτω από το νερό.

Ως τσιμέντο Portland ορίζεται το προϊόν που προκύπτει μετά από έψηση σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης (1380-1420 °C) ενός κατάλληλα αλεσμένου και πλήρως ομογενοποιημένου μίγματος που αποτελείται από 75% περίπου ασβεστολιθικά υλικά και 25% περίπου αργυλοπυριτικά υλικά και συνάλεση του προκύπτοντος προϊόντος, που καλείται κλίνκερ, με την κατάλληλη ποσότητα γύψου (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O).

Εκτός από την χημική σύσταση, για να γίνει αποδεκτό ένα τσιμέντο Portland πρέπει να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις για τον χρόνο πήξης, την σταθερότητα όγκου και κυρίως τις αντοχές (που είναι συνάρτηση της λεπτότητάς του), που θέτουν τα διάφορα πρότυπα.



**Σχήμα 2.3:** Σχηματικό διάγραμμα παρασκευής του τσιμέντου Portland.

Το τσιμέντο Πόρτλαντ, όπως επίσης και οι διάφοροι τύποι του που χρησιμοποιούνται στις δομικές κατασκευές, είναι υδραυλικές κονίες και δεν απαιτούν τη χρησιμοποίηση

ποζολανικού υλικού για την ανάπτυξη αντοχών σε περιβάλλον που βρίσκεται υπό την παρουσία νερού. Τα κύρια ορυκτολογικά συστατικά του κλίνκερ είναι ασβεστοαργλικές ενώσεις ( $C_3A$ ) και ( $C_4AF$ ), καθώς και ασβεστοπυριτικές ενώσεις του πυριτικού διασβεστίου ( $C_2S$ ) και του πυριτικού τριασβεστίου ( $C_3S$ ) και στην παρουσία αυτών των ενώσεων οφείλεται ο υδραυλικός χαρακτήρας του τσιμέντου. (Τσίμας Σ., 2001 και Τσίμας Σ., & Τσιβιλής Σ., 2000)

### **Ενυδάτωση των τσιμέντων Portland**

Η ενυδάτωση το τσιμέντου είναι μια διαδικασία περισσότερο πολύπλοκη από την απλή μετατροπή άνυδρων ενώσεων στις αντίστοιχες ενυδατωμένες και περιλαμβάνει ένα σύνολο χημικών και φυσικο-μηχανικών μεταβολών που έχουν ως αποτέλεσμα την πήξη και την ανάπτυξη αντοχών του συστήματος τσιμέντο-νερό.

Μερική ενυδάτωση του τσιμέντου μπορεί να προκαλέσει ακόμα και η αυξημένη υγρασία του χώρου, αλλά για πλήρη ενυδάτωση απαιτείται η ανάμειξη με ικανή ποσότητα νερού. Ο λόγος νερού προς τσιμέντου καθορίζει τη ρεολογία του μίγματος, την πορεία της ενυδάτωσης και τις ιδιότητες του ενυδατωμένου υλικού και κυμαίνεται συνήθως από 0.3 έως 0.6.

Η ενυδάτωση του τσιμέντου Portland είναι μια σειρά αντιδράσεων μεταξύ των επιμέρους φάσεων του κλίνκερ, της γύψου και του νερού, οι οποίες προχωρούν είτε παράλληλα είτε διαδοχικά με διαφοροποιημένους ρυθμούς και αλληλεπιδράσεις.

Οι αντιδράσεις ενυδάτωσης που λαμβάνουν χώρα όταν το τσιμέντο αναμιχθεί με το νερό είναι σύνθετες και αλληλεξαρτώμενες.

Τα συστατικά που συμμετέχουν στις αντιδράσεις αυτές είναι:

- Αλίτης ( $C_3S$  με προσμίξεις ξένων ιόντων)
- Βελίτης ( $C_2S$  με προσμίξεις ξένων ιόντων)
- Αργλική φάση
- Φερριτική φάση
- Ελεύθερο  $CaO$
- Θεικά αλκάλια
- Θεικό ασβέστιο ως διωδρίτης, ημιωδρίτης ή ανυδρίτης
- Νερό

Το C<sub>3</sub>S συνεισφέρει στην γρήγορη ενυδάτωση του τσιμέντου, στην καλή αρχική και τελική αντοχή και στην ανάπτυξη υψηλής θερμότητας ενυδάτωσης. Αντίστοιχα, το C<sub>2</sub>S συνεισφέρει στην αργή ενυδάτωση, στην καλή τελική αντοχή και στην ανάπτυξη χαμηλής θερμότητας ενυδάτωσης. Το αργλικό τριασβέστιο (C<sub>3</sub>A) συνεισφέρει στην γρήγορη ενυδάτωση, στην ανάπτυξη υψηλής θερμότητας ενυδάτωσης και στην αρχική αντοχή. Τέλος το αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο (C<sub>4</sub>AF) συνεισφέρει ελάχιστα στην ενυδάτωση, προκαλεί ασήμαντη ανάπτυξη αντοχής και προσδίδει έντονο χρώμα (σκούρο καφέ ή γκριζοπράσινο). Με λίγα λόγια επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό τις ιδιότητες του τσιμεντοπολτού.

Στην αρχή της ενυδάτωσης, η διαδικασία ελέγχεται από το ρυθμό διαλυτοποίησης των άνυδρων συστατικών του κλίνκερ και της γύψου, στη συνέχεια από το ρυθμό σχηματισμού των ενυδατωμένων ενώσεων και στο τέλος από το ρυθμό διάχυσης του νερού και των ιόντων.

Η πορεία της ενυδάτωσης, επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων και οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι:

- η σύσταση των φάσεων του κλίνκερ και ο βαθμός ενσωμάτωσης ξένων ιόντων στο πλέγμα τους,
- οι συνθήκες παρασκευής του κλίνκερ (θερμοκρασία και χρόνος έψησης, ταχύτητα ψύξης),
- το ποσοστό και η μορφή θειικού ασβεστίου,
- η λεπτότητα του τσιμέντου,
- η διαδικασία ελάττωσης μεγέθους του τσιμέντου,
- ο λόγος νερό: τσιμέντο,
- οι συνθήκες διατήρησης των παστών και
- η προσθήκη χημικών προσθέτων.

Λόγω της διαφορετικής σύνθεσής τους, τα συστατικά του τσιμέντου ενυδατώνονται με διαφορετικούς ρυθμούς. Έτσι τα αργλικά συστατικά είναι υπεύθυνα κυρίως για

την απώλεια ρευστότητας και την πήξη του τσιμεντοπολτού, ενώ τα πυριτικά παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην σκλήρυνση, δηλαδή στο ρυθμό ανάπτυξης της αντοχής.

Ο ρυθμός ενυδάτωσης εξαρτάται κυρίως από τη σύσταση του αλίτη και ειδικότερα από τις προσμίξεις του, καθώς και από τις συνθήκες έψησης του κλίνκερ. Ο ρυθμός αυξάνεται με αύξηση των  $SO_3$  στο τσιμέντο και ελαττώνεται με αύξηση του λόγου  $\beta-C_2S / C_3S$  στο κλίνκερ.

Οι αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου είναι εξώθερμες με αποτέλεσμα να παρατηρείται έκλυση θερμότητας ιδιαίτερα κατά τα πρώτα στάδια. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ακολουθεί προσεγγιστικά το ρυθμό ενυδάτωσης του τσιμέντου και επηρεάζεται από τους ίδιους παράγοντες, δηλαδή τη σύσταση και τη λεπτότητα του τσιμέντου. Η συνολική θερμότητα που εκλύεται είναι περίπου ίδια με το άθροισμα της θερμότητας που αντιστοιχεί στην ενυδάτωση καθεμιάς από τις επιμέρους φάσεις του τσιμέντου. Σε ένα τυπικό τσιμέντο Portland το 50% περίπου της συνολικής θερμότητας εκλύεται μέχρι την τρίτη μέρα, το 75% περίπου μέχρι την έβδομη και το 85-90% περίπου μέχρι τους 6 μήνες.

### **Έλεγχος ποιότητας του τσιμέντου**

Ο έλεγχος της ποιότητας του τσιμέντου γίνεται σε δείγμα από το τσιμέντο που θα ελεγχθεί σε ποσότητα όχι μικρότερη από 8 Kg, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 206-1. Το δείγμα έχει παρασκευασθεί και συντηρηθεί σε θερμοκρασία 20° και σχετική υγρασία μικρότερη από 65%. Για το έλεγχο της ποιότητας του τσιμέντου μπορούν να γίνουν οι παρακάτω έλεγχοι:

- δοκιμή σε θλίψη
- δοκιμή σε κάμψη
- προσδιορισμός του χρόνου πήξης του τσιμέντου με τη βοήθεια της συσκευής Vicat
- προσδιορισμός της λεπτότητας του τσιμέντου με τη βοήθεια της συσκευής Blaine
- προσδιορισμός του είδους και της περιεκτικότητας των ξένων υλών που περιέχονται στο τσιμέντο
- προσδιορισμός του αδιάλυτου υπολείμματος του τσιμέντου

- προσδιορισμός της περιεκτικότητας οξειδίων ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_3$  και άλλα οξείδια του τύπου  $\text{R}_2\text{O}_3$ )

### 2.2.2. Αδρανή υλικά

Τα αδρανή υλικά αποτελούν το 65-70% του όγκου του σκυροδέματος και οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι παραμένουν χημικά αδρανή. Οι ιδιότητες των αδρανών επηρεάζουν την ποιότητα του σκυροδέματος. Τα αδρανή συνδέονται και συγκολλούνται μεταξύ τους με δυνάμεις συνάφειας και συμβάλλουν, μηχανικά μόνο, στην αντοχή του τελικού προϊόντος.

Για αδρανή υλικά μπορούν θεωρητικά να χρησιμοποιηθούν οποιαδήποτε υλικά συγκεντρώνουν τρεις βασικές ιδιότητες: επαρκή αντοχή, επαρκή πρόσφυση και χημική ανεκτικότητα. Τα καταλληλότερα πετρώματα είναι τα πυριτικά και τα ασβεστολιθικά. (Τσίμας Σ., 2001)

Τα αδρανή μπορεί να είναι φυσικά ή τεχνητά. Φυσικά θεωρούνται αυτά που προέρχονται από φυσικά ορυκτά πετρώματα και χρησιμοποιούνται όπως είναι ή μετά από θραύση, ενώ τεχνητά θεωρούνται είτε τα φυσικά που χρησιμοποιούνται μετά από ειδική επεξεργασία εκτός της θραύσης, είτε τα διογκωμένα πλαστικά.

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 1097-6, όταν η πυκνότητα σωματιδίων είναι μεταξύ 2000 και 3000  $\text{kg/m}^3$  χαρακτηρίζονται ως κανονικού βάρους, όταν η πυκνότητα είναι μικρότερη των 2000  $\text{Kg/m}^3$  σε ελαφροβαρή αδρανή, ενώ όταν η πυκνότητα είναι μεγαλύτερη των 3000  $\text{Kg/m}^3$  σε βαριά αδρανή.

Η ποιότητα του τελικού προϊόντος επηρεάζεται από την αντοχή των αδρανών (αντοχή του μητρικού πετρώματος), την καθαρότητα των αδρανών (η ύπαρξη ή όχι πρόσμικτων ουσιών), την πρόσφυση με την κονία, τη χημική συμπεριφορά των αδρανών με άλλα συστατικά του σκυροδέματος, την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών (σχήμα και μέγεθος των κόκκων) και τη θλιπτική αντοχή των αδρανών.

Το κυριότερο από τα χαρακτηριστικά των αδρανών, το οποίο επηρεάζει την ποιότητα του σκυροδέματος είναι η κοκκομετρική τους διαβάθμιση και στη συνέχεια οι περιεχόμενες επιβλαβείς ουσίες, η αντοχή τους σε θλίψη και τριβή, το σχήμα και η υφή της επιφάνειάς τους, η απορρόφηση νερού και τέλος η αντοχή τους σε φυσικές μεταβολές και χημικές επιδράσεις.

Ως προς την κοκκομετρική σύνθεση ή διαβάθμιση θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι κόκκοι των αδρανών υλικών στηρίζονται ο ένας πάνω στον άλλο, αλλά λόγω του ακανόνιστου πολυγωνικού σχήματος που έχουν δεν εφάπτονται απόλυτα μεταξύ τους παρά αφήνουν ενδιάμεσα κενά. Τα κενά αυτά μεταξύ των αδρανών τα γεμίζει το κονίαμα που συνδέει με αυτό τον τρόπο τους κόκκους σε ένα συμπαγές υλικό. Η ποσότητα του κονιάματος πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τα μεταξύ των κόκκων κενά. Επειδή από την άλλη μεριά το κονίαμα είναι περισσότερο πορώδες και λιγότερο ανθεκτικό από το πέτρωμα των αδρανών, όσο λιγότερα είναι τα παραπάνω κενά, τόσο αυξάνεται η αντοχή και η πυκνότητα του σκυροδέματος. Προτιμώνται τα αδρανή υλικά όπου το κλάσμα κόκκων διαμέτρου μικρότερης από 250 μm είναι το 10-25 % της συνολικής ποσότητας.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση καθορίζεται με σειρά πρότυπων κόσκινων. Οι σειρές κόσκινων που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα και υιοθετούνται από το πρότυπο ΕΛΟΤ-408 και από τον Ν.Κ.Τ.Σ είναι η γερμανική σειρά των DIN 4187 και 4188 και η αμερικανική σειρά κόσκινων της προδιαγραφής ASTM E 11.

Οι κόκκοι μπορεί να είναι στρογγυλοί, κυβόμορφοι, γωνιώδεις, πλακόμορφοι ή επιμήκεις. Από πλευράς εργασιμότητας καλύτεροι είναι οι στρογγυλοί ή κυβόμορφοι κόκκοι ενώ από πλευράς μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος, οι κόκκοι με ανώμαλη επιφάνεια. Δηλαδή συνολικά καλύτερα είναι τα θραυστά αδρανή με κόκκους που δεν είναι επιμήκεις και πλακοειδείς.

Τα αδρανή υλικά ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες (πίνακας 2.5.):

**Πίνακας 2.5. Κατάταξη αδρανών με βάση το μέγεθος του κόκκου.**

| Κατηγορία αδρανών           | Κατηγορία αδρανών       |
|-----------------------------|-------------------------|
| <b>α) Άμμος</b>             | <b>μέχρι 2,5 mm</b>     |
| <b>β) Λεπτόκοκκα σκύρα</b>  | <b>ριζάκι 2,5-7 mm</b>  |
|                             | <b>γαρμπίλι 7-14 mm</b> |
|                             | <b>σκύρα 14-30 mm</b>   |
| <b>γ) Χονδρόκοκκα σκύρα</b> | <b>30-70 mm</b>         |

Τα αδρανή δεν πρέπει να έχουν στην επιφάνειά τους, μέσα στη μάζα τους ή μεταξύ τους ξένες ουσίες που μπορεί να εμποδίσουν την πρόσφυση με το κονίαμα ή να έχουν επιβλαβή χημική επίδραση στο τσιμέντο ή στο χαλύβδινο οπλισμό. Τα κυριότερα από τα επιβλαβή αυτά πρόσμικτα είναι: πυριτική παιπάλη, οργανικές προσμίξεις, θειούχες ενώσεις.

Επίσης θα πρέπει να ελέγχεται κατά πόσο τα αδρανή περιέχουν ποιότητες πυριτίου επιδεκτές σε προσβολή από τα αλκάλια ( $\text{Na}_2\text{O}$  και  $\text{K}_2\text{O}$ ) που προέρχονται από το τσιμέντο, ενώ παράλληλα το σκυρόδεμα εκτίθεται σε υγρό περιβάλλον. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει ο κίνδυνος αντίδρασης μεταξύ των αλκαλίων και των αδρανών με αποτέλεσμα τη φθορά ή και την καταστροφή του σκυροδέματος.

Τα αδρανή υλικά πρέπει να είναι:

- σταθερά ώστε να μην θρυμματίζονται εύκολα
- ανθεκτικά από σκληρά πετρώματα (γρανίτες και ασβεστόλιθοι)
- καθαρά και απαλλαγμένα από φυτικές και άλλες επιβλαβείς προσμίξεις (πυλός, χημικά δραστικές ουσίες, άνθρακες).
- σταθερά στις καιρικές αλλαγές (μεταβολές θερμοκρασίας και υγρασίας)
- απαλλαγμένα από παιπάλη με διάμετρο μικρότερη από 0,075 mm
- καλά διαβαθμισμένα. Η κοκκομετρική καμπύλη της άμμου, των σκύρων και του μίγματος αυτών πρέπει να βρίσκεται μέσα στις περιοχές που περιλαμβάνονται στα διαγράμματα που προβλέπουν οι κανονισμοί. Κάθε υλικό που παρουσιάζει κοκκομετρική σύνθεση, τέτοια ώστε η κοκκομετρική

του καμπύλη να βρίσκεται εκτός από τις επιτρεπόμενες υπό των προδιαγραφών καμπύλες, ή η κοκκομετρική του καμπύλη να είναι ασυνεχής, πρέπει να απορρίπτεται ή να βελτιώνεται προτού χρησιμοποιηθεί.

Επίσης ισχύουν τα παρακάτω:

1. Τα αδρανή μέχρι 7 mm – χωρίς τσιμέντο- πρέπει να καλύπτουν το 35-45% της συνολικής ποσότητας των αδρανών
2. Ανάλογα με την ποιότητα του σκυροδέματος τα αδρανή υλικά μπορούν να προσκομίζονται στο εργοτάξιο αναμεμιγμένα ή διαβαθμισμένα.
  - Προκειμένου για σκυρόδεμα C8 τα αδρανή υλικά μπορούν να είναι αμμοχάλικα ποταμού ή θραυστά λατομείου αναμεμιγμένα αρκεί μακροσκοπικός να είναι προφανές ότι περιέχουν και αρκετό χονδρόκοκκο υλικό.
  - Προκειμένου όμως για σκυροδέματα ανώτερης ποιότητας πρέπει να προσκομίζονται σε ξεχωριστές ομάδες. Για μεν τα σκυροδέματα C12 και C16 να προσκομίζονται σε τρεις διαβαθμίσεις (άμμος, γαρμπίλι, σκύρα).
  - Για δε τα σκυροδέματα C20 και άνω σε τέσσερις διαβαθμίσεις (άμμος, ριζάκι, γαρμπίλι, σκύρα).
3. Όταν χρησιμοποιούνται θραυστά αδρανή και προπαντός θραύστη άμμος καλό είναι να προστίθενται σε αυτά και άμμος ποταμών.

Τέλος η αποθήκευση των αδρανών πρέπει να γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε:

- α) Να μην διαχωρίζονται οι κόκκοι των αδρανών, όπως π.χ. συμβαίνει όταν ένα χονδρόκοκκο αδρανές αδειάζετε από μεγάλο ύψος ή όταν αναμοχλεύεται.
- β) Να αποφεύγεται η ανάμιξη διαφορετικών αδρανών, όπως π.χ. συμβαίνει όταν δύο σωροί εφάπτονται χωρίς ενδιάμεσο χώρισμα.
- γ) Να αποφεύγεται η ρύπανση τους από επιβλαβείς προσμίξεις (χώμα, λύματα κ.λ.π.)

Από τις ιδιότητες του σκυροδέματος που επηρεάζονται από τα αδρανή, η πλέον σημαντική για τη διάβρωση είναι το πορώδες. Αυτό εμφανίζεται χαμηλότερο στην περίπτωση των φυσικών αδρανών, πράγμα που προσδίδει στο σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με αυτά, μεγαλύτερη αντοχή στην διάβρωση.

Ανάλογα με τη χρήση του σκυροδέματος και κυρίως σε ειδικές περιπτώσεις κατασκευών που διατρέχουν μεγάλο κίνδυνο χημικής προσβολής, η επιλογή των αδρανών πρέπει να υπακούει σε διεθνείς προδιαγραφές. (Ρούτουλας Α., 2010)

### **2.2.3. Το νερό ανάμειξης**

Ένα από τα δύο ενεργά συστατικά του σκυροδέματος είναι το νερό. Μαζί με το τσιμέντο παίρνει μέρος σε σειρά χημικών αντιδράσεων, που οδηγούν με τη δημιουργία ένυδρων κρυστάλλων, στην πήξη και τη σκλήρυνση του μίγματος. Η βασική απαίτηση έναντι του νερού είναι να μην περιέχει συστατικά τα οποία μπορούν να βλάψουν ή να επηρεάσουν τις αντιδράσεις ενυδατώσεως. Έτσι το νερό που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι πόσιμο, καθαρό και απαλλαγμένο από βλαπτικές ουσίες (οργανικά ή ανόργανα στερεά, θειικά άλατα, οξέα) σε μεγάλο ποσοστό γιατί μπορούν να βλάψουν την ποιότητα του σκυροδέματος και να προκαλέσουν διάβρωση του οπλισμού. Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ανθρακούχα νερά., καθώς και τα νερά με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα και χαμηλό pH. (Μπατής Γ., 2006)

Γενικά μπορούμε να είμαστε περισσότερο ανεκτικού στο νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος αφού η ποσοστιαία αναλογία του νερού αναμίξεως και συνεπώς και κάθε ξένης ουσίας μέσα σε αυτό, είναι μικρή και οι ουσίες αυτές δρουν μέχρι να εξαντληθούν.

Οι κυριότερες από τις χημικές ουσίες που έχουν δυσμενή επίδραση στην εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων με αποτέλεσμα είτε τη μείωση της τελικής αντοχής είτε την καθυστέρηση της πήξεως είναι οι ακόλουθες:

- Η ζάχαρη
- Τα οξέα (όπως το ανθρακικό οξύ ή άλλα οργανικής προέλευσης)
- Τα λάδια και τα λίπη
- Οι οργανικές ουσίες

Το θαλασσινό νερό έχει συχνά χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή σκυροδέματος αλλά η υψηλή περιεκτικότητά του σε χλωριόντα διευκολύνει τη διάβρωση του οπλισμού και η χρήση του πρέπει να αποφεύγεται για την παραγωγή οπλισμένου σκυροδέματος. Ο Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Ν.Κ.Τ.Σ.) επιτρέπει την χρήση θαλασσινού νερού μίξης σε άοπλο φέρων σκυρόδεμα, αν η απαιτούμενη αντοχή αυξηθεί κατά 15%.

Το νερό για τη παραγωγή σκυροδέματος πρέπει να έχει:

- περιεκτικότητα σε άλατα μικρότερη από 3.5%
- περιεκτικότητα σε θειικά μικρότερη από 0.5%
- pH μεγαλύτερο από 4
- περιεκτικότητα σε νάτριο μικρότερη από 3%
- πλήρη έλλειψη σε λίπη ή έλαια
- χαμηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένες οργανικές ουσίες
- χαμηλή περιεκτικότητα σε αιωρούμενες οργανικές ουσίες

Είναι γνωστό ότι στην αντοχή του σκυροδέματος παίζει σπουδαίο ρόλο ο λόγος κατά βάρους του νερού προς τσιμέντο w/z. Όσο μικρότερος είναι ο λόγος αυτός τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του σκυροδέματος. Έχει παρατηρηθεί ότι η άριστη αναλογία w/z κυμαίνεται μεταξύ 0,4 για σκυροδέματα υψηλής αντοχής και 0,5 για σκυροδέματα χαμηλότερης αντοχής. Επίσης παρατηρείται ότι, ενώ μια απόκλιση προς τα επάνω από το άριστο ποσοστό κατά 10% συνεπάγεται μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά 15% περίπου, μια ίση απόκλιση προς τα κάτω, συνεπάγεται μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά 30% περίπου. Είναι επομένως φρόνιμο, κατά την επιδίωξη της βέλτιστης αναλογίας νερού να παραμένει κανείς πάντοτε για λόγους ασφαλείας προς τα επάνω, παρά να κινδυνεύει η ποσότητα νερού να είναι μικρότερη της βέλτιστης με συνέπεια να υποστεί αλματώδη πτώση η αντοχή του παραγόμενου σκυροδέματος. Τέλος η ποσότητα του νερού δεν πρέπει να είναι τόσο λίγη ώστε να παραβλάπτεται η καλή κατεργασία του όλου μίγματος.

#### **2.2.4. Βελτιωτικά πρόσμικτα**

Βελτιωτικά ή χημικά πρόσμικτα είναι τα υλικά που προστίθενται σε μικρές ποσότητες σε σχέση με τη μάζα του τσιμέντου, κατά τη διάρκεια της αναμίξεως του σκυροδέματος, με σκοπό να τροποποιήσουν τις ιδιότητες κυρίως του νωπού αλλά και του σκληρυμένου σκυροδέματος. (Τσίμας Σ., 2001)

Τα υλικά αυτά, ανάλογα με την κύρια δράση τους, κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Αερακτικά, που αναπτύσσουν στη μάζα του σκληρυμένου σκυροδέματος μικροσκοπικές (0,02-0,2mm) φυσαλίδες με σκοπό την αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε κύκλους ζέστης- παγετού.
- Πρόσθετα επιταχυντικά της πήξης, για σκυροδέτηση σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Πρόσθετα επιβραδυντικά της πήξης, για σκυροδέτηση σε πολύ ζεστό καιρό.
- Ρευστοποιητικά ή υπερρευστοποιητικά πρόσθετα, για αύξηση της ρευστότητας του νωπού σκυροδέματος. Η χρήση τους είναι σχεδόν απαραίτητη για σκυροδέματα υψηλής ποιότητας, που αναγκαστικά περιέχουν λιγότερο νερό, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες. Τα υλικά αυτά λύνουν το πρόβλημα της εργασιμότητας και κατ' επέκταση της αντλησιμότητας και διάστρωσης του σκυροδέματος, χωρίς την επιζήμια αύξηση του νερού ανάμειξης, ενώ έχουν επιπρόσθετα και επιβραδυντική δράση. Όταν χρησιμοποιούνται υπερρευστοποιητικά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η επίδραση τους στην ρευστότητα του μίγματος κατά κανόνα εξαφανίζεται μετά από 20-30 min από την προσθήκη τους στο μίγμα.
- Στεγανωτικά

Εκτός από αυτά υπάρχουν και άλλα ειδικά πρόσμικτα, όπως αντιπαγετικά, διογκωτικά, αντιδιαβρωτικά.

### ***2.2.5. Πρόσθετα συστατικά***

Τα πρόσθετα συστατικά είναι τα λεπτομερώς διαμερισμένα ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σκυροδέμα στοχεύοντας με σκοπό τη βελτίωση, μέσω φυσικοχημικής αντίδρασης, ορισμένων ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Σε σύγκριση με τα λοιπά συστατικά του σκυροδέματος, τα πρόσθετα έχουν σημαντικό, ανά μονάδα βάρους ή όγκου, κόστος.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες προσθέτων, τα σχεδόν αδρανή πρόσθετα (τύπου I) και τα πρόσθετα που έχουν ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες (τύπου II) στα οποία περιλαμβάνονται οι ιπτάμενες τέφρες, η πυριτική παιπάλη κ.α. (Τσίμας Σ., 2006)

### 2.3. Ιδιότητες σκυροδέματος

#### *Εργασιμότητα (workability)*

Με τον όρο “εργασιμότητα” χαρακτηρίζουμε γενικά την ευκολία με την οποία μπορούμε να μεταφέρουμε, διαστρώσουμε και συμπυκνώσουμε το σκυρόδεμα, χωρίς απόμιξη των υλικών. Επειδή η ευκολία κατεργασίας του νωπού σκυροδέματος συνδέεται και με τα μέσα που διαθέτουμε, μπορεί να οριστεί και ως το έργο που απαιτείται για την υπερνίκηση των εσωτερικών τριβών ωσότου πετύχουμε πλήρη συμπίκνωση.

Το εργάσιμο είναι μια πολύ χρήσιμη έννοια για την πράξη, γιατί αποδίδει ακριβώς αυτό που ενδιαφέρει τον κατασκευαστή κατά τον χρόνο της σκυροδετήσεως, είναι όμως ιδιότητα σύνθετη που συνδέεται με άλλες ρεολογικές ιδιότητες και που δύσκολα μπορεί να αποδοθεί ποσοτικά.

Τέτοιες ιδιότητες, με τις οποίες συνδέεται και εξαρτάται το εργάσιμο, είναι οι ακόλουθες:

- α) Η ρευστότητα που σημαίνει την ευκολία με την οποία ρέει ένα υλικό. Η ρευστότητα εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του νερού αναμείξεως.
- β) Η πλαστικότητα, με την οποία νοείται η ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς διακοπή της συνέχειας του.
- γ) Η συνοχή, η οποία είναι το αποτέλεσμα των δυνάμεων που έλκουν τα μόρια του υλικού μεταξύ τους και επομένως είναι μία από τις ιδιότητες που συντελούν στην πλαστικότητα.
- δ) Η συμπυκνωσιμότητα, δηλαδή η δυνατότητα του υλικού να συμπυκνωθεί και που εξαρτάται από τον αρχικό βαθμό συμπυκνώσεως.

Τέλος, τον όρο συνεκτικότητα χρησιμοποιούμε πολλές φορές, για να εκφράσουμε άλλοτε το εργάσιμο και άλλοτε τη ρευστότητα.

Η σημασία της εργασιμότητας στην τεχνολογία του σκυροδέματος είναι τεράστια, αφού είναι γνωστό πλέον ότι σκυροδέματα που διαστρώνονται ή συμπυκνώνονται δύσκολα, παρουσιάζουν προβληματική αντοχή και ανθεκτικότητα σε διάρκεια.

Επειδή η εργασιμότητα δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα, έχουν προταθεί μέθοδοι μετρήσεως μιας ή περισσότερων από τις παραπάνω ιδιότητες, με κυριότερη

χρησιμοποιούμενη μέθοδο την κάθιση (slump). (Τσίμας Σ., 2001 και Τσίμας Σ., & Τσιβιλής Σ., 2000)

### ***Αντοχή (strength)***

Ο όρος αντοχή στο σκυροδέμα, αναφέρεται στη μέγιστη τάση που μπορεί να μεταφέρει το υλικό, η οποία προκαλεί θραύση. Η αντοχή δίνει μια συνολική εικόνα της ποιότητας του σκυροδέματος επειδή συνδέεται άμεσα με τη δομή της ενυδατώμενης τσιμεντόπαστας. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, είναι ιδιαίτερα μεγάλη και τα στοιχεία από σκυροδέμα σχεδιάζονται έτσι ώστε να εκμεταλλευόμαστε την ιδιότητα αυτή.

Ο πλέον καθοριστικός παράγοντας για τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, είναι η σχέση του λόγου W/C με το πορώδες. Αύξηση του λόγου W/C προκαλεί αύξηση του πορώδους και κατά συνέπεια μείωση της αντοχής του τσιμεντοπολτού.

Ο εγκλωβισμένος αέρας στη δομή του σκυροδέματος, επηρεάζει επίσης την αντοχή του. Η παρουσία κενών αέρα στη δομή, οφείλεται είτε σε κακή συμπίκνωση είτε στη χρήση αερακτικών πρόσθετων που σχηματίζουν στη μάζα του σκυροδέματος μικροσκοπικές φυσαλίδες. Έτσι, αυξάνεται το πορώδες και μειώνεται η αντοχή.

Η αντοχή του σκυροδέματος αποτελεί σύνθετο φαινόμενο και εκτός από τα παραπάνω, επηρεάζεται και από πολλούς άλλους παράγοντες:

- Τύπος τσιμέντου
- Είδος νερού ανάμιξης
- Υγρασία
- Θερμοκρασία

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζονται από τη διαθέσιμη υγρασία, τη παρουσία διαβρωτικών ουσιών στο νερό και τη θερμοκρασία. (Τσίμας Σ., 2001)

## Πορώδες

Το σκυρόδεμα δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές, αλλά περιέχει πλήθος από εσωτερικές κοιλότητες. Το σύνολο των κοιλοτήτων το ονομάζουμε πορώδες του σκυροδέματος.

Ανάλογα με την προέλευσή τους διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- πόροι των αδρανών υλικών, δηλαδή πόροι των κόκκων της άμμου και των σκύρων,
- πόροι που δημιουργούνται από εγκλεισμό φυσαλίδων αέρα μέσα στο τσιμεντοκονίαμα,
- πόροι ή τριχοειδή κενά που δημιουργούνται μέσα στην τσιμεντοκονία μετά την εξάτμιση του νερού που περισσεύει,
- κοιλότητες μεταξύ τσιμεντοκονιάματος και αδρανών, είτε από κακή πρόσφυση μεταξύ τους, είτε λόγω συστολής του τσιμεντοκονιάματος, είτε από το νερό που συγκεντρώνεται στην κάτω κυρίως πλευρά των κόκκων, λόγω της εξίδρωσης του μίγματος,
- μακροσκοπικές κοιλότητες που προέρχονται από κακή συμπίκνωση,
- τριχοειδή κενά που δημιουργούνται μετά τις μικρορηγματώσεις από τις συστολές του τσιμεντοκονιάματος ή και τις εξωτερικές καταπονήσεις.

Το ολικό πορώδες χαρακτηρίζει την έκταση του πορώδους και εκφράζει το % ποσοστό ή το κλάσμα του όγκου ενός υλικού που καταλαμβάνουν οι πόροι του. Δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\rho = \frac{Vk}{V} = \frac{\rho - \rho\varphi}{\rho} \quad (2.1)$$

Όπου  $\rho$ : το ολικό πορώδες του υλικού,

$V_k$ : ο όγκος των πόρων,

$V$ : ο φαινόμενος όγκος του υλικού,

$\rho_\varphi$ : το φαινόμενο ειδικό βάρος του υλικού

$\rho$ : το ειδικό βάρος του υλικού

Το ολικό πορώδες στο σκυρόδεμα κυμαίνεται μεταξύ 8 και 25% και επηρεάζει κατά πολλούς τρόπους τις ιδιότητές του σκυροδέματος, κυρίως μέσα από την επίδραση που έχει στις αντοχές και στη διαπερατότητα του. Οι περισσότερες από τις ιδιότητες του

σκυροδέματος βελτιώνονται όταν, για το ίδιο ολικό πορώδες, το μέγεθος των πόρων είναι μικρότερο, είναι περισσότερο ομοιόμορφα κατανεμημένοι μέσα στο υλικό και το σχήμα τους πλησιάζει το σφαιρικό.

Στη μείωση του πορώδους συντελούν οι παρακάτω παράγοντες:

- η ελάττωση του νερού και, επομένως, η ελάττωση των πόρων που δημιουργούνται από την εξάτμιση του νερού που περισσεύει.
- η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών, που πλησιάζει στην άριστη περιοχή, δηλαδή η πυκνότερη δομή των αδρανών.
- η καλή ποιότητα και καθαρότητα των αδρανών για την καλύτερη προσκόλληση της τσιμεντοκονίας. Τα ασβεστολιθικά πετρώματα π.χ. έχουν καλύτερη πρόσφυση από ταυριτικά.
- η αποτελεσματική συμύκνωση του νωπού σκυροδέματος.
- η καλή συντήρηση για την αποφυγή ρηγματώσεων κατά τη διάρκεια της πήξης. (Τσίμας Σ., 2001 και Τσίμας Σ., & Τσιβιλής Σ., 2000)

### ***Διαπερατότητα (permeability)***

Η διαπερατότητα αποτελεί το πλέον καθοριστικό στοιχείο για την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και επηρεάζεται από:

- Τη σύσταση του τσιμέντου. Όταν το σκυρόδεμα περιέχει τσιμέντο σε ποσότητα μεγαλύτερη από 300 Kg/m<sup>3</sup>, έχει μικρό W/C και έχει γίνει προσεκτική συντήρηση, τότε θα έχει μικρή διαπερατότητα.
- Τον λόγο W/C (νερό / τσιμέντο). Όταν ο λόγος αυτός υπερβεί την τιμή 0.6, υπάρχει δυσανάλογη αύξηση της διαπερατότητας επειδή αυξάνεται το μέγεθος και ο αριθμός των τριχοειδών πόρων.
- Το πορώδες. Το μέγεθος και η κατανομή των πόρων καθώς και η ποσότητα νερού που περιέχουν, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την διαπερατότητα του σκυροδέματος.
- Τη συμύκνωση. Με τη συμύκνωση μειώνονται τα κενά του αέρα στο σκυρόδεμα, μειώνοντας έτσι το πορώδες.

- Τη συντήρηση. Η συντήρηση του σκυροδέματος συνίσταται στη διατήρηση ευνοϊκών συνθηκών υγρασίας και θερμοκρασίας ώστε να προχωρήσουν οι αντιδράσεις ενυδάτωσης.
- Την ύπαρξη ρωγμών. Με τις ρωγμές διευκολύνεται η διείσδυση βλαβερών ουσιών στο εσωτερικό της κατασκευής και προς τον οπλισμό του σκυροδέματος.

### *Ανθεκτικότητα (durability)*

Η ανθεκτικότητα εκφράζει τη δυνατότητα του σκυροδέματος να διατηρεί την αντοχή και τη λειτουργικότητά του στην κατασκευή, στη μέγιστη δυνατή διάρκεια.

Οι τρεις βασικοί παράγοντες που ρυθμίζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος είναι:

- Η παρουσία συνδεδεμένων πόρων
- Η έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον
- Η παρουσία νερού

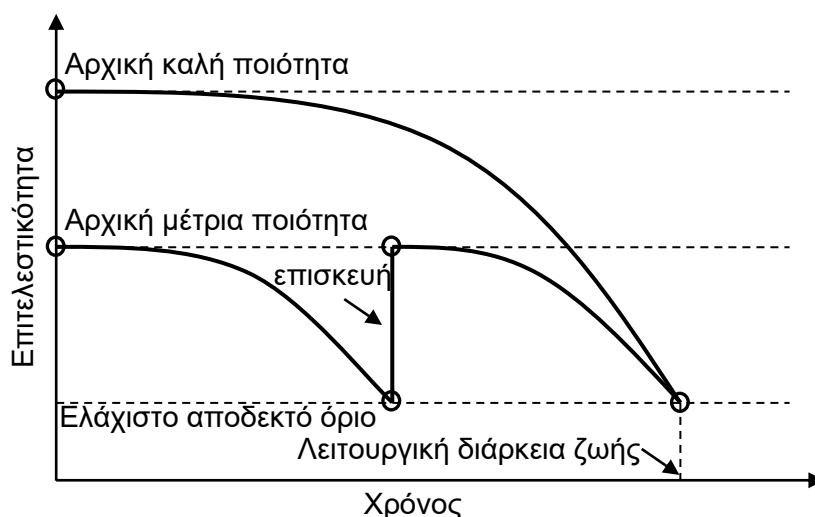
Όταν ένας παράγοντας υπάρχει μόνος του, χωρίς την παρουσία των υπολοίπων, τότε δεν υπάρχει κίνδυνος φθοράς του σκυροδέματος. Όταν συνυπάρχουν δύο παράγοντες, η πιθανότητα φθοράς αυξάνεται σημαντικά, ενώ όταν συνυπάρχουν και οι τρεις παράγοντες ο κίνδυνος φθοράς γίνεται μέγιστος.

Το σκυρόδεμα και κυρίως το οπλισμένο, έχει πεπερασμένο χρόνο ζωής, πέρα από τον οποίο κρίνεται λειτουργικά ανεπαρκές. Έτσι το πρόβλημα της ανθεκτικότητας σε διάρκεια θεωρείται σήμερα διεθνώς ίσως το σημαντικότερο πρόβλημα των κατασκευών σκυροδέματος. Επηρεάζεται από τρεις ομάδες παραγόντων, τη **διαπερατότητα**, τις **περιβαλλοντικές συνθήκες** και τις **φυσικές ή χημικές ή μηχανικές επιδράσεις**.

### **2.4. Μηχανισμοί φθοράς σκυροδέματος**

Η διάρκεια χρήσιμης ζωής μιας κατασκευής είναι η περίοδος του χρόνου μέσα στην οποία η επιτελεστικότητα της κατασκευής, η οποία συνδέεται με την ασφάλεια, τη λειτουργικότητα και την εμφάνιση της κατασκευής, διατηρείται σε ένα αποδεκτό, σύμφωνα με προδιαγραφές επίπεδο. Ο τύπος και ο ρυθμός των διεργασιών φθοράς

του σκυροδέματος και του οπλισμού του καθορίζει την αντίσταση των υλικών, των στοιχείων και των τμημάτων που συνθέτουν την κατασκευή. Στο σχήμα 2.5 φαίνεται η σχέση της επιτελεστικότητας με τη διάρκεια ζωής της κατασκευής από σκυρόδεμα. Μια επιθυμητή διάρκεια ζωής μπορεί να επιτευχθεί είτε λόγω καλής αρχικής ποιότητας κατασκευής είτε λόγω συνεχών σοβαρών επισκευών μιας κακής αρχικής ποιότητας κατασκευής.



**Σχήμα 2.4:** Σχέση επιτελεστικότητας – διάρκειας ζωής κατασκευών από σκυρόδεμα

Πηγή: Παπαδάκης, 2004

Το αποτέλεσμα διαφόρων περιβαλλοντικών δράσεων, φυσικών, μηχανικών και βιοχημικών διεργασιών είναι η απώλεια της επιτελεστικότητας μιας κατασκευής και η φθορά της κατασκευής στο χρόνο. Το σκυρόδεμα μετά την επίδραση των παραπάνω μηχανισμών ρηγματώνεται ή/και διαβρώνεται.

Οι μηχανικές διεργασίες που προκαλούν ρηγματώση στο σκυρόδεμα μπορεί να είναι η αρχική συστολή, η αρχική καθίζηση, η άμεση φόρτιση και οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις. Στις φυσικές διεργασίες περιλαμβάνονται οι θερμοκρασιακές διαφορές, η συστολή ξήρανσης, και η επίδραση του παγετού.

Οι χημικές διεργασίες που προκαλούν φθορά του σκυροδέματος διακρίνονται σε αυτές που επιδρούν στο σκυρόδεμα και σε αυτές που επιδρούν στον χαλύβδινο οπλισμό του σκυροδέματος, ενώ στις βιοχημικές διεργασίες που οδηγούν σε διάβρωση του σκυροδέματος περιλαμβάνεται η ανάπτυξη μικροοργανισμών στις επιφάνειες σκυροδέματος.

Μια προσεγγιστική ένδειξη του χρόνου κατά τον οποίο αναμένεται να εμφανισθούν φθορές στο σκυρόδεμα φαίνεται στο σχήμα 2.6., συναρτήσει των πιθανών αιτιών φθοράς του σκυροδέματος.

|            |               |  |       |      |        |                                    |
|------------|---------------|--|-------|------|--------|------------------------------------|
| ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ  | αρχ. συστολή  |  |       |      |        |                                    |
|            | αρχ. καθίζηση |  |       |      |        |                                    |
|            |               | άμεση φόρτιση<br>επιβαλλόμενες παραμορφώσεις |       |      |        |                                    |
| ΦΥΣΙΚΟΙ    |               | θερμοκρασιακές διαφορές                      |       |      |        |                                    |
|            |               | συστολή ξήρανσης                             |       |      |        |                                    |
|            |               | δράση παγετού                                |       |      |        |                                    |
| ΧΗΜΙΚΟΙ    |               |  |       |      |        | δράση οξέων<br>θεικών,<br>αλκαλίων |
|            |               |  |       |      |        | διάβρωση<br>οπλισμού               |
| ΒΙΟΧΗΜΙΚΟΙ |               |  |       |      |        | ανάπτυξη<br>μικροοργαν.            |
|            |               |  |       |      |        | δράση H <sub>2</sub> S             |
| ΩΡΑ        | ΗΜΕΡΑ         | ΕΒΔΟΜΑΔΑ                                     | ΜΗΝΑΣ | ΕΤΟΣ | ΑΙΩΝΑΣ |                                    |

**Σχήμα 2.5: Μηχανισμοί φθοράς και πιθανός χρόνος εμφάνισης ρωγμών στο σκυρόδεμα.**

Σύμφωνα με το EN 206, περιβαλλοντικές δράσεις είναι εκείνες οι χημικές και φυσικές δράσεις στις οποίες εκτίθεται το σκυρόδεμα και επιδρούν σε αυτό ή τον οπλισμό του, και δεν θεωρούνται ως τυπικά φορτία κατά τον δομικό σχεδιασμό. Ως κύριες δράσεις φθοράς θεωρούνται: η διάβρωση του οπλισμού προκαλούμενη είτε μέσω ενανθράκωσης είτε επίδρασης χλωριόντων, η δράση παγετού και η χημική προσβολή. Οι περιβαλλοντικές δράσεις ταξινομούνται σε διάφορες **κατηγορίες έκθεσης** και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.6.

**Πίνακας 2.6. Κατηγορίες έκθεσης σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206.**

| Κατηγορία   | Περιγραφή του περιβάλλοντος   | Ενδεικτικά παραδείγματα  |
|---|---|--|
| <b>1 Χωρίς κίνδυνο διάβρωσης ή άλλης προσβολής</b>  |   |  |
| <b>X0</b>   | Για άοπλο σκυρόδεμα: Όλες οι εκθέσεις, εκτός εάν υπάρχει δράση παγετού, απότριψη ή χημική προσβολή<br>Για σκυρόδεμα με οπλισμό ή άλλα ενσωματωμένα μέταλλα: Πολύ ξηρό | Σκυρόδεμα εσωτερικών χώρων με πολύ χαμηλή υγρασία αέρα   |
| <b>2 Διάβρωση που προκαλείται μέσω ενανθράκωσης</b>   |   |  |
| Όταν σκυρόδεμα με οπλισμό ή άλλα ενσωματωμένα μέταλλα εκτίθεται σε ατμοσφαιρικό αέρα και υγρασία, η έκθεση να κατηγοριοποιείται ως ακολούθως:   |   |  |
| <b>XC1</b>  | Ξηρό ή μόνιμα υγρό  | Σκυρόδεμα εσωτερικών χώρων με χαμηλή υγρασία αέρα, σκυρόδεμα μόνιμα βυθισμένο σε νερό                            |
| <b>XC2</b>  | Υγρό, σπάνια ξηρό   | Επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε μακροχρόνια επαφή με νερό, πολλές θεμελιώσεις                            |
| <b>XC3</b>  | Μέτρια υγρασία  | Σκυρόδεμα εσωτερικών χώρων με μέτρια ή υψηλή υγρασία αέρα, σκυρόδεμα εξωτερικών χώρων προφυλαγμένο από την βροχή |
| <b>XC4</b>  | Κυκλική εναλλαγή ύγρανσης-ξηράνσης  | Επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε επαφή με νερό, εκτός κατηγορίας έκθεσης XC2                              |
| <b>3 Διάβρωση που προκαλείται μέσω χλωριόντων εκτός θαλάσσιου νερού</b>   |   |  |
| Όταν σκυρόδεμα με οπλισμό ή άλλα ενσωματωμένα μέταλλα εκτίθεται σε επαφή με νερό που περιέχει χλωριόντα περιλαμβάνοντας τα αντιπαγωτικά άλατα, από πηγές άλλες εκτός θαλάσσιου νερού, η έκθεση να κατηγοριοποιείται ως ακολούθως: |   |  |
| <b>XD1</b>  | Μέτρια υγρασία  | Επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε χλωριόντα μεταφερόμενα μέσω αέρα   |
| <b>XD2</b>  | Υγρό, σπάνια ξηρό   | Πισίνες, σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε βιομηχανικά νερά που περιέχουν Cl <sup>-</sup>                                 |

|   |  |   |
|---|--|---|
| <b>XD3</b>  | Κυκλική εναλλαγή ύγρανσης-ξηράνσης   | Τμήματα γεφυρών εκτεθειμένα σε σταγονίδια που περιέχουν Cl <sup>-</sup> , πεζο-δρόμια, δάπεδα χώρων στάθμευσης  |
| <b>4 Διάβρωση που προκαλείται μέσω χλωριόντων θαλάσσιου νερού</b>   |  |   |
| Όταν σκυρόδεμα με οπλισμό ή άλλα ενσωματωμένα μέταλλα εκτίθεται σε επαφή με χλωριόντα από θαλάσσιο νερό ή αέρα που μεταφέρει άλατα θαλάσσιου νερού, η έκθεση να κατηγοριοποιείται ως ακολούθως:   |  |   |
| <b>XS1</b>  | Εκτεθειμένο σε άλατα μεταφερόμενα μέσω αέρα αλλά όχι σε άμεση επαφή με θαλάσσιο νερό | Παραθαλάσσιες κατασκευές  |
| <b>XS2</b>  | Μόνιμα βυθισμένο σε νερό   | Τμήματα θαλασσιών κατασκευών  |
| <b>XS3</b>  | Ζώνη διαβροχής   | Τμήματα θαλασσιών κατασκευών  |
| <b>5 Δράση παγετού με ή χωρίς αντιπαγωτικά μέσα</b>   |  |   |
| Όταν σκυρόδεμα εκτίθεται σε σημαντική δράση παγετού παρουσία υγρασίας, η έκθεση να κατηγοριοποιείται ως ακολούθως:  |  |   |
| <b>XF1</b>  | Μέτριος κορεσμός σε νερό, χωρίς αντιπαγωτικά μέσα                                    | Κατακόρυφες επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε βροχή και παγετό  |
| <b>XF2</b>  | Μέτριος κορεσμός σε νερό, με αντιπαγωτικά μέσα                                       | Κατακόρυφες επιφάνειες σκυροδέματος σε έργα οδοποιίας εκτεθειμένες σε παγετό και σε αντιπαγωτικά άλατα μεταφερόμενα μέσω αέρα   |
| <b>XF3</b>  | Υψηλός κορεσμός σε νερό, χωρίς αντιπαγωτικά μέσα                                     | Οριζόντιες επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε βροχή και παγετό   |
| <b>XF4</b>  | Υψηλός κορεσμός σε νερό, με αντιπαγωτικά μέσα ή θαλάσσιο νερό                        | Οδοί και καταστρώματα γεφυρών εκτεθειμένα σε αντιπαγωτικά άλατα. Επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε παγετό και άμεση διαβροχή που περιέχει αντιπαγωτικά άλατα. Ζώνη διαβροχής θαλασσιών κατασκευών που εκτίθεται σε παγετό |
| <b>6 Χημική προσβολή</b>  |  |   |
| Όταν σκυρόδεμα εκτίθεται σε χημική προσβολή από φυσικά εδάφη και υπόγεια νερά όπως δίνεται στον Πίνακα 2.7., η έκθεση να κατηγοριοποιείται ως ακολούθως:<br>Σημείωση: Μια ειδική μελέτη χρειάζεται για να καθορίσει τις σχετικές συνθήκες έκθεσης όπου υπάρχουν όρια εκτός του Πίνακα 2, άλλα δραστικά χημικά, χημικά μολυσμένο έδαφος ή νερό, και υψηλή ταχύτητα νερού σε συνδυασμό με τα χημικά του Πίνακα 2.7. |  |   |
| <b>XA1</b>  | Ασθενώς δραστικό χημικά, περιβάλλον, σύμφωνα με τον Πίνακα 2.7                       |   |
| <b>XA2</b>  | Μέτρια δραστικό χημικά, περιβάλλον,  |   |

|            |   |  |
|------------|---|--|
|            | σύμφωνα με τον Πίνακα 2.7                                     |  |
| <b>XA3</b> | Ισχυρά δραστικό χημικά, περιβάλλον, σύμφωνα με τον Πίνακα 2.7 |  |

**Πίνακας 2.7. Οριακές τιμές για κατηγορίες έκθεσης χημικής προσβολής από φυσικά εδάφη και υπόγεια νερά.**

| Χημικά χαρακτηριστικά                    | Μέθοδος δοκιμής αναφοράς | XA1         | XA2                           | XA3             |
|--|--------------------------|-------------|-------------------------------|-----------------|
| <b>Υπόγεια νερά</b>                      |                          |             |                               |                 |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)     | EN 196-2                 | 200 – 600   | 600 – 3000                    | 3000 – 6000     |
| pH                                       | ISO 4316                 | 5.5 – 6.5   | 4.5 – 5.5                     | 4.0 – 4.5       |
| CO <sub>2</sub> (mg/l)                   | prEN 13577               | 15 – 40     | 40 – 100                      | 100 – κορεσμός  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)      | ISO 7150                 | 15 – 30     | 30 – 60                       | 60 – 100        |
| Mg <sup>2+</sup> (mg/l)                  | ISO 7980                 | 300 – 1000  | 1000 – 3000                   | 3000 – κορεσμός |
| <b>Έδαφος</b>                            |                          |             |                               |                 |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> tot(mg/kg) | EN 196-2                 | 2000 – 3000 | 3000 – 12000                  | 12000 – 24000   |
| Οξύτητα (ml/kg)                          | DIN 4030-2               | > 200       | Δεν παρουσιάζονται στην πράξη |                 |

### 3. ΧΑΛΥΒΕΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

#### 3.1. Γενικά για τους χάλυβες

Λόγω της μικρής εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος (περίπου το 10% της αντοχής σε θλίψη), τοποθετείται οπλισμός, συνήθως χαλύβδινος, εντός του σκυροδέματος, με σκοπό την ανάληψη των εφελκυστικών δυνάμεων στις κατασκευές. Ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος αποτελεί μαζί με το σκυρόδεμα (μπετόν), το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλή θλιπτική αντοχή, τον φέροντα οργανισμό (σκελετό) του κτιρίου. Τα δύο υλικά συμπεριφέρονται ως ενιαίος φορέας, και ο χάλυβας προφυλάσσει το σκυρόδεμα (μπετόν) από το να υποστεί ρωγμές σε κρίσιμα σημεία (περιοχές κόμβων). Επιπλέον, σε σεισμική δραστηριότητα ο χάλυβας απορροφά τη σεισμική ενέργεια μειώνοντας τις βλάβες και σε οριακές καταστάσεις διασφαλίζει τη μη κατάρρευση της κατασκευής (Μαυροειδής Π., 2005).

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος είναι προϊόντα χάλυβα με κυκλική ή σχεδόν κυκλική διατομές. Στην επιφάνειά τους στην τυπική περίπτωση έχουν νευρώσεις για καλύτερη πρόσφυση με το σκυρόδεμα, υπάρχουν όμως και χάλυβες οπλισμού χωρίς νευρώσεις ή με αυλακώσεις.

Οι ράβδοι οπλισμού σκυροδέματος ενσωματώνονται στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος αφού έχει γίνει η κατάλληλη διαμόρφωση (διαδικασίες κοπής κάμψης, συγκολλήσεις, κατασκευή συνδετήρων κ.α.) και ευθυγράμμιση σε περίπτωση που είχαν παραχθεί σε μορφή ρολών. Στη συνέχεια γίνεται η τοποθέτησή τους στο καλούπι ώστε να ακολουθήσει η σκυροδέτηση.

Εξαιτίας της σημασίας τόσο των λειτουργικών ιδιοτήτων των χαλύβων οπλισμών, όσο και της ποιότητάς τους, τα τελευταία χρόνια, τόσο στην Ελλάδα όσο και στις υπόλοιπες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης εισάγονται νέες απαιτήσεις και τροποποιούνται οι παλιές.

Οι νέες απαιτήσεις που εισάγονται συμβαδίζουν με τις σύγχρονες απαιτήσεις σχεδιασμού των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα και περιλαμβάνονται στα

νέα πρότυπα για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3.

Ο Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος (Κ.Τ.Χ.), ο οποίος συντάχθηκε το 2000 και τροποποιήθηκε το 2008 (ΦΕΚ1416/Β/17.07.2008 και ΦΕΚ 2113/Β/13.10.2008) ώστε να ενσωματωθούν οι νέες απαιτήσεις των προτύπων ΕΛΟΤ για τους χάλυβες, ορίζει τις απαιτήσεις όχι μόνο σε σχέση με την ποιότητα των χαλύβων του οπλισμού αλλά και σε σχέση με τη διαμόρφωση και την τοποθέτηση των οπλισμών.

Το πρότυπο ΕΛΟΤ 1421 ορίζει τις απαιτήσεις για του χάλυβες οπλισμού.

Γενικά η ποιότητα των χαλύβων σχετίζεται με τις παρακάτω παραμέτρους: (Μαυροειδής Π., 2008)

- Ικανοποίηση των απαιτήσεων των εκάστοτε ισχυόντων Προτύπων σε σχέση με τις **μηχανικές αντοχές** τους (όριο διαρροής και εφελκυστική αντοχή)
- Δυνατότητα ανάληψης σημαντικών πλαστικών παραμορφώσεων, που εκφράζεται μέσω συγκεκριμένων απαιτήσεων για την **ολκιμότητα** και την **δυσθραυστότητα**.
- Ικανότητα του συστήματος σκυρόδεμα/οπλισμός να μεταφέρει τις εφελκυστικές δυνάμεις από τον οπλισμό στο σκυρόδεμα. Η ικανότητα ανάληψης παραμορφώσεων από τα δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος επηρεάζεται από την αντοχή συνάφειας και γι' αυτό αποτελεί σημαντική προϋπόθεση η ύπαρξη κατάλληλης τραχύτητας του οπλισμού, που εξασφαλίζεται με την τήρηση ειδικών απαιτήσεων για την **γεωμετρία επιφάνειας**.
- Δυνατότητα συγκολλησιμότητας των χαλύβων, η οποία καθορίζεται από τη χημική τους σύσταση και ελέγχεται μέσω της θέσπισης σχετικών απαιτήσεων.
- Δυνατότητα διατήρησης των βασικών προδιαγραφόμενων ιδιοτήτων, εντός των απαιτήσεων των Προτύπων και των κατασκευαστικών κανονισμών, σε τυπικές συνθήκες **διαμόρφωσης** των χαλύβων οπλισμού πριν την ενσωμάτωσή τους στο έργο, καθώς και απαιτήσεις που σχετίζονται με την **συμπεριφορά σε δοκιμασίες κάμψης** και την πρόβλεψη για πιθανή υποβάθμιση των ιδιοτήτων λόγω προβλημάτων φυσικής γήρανσης.

- Διατήρηση των βασικών ιδιοτήτων των χαλύβων οπλισμού, σε περιπτώσεις ιδιαίτερα επιβλαβούς περιβάλλοντος (απαιτήσεις προστασίας από την **διάβρωση**).
- Συμπεριφορά των χαλύβων οπλισμού σε ειδικές συνθήκες, όπως σε πολύ **υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες** ή περιπτώσεις στις οποίες μπορούν να εμφανιστούν **προβλήματα κόπωσης**.
- Χρήση των χαλύβων οπλισμού σε κατάσταση, ποσότητα, διάταξη, μορφή και ποιότητα διαμόρφωσης, αντίστοιχων των απαιτήσεων σχεδιασμού στην τελευταία και καθοριστική φάση της ενσωμάτωσης του στο σκυρόδεμα, ή αλλιώς κατά την **τοποθέτηση** τους.

### 3.2. Παραγωγή χαλύβων

Οι χάλυβες παράγονται με έναν από τους παρακάτω τρόπους: (Βουδικλάρης Θ., 2004)

- Θερμή έλαση χωρίς παραπέρα κατεργασία
- Θερμή έλαση με άμεση θερμική κατεργασία
- Ψυχρή κατεργασία με στρέψη ή/και ολκή του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι χάλυβες χαρακτηρίζονται από τις φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες ανεξάρτητα από τον τρόπο παραγωγής τους.

Όλοι οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται παρουσιάζουν τα εξής κοινά χαρακτηριστικά:

- Μέτρο ελαστικότητας :  $E = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$  ( $2.0 \times 10^6 \text{ kp/cm}^2$ )
- Μέτρο ολισθήσεως (διατμήσεως) :  $G = 8.0 \times 10^4 \text{ MPa}$  ( $0.8 \times 10^6 \text{ kp/cm}^2$ )
- Συντελεστή θερμικής διαστολής :  $\alpha = 12 \times 10^{-6} / \text{grad}$
- Πυκνότητα :  $d = 7.85 \text{ kg/dm}^3$  ή  $\text{t/m}^3$  ή  $\text{g/cm}^3$

Οι παραπάνω τιμές ισχύουν για θερμοκρασία περί τους  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , μεταβαλλόμενες αισθητά υπό την επίδρασή της (π.χ. τα  $E$  και  $G$  μειώνονται κατά 40% περίπου στους

650 °C, ενώ ο συντελεστής  $\alpha$  θερμικής διαστολής αυξάνει κατά 15% περίπου για την ίδια θερμοκρασία). Η μεταβολή είναι ανομοιόμορφη.

Οι ονομαστικές διαμέτροι, οι ονομαστικές διατομές καθώς και η ονομαστική μάζα δίνονται στον Πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1. Ονομαστικές διαμέτροι, ονομαστική μάζα και ανοχές για χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος με νευρώσεις**

| Διάμετρος     | Α                       | Ανοχές (%)   |           | Μάζα          |
|---------------|-------------------------|--------------|-----------|---------------|
|               |                         | ΕΛΟΤ 971/KTX | ΕΛΟΤ 1421 |               |
| <b>d (mm)</b> | <b>(mm<sup>2</sup>)</b> |              |           | <b>(kg/m)</b> |
| 6             | 28,3                    | ±10          | ±6        | 0,222         |
| 8             | 50,3                    | ±8           | ±6        | 0,395         |
| 10            | 78,5                    | ±8           | ±4,5      | 0,617         |
| 12            | 113                     | ±8           | ±4,5      | 0,888         |
| 14            | 154                     | ±6           | ±4,5      | 1,21          |
| 16            | 201                     | ±6           | ±4,5      | 1,58          |
| 18            | 254                     | ±6           | ±4,5      | 2,00          |
| 20            | 314                     | ±6           | ±4,5      | 2,47          |
| 22            | 380                     | ±5           | ±4,5      | 2,98          |
| 25            | 491                     | ±5           | ±4,5      | 3,85          |
| 28            | 616                     | ±5           | ±4,5      | 4,83          |
| 32            | 804                     | ±5           | ±4,5      | 6,31          |
| 40            | 1257                    | ±5           | ±4,5      | 9,86          |

### 3.3. Κατηγοριοποίηση χάλυβων

Μέχρι πριν από λίγα χρόνια, ο πιο γνωστός τρόπος διακρίσεως των χάλυβων σκυροδέματος ήταν (σε συμφωνία και με τους Γερμανικούς Κανονισμούς και τα DIN που ακολουθούσε η Ελλάδα) ο διαχωρισμός τους στις κατηγορίες St I, St III και St IV (η κατηγορία St II είχε καταργηθεί). Οι κατηγορίες St III και St IV (οι “σκληροί” χάλυβες) διακρίνονταν σε υποκατηγορίες St IIIa, St IIIb και St IVa, St IVb αντίστοιχα, όπου η ένδειξη a έδειχνε τους φυσικούς σκληρούς χάλυβες, ενώ η ένδειξη b τους εν ψυχρώ κατεργασμένους.

Στην κατηγορία St I η τάση διαρροής ήταν 2200 kp/cm<sup>2</sup> και η επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας 1400 kp/cm<sup>2</sup>, στην κατηγορία St III οι αντίστοιχες τιμές ήταν 4200 kp/cm<sup>2</sup> για τη διαρροή και 2400 kp/cm<sup>2</sup> για την επιτρεπόμενη τάση και στην

κατηγορία St IV οι τιμές ήταν  $5000 \text{ kp/cm}^2$  και  $2600 \text{ kp/cm}^2$  ή  $2800 \text{ kp/cm}^2$  αντίστοιχα ( $1 \text{ kp} \approx 10 \text{ N}$  και  $1 \text{ kp/cm}^2 \approx 100 \text{ kN/m}^2$ ) (Βουδικλάρης Θ., 2004).

Στον Γερμανικό Κανονισμό Σκυροδέματος του 1972, οι συμβολισμοί τροποποιήθηκαν σε BSt 22/34 (για το St I), BSt 42/50 (για το St III) και BSt 50/55 (για το St IV), όπου ο αριθμητής του κλάσματος έδειχνε το εγγυημένο όριο διαρροής και ο παρονομαστής το εγγυημένο όριο θραύσεως σε εφελκυσμό, π.χ. για το BSt 22/34 έδειχνε όριο διαρροής  $2200 \text{ kp/cm}^2$  και όριο θραύσεως  $3400 \text{ kp/cm}^2$ . Άλλωστε, με τον ίδιο τρόπο εμφανιζόταν εξ αρχής και προ πολλού χρόνου ο χαρακτηρισμός των χάλυβων προεντάσεως (ένδειξη διαρροής και θραύσεως).

Αργότερα, η ποιότητα, οι διαστάσεις, οι ανοχές και οι λοιπές απαιτήσεις χαρακτηριστικών που έπρεπε να ικανοποιούνται από τους χάλυβες του οπλισμού σκυροδέματος που κυκλοφορούσαν στην Ελλάδα, προδιαγράφονταν στα Πρότυπα ΕΛΟΤ 959 “Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος” και ΕΛΟΤ 971 “Συγκολλησιμοί Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος”, που έγιναν υποχρεωτικά με την υπ’ αριθμ. Β 21538/2228/03.12.1987 (ΦΕΚ 702/Β/4-12-87) Απόφαση του Υπουργού Βιομηχανίας, όπως (ύστερα από διαδοχικές τροποποιήσεις - καταργήσεις - επαναφορές) διαμορφώθηκε τελικά με την Υπουργική Απόφαση 15283/Φ7/422/08.08.95 (ΦΕΚ 746/Β/30.08.95). Σύμφωνα με αυτά καθορίστηκαν τρεις κατηγορίες χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος, με βάση τη χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής τους (πραγματικού ή συμβατικού, για παραμένουσα παραμόρφωση 0,2%), ήτοι οι κατηγορίες S220, S400 και S400s, S500 και S500s, που κάθε μία τους είχε τάση ορίου διαρροής 220 MPa ( $\approx 2200 \text{ kp/cm}^2$ ), 400 MPa ( $\approx 4000 \text{ kp/cm}^2$ ) και 500 MPa ( $\approx 5000 \text{ kp/cm}^2$ ), αντίστοιχα. Η ένδειξη s έδειχνε τους συγκολλησίμους χάλυβες. Για τον χάλυβα S220 δεν υπήρχε ιδιαίτερη κατηγορία S220s, ήταν όμως σχεδόν πάντα συγκολλησίμους. Οι λοιποί χάλυβες S400 και S500 ήταν επίσης συγκολλησίμους, αλλά υπό προϋποθέσεις. (Βουδικλάρης Θ., 2004).

Ο ΚΤΧ 2008 προδιαγράφει τις ελάχιστες γενικές και ειδικές απαιτήσεις τις οποίες πρέπει να ικανοποιούν οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος και γίνονται παραπομπές στα παρακάτω Πρότυπα και κανονιστικά κείμενα:

- ΕΛΟΤ EN 10080 (2005): Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησίμους χάλυβες – Γενικές απαιτήσεις

- ΕΛΟΤ 1421-2 (2007): Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος - Συγκολλησιμοι χάλυβες - Μέρος 2: Τεχνική κατηγορία B500A
- ΕΛΟΤ 1421-3 (2007): Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος - Συγκολλησιμοι χάλυβες - Μέρος 3: Τεχνική κατηγορία B500C

Σύμφωνα με τον **ΚΤΧ 2008** (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., 2008) και τα πρότυπα του **ΕΛΟΤ** (ΕΛΟΤ 971, 1996), (ΕΛΟΤ 959, 1996), οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος διακρίνονται στις πιο κάτω κατηγορίες ως εξής:

- Ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής όπου διακρίνονται σε θερμής έλασης χωρίς περαιτέρω κατεργασία (ΘΕ-Χ), θερμής έλασης ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία (ΘΕ-Θ), και ψυχρή κατεργασία (στρέψη, έλαση ή διέγκυση ή συνδυασμό τους) του προϊόντος της θερμής έλασης (ΨΚ-Ο).
- Ανάλογα με την επιφάνεια τους οπότε διακρίνονται σε λείους, με κοιλότητες ή ανάγλυφες νευρώσεις (υψηλής συνάφειας).
- Ανάλογα με την ολκιμότητα οπότε διακρίνονται σε χαμηλής, μέσης ή υψηλής ολκιμότητας.
- Ανάλογα με τη συγκολλησιμότητα οπότε υπάρχουν οι συγκολλησιμοι ή μη συγκολλησιμοι χάλυβες.
- Ανάλογα με την αντοχή τους στη διάβρωση οπότε διακρίνονται σε κοινούς χάλυβες (κράματα Fe-C και μικρές περιεκτικότητες άλλων στοιχείων) και ανοξειδωτοι χάλυβες (περιέχουν 12% Cr και μικρές ποσότητες Ni, Mo, Ti, κτλ.).

Στο Εθνικό Πρότυπο (ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3) η Ελλάδα έχει επιλέξει για το όριο διαρροής (που ορίζει την κατηγορία του χάλυβα) την τιμή των 500 MPa. Όλες οι τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών που αναγράφονται στα Πρότυπα είναι **χαρακτηριστικές τιμές**, έχουν δηλαδή, γενικώς, πιθανότητα 5% να υπολείπονται ή να υπερβάλλονται.

Η μέση ολκιμότητα (B) έχει αποκλεισθεί για τους χάλυβες που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα ως οπλισμός σκυροδέματος (εθνική επιλογή). Η μικρή ολκιμότητα (A) επιτρέπεται μόνο για τους χάλυβες τους χρησιμοποιούμενους σε πλέγματα και μόνο μέχρι τη διάμετρο Φ8 (Πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-2).

Λόγω της σεισμικότητας στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται χάλυβες μεγάλης ολκιμότητας, οι οποίοι επιτρέπουν μεγάλες πλαστιμότητες φερόντων στοιχείων. Έτσι, ο κύριος, ραβδόμορφος οπλισμός αντοχής που επιτρέπεται να χρησιμοποιείται πλέον στην Ελλάδα, είναι κατηγορίας B500C (Πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3).

Επίσης χρησιμοποιούνται και οι B500A (χαμηλής ολκιμότητας για πλέγματα), οι οποίοι είναι συγκολλησιμοι και έχουν τιμή ορίου διαρροής  $f_{y,nom}$  500MPa.

Γενικά, μόνο νευροχάλυβες B500C, με εξέχουσες, ανάγλυφες νευρώσεις, επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα, για φέρουσες κατασκευές. Οι νευρώσεις έχουν σκοπό τη βελτίωση της ικανότητας συνάφειας - πρόσφυσης του χάλυβα στο σκυρόδεμα, ιδιαίτερα αναγκαίας στις σεισμικές περιοχές, στις οποίες υπάρχει πρόβλημα απομείωσης της συνάφειας από την εναλλασσόμενη φόρτιση. Στα δομικά πλέγματα ο χρησιμοποιούμενος χάλυβας (B500A ή B500C) πρέπει επίσης να είναι νευροχάλυβας.

Οι νέες κατηγορίες B500A και B500C αντιστοιχούν, από πλευράς αντοχής, προς αυτές των παλιών χαλύβων St IV και S500 (αν και υπάρχουν σημαντικές διαφορές στη σύνθεση των κραμάτων και ακόμα μεγαλύτερες στις μεθόδους παραγωγής, με επίπτωση κυρίως στη συγκολλησιμότητα και την ολκιμότητα).

Οι παλιές και νέες απαιτήσεις των ελληνικών Προτύπων και Κανονισμών σε σχέση με τις μηχανικές αντοχές και την ολκιμότητα, παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2.

**Πίνακας 3.2. Απαιτήσεις μηχανικών ιδιοτήτων για τους χάλυβες οπλισμού  
σκυροδέματος**

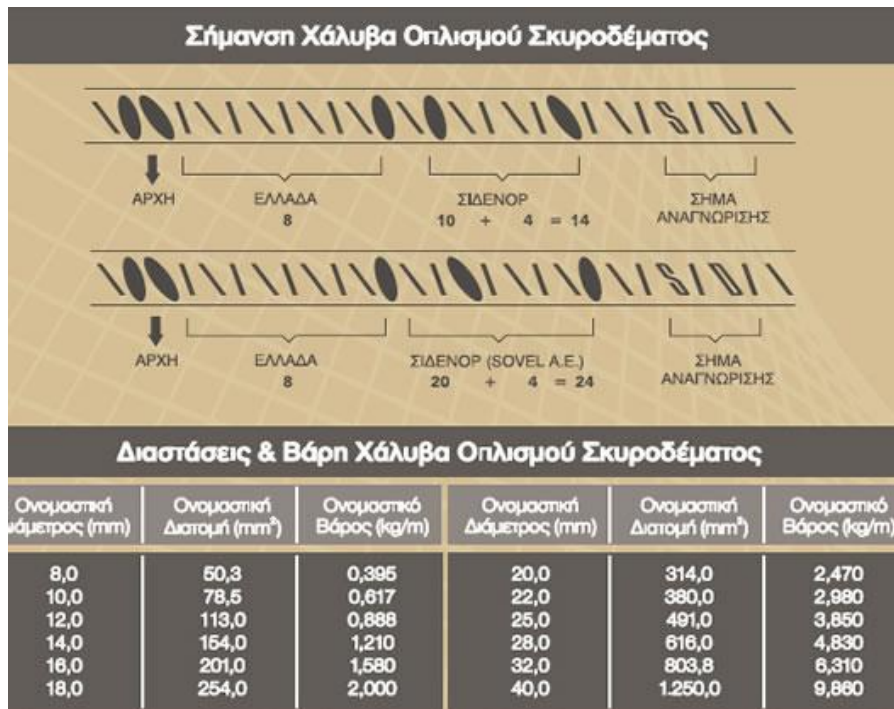
| Μέγεθος  | Πρότυπα ΕΛΟΤ 959, ΕΛΟΤ 971 |                 |                 |                 |                 | Πρότυπο ΕΛΟΤ 1421  |  |
|--|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|--|
|  | S220                       | S400            | S500            | S400s           | S500s           | B500C  | B500A  |
| <b>Όριο διαρροής,<br/>Re (MPa)</b>   | 220                        | 400             | 500             | 400             | 500             | 500  | 500  |
| <b>Εφελκυστική<br/>αντοχή,<br/>Rm (MPa)</b>  | 340                        | 500             | 550             | 440             | 550             | Δεν<br>ορίζεται.<br>Τίθεται<br>έμμεση<br>απαίτηση<br>μέσω των<br>περιορισμ<br>ών για τις<br>τιμές του<br>λόγου<br>R <sub>m</sub> /R <sub>e</sub> | Δεν<br>ορίζεται.<br>Τίθεται<br>έμμεση<br>απαίτηση<br>μέσω των<br>περιορισμ<br>ών για τις<br>τιμές του<br>λόγου<br>R <sub>m</sub> /R <sub>e</sub> |
| <b>Ανηγγμένη<br/>παραμόρφωση<br/>μετά την<br/>θραύση,<br/>A<sub>5</sub> (%)</b>  | 24                         | 14              | 12              | 14              | 12              | Δεν<br>ορίζεται  | Δεν<br>ορίζεται  |
| <b>Ανηγγμένη<br/>παραμόρφωση<br/>στο μέγιστο<br/>φορτίο,<br/>A<sub>gt</sub> (%)</b>  | Δεν<br>ορίζεται            | Δεν<br>ορίζεται | Δεν<br>ορίζεται | Δεν<br>ορίζεται | Δεν<br>ορίζεται | A <sub>gt</sub> ≥7,5   | A <sub>gt</sub> ≥2,5   |
| <b>Λόγος<br/>εφελκυστικής<br/>αντοχής προς<br/>Όριο διαρροής,<br/>Rm/Re</b>  | Δεν<br>ορίζεται            | Δεν<br>ορίζεται | Δεν<br>ορίζεται | 1,05            | 1,05            | 1,15≤R <sub>m</sub> /R <sub>e</sub><br>≤ 1,25  | R <sub>m</sub> /R <sub>e</sub> ≥1.0<br>5   |
| <b>Λόγος<br/>πραγματικής<br/>τιμής Ορίου<br/>διαρροής προς<br/>ονομαστική<br/>τιμή Ορίου<br/>διαρροής,<br/>(R<sub>e,act</sub>/R<sub>e,nom</sub>)</b> | Δεν<br>ορίζεται            | Δεν<br>ορίζεται | Δεν<br>ορίζεται | Δεν<br>ορίζεται | Δεν<br>ορίζεται | R <sub>e,act</sub> /R <sub>e,nom</sub><br>≤ 1,35   | Δεν<br>ορίζεται  |

Η σήμανση των χάλυβων, σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα, ορίζεται με το διαφορετικό τρόπο διάταξης των πλάγιων νευρώσεων στην επιφάνεια της ράβδου όπου δηλώνεται η σήμανση της χώρας και του εργοστασίου παραγωγής του χάλυβα, καθώς και το σύστημα αναγνώρισης της τεχνικής κατηγορίας.

Οι χάλυβες κατηγορίας B500C φέρουν στην επιφάνειά τους δύο σειρές πλάγιων διαδοχικών νευρώσεων αντίθετης φοράς. Σε κάθε σειρά, οι διαδοχικές νευρώσεις έχουν εναλλασσόμενες γωνίες κλίσης ως προς το διαμήκη άξονα της ράβδου.

Η αναγνώριση της χώρας και της μονάδας παραγωγής ενός χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος γίνεται, συνήθως, μέσω ενός αριθμητικού συστήματος κανονικών πλάγιων νευρώσεων ανάμεσα σε ενισχυμένες που παρουσιάζονται επαναλαμβανόμενες στη μία πλευρά των πλάγιων νευρώσεων της ράβδου. Το σύμβολο για την έναρξη της σήμανσης καθώς και για την κατεύθυνση της ανάγνωσης υποδηλώνεται με δύο διαδοχικές ενισχυμένες πλάγιες νευρώσεις. Μετά την έναρξη ακολουθεί η σήμανση της χώρας παραγωγής (πεδίο Β). Ακολουθεί το πλήθος των νευρώσεων που συμβολίζει τη χώρα παραγωγής (κωδικός αριθμός χώρας) και μετά ακολουθεί η σήμανση της μονάδας παραγωγής του χάλυβα (πεδίο Γ). Εάν ο αριθμός που δηλώνει τη μονάδα παραγωγής είναι διψήφιος (το 10 και τα πολλαπλάσια του απαγορεύονται) τότε συμβολίζεται με δύο ομάδες πλάγιων νευρώσεων ανάμεσα σε ενισχυμένες, εκ των οποίων η πρώτη ομάδα δίνει το πρώτο ψηφίο και η δεύτερη ομάδα το δεύτερο ψηφίο του κωδικού του εργοστασίου (Βατάλης Α., 2009).

Στο σχήμα 3.1. παρουσιάζεται η σήμανση του χαλύβδινου οπλισμού βάση των χαρακτηριστικών και τη χώρα παραγωγής.



*Σχήμα 3.1: Σήμανση χάλυβα οπλισμού Σκυροδέματος με βάση της χώρας παραγωγής (πηγή: ΣΙΔΕΝΩΡ Α.Ε)*

### 3.4. Συγκολλησιμότητα

Η συγκολλησιμότητα είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα των χαλύβων καθώς παρέχει τη δυνατότητα της σύνδεσης τμημάτων του οπλισμού με σταθερές και υγιείς συγκολλήσεις, έτσι ώστε η προκύπτουσα σύνδεση να ικανοποιεί τις απαιτήσεις σχεδιασμού.

Καθορίζεται από τη χημική τους σύσταση και συμπυκνώνεται στην έννοια της **ισοδύναμης τιμής σε άνθρακα (C<sub>eq</sub>)**, που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_{eq} = C + (Mn/6) + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15,$$

όπου τα σύμβολα των χημικών στοιχείων δείχνουν την επί τοις εκατό περιεκτικότητα κατά βάρος (% κ.β.) όπως προσδιορίζεται από τη χημική ανάλυση.

Η ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα (C<sub>eq</sub>) είναι μία σύνθετη παράμετρος, που παρουσιάζει τη συμμετοχή των χημικών στοιχείων στη δημιουργία σκληρών, ψαθυρών δομών κατά τη δημιουργία της συγκόλλησης, που προφανώς θέλουμε να αποφύγουμε.

Οι χάλυβες θεωρούνται συγκολλησιμοι όταν οι περιεκτικότητες σε άνθρακα (C), θείο (S), φωσφόρο (P), άζωτο (N), χαλκό (Cu), καθώς και η ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα  $C_{eq}$  δεν υπερβαίνουν τις αντίστοιχες τιμές που δίνονται στον Πίνακα 3.3., σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 10080.

**Πίνακας 3.3. Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές για τη χημική σύσταση (περιεκτικότητα % κ.β.) κατά ΕΛΟΤ 10080**

|   | <b>Άνθρακας<br/>C<sup>(2)</sup></b> | <b>Θείο<br/>S</b> | <b>Φώσφορος<br/>P</b> | <b>Άζωτο<br/>N<sup>(1)</sup></b> | <b>Χαλκός<br/>Cu</b> | <b>Ισοδύναμη<br/>τιμή σε<br/>άνθρακα<br/>C<sub>eq</sub><sup>(2)</sup></b> |
|---|-------------------------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------|---|
| Ανάλυση<br>ρευστού χάλυβα<br>κατά τη<br>χύτευση | 0,22                                | 0,050             | 0,050                 | 0,012                            | 0,80                 | 0,50  |
| Ανάλυση<br>τελικού<br>προϊόντος                 | 0,24                                | 0,055             | 0,055                 | 0,014                            | 0,85                 | 0,52  |

(1) Υψηλότερες τιμές σε άζωτο επιτρέπονται εάν υπάρχουν επαρκείς ποσότητες στοιχείων που το δεσμεύουν.

(2) Επιτρέπεται η υπέρβαση των μέγιστων τιμών για τον άνθρακα κατά 0,03% κ.β., με την προϋπόθεση ότι μειώνονται αντίστοιχα οι ισοδύναμες τιμές σε άνθρακα κατά 0,02% κ.β.

Η συγκόλληση θα γίνεται μόνο με παράθεση και όχι μετωπικά και η θέση της συγκόλλησης πρέπει να επιλέγεται σε ευθύγραμμο τμήμα της ράβδου (π.χ. σε απόσταση 50 cm από την καμπύλη). Επίσης η αντοχή της μπορεί να ανταποκρίνεται στη φέρουσα ικανότητα του ισχυρότερου από τους συγκολλούμενους χάλυβες. Τα συγκολλημένα δοκίμια ελέγχονται σε εφελκυσμό και κάμψη, χωρίς θερμική κατεργασία πριν ή μετά τη συγκόλληση.

Οι συγκολλήσεις πρέπει να γίνονται πάντα υπό αυστηρή τήρηση των σχετικών μέτρων ασφαλείας και από τεχνίτες πεπειραμένους.

### 3.5.Συνάφεια οπλισμού - σκυροδέματος

Οι ιδιότητες συνάφειας μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος εξαρτώνται από τις ιδιότητες του σκυροδέματος στο οποίο προσφύονται και με το οποίο συνεργάζονται. Μετά την ενσωμάτωση των χαλύβων του οπλισμού στο σκυρόδεμα αναπτύσσεται τάση συνάφειάς τους με το σκυρόδεμα σταδιακά (όχι ωστόσο γραμμικά). Η τάση συνάφειας του χάλυβα με το σκυρόδεμα είναι συνάρτηση των παρακάτω βασικών παραμέτρων: (Μαυροειδής Π., 2009)

- Του επιβαλλόμενου φορτίου
- Της ποιότητας του σκυροδέματος
- Των μηχανικών ιδιοτήτων των ράβδων οπλισμού
- Των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας των ράβδων οπλισμού
- Της κατάστασης στην οποία βρίσκεται η επιφάνεια των ράβδων του οπλισμού

Για την ανάπτυξη της τάσης αυτής, οι ράβδοι πρέπει να έχουν ένα συγκεκριμένο μήκος αγκύρωσης μέσα στο σκυρόδεμα, που σχετίζεται με τις παραπάνω παραμέτρους και φυσικά και με την ποιότητα του σκυροδέματος.

## 4. ΔΙΑΒΡΩΣΗ

### 4.1. Εισαγωγή

Σύμφωνα με το ISO 8044 – 99 δίνεται ο ορισμός της διάβρωσης, σαν συναφής έκφραση της Μηχανικής της Διάβρωσης (Corrosion Engineering): «Διάβρωση είναι η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του μετάλλου, του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος, που αυτά αποτελούν τμήμα του».

Με τον όρο διάβρωση εννοούμε την καταστροφή, φθορά ή και λειτουργική αχρήστευση ενός υλικού εξαιτίας χημικής ή ηλεκτροχημικής ή μηχανικής δράσης του υλικού με το περιβάλλον του. (Υφαντής Δ., 2000)

Οι κατασκευές από σκυρόδεμα και οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ανθεκτικές στη φθορά. Όμως η ανθεκτικότητα των κατασκευών αυτών επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες επιδρούν στην κατασκευή εσωτερικά και εξωτερικά. Σε χώρες που περιβάλλονται από θάλασσα και με ζεστό κλίμα, όπως η Ελλάδα, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, τα χλωριόντα και άλλοι αέριοι ρύποι όπως το διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub>, το διοξείδιο του θείου SO<sub>2</sub> και τα οξείδια του αζώτου NO<sub>x</sub>, είναι παράγοντες θεμελιώδους σημασίας για τη φθορά και κατά συνέπεια την καταστροφή του σκυροδέματος, η οποία προκαλείται κατά κύριο λόγο από τη διάβρωση του οπλισμού και την ενανθράκωση του σκυροδέματος.

Σύμφωνα με την Αμερικανική Επιτροπή Σκυροδέματος (ACI 201), ανθεκτικότητα, είναι η ικανότητά του σκυροδέματος να αντιστέκεται στη διάβρωση, τη χημική προσβολή, την τριβή, ή οποιαδήποτε άλλη διαδικασία φθοράς όταν εκτίθεται σε περιβαλλοντικές συνθήκες.

Στη γενικότερη περίπτωση η διάβρωση του σκυροδέματος μπορεί να είναι φυσική ή χημική. Με τον όρο φυσική διάβρωση χαρακτηρίζονται οι φθορές από καθαρά μηχανικούς λόγους που οδηγούν σε αργή μείωση του όγκου του σκυροδέματος ή σε απότομη ρηγμάτωση. Τέτοιοι μηχανικοί λόγοι μπορεί να είναι η τριβή που μπορεί να

δημιουργηθεί στην περίπτωση που το νερό ρέει κατά μήκος μια επιφάνειας και το ψύχος όπου σε περιόδους χαμηλής θερμοκρασίας του περιβάλλοντος παρατηρείται συστολή του σκυροδέματος με αποτέλεσμα την καταστροφή του.

Η χημική διάβρωση σχετίζεται με φαινόμενα χημικά ή φυσικοχημικά, χωρίς να αποκλείεται η συνέργια μηχανικών αιτίων. (Μπατής Γ., 1999)

Η χημική δράση μπορεί να χωριστεί σε τρία είδη:

- Διάβρωση λόγω εκχύλισης ιόντων (προκαλείται από τα μαλακά νερά που διαλύουν το υδροξείδιο του ασβεστίου)
- Διάβρωση από ιοντοανταλλαγή (πραγματοποιείται μεταξύ του σκυροδέματος και του διαβρωτικού περιβάλλοντος μεταξύ των ιόντων που έχουν παρόμοια ιοντική ακτίνα και περίπου ίδιο μέγεθος ατόμων)
- Διάβρωση μέσω σχηματισμού μεγαλομοριακών ενώσεων (όπου τα μόρια που σχηματίζονται στο εσωτερικό των πόρων έχουν μεγάλο όγκο και μπορεί να προκαλέσουν την καταστροφή του σκυροδέματος).

#### **4.2. Διαβρωτικό περιβάλλον**

Στην πράξη υπάρχει τεράστια ποικιλία διαβρωτικού περιβάλλοντος και στις τρεις καταστάσεις της ύλης, όπως: σε αέρια μορφή με ή χωρίς παρουσία υγρασίας (ατμοσφαιρική διάβρωση, διάβρωση σε ξηρή ατμόσφαιρα – απουσία υγρασίας – διάβρωση από καυσαέρια), σε υγρή μορφή (θαλασσινό, φυσικό, ύδρευσης, αποχέτευσης, βιομηχανικό νερό, χημικά υγρά, βιολογικά υγρά) και σε στερεή μορφή (έδαφος, σκυρόδεμα)

Σε κάθε περίπτωση το διαβρωτικό σύστημα είναι ετερογενές και η διάβρωση εμφανίζεται στη διεπιφάνεια.

Παράμετροι που επηρεάζουν κατά περίπτωση τη διάβρωση είναι:

με κριτήριο το υλικό:

- η χημική του σύσταση
- η δομή του
- η μέθοδος και οι συνθήκες χύτευσης
- οι μηχανικές κατεργασίες
- η τελική επεξεργασία της επιφάνειας

με κριτήριο το διαβρωτικό περιβάλλον:

- χημικές, φυσικές ή ηλεκτροχημικές όπως το pH (όξινο, ουδέτερο, αλκαλικό),
- το είδος των εν διαλύσει ιόντων (π.χ. Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>),
- η αγωγιμότητα του διαβρωτικού μέσου,
- η παρουσία ή όχι διαλυμένου οξυγόνου,
- η θερμοκρασία,
- η ακινησία ή ροή του διαβρωτικού μέσου,
- η μηχανική καταπόνηση μόνιμη ή περιοδική που επιβάλλεται στο υλικό από το περιβάλλον,
- η παρουσία ζώντων οργανισμών (π.χ. μακρο-οργανισμοί στο θαλάσσιο περιβάλλον, βακτηρίδια στο έδαφος) κ.α.

Στην πράξη μπορούν να συνυπάρχουν δύο ή και τρεις μηχανισμοί διάβρωσης που δρουν άμεσα ή έμμεσα με αποτέλεσμα η διάγνωση των αιτιών της διάβρωσης να είναι εξαιρετικά δύσκολη σε ορισμένες περιπτώσεις.

Κοινό χαρακτηριστικό όλων των μορφών διάβρωσης είναι η επιφανειακή αλλοίωση των υλικών με επιπτώσεις που η βαρύτητά τους εξαρτάται από τις απαιτήσεις λειτουργίας του υλικού.

Οι κύριοι διαβρωτικοί παράγοντες για κάθε περιβάλλον είναι:

- Η Ατμόσφαιρα. Οι κύριοι παράγοντες της ατμοσφαιρικής διάβρωσης είναι το οξυγόνο, η υγρασία που περιέχεται στην ατμόσφαιρα και το CO<sub>2</sub>. Η ατμοσφαιρική διάβρωση εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες, δηλαδή αν το κλίμα είναι ξηρό, τροπικό ή πολικό.
- Το Έδαφος. Η διαβρωτική ικανότητα του εδάφους επηρεάζεται κυρίως από τα συστατικά που περιέχονται σε αυτό. Παράγοντες διάβρωσης είναι η οξύτητα του εδάφους, η ύπαρξη αλάτων η υγρασία του εδάφους, η περιεκτικότητά του σε O<sub>2</sub>, η δομή και η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα βακτήρια που επίσης περιέχονται στο έδαφος βοηθούν στην αναγωγή των θεικών ενώσεων σε θειώδεις και αυξάνουν έτσι το βαθμό διάβρωσης.
- Το Νερό. Το νερό αποτελεί κύριο παράγοντα διάβρωσης χάρη στην ικανότητά του να υδρολύει και να διαλύει υλικά που έρχονται σε επαφή με αυτό, καθώς

και στην ικανότητά του να διεισδύει και να αναρριχάται (με βάση το μηχανισμό των τριχοειδών φαινομένων). Στη διαβρωτική δράση του νερού πρέπει να προστεθεί και εκείνη των διαφόρων διαβρωτικών ουσιών των οποίων αποτελεί φυσικό φορέα. Ο περισσότερο διαβρωτικός τύπος νερού είναι το νερό της θάλασσας. Οι βιολογικοί οργανισμοί, η περιεκτικότητα σε οξυγόνο, η άνοδος της θερμοκρασίας και η αύξηση της ταχύτητας κίνησης του νερού (τρικυμία) αυξάνουν τη διαβρωτική δράση του θαλασσινού νερού.

### 4.3. Διάβρωση μετάλλων

Τα μέταλλα σχεδόν στο σύνολο τους υφίστανται διάφορες φθορές στο περιβάλλον το οποίο βρίσκονται εκτεθειμένα εξαιτίας χημικών, μηχανικών ή μικροβιολογικών δράσεων. Η πλήρης κατανόηση του ορισμού της διάβρωσης παίζει καθοριστικό ρόλο στην προσπάθεια αποφυγής του φαινομένου, καθώς επίσης και την αποκατάσταση των φθορών που έχει υποστεί. Γενικά, ο όρος διάβρωση περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες εκείνες κατά τις οποίες επέρχεται υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού και μείωση του χρόνου ζωής του. Με την έννοια της διάβρωσης, ως διεργασία είναι συνυφασμένη η ταχύτητα της διαβρωτικής δράσης, της προκαλούμενης φθοράς και η έκταση και η φύση της φθοράς σε σχέση με τη λειτουργία του σχετικού συστήματος.

Σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ και το ISO 8044-86 ο όρος της διάβρωσης δίνεται ως εξής:  
*«Διάβρωση είναι η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του μετάλλου, του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος, που αυτά αποτελούν τμήμα του».*

Ο παραπάνω ορισμός δεν είναι πλήρης αφού για παράδειγμα διάβρωση εκδηλώνεται και στην περίπτωση όπου το διαβρωτικό περιβάλλον δεν είναι σε άμεση επαφή με το μέταλλο, όπως σε επιμεταλλωμένα μέταλλα. Στην περίπτωση αυτή το επίστρωμα (άμεσο περιβάλλον) και το βασικό μέταλλο δεν αλληλεπιδρούν, αλληλεπιδρούν όμως το βασικό μέταλλο με το έμμεσο περιβάλλον (ατμόσφαιρα, νερό κ.α).

Από την Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Διάβρωσης, της Διεθνούς Επιτροπής Θαλάσσιας Διάβρωσης και Ρύπανσης των Υφάλων, δίνεται ένας άλλος ορισμός: «*Διάβρωση ονομάζεται η αυθόρμητη, κατ' επέκταση εκβιασμένη, ηλεκτροχημικής κατ' επέκταση χημικής, κατ' επέκταση μηχανικής, κατ' επέκταση βιολογικής φύσης, αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων και των κραμάτων, που οδηγεί σε απώλεια υλικού*».

Όταν ένα μέταλλο βρεθεί σε δεδομένο περιβάλλον μπορεί να συμπεριφερθεί με τους εξής τρόπους:

- Ενεργή κατάσταση όπου το μέταλλο διαβρώνεται σχηματίζοντας στην επιφάνειά του αδιάλυτα προϊόντα διάβρωσης τα οποία έχουν υποβαθμισμένες ιδιότητες σε σχέση με το μέταλλο. Η διάβρωση συνεχίζεται γιατί τα προϊόντα αυτά δεν εμποδίζουν τη συνέχισή της και παρατηρείται μεγάλη απώλεια μάζας του υλικού.
- Αδρανής κατάσταση, η οποία συμβαίνει συνήθως στα ευγενή μέταλλα (π.χ. χρυσός, ασήμι, πλατίνα) και είναι αποτέλεσμα της θερμοδυναμικής σταθερότητας των μετάλλων αυτών. (Roventi et al, 2013)
- Παθητική κατάσταση, όπου το μέταλλο διαβρώνεται και σχηματίζεται στην επιφάνειά του ένα αδιάλυτο προϊόν (ένα λεπτό προστατευτικό φιλμ), το οποίο ελαττώνει σημαντικά την ταχύτητα διάβρωσης εφόσον δεν έχει υποστεί φθορές στην επιφάνειά του. Στην περίπτωση που το προστατευτικό φιλμ έχει παρουσιάσει ρωγμές στην επιφάνειά του τότε μπορεί να παρουσιάσει ενεργή συμπεριφορά.

#### **4.4. Μορφές διάβρωσης**

Δεν υπάρχει ενιαία συστηματική κατάταξη των τύπων της διάβρωσης στη βιβλιογραφία διότι δεν χρησιμοποιούνται πάντοτε τα ίδια κριτήρια κατάταξης. Στο DIN 50900 Teil I, April 1982 Corrosion der Metallic – Bereft γίνεται η γενική διάκριση μεταξύ διάβρωσης με και χωρίς μηχανική καταπόνηση.

#### **4.4.1. Διάβρωση από μηχανική καταπόνηση (stress corrosion cracking)**

Πρόκειται για διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση η οποία προκύπτει από συνδυασμένη δράση χημικών ή ηλεκτροχημικών διαβρωτικών παραγόντων και μηχανικών τάσεων, που προϋπήρχαν στο υλικό ή επιβάλλονται εξωτερικά. Η έναρξη της διάβρωσης μπορεί να έχει αίτια είτε μηχανικά τα οποία στη συνέχεια προκαλούν την ηλεκτροχημική δράση, είτε ηλεκτροχημικά που αρχικά επηρεάζουν τη μηχανική αντοχή του υλικού το οποίο συνέχεια διαβρώνεται υπό την επίδραση πρόσθετων μηχανικών τάσεων. (Υφαντής Δ., 2000)

Η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση απαιτεί την ταυτόχρονη δράση ενός διαβρωτικού μέσου και μιας διατηρούμενης εφελκυστικής τάσης. Έτσι μερικά υλικά τα οποία είναι αδρανή σε ένα συγκεκριμένο διαβρωτικό μέσο γίνονται ευάλωτα σε αυτή τη μορφή διάβρωσης όταν εφαρμοστεί μια τάση. Αρχικά σχηματίζονται μικρές ρωγμές οι οποίες διαδίδονται σε μια διεύθυνση κάθετη στην μηχανική τάση, ακολουθώντας περικρυσταλλικό ή ενδοκρυσταλλικό δρόμο, με αποτέλεσμα να υπάρξει τελικά αστοχία. Το φαινόμενο εξελίσσεται σε τρία στάδια: α) δημιουργία εσοχής, β) εκκόλαψη και γ) γρήγορη προώθηση της ρωγμής με ταχύτητα που είναι συνήθως ανάλογη του ανοδικού ρεύματος στο βάθος της ρωγμής. (Σκουλικίδης Θ.Ν., 2000)

Η διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση θεωρείται ιδιαίτερα επικίνδυνη, συχνά δε η ύπαρξή της συνοδεύεται από εμφανή προϊόντα διάβρωσης.



**Εικόνα 4.1 Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση**

Τα κυριότερα είδη διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση, είναι:

➤ **Ρευστομηχανική διάβρωση ή διάβρωση εκτριβής (erosion corrosion)**

Η διάβρωση εκτριβής περιλαμβάνει την ταχύτερη απώλεια μάζας λόγω της σχετικής κίνησης μεταξύ του διαβρωτικού μέσου και της μεταλλικής επιφάνειας. Η μηχανική επίδραση της ροής ή της ταχύτητας του ρευστού συνδυασμένο με τη διαβρωτική του δράση έχει σαν αποτέλεσμα την τοπική καταστροφή του επιφανειακού στρώματος και την αύξηση της ταχύτητας διάβρωσης λόγω της δημιουργίας τοπικών γαλβανικών στοιχείων μεταξύ των περιοχών που έχουν υποστεί φθορά από εκτριβή και του υπόλοιπου μετάλλου. (Song G.L. and Xu Z., 2012)

Η αντοχή των υλικών σε διάβρωση εκτριβής καθορίζεται από την χημική τους σύσταση, την αντίσταση στην διάβρωση, την σκληρότητά τους και ειδικά του επιφανειακού στρώματος, καθώς και από τις μεταλλουργικές διεργασίες που έχουν υποστεί.

➤ **Μηχανική σπηλαιώδης διάβρωση (cavitation corrosion)**

Η σπηλαιώδης διάβρωση είναι μια ειδική μορφή διάβρωσης εκτριβής και παρατηρείται όταν η πίεση λειτουργίας ενός ρευστού που κινείται με μεγάλη ταχύτητα πέσει κάτω από την πίεση των κεκορεσμένων ατμών του σχηματίζοντας φυσαλίδες ατμού. Οι φυσαλίδες ατμού σπάνε κοντά στη μεταλλική επιφάνεια προκαλώντας κύματα σύγκρουσης με αυτήν ή το προστατευτικό της οξειδίο, τα οποία αντιστοιχούν σε τοπικές πιέσεις μέχρι 4000 atm. Συνέπεια είναι η επιτάχυνση της διάβρωσης, η οποία συνεχώς αυξάνεται διότι η ανώμαλη σπογγώδης επιφάνεια που δημιουργείται ευνοεί συνεχώς το σχηματισμό όλο και περισσότερων φυσαλίδων και η τοπική καταστροφή της επιφάνειας. Αυτή η μορφή διάβρωσης εμφανίζεται κυρίως σε αντλίες υγρών, σε υδραυλικές τουρμπίνες, προπέλες πλοίων, και γενικά σε επιφάνειες που υφίστανται ταχεία ροή υγρών και μεταβολές πίεσης. (Kruger J., 2001)

Δημιουργούνται εσοχές, σπηλαιώσεις, κρατήρες και τοπική εξάχνωση του υλικού, εξαιτίας της δημιουργίας πιέσεων και υποπιέσεων.

➤ **Διάβρωση από τριβή (fretting corrosion)**

Η διάβρωση από τριβή παρατηρείται στη διεπιφάνεια μεταξύ δυο επιφανειών, μια τουλάχιστον εκ των οποίων είναι μεταλλική, όταν υπάρχει ολίσθηση υπό φορτίο. Η ολίσθηση είναι κυρίως παλμική, όπως αυτή που παρατηρείται από δόνηση. Η διάβρωση από τριβή παρατηρείται κυρίως σε έκθεση στην ατμόσφαιρα παρά σε υδατικά διαλύματα και έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό σκόνης οξειδίων που δύσκολα απομακρύνεται προκαλώντας βελονισμούς ή αυλακώσεις που περιβάλλονται από προϊόντα διάβρωσης. Εμφανίζεται σε στοιχεία μηχανών, σε πλάκες με μπουλόνια, σε γρανάζια με σφήνα, σε ηλεκτρικές επαφές κλπ. (Revie R.W. and Uhlig H.H., 2008)

➤ **Διάβρωση λόγω κόπωσης (fatigue corrosion)**

Η διάβρωση λόγω κόπωσης παρατηρείται όταν ένα μέταλλο αστοχεί πρόωρα κάτω από τη συνδυασμένη δράση διαβρωτικής προσβολής και επαναλαμβανόμενων κύκλων φόρτισης, δηλαδή γρήγορα εναλλασσόμενων εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων. Η συνήθης περίπτωση περιέχει εφαρμοζόμενες τάσεις αρκετά κάτω από το όριο αντοχής σε εφελκυσμό.

Η φθορά του υλικού είναι σχεδόν πάντοτε μεγαλύτερη από το άθροισμα της φθοράς από διάβρωση και της φθοράς από κόπωση αν δράσουν ξεχωριστά. Η διάβρωση λόγω κόπωσης μπορεί να αποφευχθεί με τη χρησιμοποίηση κραμάτων ανεκτικών σε διάβρωση λόγω κόπωσης, ή με τη χρησιμοποίηση κραμάτων επικαλυμμένων με προστατευτικές επιστρώσεις ώστε να καθυστερείται η ανάπτυξη των ρωγμών.

#### **4.4.2. Διάβρωση χωρίς μηχανική καταπόνηση**

Με κριτήριο τη γεωμετρική κατανομή της διάβρωσης στην επιφάνεια χωρίς μηχανική καταπόνηση διακρίνουμε δύο τύπους, την ομοιόμορφη ή γενική αν η επιφάνεια του μετάλλου καλύπτεται από ομοιόμορφο στρώμα διάβρωσης όπως π.χ. στην αμαύρωση ή η μεταλλική επιφάνεια διαλύεται ομοιόμορφα όπως π.χ. κατά τη διάλυση μετάλλων σε οξέα, και την τοπική διάβρωση όταν η προσβολή είναι εντοπισμένη σε ορισμένες περιοχές της επιφάνειας δηλαδή υπάρχουν διαφορετικές ταχύτητες διάβρωσης στην επιφάνεια.

➤ **Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση.**

Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση είναι το είδος της διάβρωσης το οποίο παρατηρείται ομοιόμορφα κατανεμημένο σε όλη την εκτεθειμένη επιφάνεια ενός μετάλλου. Συνήθως χαρακτηρίζεται από μια χημική ή ηλεκτροχημική δράση η οποία προχωράει ομοιόμορφα σε όλη την εκτεθειμένη επιφάνεια του μετάλλου ή στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός ομοιόμορφου και περίπου ισοπαχούς στρώματος προϊόντος διάβρωσης ή μιας περίπου ομοιόμορφης διάλυσης της επιφάνειας του υλικού. Το φαινόμενο της διάβρωσης εμφανίζεται συνήθως όταν το μέταλλο είναι σε επαφή με οξύ ή διάλυμα, αλλά και με ξηρή ατμόσφαιρα (οξειδωση σε υψηλές θερμοκρασίες). Το είδος αυτό της διάβρωσης μπορεί να προβλεφθεί ή αντιμετωπιστεί με: (α) κατάλληλη επιλογή υλικών, (β) προστατευτικά επιστρώματα, (γ) χρήση αναστολέων ή αλλαγή περιβάλλοντος, (δ) ανοδική προστασία και καθοδική προστασία και (ε) αντικατάσταση με υλικό ανθεκτικότερο στη διάβρωση.

➤ **Τοπική διάβρωση.**

Εδώ η προσβολή μπορεί να εξειδικευθεί ανάλογα με τη μορφή ή την έκτασή της οπότε διακρίνουμε διάβρωση με βελονισμούς, ή σημειακή ή με οπές. Η τοπική διάβρωση είναι γενικά ο συνήθης τύπος διάβρωσης στις βαμμένες επιφάνειες. Είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη για σημαντικά κατασκευαστικά υλικά, όπως ο σίδηρος ανοξειδωτος ή όχι και το αλουμίνιο, διότι μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή ή σε αχρήστευση μιας κατασκευής π.χ. τρύπημα μιας σωλήνωσης ή μιας δεξαμενής.

**Διάβρωση με βελονισμούς (pitting corrosion):**

Στη διάβρωση με βελονισμούς εμφανίζεται διάβρωση μιας μεταλλικής επιφάνειας σε ένα σημείο ή μια μικρή περιοχή και σχηματίζονται εσοχές και κρατήρες. Καθώς δεν γίνεται εύκολα αντιληπτό και το φαινόμενο προχωράει με μεγάλη ταχύτητα, αποτελεί ένα από τα πιο βλαβερά είδη διάβρωσης και μπορεί να προκαλέσει καταστροφή των υλικών λόγω διάτρησης ακόμα και για πολύ μικρό ποσοστό απώλειας βάρους της κατασκευής. (Kruger J., 2001)

Λόγω του μικρού μεγέθους των βελονισμών και επειδή συχνά καλύπτονται από προϊόντα διάβρωσης, είναι συνήθως δύσκολο να διακριθούν. Η διάβρωση με βελονισμούς μπορεί να εμφανιστεί ακόμα και σε μέταλλα επιστρωμένα με προστατευτικά υλικά. Διάβρωση με βελονισμούς υφίστανται τα παθητικά μέταλλα ή κράματα, όπως κράματα του αλουμινίου, ο ανοξείδωτος χάλυβας και άλλα ανοξείδωτα κράματα, στα οποία το λεπτό φιλμ οξειδίων (παθητικό στρώμα) έχει διαρρηχτεί και δεν είχε επαναπαθητικοποιηθεί άμεσα. Επίσης, η διάβρωση με βελονισμούς μπορεί να εμφανιστεί σε περιβάλλον με διαλύματα χλωριόντων, τα οποία επιτίθενται στο παθητικό στρώμα οξειδίων με αποτέλεσμα τη διάβρωση. (Yeih W. and Chang J., 2005)

#### **Διάβρωση σε σχισμές (crevice corrosion):**

Η διάβρωση σε σχισμές είναι μια εντοπισμένη μορφή διάβρωσης, η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ύπαρξη σχισμών ή προφυλαγμένων περιοχών μεταλλικής επιφάνειας σε μικρο-περιβαλλοντικό επίπεδο. Αυτή η μορφή της διάβρωσης συνδυάζεται και με την ύπαρξη μικρών όγκων στάσιμων διαλυμάτων ή στερεών σε οπές, φλάντζες, ή παρεμβύσματα, σε σχισμές κάτω από μπουλόνια και πριτσίνια, καθώς και κάτω από επιφανειακές αποθέσεις και χρώματα που έχουν υποστεί μερική αποκόλληση. Η εντοπισμένη διάβρωση σε περιβάλλοντα πλούσια σε οξυγόνο και χλωριόντα, προκαλείται λόγω της σταδιακής οξίνισης του διαλύματος που βρίσκεται μέσα στις σχισμές. Ευπαθή μέταλλα σε αυτό το είδος της διάβρωσης είναι αυτά που προστατεύονται από τα οξείδια τους π.χ ανοξείδωτος χάλυβας, αλουμίνιο, τιτάνιο κ.λ.π. (ISO 9223:2012)

#### **Περικρυσταλλική διάβρωση (intergranular):**

Η περικρυσταλλική διάβρωση εμφανίζεται στα περατωτικά όρια των κόκκων, τα οποία είναι ανοδικότερα του κυρίως μετάλλου λόγω της συγκέντρωσης σε αυτά ακαθαρσιών και στοιχείων κραματοποίησης. Συνέπεια της διάβρωσης αυτής είναι η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, το οποίο υπό την επίδραση τάσεων υφίσταται περικρυσταλλικές ρηγματώσεις, ακόμη και αν το επιβαλλόμενο φορτίο είναι αρκετά μικρότερο από εκείνο της αντοχής του σε εφελκυσμό. (Coburn S.K., 1984)

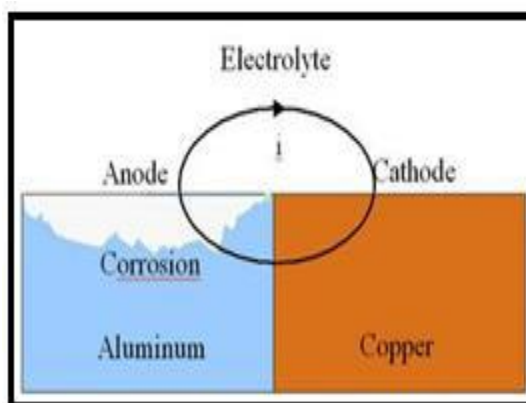
Το πιο σύνηθες παράδειγμα περικρυσταλλικής διάβρωσης παρουσιάζεται στους ωστενιτικούς χάλυβες στην περιοχή των συγκολλήσεων, όπου κατακρημνίζονται καρβίδια λόγω της θερμικής κατεργασίας και της χημικής σύστασης των χαλύβων. Αυτές οι κατακρημνίσεις λόγω διαφορετικής σύνθεσης από αυτήν στο εσωτερικό του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

➤ **Διάβρωση λόγω ανάπτυξης εξωτερικής διαφοράς δυναμικού**

**Γαλβανική διάβρωση ή διμεταλλική διάβρωση (galvanic corrosion):**

Επιτυγχάνεται όταν δύο διαφορετικά μέταλλα ή κράματα βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους παρουσία ενός ηλεκτρολύτη (διαβρωτικό ή αγώγιμο περιβάλλον). Μεταξύ των δύο υλικών δημιουργείται διαφορά δυναμικού με ροή ηλεκτρονίων στο σύστημά τους. Το μέταλλο το οποίο έχει μικρότερη αντοχή στη διάβρωση υπόκειται σε επιταχυνόμενη διαβρωτική δράση (άνοδος), ενώ το μέταλλο με μεγαλύτερη αντίσταση στη διάβρωση (περισσότερο ευγενές) προστατεύεται ως καθοδικότερο.

Ο μηχανισμός της διάβρωσης βασίζεται στα διαφορετικά ηλεκτροχημικά δυναμικά που έχουν τα μέταλλα και τα κράματα στον ίδιο ηλεκτρολύτη. Η αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη επηρεάζει το βαθμό της επίθεσης και ο λόγος της καθοδικής προς την ανοδική περιοχή είναι ευθέως ανάλογος προς την επιτάχυνση. Στο σχήμα 4.1. φαίνεται ο μηχανισμός της γαλβανικής διάβρωσης ανάμεσα στο χαλκό και το αλουμίνιο. (Ζαχαροπούλου Α. κα, 2010)



**Σχήμα 4.1: Μηχανισμός γαλβανικής διάβρωσης**

➤ **Εκλεκτική διάβρωση (selective attack):**

Η εκλεκτική διάβρωση εμφανίζεται σε κράματα, όταν ένα μόνο μέταλλο απομακρύνεται από το στερεό διάλυμα που συνθέτουν δύο ή περισσότερα μέταλλα. Επιτυγχάνεται σε ορισμένα πολυφασικά κράματα, όπως τα κράματα του χαλκού, όπου παρατηρείται εκλεκτική διάλυση επιμέρους συστατικών συνήθως των λιγότερο ευγενών μετάλλων οπότε τα ευγενέστερα συστατικά παραμένουν ως πορώδης σκελετός. Συνηθέστερη περίπτωση είναι η αποψευδαργύρωση του ορείχαλκου, η οποία εμφανίζεται ως ομοιόμορφη με στρώσεις ή ως εντοπισμένη. (Παντελής Δ. και Χρυσουλάκης Γ., 2003)

#### **4.4.3. Άλλα είδη διάβρωσης**

- Διάβρωση μέσω ρευμάτων διαφυγής. Η περίπτωση αυτή διάβρωσης μπορεί να παρατηρηθεί σε οποιαδήποτε μεταλλική κατασκευή ή σωλήνωση υπόγεια ή όχι που γειτνιάζει με γειωμένες πηγές συνεχούς ρεύματος. Ρεύματα διαφυγής ονομάζονται τα συνεχή ρεύματα που ακολουθούν δρόμο διαφορετικό από τον προβλεπόμενο. Η διάβρωση εμφανίζεται στα σημεία εξόδου των ρευμάτων από τις κατασκευές. Η φύση της διαβρωτικής διαδικασίας είναι ηλεκτρολυτική και η έκταση της βλάβης ή η απώλεια του μετάλλου είναι ευθέως ανάλογη του μεγέθους του διαφυγόντος ρεύματος.
- Βιολογική διάβρωση. Είναι η διάβρωση που ξεκινά ή επιταχύνεται με την παρουσία μικροοργανισμών (βακτηρίδια) ή άλλων μικροοργανισμών. Έχει παρατηρηθεί ότι βιολογικοί παράγοντες έχουν έμμεση επίδραση στο σύστημα διάβρωσης, π.χ. σε υπόγειες μεταλλικές σωληνώσεις ή κατασκευές παρατηρήθηκε αύξηση της ταχύτητας διάβρωσης μέσω επέμβασης αναερόβιων βακτηριδίων στο έδαφος που ανάγουν θειικά ανιόντα του συστήματος προς θειούχα. Οι οργανισμοί είτε επιδρούν κατευθείαν στις ανοδικές και καθοδικές δράσεις, είτε προσβάλλουν τα προστατευτικά επιστρώματα ή και τους αναστολείς, είτε παράγουν διαβρωτικές ουσίες και αποθέσεις με την μορφή σωρών ή εξογκωμάτων.

- Θερμογαλβανική διάβρωση. Είναι παρόμοια προς τη γαλβανική διάβρωση. Το γαλβανικό στοιχείο δημιουργείται από θερμοκρασιακή διαφορά εξαιτίας ανομοιόμορφης θέρμανσης ή ψύξης μεταλλικών επιφανειών. Η θερμογαλβανική διάβρωση προκαλεί διαφορετική πόλωση στο μέταλλο, οπότε δημιουργούνται ανοδικές και καθοδικές περιοχές που προκαλούν τοπική προσβολή του θερμότερου τμήματος. (Σκουλικίδης Θ.Ν., 2000)
- Βλάβη από υδρογόνο. Η βλάβη από υδρογόνο είναι η ρηγμάτωση του υλικού από τη ρόφηση υδρογόνου από το μέταλλο χωρίς να υπάρχει δράση διάβρωσης στην επιφάνεια. Στην βλάβη από υδρογόνο η αποσάθρωση συμβαίνει στην κάθοδο όπου εκλύεται υδρογόνο, σε αντίθεση με την κλασική διάβρωση όπου η αποσάθρωση συμβαίνει στην άνοδο. Αν το μέταλλο έχει κοιλότητες ή κενά ορισμένα άτομα υδρογόνου μπορούν να διαχυθούν μέσα σε αυτές τις ατέλειες και να δημιουργήσουν μοριακό υδρογόνο. Λόγω της μη δυνατότητας του μοριακού υδρογόνου να διαχυθεί αυξάνεται η συγκέντρωση και η πίεση μέσα στις κοιλότητες με αποτέλεσμα τη δημιουργία φλυκταινών από υδρογόνο και τελικά τη θραύση. Η βλάβη από υδρογόνο απαντάται σε διυλιστήρια πετρελαίου. (Σκουλικίδης Θ.Ν., 2000)

#### **4.5. Διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος**

Οι ράβδοι οπλισμού του σκυροδέματος προστατεύονται από τη διάβρωση μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου, το οποίο δημιουργείται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Στο νερό των πόρων του σκληρυμένου σκυροδέματος υπάρχει μεγάλο ποσοστό οξειδίου του ασβεστίου  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  έτσι ώστε να δημιουργείται αλκαλικό περιβάλλον με τιμή pH γύρω στο 12.5. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως παθητικοποίηση του χάλυβα και με τον τρόπο αυτό προστατεύεται ο χάλυβας από τη διάβρωση εφόσον το οξύδιο παραμένει ανέπαφο. (Ζαχαροπούλου Α., κα 2010)

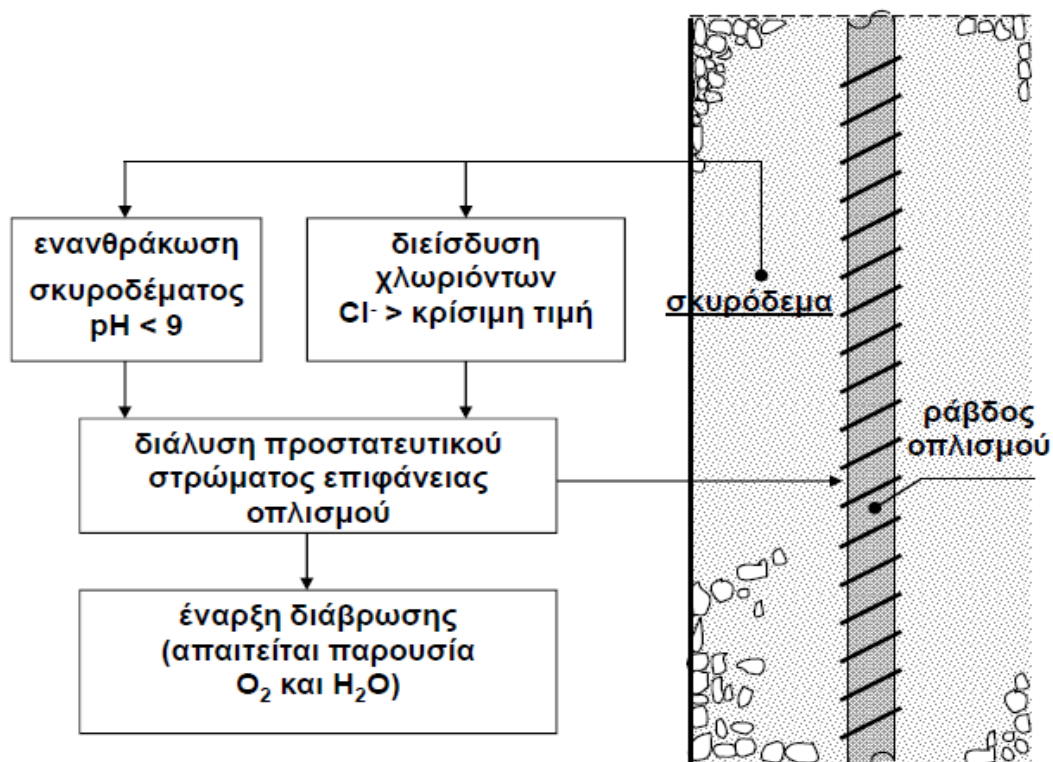
Η διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα είναι μια ηλεκτροχημική δράση που λαμβάνει χώρα όταν το σκυρόδεμα έχει μια ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω της παρουσίας υγρασίας και ηλεκτρολυτών στους πόρους του.

Για να πραγματοποιηθεί διάβρωση του σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα πρέπει να υπάρχουν τρεις προϋποθέσεις:

- Ανοδική διάλυση του σιδήρου
- Παρουσία οξυγόνου
- Ηλεκτρική αγωγιμότητα του σκυροδέματος μέσω του υγρού των πόρων

Εάν και οι τρεις προϋποθέσεις εκπληρώνονται, τότε η διάβρωση του σιδηροπλισμού εξαρτάται και από άλλους παράγοντες. Η ταχύτητα, η μορφή και η έκταση της διάβρωσης εξαρτάται και από άλλους παράγοντες.

Η ανοδική και η καθοδική δράση συμβαίνουν ταυτόχρονα στην επιφάνεια του χάλυβα.



Σχήμα 4.2: Μηχανισμοί έναρξης διάβρωσης οπλισμού σκυροδέματος

## 4.6. Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση του σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα

### 4.6.1. Το είδος και η δομή του σκυροδέματος

Το είδος του τσιμέντου είναι σημαντικός παράγοντας στη διάβρωση του σιδηροπλισμού. Το σκυρόδεμα αποτελείται κυρίως από τσιμέντο, αδρανή και νερό. Ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται, προστίθενται κάποια βελτιωτικά των ιδιοτήτων του. Η ποιότητα του σκυροδέματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των υλικών από τα οποία συντίθενται, αλλά και από άλλους παράγοντες όπως η αναλογία και ο τρόπος ανάμιξής τους, η συντήρηση, η κατασκευή των καλουπιών και η συμπίκνωση του σκυροδέματος μέσα στα καλούπια.

Οι προσμίξεις που περιέχονται στο τσιμέντο επιδρούν στις τελικές ιδιότητες του τσιμέντου. Για παράδειγμα το τσιμέντο που είναι ανθεκτικό σε θειικά, σε περιβάλλον που περιέχει χλωριόντα επιταχύνει τη διάβρωση του σιδηροπλισμού. Επίσης τσιμέντα που περιέχουν φυσικές ή τεχνητές ποζολάνες, εξαιτίας της ποζολανικής δράσης, μειώνουν το πορώδες. Πολλές ποζολάνες πέραν από τη μείωση του πορώδους παρεμποδίζουν τη διάβρωση με δέσμευση χλωριόντων εξαιτίας της περιεκτικότητάς τους σε  $Al_2O_3$ . Ακόμα η χρήση της σκωρίας υψικαμίνων και της ιπτάμενης τέφρας ως πρόσθετα στο τσιμέντο μειώνει τον κίνδυνο πραγματοποίησης αλκαλοπυριτικής δράσης.

Η χρήση ειδικών τύπων τσιμέντου μπορεί να μειώσει τη διάβρωση του οπλισμού, ανάλογα με το περιβάλλον που θα εκτεθεί το συγκεκριμένο σκυρόδεμα. Το τσιμέντο που περιέχει πρόσθετα και με υψηλά ποσοστά αλκαλίων γενικά οδηγεί σε μείωση της διάβρωσης του οπλισμού εντός του σκυροδέματος. Από προηγούμενες έρευνες προέκυψε ότι το είδος του τσιμέντου που θα χρησιμοποιηθεί διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Για παράδειγμα η χρήση τσιμέντου *CEM I 35N* μειώνει το βάθος ενανθράκωσης και τη διάβρωση του οπλισμού συγκριτικά με τη χρήση τσιμέντου *CEM II 35N*. (Batis et al., 2005)

Η ποιότητα του σκυροδέματος και η διάβρωση του σιδηροπλισμού επηρεάζονται από τις ιδιότητες των αδρανών, όπως είναι η κοκκομετρική τους διαβάθμιση, οι

περιεχόμενες επιβλαβείς ουσίες, η αντοχή τους σε θλίψη και τριβή, το σχήμα και η υφή της επιφάνειάς τους, η απορρόφηση νερού και τέλος η αντοχή τους σε φυσικές μεταβολές και σε χημικές επιδράσεις. Επίσης τα αδρανή επιδρούν τόσο στη μηχανική αντοχή όσο και σε μία από τις πιο σημαντικές ιδιότητες του σκυροδέματος που έχει άμεση επίδραση στη διάβρωσή του, το πορώδες. Εάν τα αδρανή είναι συμπαγή (χωρίς πόρους) τότε η διέλευση των διαβρωτικών συστατικών πραγματοποιείται μέσα από τους πόρους του τσιμέντου. Εάν όμως είναι πορώδη, η διέλευση των διαβρωτικών συστατικών γίνεται και μέσα από τους πόρους των αδρανών και φυσικά η διάβρωση είναι μεγαλύτερη.

Επίσης η ποιότητα του σιδηροπλισμού επηρεάζεται τόσο από την ποσότητα όσο και από την ποιότητα του νερού στο σκυρόδεμα. Επειδή η ποσοστιαία αναλογία του νερού ανάμιξης και επομένως και κάθε ξένης ουσίας μέσα σε αυτό, είναι μικρή, το νερό επηρεάζει σε μικρό βαθμό την ποιότητα του σκυροδέματος. (Τσίμας Σ. και Τσιβιλής Σ., 2004)

Όταν πρόκειται για πόσιμο νερό δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην ποιότητα του σκυροδέματος. Η σύσταση του νερού επηρεάζει περισσότερο την ποιότητα του σκυροδέματος όταν έχει χρησιμοποιηθεί νερό ποταμών ή θάλασσας, λόγω της περιεκτικότητάς του σε χλωριόντα.

Το νερό που χρησιμοποιείται πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγραφή EN 1008.

#### ***4.6.2. Το πάχος επικάλυψης***

Το πάχος της επικάλυψης επηρεάζει τον χρόνο που απαιτείται για να φθάσουν τα διαβρωτικά συστατικά στον οπλισμό. Όσο μεγαλύτερο το πάχος της επικάλυψης, τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται. Η ωθούσα δύναμη για την μετακίνηση των συστατικών είναι η διάχυση. Για να έχουμε τον ίδιο βαθμό προστασίας του οπλισμού θα πρέπει όσο το πορώδες του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερο τόσο μεγαλύτερο να είναι το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού.

#### **4.6.3. Η παρουσία νερού στο σκυρόδεμα**

Εντός του σκυροδέματος δημιουργούνται πόροι, λόγω της αλληλεπίδρασης που έχουν τα αδρανή με την πάστα του τσιμέντου. Οι πόροι που δημιουργούνται μέσα στο σκυρόδεμα διαχωρίζονται σε μικροπόρους (<2.5nm), σε μεσοπόρους (2.5 – 100nm) και σε μακροπόρους (>100nm). Ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας τους διακρίνονται σε πόρους πήγματος (<10nm), οι οποίοι αποτελούν μέρος της μικροδομής της τσιμεντόπαστας και σε τριχοειδείς πόρους (>10nm), οι οποίοι δημιουργούνται από την εξάτμιση του νερού κατά την πήξη και σκλήρυνση του τσιμέντου. Η διαπερατότητα του σκυροδέματος αυξάνεται λόγω των τριχοειδών πόρων, οι οποίοι διευκολύνουν τη διάχυση των αερίων και των ιόντων στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Η συμπύκνωση κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης με κατάλληλους δονητές, καθώς και με τη χρήση προσθέτων που επιδρούν στις φάσεις ενυδάτωσης του σκυροδέματος, έχει σκοπό την ελάττωση του πορώδους του σκυροδέματος.

Το νερό στους πόρους του σκυροδέματος ρυθμίζει την μεταφορά των διάφορων ιόντων ή αερίων στο εσωτερικό του σκυροδέματος αλλά και την (ηλεκτρική) αντίσταση του σκυροδέματος.

Το κορεσμένο με νερό σκυρόδεμα έχει την μικρότερη ηλεκτρική αντίσταση και μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο διάχυση του διαλυμένου στο νερό οξυγόνου, η οποία είναι μικρή.

Αντίθετα η ηλεκτρική αντίσταση του ξηρού σκυροδέματος είναι μεγάλη. Επομένως ο κίνδυνος διάβρωσης σε ξηρό και κορεσμένο σε νερό σκυρόδεμα είναι μικρός ενώ στις ενδιάμεσες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερος.

Η ποσότητα του νερού στο σκυρόδεμα εξαρτάται από:

- Την υγρασία στην επιφάνεια του σκυροδέματος
- Την δυνατότητα της μεταφοράς του νερού στο εσωτερικό του σκυροδέματος
- Την προϊστορία του σκυροδέματος κατά την πήξη και συντήρηση

#### 4.6.4. Η παρουσία ρωγμών

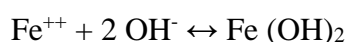
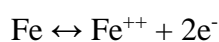
Η παρουσία ρωγμών στο σκυρόδεμα έχει σαν αποτέλεσμα την διευκόλυνση της μεταφοράς του οξυγόνου, του διοξειδίου του άνθρακα και των χλωριόντων στην επιφάνεια του οπλισμού. Γενικά στο σκυρόδεμα υπάρχουν ρωγμές με πλάτος μικρότερο από 2-3 mm. Η ύπαρξη ρωγμών με πλάτος μεγαλύτερο από 0,3 mm οδηγεί σε διάβρωση του οπλισμού, καθώς η μεταφορά οξυγόνου, διοξειδίου του άνθρακα και χλωριόντων από τις ρωγμές αυτές είναι σημαντική.

#### 4.7. Μηχανισμός Διάβρωσης του χάλυβα

Η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού του σκυροδέματος είναι ένα σύνθετο ηλεκτροχημικό φαινόμενο που συνδέεται με την ύπαρξη ανοδικών και καθοδικών περιοχών. Το φαινόμενο οφείλεται στη μικροσκοπική και μακροσκοπική ανομοιογένεια της επιφάνειας του χάλυβα σε συνδυασμό με το υγρό των πόρων του σκυροδέματος.

Η διάβρωση του χάλυβα όταν αυτός βρίσκεται σε επαφή με το νερό προκαλείται από τις ακόλουθες αντιδράσεις:

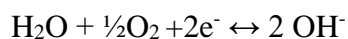
Ανοδική περιοχή



Ως άνοδος συμπεριφέρεται το τμήμα του χάλυβα όπου έχει καταστραφεί το προστατευτικό στρώμα οξειδίων. Σ' αυτή την περιοχή, τα άτομα σιδήρου μετατρέπονται σε ιόντα, ενώ ελευθερώνονται ηλεκτρόνια.

Το σχηματιζόμενο  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  είναι αδιάλυτο και σχηματίζει ένα μικρής συνάφειας πορώδες και ογκώδες στρώμα (σκουριά) πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα.

Καθοδική περιοχή

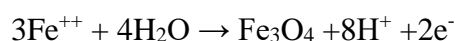
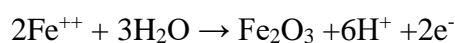


Ως κάθοδος συμπεριφέρεται εκείνη η περιοχή του χάλυβα όπου υπάρχει νερό και οξυγόνο, χωρίς να είναι απαραίτητο να έχει καταστραφεί το λεπτό στρώμα των οξειδίων. Ο ρυθμός της παραπάνω δράσης καθορίζεται από το ρυθμό διάχυσης του οξυγόνου.

Το διαλυμένο στο νερό οξυγόνο φθάνει στην καθοδική περιοχή μέσω των τριχοειδών πόρων και των ρωγμών του σκυροδέματος και οδηγεί στην διάβρωση του σιδηροπλισμού όταν η τιμή του pH βρίσκεται μεταξύ 4 και 10.

Το σχηματιζόμενο στρώμα του  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  δεν προσφέρει καμία προστασία στον οπλισμό καθώς είναι πορώδες και ελάχιστα συμπαγές, με αποτέλεσμα η διάβρωση να προχωρά μέχρι την ολοσχερή μετατροπή του σιδήρου σε υδροξείδιο. Απαραίτητη προϋπόθεση για την συνέχιση της δράσης αυτής είναι η παρουσία οξυγόνου.

Όταν η τιμή του pH είναι μεγαλύτερη από 10 οι δράσεις που πραγματοποιούνται στην ανοδική περιοχή είναι οι ακόλουθες:



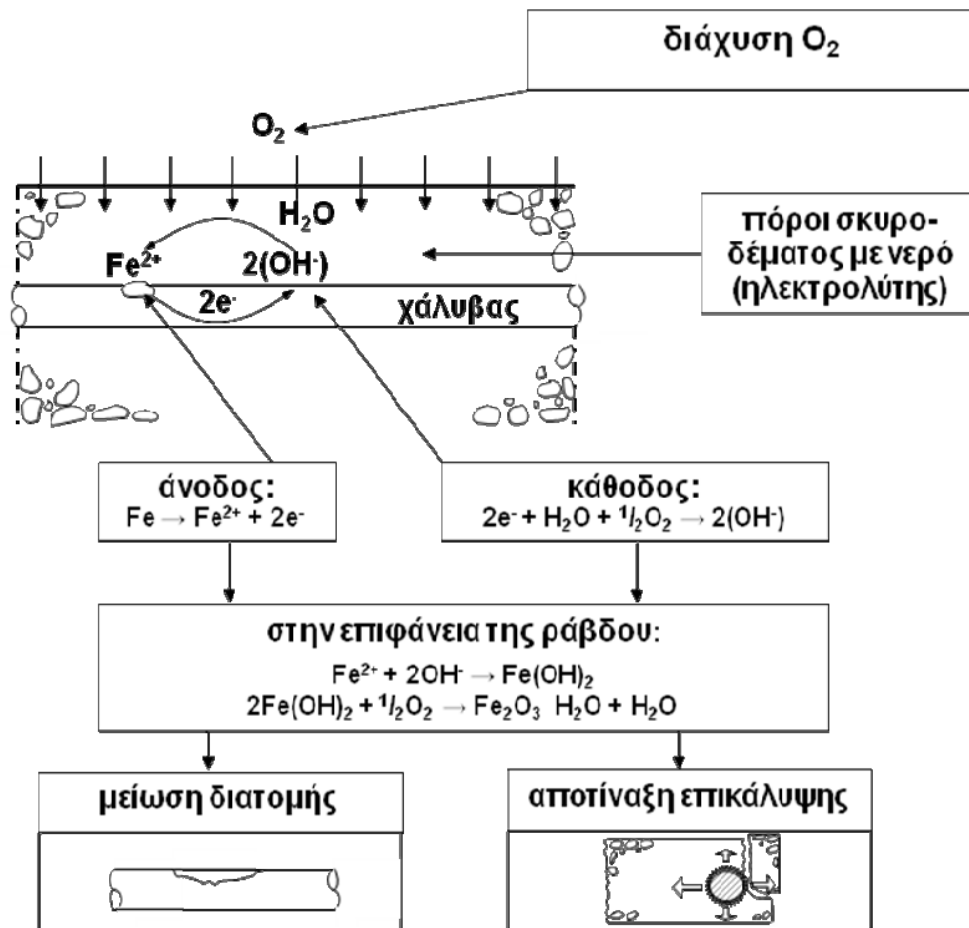
Σύμφωνα με τις παραπάνω αντιδράσεις είναι δυνατόν να συμβεί οξείδωση, δηλαδή διάβρωση ακόμη και όταν η τιμή του pH είναι μεγαλύτερη από 10. Η διαφορά όμως είναι, ότι τα προϊόντα των αντιδράσεων αυτών ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) σχηματίζουν ένα συμπαγές και αδιαπέραστο στρώμα που παθητικοποιεί τον οπλισμό και τον απομονώνει από το διαβρωτικό περιβάλλον.

Έχει ήδη αναφερθεί ότι η τιμή του pH του υγρού των πόρων του σκυροδέματος βρίσκεται συνήθως μεταξύ 12,5 και 13,5 με αποτέλεσμα ο εγκιβωτισμένος οπλισμός να παραμένει σε παθητικοποιημένη κατάσταση. Αν το σκυρόδεμα περιέχει ρωγμές, το νερό μπορεί να εισχωρήσει, να φθάσει στην περιοχή του οπλισμού και να απομακρύνει τα  $\text{OH}^-$  που συντελούν στην παθητικοποίηση του σιδήρου. Όταν υπάρχει ρωγμή που εκτείνεται μέχρι τον οπλισμό, ο χάλυβας θα συμπεριφερθεί σαν να ήταν άμεσα βυθισμένος στο θαλασσινό νερό, με αποτέλεσμα την γρήγορη διάβρωσή του.

Η απομάκρυνση των  $\text{OH}^-$  όμως εμποδίζεται από τις αντιδράσεις μεταξύ των ιόντων του θαλασσινού νερού και του ενυδατωμένου σιμιέντου, τα προϊόντα των οποίων φράσσουν προοδευτικά τις ρωγμές του σκυροδέματος.

Η διάβρωση του σιδηροπλισμού επηρεάζεται επίσης από τις μεταβολές της υγρασίας του σκυροδέματος στην περιοχή του. Τέτοιες μεταβολές δεν παρατηρούνται σε σκυρόδεμα μόνιμα βυθισμένο στο θαλασσινό νερό είναι όμως έντονες σε περιοχές με παλιρροιακά φαινόμενα.

Τέλος, ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.



**Σχήμα 4.3: Μηχανισμοί και αποτελέσματα διάβρωσης οπλισμού σκυροδέματος**

Οι τρεις βασικοί λόγοι διάβρωσης του χάλυβα είναι:

1. Ενανθράκωση του σκυροδέματος

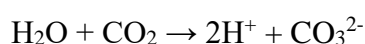
2. Επίδραση χλωριόντων

3. Ρωγμές

#### **4.7.1. Ενανθράκωση του σκυροδέματος**

Η ενανθράκωση του σκυροδέματος είναι η αντίδραση του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας με το υδροξείδιο του ασβεστίου του σκυροδέματος, το οποίο σχηματίζεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου.

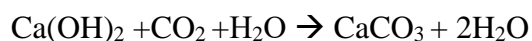
Η αντίδραση αυτή πραγματοποιείται σε τρία στάδια: το διοξείδιο του ασβεστίου διαχέεται στους πόρους του σκυροδέματος, το ελεύθερο υδροξείδιο του ασβεστίου διαλύεται στο υγρό των πόρων του σκυροδέματος και τέλος το υδροξείδιο του ασβεστίου αντιδρά με το διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα, σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις:



Οι ράβδοι οπλισμού προστατεύονται από την διάβρωση μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου, που δημιουργείται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Η αλκαλικότητα αυτή χαρακτηρίζεται από μία τιμή του pH γύρω στο 12.5, που αντιστοιχεί στην υπό συνήθη θερμοκρασία συγκέντρωση ισορροπίας του υδροξειδίου του ασβεστίου  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , στο νερό των πόρων. Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από ιόντα χλωρίου, αν η συγκέντρωση των τελευταίων υπερβαίνει το 0.4 έως 0.6 % του βάρους του τσιμέντου, ή να διαλυθεί γενικά, λόγω μείωσης της αλκαλικότητας του σκυροδέματος γύρω από την ράβδο, σε τιμές του pH κάτω από 9.0. Τότε ο χάλυβας του οπλισμού αποπαθητικοποιήθηκε (δηλαδή δεν απολαμβάνει πλέον την παθητική προστασία που του προσέφερε η αλκαλικότητα του σκυροδέματος).

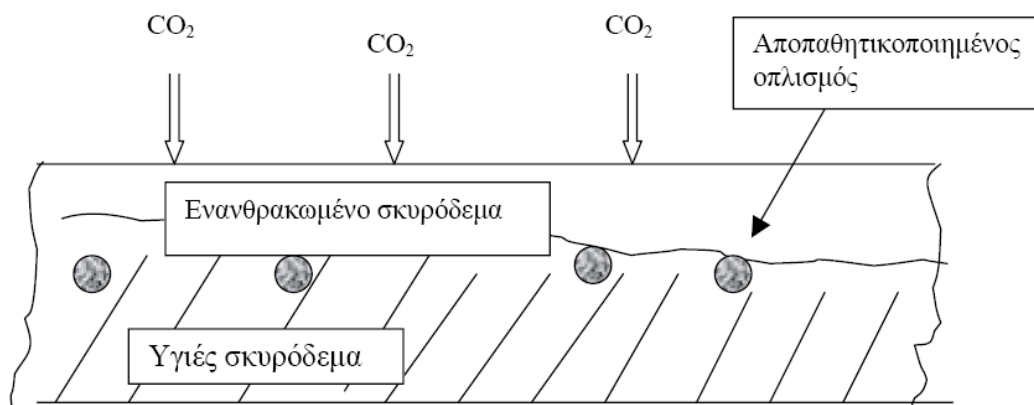
Η μείωση του pH του σκυροδέματος σε τιμές κάτω του 9.0 οφείλεται στην χημική αντίδραση του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  του νερού των πόρων ( και γενικότερα του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού) με το διοξείδιο του άνθρακος ( $\text{CO}_2$ ) της ατμόσφαιρας, που σταδιακά διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω

της αέριας φάσης των πόρων. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη μετατροπή του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  σε ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ) σύμφωνα με την αντίδραση:



Η αντίδραση αυτή, γνωστή ως ενανθράκωση του σκυροδέματος, δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις στις ιδιότητες του ίδιου του σκυροδέματος. Αντίθετα έχει σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρηθεί μία ελαφριά αύξηση της αντοχής λόγω του σχηματισμού του ανθρακικού ασβεστίου. Το σημαντικότερο αποτέλεσμα της παραπάνω αντίδρασης είναι η κατανάλωση  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  προς σχηματισμό  $\text{CaCO}_3$ , με αποτέλεσμα τη μείωση της αλκαλικότητας του περιβάλλοντος των πόρων του σκυροδέματος (πτώση του pH του διαλύματος των πόρων). Όταν η τιμή του pH μειωθεί κάτω του 11, το προστατευτικό στρώμα του χάλυβα αρχίζει να ρηγματώνεται και τελικά καταστρέφεται πλήρως όταν το pH του διαλύματος των πόρων πέσει κάτω από την τιμή 9. Τότε ο χάλυβας του σκυροδέματος αρχίζει να σκουριάζει, σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρθηκε ανωτέρω. Η αντίδραση της ενανθράκωσης ξεκινάει από την εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος και σταδιακά προχωράει προς το εσωτερικό του. Η επιφάνεια που διαχωρίζει το ενανθρακωμένο από το υγιές σκυρόδεμα ονομάζεται μέτωπο της ενανθράκωσης. Όταν το μέτωπο της ενανθράκωσης φθάσει στον οπλισμό (ή με άλλα λόγια το βάθος της ενανθράκωσης γίνει ίσο με το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού), τότε αυτός αποπαθητικοποιείται και η διάβρωσή του ξεκινά. (Σιδέρης Κ. και Ζάρρας Σ., 2006)

Η όλη διαδικασία γίνεται καλύτερα κατανοητή στο σχήμα 4.4.:



**Σχήμα 4.4: Διάβρωση οπλισμού σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα**

Για την πραγματοποίηση της αντίδρασης απαιτούνται μικρές ποσότητες νερού. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενανθράκωσης παρατηρείται σε αέρα με σχετική υγρασία 50 έως 70%. Το ξηρό σκυρόδεμα δεν θα ενανθρακωθεί, λόγω απουσίας της απαιτούμενης υγρασίας ενώ σε κορεσμένο με νερό σκυρόδεμα εμποδίζεται η διάχυση του αερίου CO<sub>2</sub> στους πόρους του σκυροδέματος.

Το νερό που δημιουργείται μετά την αντίδραση διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος και η διαδικασία συνεχίζεται σε μεγαλύτερα βάθη. Το pH μειώνεται, σε πλήρως δε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα παίρνει περίπου την τιμή 8,3.

Το ανθρακικό ασβέστιο που δημιουργείται φράζει τους πόρους του τσιμεντοκονιάματος και έτσι προκαλείται και μια αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Κατόπιν το ανθρακικό ασβέστιο αντιδρώντας με το ανθρακικό οξύ (ανάλογα με την πίεση και την θερμοκρασία το αέριο CO<sub>2</sub> διαλύεται στο νερό και σχηματίζει ανθρακικό οξύ [ H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ] σε πολύ μικρές ποσότητες περίπου 1 % κατά βάρος ενώ το υπόλοιπο παραμένει αδιάλυτο ως αέριο CO<sub>2</sub>) δίνει όξινο ανθρακικό ασβέστιο το οποίο είναι ευδιάλυτο στο νερό και έτσι προκαλείται απόπλυση. Αποτέλεσμα της απόπλυσης είναι και οι φωλιές που εμφανίζονται κοντά στην επιφάνεια του σκυροδέματος.



Το ανθρακικό οξύ μπορεί να αντιδράσει με τα ένυδρα άλατα αργιλικού τριασβεστίου (C<sub>3</sub>-A-H<sub>6</sub>) και σιδηρικού τριασβεστίου (C<sub>3</sub>-F-H<sub>6</sub>) τα οποία στηρίζουν τη συνάφεια μεταξύ του τσιμεντοπολτού και των αδρανών προκαλώντας χαλάρωση του σκυροδέματος.



**Εικόνα 4.2 Διάβρωση οπλισμού**

### **Παράμετροι που επηρεάζουν την ενανθράκωση.**

#### **➤ Συνθήκες περιβάλλοντος**

- Για σχετική υγρασία περιβάλλοντος 50% έως 70% παρατηρείται το μέγιστο ποσοστό ενανθράκωσης.
- Θερμοκρασία: Αύξηση της θερμοκρασίας επιταχύνει την ταχύτητα ενανθράκωσης.

#### **➤ Ποιότητα και πάχος της επικάλυψης**

- Χαμηλή διαπερατότητα. Μειώνει ή και αναστέλλει τη διείσδυση του CO<sub>2</sub>.
- Υπάρξει ρωγμών. Επιταχύνει πολύ τη διαδικασία ενανθράκωσης.
- Σχέση νερού τσιμέντου (W/C). Για μικρές τιμές του λόγου W/C περιορίζεται πολύ η διείσδυση υγρασίας και η διάχυση του αερίου CO<sub>2</sub> λόγω μείωσης του μεγέθους και του αριθμού τριχοειδών πόρων.
- Πάχος επικάλυψης: Όσο το πορώδες του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερο, τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού από το σκυρόδεμα ώστε να έχουμε τον ίδιο βαθμό προστασίας του οπλισμού. Επικάλυψη με χαμηλή διαπερατότητα μειώνει ή και αναστέλλει τη διείσδυση του CO<sub>2</sub>, μειώνοντας έτσι την ταχύτητα της ενανθράκωσης.
- Η ενανθράκωση επιταχύνεται από πόρους, φωλιές, κακοτεχνίες, ανομοιογενή κακή δόνηση κτλ. (Τάσιος Θ. και Αλιγιζάκη Κ., 1992)

- **Είδος τσιμέντου.** Η αυξημένη περιεκτικότητα του μπετόν σε τσιμέντο μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης
  - Κατά τον U. Ludwing (1890) τα τσιμέντα που περιέχουν σκωρίες υψικαμίνων και ποζολάνες ενανθρακώνονται πιο γρήγορα από το Portland.
  - Κατά τον Matthews (1984) η προσθήκη ιπταμένων τεφρών στο τσιμέντο επιταχύνει την ενανθράκωση σε σκυροδέματα με αντοχή μικρότερη από 30 έως 35 MPa.
  - Κατά τους A. Zhu (1982), και X. Tan (1982) η προσθήκη λιγνοσουλφόνης στο σκυρόδεμα σε ποσότητα 0,25% κ.β. μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης κατά 10 έως 30%.
  - Η προσθήκη πυριτικής παιπάλης επιταχύνει την ενανθράκωση. (Τάσιος Θ. και Αλιγιζάκη Κ., 1992)

#### **Αποτελέσματα της ενανθράκωσης**

Η πιο σοβαρή επίπτωση της ενανθράκωσης στο οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ότι μειώνει την αλκαλικότητα του τσιμέντου με συνέπεια την οξείδωση του οπλισμού. Σ' αυτή την περίπτωση μπορεί να λάβει μέρος διάβρωση του χάλυβα αλλά όπως έχει αναφερθεί χρειάζεται η παρουσία και των δύο, νερού και οξυγόνου. Έτσι εξηγείται γιατί δεν έχουμε διάβρωση του χάλυβα στους εσωτερικούς χώρους αν και η ενανθράκωση του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη.

Επίσης άλλες συνέπειες της ενανθράκωσης είναι:

- Αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος (από 30-100%) όταν τα δοκίμια βρίσκονται σε χώρους με πλούσια περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub>.
- Μείωση του πορώδους. Η μείωση του πορώδους πιθανόν να οφείλεται στην εναπόθεση των προϊόντων της ενανθράκωσης στα τοιχώματα των τριχοειδών πόρων. Γι αυτό το λόγο αποφεύγεται η μέτρηση του πορώδους για να εκτιμήσουμε την αντοχή του σκυροδέματος σε ενανθράκωση.
- Αύξηση του ερπυσμού και της ταχύτητας του ερπυσμού
- Αυξάνεται η συστολή του σκυροδέματος λόγω της αποβολής του νερού, προκαλούμενη κυρίως από την απελευθέρωση του νερού.

- Ακόμη μια φθορά που μπορεί να προκληθεί από την ενανθράκωση είναι η άτακτη ρηγμάτωση η οποία αν δεν οφείλεται στην υπερβολική συρρίκνωση του νωπού σκυροδέματος (υπερβολική εξάτμιση νερού) οφείλεται σε μεταγενέστερη αλκαλική αντίδραση τσιμέντου-αδρανών. Η άτακτη ρηγμάτωση μπορεί να οδηγήσει σε εκτεταμένες απολεπίσεις του σκυροδέματος.
- Καθώς διαβρώνεται ο οπλισμός προκαλείται διόγκωση, η οποία με την σειρά της προκαλεί εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα, που προκαλούν ρηγματώσεις και αποκόλληση της επικάλυψης του οπλισμού. Η οξείδωση του οπλισμού έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της μηχανικής αντοχής του.
- Ένα ακόμη αποτέλεσμα της ενανθράκωσης είναι η απόθεση αλάτων η οποία γίνεται εμφανής με τη δημιουργία λευκών κηλίδων στην επιφάνεια του σκυροδέματος.
- Αποτέλεσμα της ενανθράκωσης είναι και οι κηλίδες σκουριάς, οι οποίες εμφανίζονται στις παρειές ή στον πυθμένα στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, έχουν καφέ χρώμα και οφείλονται στη διάβρωση του χάλυβα.

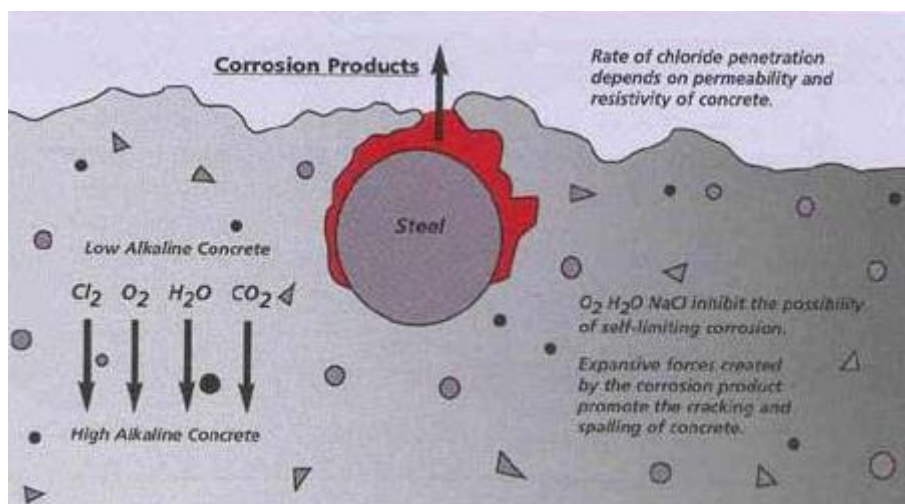
#### **4.7.2. Επίδραση χλωριόντων**

Η διείσδυση των χλωριόντων μπορεί να γίνει είτε σε ξερό περιβάλλον (διείσδυση αερίου χλωρίου) είτε σε περιβάλλον με μεγάλα ποσοστά υγρασίας. Η διείσδυση χλωριόντων σε υγρό περιβάλλον είναι η περισσότερο συνηθισμένη και σοβαρή μορφή διείσδυσης. Ακόμα όμως και για χαμηλή υγρασία του περιβάλλοντος, η υγρασία στην επιφάνεια του σκυροδέματος αυξάνεται σημαντικά λόγω της υγροσκοπικής ικανότητας των χλωριόντων. Μ' αυτόν τον τρόπο, μεγαλώνει κατά πολύ ο κίνδυνος διάβρωσης του χάλυβα. Επίσης η θερμοκρασία επιταχύνει τις διαδικασίες διείσδυσης των χλωριόντων και κατά συνέπεια την διάβρωση του χάλυβα. (Ρούτουλας Α., 2010)

Η επίδραση του περιβάλλοντος σε παραθαλάσσιες περιοχές είναι η κύρια πηγή των χλωριόντων που απαιτούνται για να λάβει χώρα η διάβρωση του σκυροδέματος στις γέφυρες και γενικά στις παραθαλάσσιες κατασκευές όπως λιμάνια και μαρίνες. Επίσης σε ψυχρά κλίματα, η χρησιμοποίηση αλάτων τήξης χιονιού στους δρόμους

είναι μία συνήθης πρακτική, με αποτέλεσμα τα χλωριόντα να διαλύονται στο νερό και να διεισδύουν αρκετά εύκολα στο σκυροδέμα καταστρωμάτων γεφυρών και αλλού. (Αποστολόπουλος Χ. κ.α., 2009)

Η διείσδυση των χλωριόντων είναι μια διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε πλήρως ή μερικώς γεμάτους πόρους με νερό. Τα χλωριόντα, φθάνοντας στην εξωτερική επιφάνεια ενός δομικού στοιχείου, διεισδύουν στους πόρους του σκυροδέματος είτε μέσω διάχυσης είτε μέσω τριχοειδούς απορρόφησης του επιφανειακού νερού στο οποίο διαλύονται, όπου τα ποσά των μεταφερόμενων χλωριόντων είναι μεγαλύτερα από ότι με διάχυση, είτε με συνδυασμό των δυο αυτών μηχανισμών.



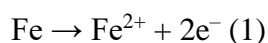
**Σχήμα 4.5: Απεικόνιση διείσδυσης χλωριόντων**

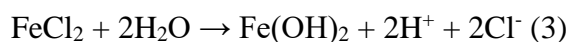
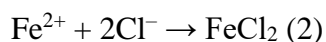
Η ικανότητα δέσμευσης των χλωριόντων εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο τσιμέντο. Κατά τη διείσδυση των χλωριόντων στο εσωτερικό του σκυροδέματος, μέρος αυτών δεσμεύεται από το C<sub>3</sub>A προς σχηματισμό του άλατος Friedel (CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaCl<sub>2</sub>·10H<sub>2</sub>O). Οι αργλικές φάσεις παίζουν κύριο ρόλο στη δέσμευση των χλωριόντων (σχηματισμός του άλατος Friedel), ενώ οι πυριτικές φάσεις έχουν πολύ μικρή συνεισφορά. Συχνά όμως το υπάρχον C<sub>3</sub>A δεν επαρκεί για τη δέσμευση όλων των χλωριόντων, με αποτέλεσμα μέρος αυτών να παραμένει ελεύθερο στο διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος. (Σωτηριάδης Κ. κ.α., 2009)

Ο ρόλος των ιόντων χλωρίου στην πρόκληση της διάβρωσης και της ενίσχυσης του ρεύματος διάβρωσης είναι σημαντικός. Εάν τα χλωριόντα βρίσκονται σε επαρκή ποσότητα, καταστρέφουν το παθητικό στρώμα οξειδίων προκαλώντας διάβρωση του χάλυβα. Η τιμή του ορίου της συγκέντρωσης των χλωριόντων είναι ένας παράγοντας σημαντικής σπουδαιότητας, ο οποίος ποικίλει ανάλογα με τον τύπο σκυροδέματος. Συγκεντρώσεις της τάξης των 0,71 έως 0,89 Kg/m<sup>3</sup> θεωρούνται όριο συγκέντρωσης των χλωριόντων για συνήθεις κατασκευές από σκυρόδεμα για γέφυρες. Σύμφωνα με το AASHTO, συγκεντρώσεις μικρότερες των 1,42 Kg/m<sup>3</sup> είναι αποδεκτές για γέφυρες, ωστόσο το σκυρόδεμα θα πρέπει να επισκευάζεται όταν το όριο των χλωριόντων φτάσει την τιμή 2.8 Kg/m<sup>3</sup>. (Ρούτουλας Α., 2010)

Τα χλωριόντα δεσμεύονται από το σκυρόδεμα κατά 30-60% ανάλογα με την σύσταση και τον τύπο του τσιμέντου μέσω χημικών διεργασιών που περιλαμβάνουν την δέσμευση χλωριόντων από τα συστατικά της ενυδάτωσης του σκυροδέματος, ανταλλαγές ιόντων, και την δημιουργία μιας διπλής ιονοστοιβάδας. Οι φυσικοχημικές διεργασίες διάχυσης χλωριόντων, η ρόφηση και δέσμευσή τους από τον τσιμεντοπολτό περιγράφονται από μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις της συγκέντρωσης Cl<sup>-</sup> στην υγρή φάση, από τις οποίες η συγκέντρωση των δεσμευμένων Cl<sup>-</sup> στον τσιμεντοπολτό μπορεί να υπολογισθεί αλγεβρικά. Το σύστημα επιλύεται με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων ή διαφορών, επιτρέποντας έτσι την εκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου (κρίσιμη τιμή χρόνου διάβρωσης λόγω χλωριόντων) που η συγκέντρωση χλωριόντων στον χάλυβα θα βρεθεί πάνω από το όριο αποπαθητικοποίησης. Το κρίσιμο αυτό όριο προσδιορίζεται με την μέτρηση της ολικής συγκέντρωσης χλωριόντων στο σκυρόδεμα, με μέση τιμή 0.4 % (για τσιμέντο τύπου Portland) - 1 % (για ποζολανικά τσιμέντα) του βάρους του τσιμέντου που χρησιμοποιείται.

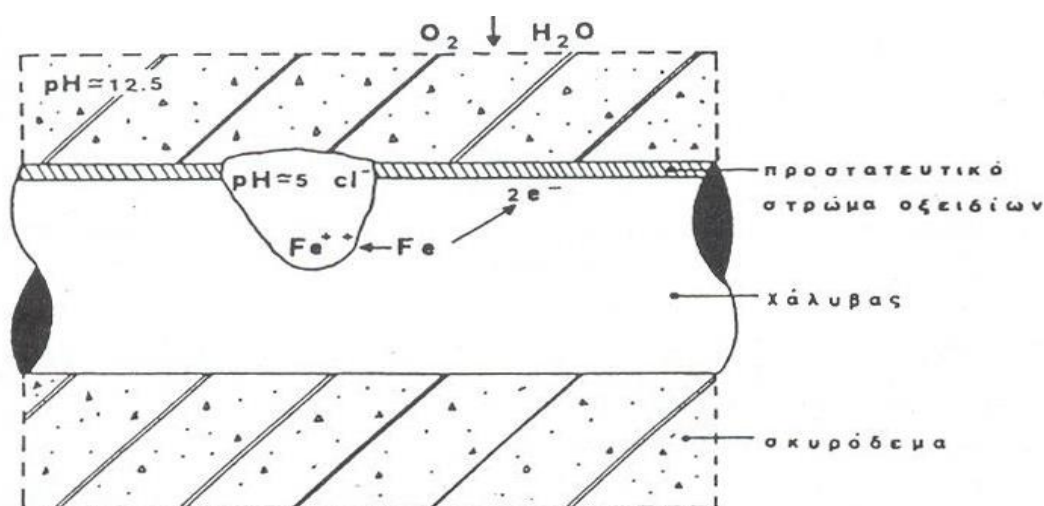
Στην συνέχεια, η εξέλιξη της διεργασίας της διάβρωσης λαμβάνει χώρα με ρυθμό που εξαρτάται από την ύπαρξη οξυγόνου και νερού. Για τα πλούσια σε χλωριόντα σκυροδέματα, σημαντικού ενδιαφέροντος είναι η ανοδική αντίδραση (Εξισώσεις 1-3), ειδικά όταν η συγκέντρωση χλωριόντων έχει υπερβεί την κρίσιμη τιμή έναρξης της διάβρωσης του οπλισμού.





Ακολουθεί μία κυκλική διαδικασία απελευθέρωσης χλωριόντων. Παρόλο που τα προϊόντα της διάβρωσης παράγονται σε ένα συγκεκριμένο σημείο στην επιφάνεια της ράβδου, στο ίδιο σημείο παράγονται και ιόντα  $\text{H}^+$  και  $\text{Cl}^-$ . Η αυξανόμενη οξειδωτικότητα της ανοδικής πλευράς βοηθάει στον περιορισμό της διάχυσης των προϊόντων της διάβρωσης και ευνοεί περαιτέρω οξείδωση της χαλύβδινης ράβδου.

Ο ρυθμός της διάβρωσης του χάλυβα εξαρτάται από την διαθεσιμότητα οξυγόνου και νερού στην κάθοδο. Όμως ακόμα και χαμηλά ποσοστά οξυγόνου μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική διάβρωση με βελονισμούς. Το φαινόμενο αυτό προκύπτει διότι οι ανοδικές περιοχές είναι τοπικές, ενώ οι αντίστοιχες καθοδικές περιοχές μπορούν να επεκταθούν σε μία ευρύτερη περιοχή. Η επίδραση ακόμα και μικρών ποσοστών παροχής  $\text{O}_2$  σε μεγάλες καθοδικές περιοχές είναι αρκετά σημαντική. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μία γρήγορη τοπική μείωση της διατομής της ράβδου και σε σημαντική υποβάθμιση της ικανότητας του δομικού στοιχείου από οπλισμένο σκυρόδεμα να μεταφέρει με ασφάλεια τα φορτία του. Όταν η ποσότητα των προϊόντων της διάβρωσης γίνεται εμφανής στην επιφάνεια της ράβδου, το μέγεθος της δομικής υποβάθμισής της μπορεί να είναι ήδη αρκετά σημαντικό. (Αποστολόπουλος Χ. κ.α., 2009)



**Σχήμα 4.6:** Απλοποιημένο προσομοίωμα της διάβρωσης του χάλυβα λόγω επίδρασης χλωριόντων.

Μια άλλη θεωρία αναφέρει ότι το όριο στο οποίο ο χάλυβας αποπαθητικοποιείται δεν πρέπει να λαμβάνει υπόψη της μόνο την συγκέντρωση των χλωριόντων στη μάζα του σκυροδέματος, αλλά την αναλογία του λόγου των χλωριόντων ως προς την συγκέντρωση των υδροξυλιόντων. Έτσι κατά την παρουσία χλωριόντων η αποπαθητικοποίηση του χάλυβα μπορεί να αρχίσει σε υψηλότερες από τις κανονικές τιμές του pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος με τη μορφή βελονισμών (pitting corrosion). Για να γίνει αυτό πρέπει ο λόγος  $[Cl^-]/[OH^-]$  να πάρει τιμές μεγαλύτερες από 0.6, οπότε τα ελεύθερα χλωριόντα φθάνουν, λόγω διάχυσης, στην επιφάνεια του οπλισμού, όπου δημιουργούνται τοπικά γαλβανικά στοιχεία (Σωτηριάδης Κ. κ.α., 2009)

Ο λόγος της συγκέντρωσης των χλωριόντων ως προς την συγκέντρωση των υδροξυλιόντων μεγαλώνει όχι μόνο με την αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων αλλά και με την μείωση της συγκέντρωσης των υδροξυλιόντων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο ακριβής προσδιορισμός της συγκέντρωσης των υδροξυλιόντων είναι πολύ δύσκολος ιδιαίτερα σε σκυροδέματα με πολύ υψηλές τιμές του pH. (Ρούτουλας Α., 2010)

Τα χλωριόντα εισέρχονται στο σκυροδέμα είτε ως επιμολύνσεις προερχόμενες από τα υλικά που περιέχονται σε αυτό, είτε κατά τη διάρκεια ζωής των κατασκευών με τη μεταφορά τους από ένα περιβάλλον που περιέχει χλωριόντα. (Σωτηριάδης Κ. κ.α., 2009). Στην πρώτη περίπτωση τα χλωριόντα είναι σχεδόν ομοιόμορφα καταναμημένα στην μάζα του σκυροδέματος. Στην δεύτερη περίπτωση η συγκέντρωσή τους μεταβάλλεται από την επιφάνεια στο εσωτερικό του σκυροδέματος.

Έτσι τα χλωριόντα που βρίσκονται στη μάζα του σκυροδέματος μπορεί να προέρχονται από:

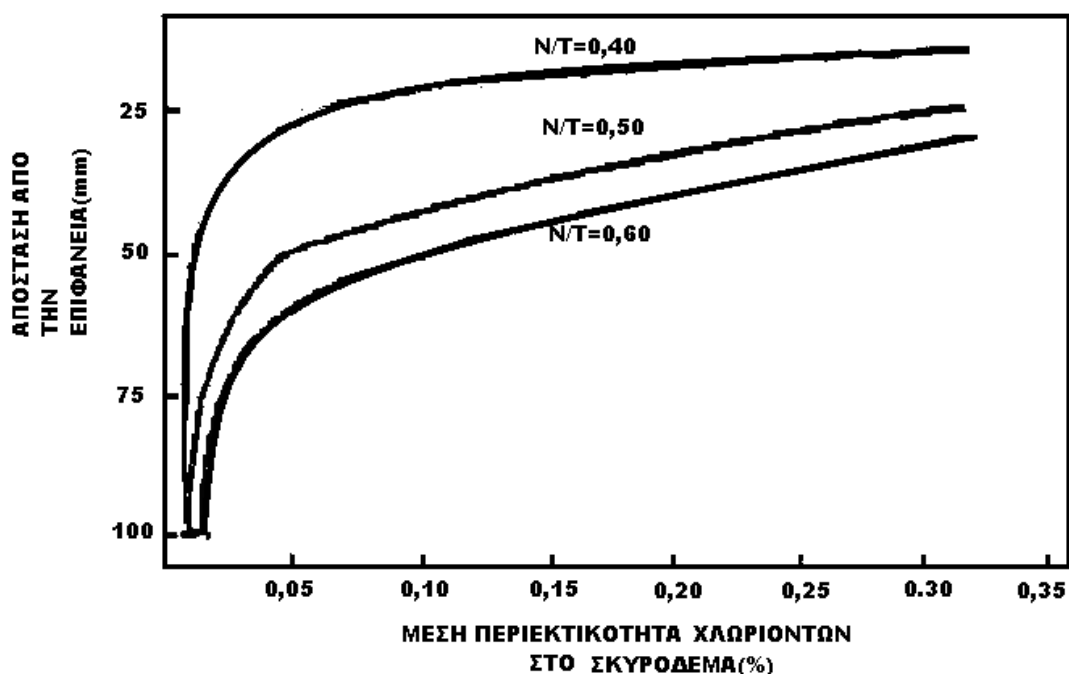
- Τα υλικά κατασκευής του (π.χ. άμμος θαλάσσης, γλυφό νερό), όπου βρίσκονται με τη μορφή των αλάτων τους και είναι ομοιόμορφα καταναμημένα στην μάζα του σκυροδέματος.
- Το περιβάλλον (διείσδυση διαλυμάτων αλάτων διάλυσης του πάγου και θαλασσινού νερού), όπου η συγκέντρωσή τους παρουσιάζει μια μέγιστη τιμή

στην επιφάνεια και μειώνεται όσο προχωράμε στο εσωτερικό του σκυροδέματος.

Η διείσδυση των χλωριόντων στην μάζα του σκυροδέματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες:

- Το πορώδες και την κατανομή των μεγεθών των πόρων
- Το είδος του χρησιμοποιηθέντος τσιμέντου
- Την ποσότητα του νερού των πόρων
- Τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Οι ρωγμές βοηθούν τη διάχυση των χλωριόντων διότι έχει παρατηρηθεί ότι η περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε χλωριόντα στη ρίζα της ρωγμής (άρα και πλησιέστερα στον οπλισμό) είναι αυξημένη. Αυτό πιθανόν να οφείλεται σε τριχοειδή απορρόφηση μέσα στις ρωγμές. Επίσης μικρός λόγος N/T εξασφαλίζει πυκνό σκυρόδεμα με μικρή διαπερατότητα οπότε μειώνεται η ποσότητα των χλωριόντων τα οποία μπορεί να διαχυθούν στο σκυρόδεμα.



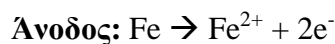
Σχήμα 4.7: Επίδραση του λόγου N/T στην διείσδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα

Για την περίπτωση των χλωριόντων διακρίνονται δύο περιπτώσεις διάβρωσης:

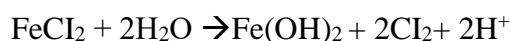
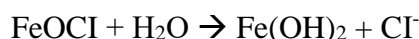
- Διάβρωση με τη δημιουργία τοπικού γαλβανικού στοιχείου (ιδιοδιάβρωση)
- Διάβρωση με δημιουργία γαλβανικού μακροστοιχείου

### **Ιδιοδιάβρωση**

Όταν η συγκέντρωση των ελεύθερων χλωριόντων φθάσει σε ένα επίπεδο, η δράση τους είναι μια αυτοκαταλύομενη αντίδραση. Το ποσό των χλωριόντων στην επιφάνεια του οπλισμού είναι σταθερό και ακόμα και αν παρεμποδιστεί η περαιτέρω είσοδος χλωριόντων, η διάβρωση δεν παρεμποδίζεται. Τα ελεύθερα χλωριόντα φτάνουν, λόγω διάχυσης, στη επιφάνεια του οπλισμού όπου αρχίζει η αποπαθητικοποίησή του, λόγω δημιουργίας τοπικών γαλβανικών στοιχείων. Εκεί πραγματοποιείται η διάλυση του σιδήρου, σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Τα ιόντα της καθόδου που σχηματίζονται από την αντίδραση της καθόδου, αντιδρούν με τα χλωριόντα που έχουν φθάσει στην επιφάνεια του οπλισμού σχηματίζοντας διχλωριούχο σίδηρο ( $\text{FeCl}_2$ ) ο οποίος παρουσία του οξυγόνου μετατρέπεται σε χλωρίδιο του τρισθενούς σιδήρου ( $\text{FeOCl}$ ). Κατόπιν με την παρουσία νερού έχουμε υδρόλυση των προϊόντων της διάβρωσης σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Με την υδρόλυση τα χλωριόντα που είχαν δεσμευθεί στα προϊόντα διάβρωσης επιστρέφουν πάλι στο διάλυμα των πόρων και ταυτόχρονα έχει γίνει τοπική οξύνιση του διαλύματος. (Μπατής Γ.,2006)

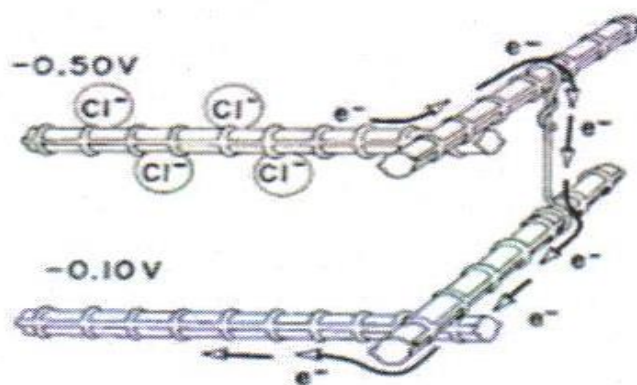
### **Γαλβανικό μακροστοιχείο:**

Τα ιόντα χλωριδίου μέσα στο σκυρόδεμα συνήθως δεν διανέμονται ομοιόμορφα. Οι περιοχές του χάλυβα που εκτίθενται στις υψηλότερες συγκεντρώσεις χλωριόντων, είναι αυτές που βρίσκονται πιο κοντά στην επιφάνεια του οπλισμού όπου αρχίζουν να διαβρώνονται με αποτέλεσμα την θραύση του προστατευτικού στρώματος οξειδίων.

Οι περιοχές του χάλυβα που βρίσκονται στο εσωτερικό του οπλισμού, έχουν μικρότερη συγκέντρωση χλωριόντων.

Η διαφορετική κατανομή των χλωριόντων οδηγεί στη διάβρωση με την δημιουργία γαλβανικού μακροστοιχείου, όπου περιοχές υψηλής συγκέντρωσης αποτελούν την άνοδο, ενώ οι περιοχές, του χάλυβα με μικρή συγκέντρωση, την κάθοδο.

Στο σχήμα 4.8. δίνεται ένα παράδειγμα διάβρωσης με την δημιουργία γαλβανικού μακροστοιχείου εξαιτίας της διαφορετικής συγκέντρωσης χλωριόντων.



**Σχήμα 4.8:** Διαφορετική συγκέντρωση χλωριόντων, δημιουργεί διαφορά δυναμικού

Η ταχύτητα της διάβρωσης εξαρτάται:

- Από το δυναμικό ανόδου – καθόδου
- Από την σχέση των επιφανειών ανόδου – καθόδου
- Από την ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος

Η ταχύτητα διάβρωσης στην περίπτωση σχηματισμού γαλβανικού μακροστοιχείου είναι κατά κανόνα πολύ μεγαλύτερη από αυτήν της ισοδιάβρωσης.

#### **4.7.3. Ρωγμές**

Η παρουσία των ρωγμών στο σκυρόδεμα επιταχύνει την διάχυση των διαβρωτικών ουσιών του περιβάλλοντος στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος και το βάθος των ρωγμών, τόσο ταχύτερη θα είναι η διάβρωση. Όταν οι

ρωγμές φθάσουν στην επιφάνεια του οπλισμού, τότε αρχίζει η διάβρωση του.

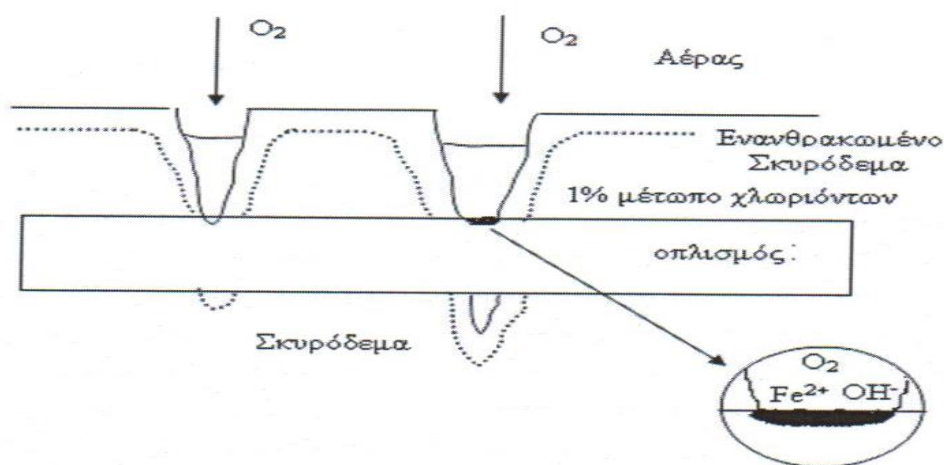


**Εικόνα 4.3 Εμφάνιση ρωγμής σε σκυρόδεμα**

Οι περιπτώσεις διάβρωσης στις ρωγμές είναι ίδιες με την αυτή των χλωριόντων:

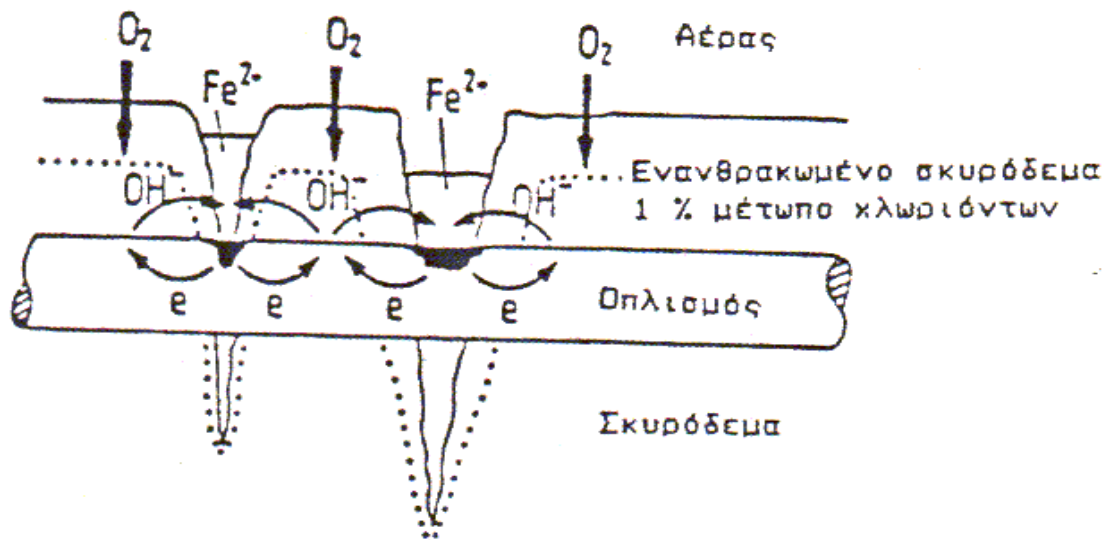
- Η ισοδιάβρωση
- Η διάβρωση με δημιουργία γαλβανικού στοιχείου, μεταξύ του τμήματος του οπλισμού στη ρωγμή και του τμήματος του οπλισμού στο σκυρόδεμα.
- 

Για να είναι δυνατή η ύπαρξη της ισοδιάβρωσης πρέπει το πλάτος της ρωγμής να είναι μεγάλο και η κάλυψη του οπλισμού να έχει αρκετό πάχος. Λόγω του μεγάλου πλάτους της ρωγμής στην επιφάνεια του οπλισμού, που βρίσκεται χωρίς κάλυψη σκυροδέματος, δημιουργείται ένα τοπικό γαλβανικό στοιχείο. Η άνοδος του τοπικού γαλβανικού στοιχείου βρίσκεται στο κέντρο της ρωγμής, όπου ο σίδηρος διαλύεται ανοδικά προς σχηματισμό του ιόντος  $Fe^{2+}$ , ενώ η γύρω περιοχή αποτελεί την κάθοδο, όπου το οξυγόνο με την παρουσία του νερού σχηματίζει το  $OH^-$ .



**Σχήμα 4.9: Διάβρωση του οπλισμού σε ρωγμές του σκυροδέματος (ισοδιάβρωση)**

Αν το πλάτος της ρωγμής και το πάχος της επικάλυψης είναι μικρά, τότε δημιουργείται ένα γαλβανικό μακροστοιχείο, στο οποίο η άνοδος είναι η περιοχή του οπλισμού που είναι ακάλυπτος στη ρωγμή, ενώ η κάθοδος είναι η περιοχή του οπλισμού που είναι καλυμμένη από σκυρόδεμα γύρω από τη ρωγμή.



**Σχήμα 4.10: Η δημιουργία μακροστοιχείου διάβρωσης του οπλισμού σε μακροστοιχείο με ρωγμές**

Η ταχύτητα της διάβρωσης εξαρτάται από:

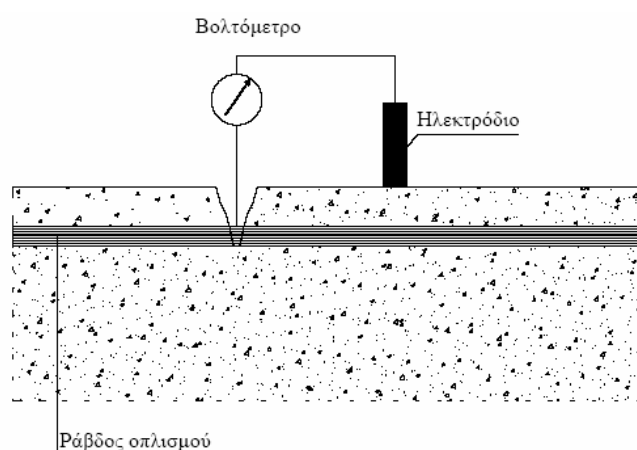
- Το δυναμικό ανόδου – καθόδου
- Το λόγο επιφανειών ανόδου – καθόδου
- Την ηλεκτρική αντίσταση του περιβάλλοντος στη ρωγμή σκυροδέματος

#### **4.8. Αποτίμηση βαθμού διάβρωσης σε υπάρχουσες κατασκευές**

Η εκτίμηση της διάβρωσης των οπλισμών μιας κατασκευής γίνεται κατόπιν αυτοψίας. Στην αυτοψία λαμβάνονται υπόψη τυχόν ιδιαιτερότητες της κατασκευής. Δεδομένου ότι οι ρωγμές λόγω διάβρωσης είναι παράλληλες στους οπλισμούς, η συχνά μεγάλου εύρους ρηγμάτωση κατά μήκος της δοκού ή του υποστύλωματος (συνήθως κοντά σε γωνία της διατομής) είναι χαρακτηριστικό (αλλά τελικό) σημάδι διάβρωσης των ράβδων οπλισμού. Στη συνέχεια γίνονται δοκιμές σε κατάλληλα επιλεγμένες θέσεις ώστε να εξετασθεί ο βαθμός διάβρωσης των ράβδων, να μετρηθεί η επικάλυψη, να

εκτιμηθεί ο βαθμός ενανθράκωσης (με ψεκασμό διαλύματος φαινολοφθαλεΐνης) και η διαπίστωση ύπαρξης χλωριόντων (ψεκασμός με κατάλληλο χρωματικό δείκτη ή με εργαστηριακή μέθοδο). (Τσίκας Π. και Παπασπυριδάκος Χ., 2006)

Ο κίνδυνος διαβρώσεως του χάλυβα μπορεί να ελεγχθεί μετρώντας το ελεύθερο δυναμικό του χάλυβα (σχήμα 4.11) και στη συνέχεια να αποφασιστεί αν απαιτείται η λήψη μέτρων προστασίας της κατασκευής από τη διάβρωση.



**Σχήμα 4.11: Μέτρηση Δυναμικού του χάλυβα**

Για τις τιμές της μέτρησης του δυναμικού του χάλυβα σε συνάρτησι με την πιθανότητα διάβρωσής του ισχύει:

Όταν  $E > -200 \text{ mV}_{cse}$ , κατά πιθανότητα 90% δεν συμβαίνει διάβρωση.

Όταν  $E < -350 \text{ mV}_{cse}$ , κατά πιθανότητα 90% συμβαίνει διάβρωση.

Όταν  $-200 \text{ mV}_{cse} > E > -350 \text{ mV}_{cse}$ , δεν είναι βέβαιο αν συμβαίνει ή όχι διάβρωση.

## 5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

### 5.1. Εισαγωγή

Οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ανθεκτικές στο χρόνο και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται το φαινόμενο της φυσικής γήρανσης των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, κυρίως λόγω της μείωσης της ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος που προκαλείται από τη διάβρωση των οπλισμών. Δεδομένου ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των μετάλλων είναι πολλοί, η διάβρωση αποτελεί ένα πολύπλοκο φαινόμενο και συχνά μη προβλέψιμο. Η ανθεκτικότητα των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες επιδρούν στην κατασκευή εσωτερικά και εξωτερικά.

Σε χώρες που περιβάλλονται από θάλασσα και με θερμό κλίμα, όπως η Ελλάδα, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, τα χλωριόντα και άλλοι αέριοι ρύποι όπως το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) και τα οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), είναι παράγοντες θεμελιώδους σημασίας για τη φθορά και κατά συνέπεια την καταστροφή του σκυροδέματος, η οποία προκαλείται κατά κύριο λόγο από τη διάβρωση του οπλισμού και την ενανθράκωση του σκυροδέματος.

Η διείσδυση των χλωριόντων μπορεί να γίνει είτε σε ξηρές συνθήκες (διείσδυση αερίου χλωρίου) είτε σε περιβάλλον με μεγάλα ποσοστά υγρασίας. Η διείσδυση χλωριόντων σε υγρό περιβάλλον είναι η περισσότερο συνηθισμένη και σοβαρή μορφή διείσδυσης καθιστώντας ευκολότερη τη διάχυση τους διαμέσου του σκυροδέματος που περιβάλλει τον οπλισμό. Ακόμα όμως και σε χαμηλή υγρασία του περιβάλλοντος, η υγρασία στην επιφάνεια του σκυροδέματος αυξάνεται σημαντικά λόγω της υγροσκοπικής ικανότητας των χλωριόντων αυξάνοντας την πιθανότητα διάβρωσης του οπλισμού. Επίσης η αυξημένη θερμοκρασία επιταχύνει τις διαδικασίες διείσδυσης των ιόντων χλωρίου και κατά συνέπεια την διάβρωση του χάλυβα. (Ρούτουλας Α., 2010)

Για την εξασφάλιση της καλής ποιότητας μιας κατασκευής από σκυρόδεμα, απαιτείται κατάλληλη επιλογή υλικών, καλή δόνησή του και μεγάλος χρόνος

συντήρησης. Η προστασία του χάλυβα στο σκυρόδεμα μπορεί να επιτευχθεί είτε μειώνοντας τη διαπερατότητα του σκυροδέματος για να εμποδιστεί η διείσδυση των διαβρωτικών ουσιών, είτε με άμεση προστασία του ίδιου του χάλυβα εμποδίζοντας την προσβολή του μετάλλου.

Τα μέτρα που λαμβάνονται για την προστασία του σιδηροπλισμού από την διάβρωση, χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

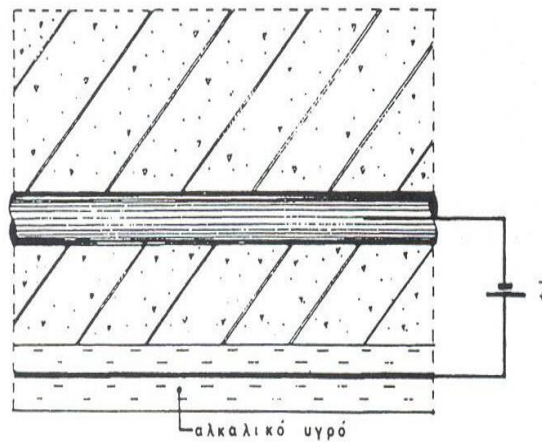
#### ➤ **Μέτρα στην μάζα του σκυροδέματος**

Πρόκειται για διεργασίες ή / και προσθήκες που τροποποιούν τη σύσταση (κραματοποίηση ή καθαρισμός), τη δομή (θερμική κατεργασία) ή τις εσωτερικές τάσεις του υλικού.

Τέτοιες επεμβάσεις μπορεί να είναι:

- Η επαναλκαλοποίηση. Με τη μέθοδο αυτή μπορούμε να αυξήσουμε το pH του σκυροδέματος, όταν αυτό έχει μειωθεί λόγω ενανθράκωσης ή άλλων αιτιών. Η διαδικασία της επαναλκαλοποίησης στηρίζεται στην λειτουργία ανόδου και καθόδου. Επαλείφουμε την επιφάνεια του σκυροδέματος με ένα αλκαλικό υγρό με περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ). Ως άνοδος λειτουργεί ένα ηλεκτρόδιο ενώ ως κάθοδος λειτουργεί ο χάλυβας. Με την εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού δυναμικού (περίπου 10V), το αλκαλικό υγρό διαχέεται στους πόρους του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την αύξηση του pH του.
- Το σφράγισμα των ρωγμών. Αυτό μπορεί να γίνει με ενέσεις ρητινών, ενέσεις τσιμέντου ή με την επαναλκαλοποίηση του σκυροδέματος. Οι ρητίνες αποτελούν ένα υλικό που μπορεί να γεμίσει το κενό μιας ρωγμής, επιτυγχάνοντας τελικά την πλήρη συνέχεια του υλικού. Επίσης λόγω της σύστασής τους, παρεμποδίζουν την ελεύθερη διείσδυση οξυγόνου και υγρασίας, των κύριων δηλαδή συστατικών της οξειδωτικής διαδικασίας. Κατά την διαδικασία αυτή οι οπλισμοί εγκιβωτίζονται, με αποτέλεσμα την προστασία τους από την διάβρωση. Επίσης οι υψηλές αντοχές εφελκυσμού και συνάφειας των ρητινών εμποδίζουν την διεύρυνση των ρωγμών. Μεγάλο πλεονέκτημα στις ρητίνες είναι το γεγονός ότι δεν είναι υλικά ευάλωτα σε εξωτερικούς παράγοντες και άρα έχουν αντοχή στο χρόνο. Το βασικό μειονέκτημα των ρητινών είναι η χαμηλή αντοχή σε

υψηλές θερμοκρασίες (κίνδυνος σε πυρκαγιά), καθώς και το υψηλό τους κόστος.



*Σχήμα 5.1: Διάταξη για επαναλκαλοποίηση του σκυροδέματος*

#### ➤ Μέτρα στην επιφάνεια του οπλισμού

Η προστασία από τη διάβρωση μπορεί να επιτευχθεί με τα:

- Επιχρίσματα σιδηροπλισμών.

Τα επιχρίσματα πάνω στο χάλυβα χρησιμοποιούνται με σκοπό να τον εμποδίσουν να έρθει σε επαφή με οξυγόνο, υγρασία ή χλωριόντα. Για την εφαρμογή των επιχρισμάτων, ο χάλυβας πρέπει να είναι απόλυτα καθαρός, απαλλαγμένος από ελαιώδεις ουσίες, σκόνη ή σκουριά προκειμένου να αποφευχθεί απώλεια συνάφειας μεταξύ των υλικών.

Τα επιχρίσματα μπορεί να είναι μεταλλικά ή μη μεταλλικά.

Για τα μη μεταλλικά επιχρίσματα μπορεί να χρησιμοποιηθούν οργανικά ή ανόργανα υλικά. Τα πλέον συνηθισμένα υλικά επίχρισης είναι οι εποξειδικές ρητίνες και το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC). Το χλωριούχο πολυβινύλιο έχει μικρή διαπερατότητα από νερό, αέρια και ηλεκτρολύτες, παρουσιάζει δε μεγάλη ανθεκτικότητα σε χημική προσβολή από οξέα και βάσεις. Οι εποξειδικές ρητίνες παρουσιάζουν καλή πρόσφυση στο χάλυβα και έχουν μεγάλη ανθεκτικότητα σε αλκαλικό περιβάλλον, όπως αυτό του σκυροδέματος. Η μέθοδος των επικαλύψεων με οργανικά στρώματα που εφαρμόζεται στον υπό προστασία χάλυβα πρέπει να αντέχει στο υψηλό pH

του σκυροδέματος και να έχει καλή συνάφεια με το σκυρόδεμα και τον δομικό χάλυβα.

Τα μεταλλικά επιχρίσματα προστατεύουν το χάλυβα με τη δική τους καταστροφή. Πρόκειται για μέταλλα με δυναμικό διάβρωσης ηλεκτραρνητικότερο από αυτό του χάλυβα, όπως ο ψευδάργυρος, το αλουμίνιο κ.α. Τα επιχρίσματα αυτά διαβρώνονται κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο που διαβρώνονται ως συμπαγή μέταλλα, μέχρι ο προστατευόμενος χάλυβας να εκτεθεί στο διαβρωτικό περιβάλλον σε μικρές περιοχές. Τότε εξαιτίας της γαλβανικής δράσης, επιταχύνεται η διάβρωση του «θυσιαζόμενου» επιχρίσματος, συνεχίζοντας έτσι την προστασία του χάλυβα. (Ρούτουλας Α., 2010)

#### ➤ **Μέτρα στην επιφάνεια του σκυροδέματος**

Οι κυριότεροι τρόποι επέμβασης είναι οι ακόλουθοι:

- Απομάκρυνση του οξυγόνου ή των οξειδωτικών από το νερό με κατεργασία υπό κενό, με κορεσμό με αδρανές αέριο ή με προσθήκη ουσιών που δεσμεύουν το οξυγόνο
- Απομάκρυνση των οξέων με εξουδετέρωση
- Απομάκρυνση των αλάτων με ιονεναλλαγή
- Ελάττωση της θερμοκρασίας. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις μη επίδρασης ή θετικής επίδρασης της αύξησης της θερμοκρασίας στην ελάττωση της διάβρωσης (π.χ. λόγω ελάττωσης της διαλυτότητας του οξυγόνου)
- Ελάττωση της ταχύτητας ροής εκτός γενικά από τα παθητικά μέταλλα
- Απομάκρυνση των στερεών σωματιδίων από το νερό ή τον αέρα με φιλτράρισμα ή άλλη κατάλληλη τεχνική
- Ελάττωση της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντα αέρα με αύξηση της θερμοκρασίας
- Απομάκρυνση του νερού από τον αέρα με αφύγρανση (π.χ. χρησιμοποίηση silica-gel)
- Χρησιμοποίηση αναστολέων δηλαδή ουσιών που προστίθενται σε μικρές συγκεντρώσεις στο διαβρωτικό περιβάλλον και ελαττώνουν την ταχύτητα διάβρωσης.

Τα μέτρα αυτά μπορεί να ληφθούν είτε εκ των προτέρων προκειμένου να αποκλεισθεί το ενδεχόμενο της διάβρωσης, είτε εκ των υστέρων προκειμένου να ανασταλεί μια εξελισσόμενη διαδικασία φθοράς σε μια ήδη υπάρχουσα κατασκευή από σκυρόδεμα. (Ρούτουλας Α., 2010)

## **5.2. Μέθοδοι προστασίας από την διάβρωση**

Για να αντιμετωπισθεί η διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα υπάρχουν διάφορες μέθοδοι προστασίας με διαφορετικό κόστος εφαρμογής αλλά και διαφορετικούς χρόνους επέκτασης της διάρκειας ζωής της κατασκευής. (Μπατής Γ., 2007)

Εκτός από την επιλογή των κατάλληλων υλικών, σε σχέση με το διαβρωτικό περιβάλλον, πρέπει να γίνεται προσπάθεια περιορισμού των γενικών συνθηκών που επιταχύνουν τη διάβρωση.

Η εφαρμογή κατάλληλης ή συνδυασμού κατάλληλων μεθόδων προστασίας από τη διάβρωση, αποβλέπει στην ελάττωση της ταχύτητας διάβρωσης μέσω μεταβολής των θερμοδυναμικών ή των κινητικών στοιχείων της διαβρωτικής δράσης.

Για την **αποτελεσματική προστασία** του σιδηρού οπλισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα παρακάτω είδη προστασίας:

- Ηλεκτροχημικές μέθοδοι προστασίας (Καθοδική προστασία, επανακαλοποίηση σκυροδέματος, ηλεκτροχημική αφαίρεση χλωριόντων)
- Επικαλύψεις σκυροδέματος
- Προσθήκη στο σκυρόδεμα αναστολέων διάβρωσης
- Χρήση ειδικών χαλύβων
- Χρήση ορυκτών πρόσθετων

### **5.2.1 Ηλεκτροχημικές μέθοδοι προστασίας**

#### ***Καθοδική προστασία (cathodic protection CP)***

Η καθοδική προστασία χρησιμοποιείται ως μέθοδος προστασίας των οπλισμών από τη διάβρωση σε σημαντικές κατασκευές όπως γέφυρες, θαλάσσιες εξέδρες, υπόγειες

σωληνώσεις από σκυρόδεμα οι οποίες υφίστανται διάβρωση από την εγκατάσταση γεωηλεκτρικών στοιχείων κ.α.

Η καθοδική προστασία αποτελεί μια ηλεκτροχημική μέθοδο προστασίας από τη διάβρωση και η εφαρμογή της βασίζεται σε τροποποιήσεις του ηλεκτροδιακού δυναμικού ανάμεσα στο μέταλλο και το περιβάλλον. Κατά τη διάβρωση ο χαλύβδινος οπλισμός οξειδώνεται στις ανοδικές περιοχές του συστήματος, ενώ τα παραγόμενα ηλεκτρόνια μεταφέρονται δια μέσου του μετάλλου και καταναλώνονται στην κάθοδο.

Κατά τη μέθοδο της καθοδικής προστασίας φορτίζεται αρνητικά η εγκατάσταση που πρέπει να προστατευτεί και με τον τρόπο αυτό η εγκατάσταση που πριν ήταν άνοδος γίνεται πλέον κάθοδος. Αυτό σημαίνει ότι η εγκατάσταση εξακολουθεί να είναι αρνητικά φορτισμένη αλλά η δράση αντιστρέφεται και πλέον έχει την προδιάθεση να πάθει αναγωγή και όχι οξείδωση όπως πριν την εφαρμογή της προστασίας.

Το δυναμικό του μετάλλου μετατοπίζεται σε πιο αρνητικές τιμές, ώστε να αποτελέσει την κάθοδο ενός ηλεκτρολυτικού κελιού.

Η μέθοδος της καθοδικής προστασίας αν εφαρμοστεί σωστά μπορεί πρακτικά να μηδενίσει την διάβρωση του οπλισμού. Η εφαρμογή της είναι δυνατή τόσο σε κατασκευαζόμενες όσο και σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές. Η εξειδίκευση και σχεδόν η συνεχής παρακολούθηση και εγκατάσταση μπορεί να είναι αποτρεπτική για την επιλογή.

Στο οπλισμένο σκυρόδεμα η μέθοδος καθοδικής προστασίας μπορεί να εφαρμοστεί με δύο τρόπους:

- με θυσιαζόμενες ανόδους
- με επιβαλλόμενο εξωτερικό ρεύμα

#### ***Καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους***

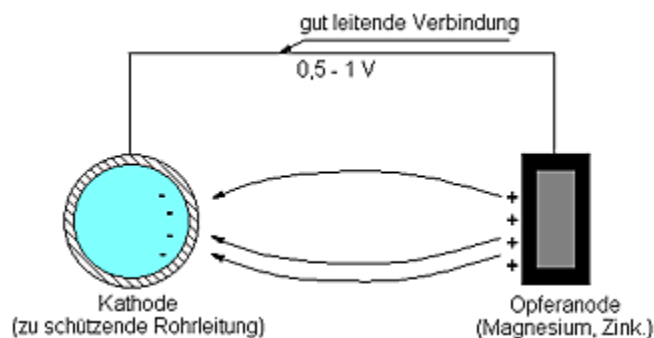
Η καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους βασίζεται στη δημιουργία γαλβανικού κελιού μεταξύ του μετάλλου που λειτουργεί ως κάθοδος και της θυσιαζόμενης ανόδου, το οποίο είναι υλικό πιο ανοδικό από το μέταλλο. Η σύνδεση

της καθόδου με την άνοδο γίνεται είτε με άμεση επαφή των δύο μετάλλων είτε μέσω μονωτικού καλωδίου (σχήμα 5.2.).

Κατά αυτόν τον τρόπο καθοδικής προστασίας χρησιμοποιούνται θυσιαζόμενες άνοδοι, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από μέταλλο ηλεκτραρνητικότερο από το δεύτερο, συνδέονται με το προς προστασία μέταλλο με αποτέλεσμα την ροή ηλεκτρονίων από το θυσιαζόμενο μέταλλο προς στο προστατευόμενο.

Τα ανοδικότερα αυτά μέταλλα (συνήθως χρησιμοποιούνται κράματα Mg, Zn, Al) αποκτούν αυθόρμητα αρνητικό δυναμικό σε σχέση με το διαβρωτικό περιβάλλον. Το ίδιο αρνητικά φορτισμένη (σε σχέση με το διαβρωτικό περιβάλλον) είναι και η χαλύβδινη κατασκευή που πρόκειται να προστατευθεί. Τα μέταλλα αυτά έχουν μεγαλύτερη προδιάθεση να διαβρωθούν (είναι ανοδικότερα) και για το λόγο αυτό φορτίζονται περισσότερο αρνητικά ως προς το περιβάλλον απ' ό,τι ο χάλυβας. Έτσι ο χάλυβας φορτίζεται θετικά ως προς τα μέταλλα αυτά. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα γαλβανικό στοιχείο με αρνητικό πόλο το μέταλλο και θετικό το χάλυβα. Επιβάλλεται δηλαδή στο χάλυβα από τα ανοδικότερα αυτά μέταλλα ένα αντίστροφο δυναμικό, από το δυναμικό διάβρωσής του (ηλεκτρόνια ρέουν από την πλάκα του μετάλλου προς το χάλυβα). Ταυτόχρονα, εξ αιτίας του γαλβανικού στοιχείου που δημιουργήθηκε, το ανοδικότερο μέταλλο οξειδώνεται (απώλεια ηλεκτρονίων, σχηματισμός ιόντων) και καταναλίσκεται περισσότερο παρά αν ήταν μόνο του.

Η μέθοδος καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενες ανόδους παρουσιάζει το πλεονέκτημα της ευκολίας στην εγκατάσταση και την ελάχιστη ως ασήμαντη συντήρηση. Όμως η προστατευτική επίδραση της καθοδικής προστασίας διαρκεί όσο υπάρχουν άνοδοι. Για να εξασφαλιστεί η προστασία του οπλισμού απαιτείται μεγάλος αριθμός ανόδων και οι θυσιαζόμενες άνοδοι όταν εξαντληθούν πρέπει να αντικατασταθούν. Η αντικατάσταση των ανόδων, που γίνεται σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, συνήθως 20 - 25 χρόνια, είναι ένα τεχνικά πολύ δύσκολο πρόβλημα. Επίσης υπάρχει μια περιορισμένη δυνατότητα επιλογής ανόδων, καθώς η θυσιαζόμενη άνοδος θα πρέπει να είναι κατασκευασμένη από υλικό που ευρίσκεται υψηλότερα από τον χάλυβα στην ηλεκτροδιακή σειρά π.χ. από ψευδάργυρο.



**Σχήμα 5.2: Απεικόνιση συστήματος καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενη άνοδο**

Πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής:

- Εύκολη και χαμηλού κόστους εγκατάσταση
- Ασήμαντη συντήρηση
- Χρήση και σε προεντεταμένο σκυρόδεμα
- Δεν απαιτούν την ύπαρξη πηγής για παροχή εξωτερικού ρεύματος
- Ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της επιφάνειας
- Χρήσιμα για τοπική προστασία σε μία κατασκευή
- Δύσκολο σχετικά να δημιουργήσουν αλληλεπιδράσεις με γειτονικές κατασκευές
- Σχετικά εύκολη η προσθήκη επιπλέον ανόδων

Μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής:

- Εφαρμογή σε περιπτώσεις που απαιτούνται μικρά ρεύματα
- Μικρή διάρκεια ζωής της ανόδου (συχνή αντικατάσταση αφού μακροχρόνια χρήση των ανόδων μπορεί να τις αποπαθητικοποιήσει και να δημιουργήσει ένα μη αγωγίμο στρώμα στην επιφάνειά τους, ώστε να μην μπορούν να παράγουν ρεύμα)
- Χρειαζόμαστε μεγάλο αριθμό ανόδων για προστασία όλων των οπλισμών
- Μη επαρκής έλεγχος της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος (εξαρτάται από περιβαλλοντικές συνθήκες).

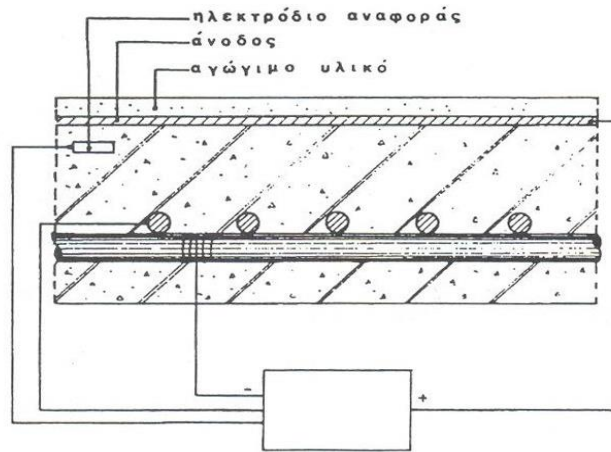
### ***Καθοδική προστασία με επιβαλλόμενο εξωτερικό ρεύμα***

Η εφαρμογή της καθοδικής προστασίας επιτυγχάνεται με την διαβίβαση μιας καθορισμένης ποσότητας ρεύματος. Η βασική αρχή της μεθόδου συνίσταται στην ύπαρξη μιας πηγής συνεχούς ρεύματος που τροφοδοτεί την κατασκευή με ηλεκτρόνια και μιας βοηθητικής ανόδου κοντά στην επιφάνεια του σκυροδέματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3. Ο οπλισμός συνδέεται ηλεκτρικά αγώγιμα με τον αρνητικό πόλο της πηγής του συνεχούς ρεύματος. Η βοηθητική άνοδος συνδέεται με τον θετικό πόλο της πηγής συνεχούς ρεύματος. Έτσι, η επιφάνεια γίνεται άνοδος και οι οπλισμοί κάθοδος.

Οι καθοδικές περιοχές πολώνονται στο δυναμικό ισορροπίας των ανοδικών περιοχών. Επομένως δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ των ανοδικών και καθοδικών περιοχών και παύει πλέον το μέταλλο να υφίσταται διάβρωση. Το εξωτερικά εφαρμοζόμενο δυναμικό (από την πηγή συνεχούς ρεύματος) εξαλείφει την επίδραση των μακροστοιχείων. Ο οπλισμός τώρα σε όλη του την έκταση συμπεριφέρεται σαν κάθοδος όπου πραγματοποιείται μόνο η μετατροπή του οξυγόνου προς υδροξύλιο. Η δράση των χλωριόντων ή των άλλων διαβρωτικών ανιόντων μεταφέρεται στην βοηθητική άνοδο.

Τα ανιόντα υδροξυλίου ( $\text{OH}^-$ ) που σχηματίζονται στην κάθοδο (χάλυβας) με την αντίδραση του νερού των πόρων με το οξυγόνο και με ελεύθερα ηλεκτρόνια από την κάθοδο κινούνται προς την επιφάνεια αντί, να κατευθύνονται κατά μήκος των ράβδων.

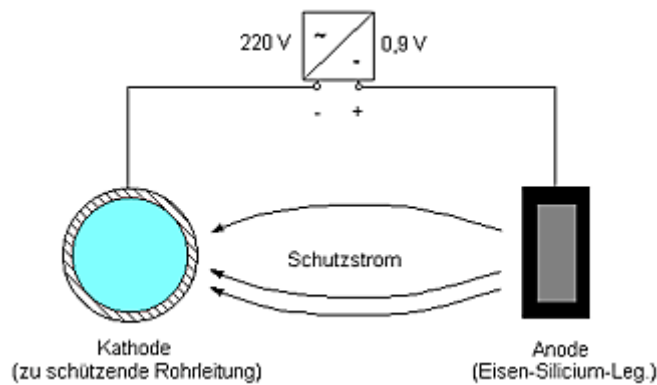
Επίσης προς την επιφάνεια κινούνται υπό την επίδραση της τάσης συνεχούς ρεύματος και τα τυχόν υπάρχοντα χλωριόντα της μάζας του σκυροδέματος και του νερού των πόρων. Έτσι η εξουδετέρωση των ανιόντων, δηλαδή η οξείδωση, γίνεται στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος και όχι στον χάλυβα με συνέπεια τη διάβρωσή του.



**Σχήμα 5.3: Καθοδική προστασία οπλισμού με εφαρμοζόμενο ρεύμα**

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

Οι άνοδοι είναι είτε καταναλισκόμενες (π.χ. σίδερα ανακύκλωσης) που όμως για να εξασφαλίζουν το πέρασμα επαρκών ρευμάτων, είναι ογκώδης, μολύνουν το περιβάλλον και απαιτούν συχνή αντικατάσταση είτε μη καταναλισκόμενες (π.χ. Si-Fe γραφίτης, Pb-Sb-Ag, Pt-Ti, Pt-Ta). Η τιμή του δυναμικού της πηγής του συνεχούς ρεύματος επηρεάζεται κυρίως από την αγωγιμότητα του περιβάλλοντος, ενώ το μήκος της προστατευόμενης ανά άνοδο κατασκευής (π.χ. σωλήνα) από την αντίσταση της μεταλλικής κατασκευής.



**Σχήμα 5.4: Απεικόνιση συστήματος καθοδικής προστασίας με χρήση ηλεκτρικής πηγής**

Πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής:

- Μεγάλη διάρκεια ζωής των ανόδων άρα όχι συχνή αντικατάσταση
- Πλήρης αναστολή της διάβρωσης του χάλυβα εφαρμόζοντας ποικίλες τιμές ρεύματος
- Ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της επιφάνειας
- Δεν προσθέτει νεκρά φορτία ούτε αυξάνει τις φυσικές διαστάσεις της κατασκευής
- Μία άνοδος παρέχει υψηλά ποσά ρεύματος και έτσι προστατεύεται μεγάλο μέρος της κατασκευής
- Μπορεί να τοποθετηθεί μακριά από την κατασκευή επειδή παρέχει υψηλές τάσεις (έως 100V)
- Εγκατάσταση σε μεγάλο βάθος που φτάνει και τις πιο δυσπρόσιτες περιοχές
- Εφαρμογή και σε καινούριες κατασκευές ως μέτρο προστασίας (Δρακάτος Δ., 2009)

Μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής:

- Απαιτεί συχνή ρύθμιση και προσαρμογή (πιθανή διακοπή ρεύματος, διακύμανση ιδιοτήτων διαβρωτικού περιβάλλοντος)
- Ασυνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος
- Μειώνει την ολκιμότητα σε χάλυβες υψηλής αντοχής λόγω εκλύσεως υδρογόνου
- Υψηλό κόστος (χρησιμοποίηση δαπανηρότερων δυναμοστατών σε διαβρωτικό περιβάλλον με μεγάλες διακυμάνσεις των ιδιοτήτων του)
- Αλληλεπιδρά με γειτονικές εγκαταστάσεις προκαλώντας τους διάβρωση

- Πρέπει να γίνεται σωστή εκλογή των ορίων τιμών της καθοδικής τάσης με προηγούμενη εργαστηριακή έρευνα
- 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.

Η καθοδική προστασία με εφαρμοζόμενο ρεύμα χρησιμοποιείται πολύ περισσότερο σε σχέση με την μέθοδο θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων, ιδιαίτερα στις παρακάτω περιπτώσεις:

- προστασία σωλήνων μέσα στο έδαφος σε γλυκό ή θαλασσίνο νερό
- κατασκευές πλωτές και μη, μέσα στη θάλασσα
- στα πλοία

### ***Επαναλκαλοποίηση σκυροδέματος (electrochemical realkalization)***

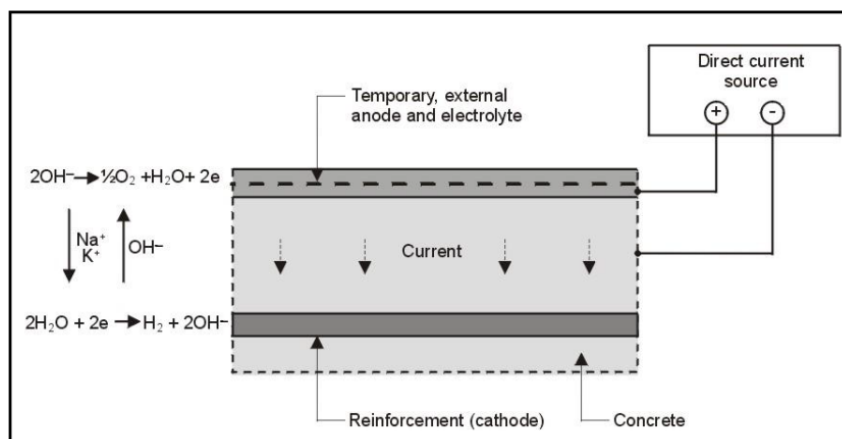
Για την επαναφορά της αρχικής αλκαλικότητας του σκυροδέματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της ηλεκτροχημικής επαναλκαλοποίησης του σκυροδέματος. Η αύξηση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος στα επίπεδα του διαλύματος των πόρων ( $pH > 12$ ), έχει σαν αποτέλεσμα την αποκατάσταση του παθητικού στρώματος οξειδίων στην επιφάνεια του χάλυβα.

Η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί συνεχές ρεύμα το οποίο επιβάλλεται ανάμεσα στον οπλισμό (κάθοδος) και σε μια άνοδο η οποία τοποθετείται προσωρινά στην εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής. Στο σχήμα 5.5 φαίνεται η βασική δομή του συστήματος της ηλεκτροχημικής επαναλκαλοποίησης.

Συνήθως, χρησιμοποιούνται σαν άνοδοι πλέγματα τιτανίου ή κοινού χάλυβα. Η αύξηση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος επιτυγχάνεται με τον ψεκασμό αλκαλικού διαλύματος πάνω στην επιφάνεια της κατασκευής στην οποία έχει αγκυρωθεί το προσωρινό δίκτυο/πλέγμα ανόδων, διαμέσου ηλεκτρολύτη. Το διάλυμα του ηλεκτρολύτη με το οποίο γίνεται ο ψεκασμός της επιφάνειας είναι συνήθως διάλυμα  $Na_2CO_3$  με  $C=1M$  (Γρηγοριάδης Γ., 2014).

Η απαιτούμενη πυκνότητα ρεύματος κυμαίνεται στην περιοχή από  $0.8 - 2 A/m^2$  επιφάνειας σκυροδέματος (Jacobasch et al., 1982). Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής

της ηλεκτροχημικής επανακαλοποίησης του σκυροδέματος λαμβάνουν χώρα δράσεις που συμβαίνουν ταυτόχρονα με την ηλεκτρόλυση όπως είναι η τριχοειδής αναρρίχηση του αλκαλικού διαλύματος και η διάχυση του στο σκυρόδεμα λόγω διαφοράς συγκέντρωσης, μεταφορά φορτίου λόγω ηλεκτρικού πεδίου, φαινόμενα ηλεκτρώσμωσης και η ηλεκτρόλυση. Μετά το τέλος της διαδικασίας τόσο το πλέγμα της ανόδου, όσο και ο ηλεκτρολύτης απομακρύνονται.



**Σχήμα 5.5: Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτροχημικής επανακαλοποίησης σκυροδέματος**

### **Ηλεκτροχημική αφαίρεση χλωριόντων**

Η ηλεκτροχημική αφαίρεση χλωριόντων από το σκυρόδεμα είναι μια διαδικασία απομάκρυνσης των ιόντων χλωρίου από μια κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος με τη βοήθεια ηλεκτροχημικών μέσων. Για την αφαίρεση των χλωριόντων με ηλεκτροχημικό τρόπο χρησιμοποιείται ένας κατάλληλος ηλεκτρολύτης, μια ρητίνη ανταλλαγής ιόντων και ένα μεταλλικό πλέγμα το οποίο εφαρμόζεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Στο ηλεκτροχημικό κύκλωμα, ο οπλισμός δρα ως κάθοδος και το πλέγμα ως άνοδος. Όπως και στην καθοδική προστασία, ο οπλισμός συνδέεται με τον αρνητικό πόλο μιας πηγής συνεχούς ρεύματος, ενώ ο θετικός πόλος συνδέεται με μια προσωρινή εξωτερική άνοδο, η οποία είναι τοποθετημένη μέσα στον ηλεκτρολύτη που καλύπτει την επιφάνεια σκυροδέματος. Το ρεύμα δια μέσου του οπλισμού ρέει προς την άνοδο και έτσι δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο. Τα χλωριόντα τα οποία έλκονται από τη θετικά φορτισμένη άνοδο, δεσμεύονται από τον ηλεκτρολύτη και απομακρύνονται με απορρόφηση.

Η ηλεκτροχημική αφαίρεση των χλωριόντων παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα: (Τάσιος Θ.Π. & Αλιγιζάκη Κ.,1993):

- Απαιτεί την εφαρμογή υψηλού δυναμικού το οποίο αναπτύσσει μεγάλες θερμοκρασίες στο σκυρόδεμα (περίπου 90°C), με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρηγματώσεων.
- Αύξηση της διαπερατότητας του σκυροδέματος.
- Μείωση της αντοχής του σκυροδέματος στην περίπτωση χρήσεως μεγάλων πυκνοτήτων ρεύματος.

Η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν η ζημιά στο σκυρόδεμα είναι εκτεταμένη και απειλεί τη στατικότητα της δομής.

### **5.2.2. Επικαλύψεις σκυροδέματος**

Η επικάλυψη του σκυροδέματος έχει ως σκοπό τη δημιουργία ενός στρώματος χαμηλής διαπερατότητας έτσι ώστε να προστατεύεται η κατασκευή από επιβλαβείς διαβρωτικούς παράγοντες. Το στρώμα της επικάλυψης εμποδίζει την είσοδο των χλωριόντων με αποτέλεσμα να καθυστερεί η έναρξη της διάβρωσης. Αν και οι περισσότερες επικαλύψεις εμποδίζουν και την είσοδο του νερού στο εσωτερικό του σκυροδέματος, παρόλα αυτά επιτρέπουν τη διαπνοή, δηλαδή την εξάτμιση των ατμών από το εσωτερικό του σκυροδέματος.

Η επιφανειακή προστασία του σκυροδέματος μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους, όπως:

- Τη σφράγιση, η οποία πραγματοποιείται με ένα λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του σκυροδέματος (μέχρι 300 μm) που κλείνει μερικά ή ολικά τους πόρους του σκυροδέματος
- Τον διαποτισμό, ο οποίος πραγματοποιείται με ένα λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του σκυροδέματος χωρίς να καλύπτονται οι πόροι του. Συνήθως χρησιμοποιούνται υλικά σιλανικής και σιλοξανικής βάσης, τα οποία έχουν πυριτική βάση και δρουν ως υδροφοβικοί παράγοντες. Αντιδρούν χημικά με το σκυρόδεμα και σχηματίζουν μια υδροφοβική στρώση η οποία εμποδίζει την είσοδο των χλωριόντων και νερού στο εσωτερικό του σκυροδέματος, αλλά επιτρέπει την εξάτμιση των ατμών. Η επιφάνεια του σκυροδέματος πριν

την εφαρμογή προετοιμάζεται κατάλληλα, ώστε να απομακρυνθούν σκόνες και έλαια. Επαναβαφή απαιτείται περίπου κάθε 5 χρόνια, χωρίς να απαιτείται η αφαίρεση της προηγούμενης στρώσης.

➤ Την επικάλυψη, η οποία πραγματοποιείται με τον σχηματισμό ενός ομοιόμορφου στρώματος στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Μπορεί να διακριθεί σε :

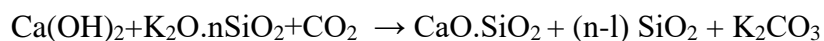
- Λεπτή επικάλυψη, με πάχος από 0,3 έως 1,0 mm. Είναι πιθανό να μην καλυφθούν όλες οι ανωμαλίες της επιφάνειας του σκυροδέματος
  - Χονδρή επικάλυψη, με πάχος από 1,0 έως 5,0 mm, το οποίο είναι αρκετό για την κάλυψη όλων των ανωμαλιών της επιφάνειας του σκυροδέματος
  - Επικάλυψη με κονιάματα, με πάχος κονιαμάτων μεγαλύτερο από 5,0 mm.
- (Μπατής Γ., 2006)

Στην κατηγορία των επικαλύψεων ανήκουν οι οργανικές και οι ανόργανες επικαλύψεις:

#### *Ανόργανες επικαλύψεις*

Οι ανόργανες επικαλύψεις έχουν σαν συνδετικό μέσο την υδρύαλο (πυριτικό κάλιο) και ως χρωστικές ανόργανα πιγμέντα. Υδρύαλος είναι η συνήθης ονομασία των πυριτικών αλάτων των αλκαλίων με γενικό τύπο:  $Me_2O_x \cdot nSiO_2$ , όπου το Me είναι K ή Na και σπάνια Li, που άλλωστε είναι τα μόνα υδατοδιαλυτά (κολλοειδή) πυριτικά άλατα με υψηλό pH μεταξύ 11-13. Όσο μεγαλύτερο είναι το pH τόσο πιο δυσδιάλυτη στο νερό είναι η υδρύαλος.

Η συγκράτηση της υδρύαλου με το υπόστρωμα (σκυρόδεμα, λίθος ή σοβάς) και η σκλήρυνση του χρώματος πραγματοποιούνται με τον ακόλουθο τρόπο:



δηλαδή η υδρύαλος, η οποία έρχεται σε επαφή λόγω διάχυσης με ιόντα ασβεστίου, και με την ενεργό συμμετοχή του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας μεταβάλλεται σε πυριτικό ασβέστιο και ανθρακικό κάλιο. Τα ανόργανα πιγμέντα που περιέχονται στην υδρύαλο συγκρατούνται στο σχηματιζόμενο πλέγμα από την προαναφερθείσα αντίδραση.

### *Οργανικές επικαλύψεις*

Η επικάλυψη (βαφή) με χρήση οργανικών επικαλύψεων (χρώματα) είναι η παλαιότερη μέθοδος προστασίας και διακόσμησης επιφανειών. Εκτός από την προστασία από την φθορά, τα χρώματα έχουν και αξιόλογα αισθητικά αποτελέσματα. Τα τελευταία χρόνια, παράλληλα με τις κλασικές επικαλύψεις (χρώματα), χρησιμοποιούνται και επικαλύψεις με κονίες πολυμερών που εξαιτίας της απουσίας οργανικών διαλυτών είναι περιβαλλοντικά αβλαβείς.

Η επικάλυψη είναι δυνατόν να εφαρμοστεί είτε στην επιφάνεια του χάλυβα ή του σκυροδέματος. Επικαλύψεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος προστατεύουν τόσο το σκυρόδεμα όσο και τον οπλισμό, ενώ επικαλύψεις στην επιφάνεια του οπλισμού προστατεύουν μόνο τον οπλισμό. Στην περίπτωση της επικάλυψης του οπλισμού πρέπει να εξετάζεται και η επίπτωση στη συνάφεια οπλισμού-σκυροδέματος.

Η επιφανειακή προστασία του σκυροδέματος (οπλισμένου ή μη) με χρώματα είναι πολύ συνηθισμένη μέθοδος προστασίας. Τα χρώματα έχουν το πλεονέκτημα να μην αυξάνουν το βάρος της κατασκευής. Είναι φανερό ότι οι επιβλαβείς επιδράσεις του περιβάλλοντος στο σκυρόδεμα ενεργούν και στην οργανική επικάλυψη.

Τέτοιες επιβλαβείς επιδράσεις του περιβάλλοντος είναι:

- Η UV-ακτινοβολία, η οποία προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία
- Η θερμότητα και οι διακυμάνσεις αυτής με την εναλλαγή ημέρας – νύκτας
- Το νερό από το περιβάλλον (π.χ. βροχή, ομίχλη, κλπ)
- Η σκόνη που μεταφέρεται από τον αέρα
- Τα διαβρωτικά αέρια CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub> από τα αυτοκίνητα και τις κεντρικές θερμάνσεις
- Τις μηχανικές δονήσεις λόγω βαρείας κυκλοφορίας
- Τα άλγη
- Τις επιβαρύνσεις από το έδαφος (υγρασία και άλατα)

Εκτός όμως από αυτές τις επιδράσεις το χρώμα πρέπει να αντιμετωπίσει:

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

- την διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος

Το νερό υπάρχει στο σκυρόδεμα για πολλούς λόγους (τυχόν περίσσεια νερού κατά τη σκυροδέτηση, βροχή, διαρροές σωληνώσεων νερού, κλπ). Ειδικότερα το νερό που προέρχεται από το έδαφος μεταφέρει και άλατα. Έτσι στα σημεία που αυτό εξατμίζεται προκαλεί εξανθήσεις αλάτων. Τα άλατα εξάνθησης έχουν επιπτώσεις στην αντοχή των χρωμάτων. Οπότε μία οργανική επικάλυψη προστατευτική του σκυροδέματος θα πρέπει να πληρεί κάποιες απαιτήσεις, όπως:

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

Η ταυτόχρονη εκπλήρωση όλων των παραπάνω απαιτήσεων είναι δύσκολη. Η βαρύτητα σε κάθε μία απαίτηση πρέπει να συμφωνεί με τις απαιτήσεις της κατασκευής, την οποία πρόκειται να προστατεύσει η οργανική επικάλυψη. Επιπλέον ένα χρώμα οφείλει να ικανοποιεί απαιτήσεις, που είναι μεταξύ τους αντίθετες και εξουδετερώνονται (υδρατμοπερατότητα έναντι αδιαβροχοποίησης, πορώδες διαπνοής έναντι δυνατότητας αυτοκαθαρισμού, ελαστικότητα έναντι μηχανικών αντοχών απότριψης, κ.α.). (Μπατής Γ., 2006)

Τα οργανικά χρώματα που χρησιμοποιούνται στην προστασία του σκυροδέματος είναι χρώματα σιλικόνης, σιλοξάνης, υδατικών διασπορών κυρίως ακρυλικών, πολυμερών ρητινών, χλωριομένου καουτσούκ, καθώς και χρώματα δύο συστατικών.

Για την εφαρμογή των χρωμάτων ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος με απομάκρυνση όλων των ξένων σωμάτων καθώς και των σαθρών τμημάτων του σκυροδέματος
- επικάλυψη με ένα χέρι υπόστρωμα (αστάρι) με το ίδιο συνδετικό μέσο με το χρώμα που θα επικαλυφθεί

- επικάλυψη με δύο χέρια χρώματος

Μεγάλη σημασία για τη διάρκεια ζωής του χρώματος έχει η σωστή εφαρμογή του υποστρώματος. Το υπόστρωμα (αστάρι) έχει την ίδια περίπου χημική σύσταση με το χρώμα που θα ακολουθήσει αλλά περιέχει μεγαλύτερο ποσοστό διαλύτη και με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η διείσδυση του χρώματος στους πόρους του σκυροδέματος και η καλή συνάφεια χρώματος και σκυροδέματος.

Τα χρώματα σιλικόνης έχουν σαν συνδετικό μέσο μία υδατική διασπορά ρητίνης σιλικόνης και έχουν μεγάλη διαπερατότητα σε ατμό και μικρή διαπερατότητα σε νερό. Βασική προϋπόθεση της εφαρμογής τους είναι η εφαρμογή ενός υδρόφοβου ασταριού σιλικόνης. Συνήθως χρησιμοποιούνται στην προστασία του σκυροδέματος αλλά και στην προστασία μνημείων.

Τα χρώματα των υδατικών διασπορών είναι τα πλέον συνηθισμένα στην προστασία του σκυροδέματος και στην αγορά διατίθεται μεγάλη γκάμα χρωμάτων της κατηγορίας αυτής σε διάφορους χρωματισμούς. Οι ακρυλικές διασπορές είναι οι πλέον γνωστές. Η προσεκτική εφαρμογή του κατάλληλου ασταριού δίνει μεγάλες τιμές συνάφειας. Τα χρώματα της κατηγορίας αυτής εμφανίζουν μεγάλη διαπερατότητα σε υδρατμούς, πολύ μικρή διαπερατότητα σε CO<sub>2</sub> και SO<sub>2</sub>, αλλά συνήθως εμφανίζουν μεγαλύτερη διαπερατότητα σε νερό από τις επόμενες κατηγορίες χρωμάτων. Νεότερες εξελίξεις στα χρώματα της κατηγορίας αυτής έχουν δώσει προϊόντα που μπορούν να εφαρμοστούν στην επιφάνεια του σκυροδέματος αμέσως μετά το ξεκαλούπωμα. Επίσης διατίθενται προϊόντα που σχηματίζουν ελαστικό στρώμα επικάλυψης ικανό για την κάλυψη των ρωγμών. (Kharshan M. and Cracauer C., 2011)

Οι ρητίνες από ακρυλικά και μεθακρυλικά συμπολυμερή διαλυτές σε οργανικούς διαλύτες χρησιμοποιούνται επίσης για την παραγωγή προστατευτικών χρωμάτων στο σκυρόδεμα, καθώς παρουσιάζουν πολύ καλή διαπερατότητα σε νερό και διοξείδιο του άνθρακα καθώς και καλή αντοχή στην ακτινοβολία UV με προσθήκη κατάλληλων προσθέτων (UV-absorbers). Επίσης τα χρώματα αυτά παρουσιάζουν πολύ καλή διεισδυτικότητα στους πόρους του σκυροδέματος και καλή συνάφεια.

Επίσης, χρώματα δύο συστατικών με βάση τις εποξικές και πολυουρεθανικές ρητίνες έχουν χρησιμοποιηθεί για την προστασία του σκυροδέματος. Η σκλήρυνση τους γίνεται με την αρχή της πολυπροσθήκης. Τα δύο συστατικό ρητίνη και σκληρυντής αναμιγνύονται λίγο πριν την εφαρμογή και αντιδρούν σχηματίζοντας ένα υψηλού μοριακού βάρους πολυμερές.

Ακόμη ακόρεστοι πολυεστέρες και μεθακρυλικές ρητίνες που σκληρύνονται με την αρχή του πολυμερισμού βρίσκουν εφαρμογή στην προστασία του σκυροδέματος, καθώς παρουσιάζουν πολύ καλή αντοχή σε αλκαλικά και όξινα διαλύματα, διαλύτες οργανικούς αλλά και πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Η χρήση τους σε γκαράζ, βιομηχανικές κατασκευές, στα τούνελ κ.λ.π, είναι ιδιαίτερα συνηθισμένη.

Η χρήση πολυουρεθανικών ρητινών σε συνδυασμό με πίσσα για την προστασία του σκυροδέματος σε ισχυρά διαβρωτικά περιβάλλοντα αποτελεί μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εφαρμογή. Μία νεότερη εξέλιξη στα χρώματα της κατηγορίας αυτής είναι η χρήση ακόρεστων πολυεστερικών ρητινών σε συνδυασμό με ίνες για την κάλυψη δεξαμενών από οπλισμένο σκυρόδεμα. (Sastri V.S., 2011)

### ***5.2.3. Προσθήκη στο σκυρόδεμα αναστολέων διάβρωσης***

Η μέθοδος της τοπικής επισκευής των προβλημάτων διάβρωσης, όπως η αφαίρεση του αποσπασμένου σκυροδέματος, η εξυγίανση των οπλισμών με τρίψιμο και εφαρμογή αντιδιαβρωτικών και έπειτα η αποκατάσταση της αρχικής διατομής με ειδικά επισκευαστικά κονιάματα, έχει σαν αποτέλεσμα να παραμένουν πολλά τμήματα σκυροδέματος, όπου η περιεκτικότητα σε χλωρίδια είναι υψηλή και το πρόβλημα να ξαναπαρουσιάζεται λίγο αργότερα, καθώς η διάβρωση προχωρά, το σκυρόδεμα ρηγματώνεται και σταδιακά αποσπώνεται και τελικά το κόστος της επισκευής απογειώνεται.

Οι διεισδυτικοί αναστολείς διάβρωσης (MCI's – Migrating Corrosion Inhibitors) χρησιμοποιούνται ως η μοναδική λύση ώστε το μη αποσπασμένο σκυρόδεμα να παραμείνει στη θέση του και η «θεραπεία» των οπλισμών από τη διάβρωση να γίνει εξωτερικά. (Παναγιωτίδης Θ., 2011)

Γενικά οι αναστολείς διάβρωσης παρέχουν προστασία στο σκυρόδεμα έναντι της διάβρωσης και παρεμβαίνουν στη διαδικασία της διάβρωσης χωρίς να επηρεάζουν αρνητικά την ποιότητα του σκυροδέματος. (Σιδέρης, Κ. κα, 2009)

Λόγω της ευκολίας χρήσης τους, του χαμηλότερου κόστους έναντι των άλλων μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας, καθώς και του γεγονότος ότι δεν απαιτείται περαιτέρω συντήρηση της κατασκευής, οι αναστολείς διάβρωσης αποτελούν μια από τις περισσότερο προτιμητέες μεθόδους προστασίας έναντι της διάβρωσης. (Batis et al, 1993)

Οι αναστολείς διάβρωσης είναι ουσίες οι οποίες προστίθενται στο σκυρόδεμα κατά την παρασκευή του, με σκοπό να προστατέψουν τον ενσωματωμένο χάλυβα από τη διάβρωση. Μπορεί να είναι οργανικά ή ανόργανα άλατα όπως, νιτρώδες ασβέστιο, νιτρώδες νάτριο, αμινοαλκοόλες, αλκανολαμίνες. (Ρούτουλας Α., 2010)

Οι αναστολείς διάβρωσης είναι χημικές ενώσεις, που όταν προστεθούν στο σκυρόδεμα σε μικρές συγκεντρώσεις, έχουν την ικανότητα να επιβραδύνουν ή να σταματούν το ρυθμό διάβρωσης των οπλισμών. Οι αναστολείς γενικά είναι ενεργοί σε μικρές συγκεντρώσεις και ο μηχανισμός της δράσης τους έχει διευκρινιστεί σε λίγες μόνο περιπτώσεις. 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 διείσδυσης των ιόντων χλωρίου, όπως π.χ. η πυριτική παιπάλη. Οι αναστολείς διάβρωσης που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να παρέχουν προστασία στον οπλισμό για μεγάλο χρονικό διάστημα και να μην επηρεάζουν αρνητικά τις υπόλοιπες ιδιότητες του σκυροδέματος.

Οι αναστολείς καθυστερούν τη διαδικασία της διάβρωσης με τους παρακάτω τρόπους:

- Αύξηση της ανοδικής ή καθοδικής πολικότητας (κλίσεις Tafel).
- Μείωση της μετακίνησης ή της διάχυσης των ιόντων στη μεταλλική επιφάνεια.
- Αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης της μεταλλικής επιφάνειας.

Τα μόρια των αναστολέων είναι συνήθως σε συνεχή κίνηση, καθώς προσροφούνται και εκροφούνται μεταξύ του ρευστού και του προστατευτικού στρώματος. Η ρόφηση

και η εκρόφηση εξαρτώνται από τη φύση των μορίων καθώς και από τη συγκέντρωση του αναστολέα στο διάλυμα. Είναι σημαντικό κατά την προστασία με χρήση αναστολέων, η συγκέντρωσή τους να διατηρείται σε επαρκή επίπεδα στο ρευστό. (Batis G. et al, 1999)

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

➤ **Ανοδικοί αναστολείς διάβρωσης (anodic inhibitors):**

Οι ανοδικοί αναστολείς αναστέλλουν τη διάβρωση, σταθεροποιώντας το προστατευτικό φιλμ του οπλισμού, το οποίο έχει την τάση να διασπάται όταν ανεβαίνει η περιεκτικότητα των χλωριδίων. Δημιουργούν ένα λεπτό προστατευτικό στρώμα στα ανοδικά σημεία του μετάλλου, το οποίο δεν είναι ορατό δια γυμνού οφθαλμού, αυξάνοντας το ανοδικό δυναμικό και επιβραδύνοντας έτσι την αντίδραση διάβρωσης. Σταδιακά το στρώμα αυτό μπορεί να καλύψει ολόκληρη την επιφάνεια του μετάλλου.

Αν η συγκέντρωση του αναστολέα είναι σχετικά χαμηλή, στην αρχή της τροφοδοσίας του αναστολέα η διάβρωση αυξάνεται εκθετικά, και αφού φτάσει σ' ένα μέγιστο σημείο, το οποίο μερικές φορές υπερβαίνει κατά πολύ το αντίστοιχο ενός μετάλλου το οποίο δεν προστατεύεται από αναστολέα, αρχίζει να ελαττώνεται προσεγγίζοντας την ελάχιστη τιμή ισορροπίας η οποία σχετίζεται με τον τύπο του αναστολέα και με τις ιδιότητες του συστήματος. Η τελική τιμή της διάβρωσης αγγίζει πολλές φορές το ένα δέκατο της διάβρωσης ενός μετάλλου που προστατεύεται από καθοδικό αναστολέα.

Ο αναστολέας δεν έχει τη δυνατότητα να προστατέψει τα πορώδη σημεία του μετάλλου στα οποία εμφανίζονται κυψελίδες αέρα και αυτές συνδυάζονται με τα καθοδικά σημεία του μετάλλου συγκεντρώνοντας το δυναμικό διάβρωσης. Συνεπώς, θα πρέπει να έχει γίνει καλός καθαρισμός του μετάλλου πριν την εφαρμογή του αναστολέα.

Χαρακτηριστικό δείγμα ανοδικών 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 (cathodic inhibitors):**

Οι καθοδικοί αναστολείς είναι γενικά λιγότερο αποτελεσματικοί από τους ανοδικούς. Προσροφώνται από τον οπλισμό και σχηματίζουν ένα ορατό στρώμα στα καθοδικά σημεία του μετάλλου το οποίο πολώνει το μέταλλο, περιορίζοντας την πρόσβαση του διαλυμένου οξυγόνου στην επιφάνεια του μετάλλου. Έτσι δημιουργείται στην επιφάνεια του οπλισμού στην επιφάνειά του ένα φράγμα στη μείωση οξυγόνου, που είναι η κύρια αιτία καθοδικής αντίδρασης του χάλυβα στο σκυρόδεμα.

Με την τροφοδοσία του αναστολέα, όταν η συγκέντρωσή του είναι ακόμα χαμηλή, δεν φαίνεται να υπάρχει μεταβολή στο ρυθμό διάβρωσης. Καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση του αναστολέα, τα καθοδικά σημεία απενεργοποιούνται και μετά από μια συγκεκριμένη τιμή της συγκέντρωσης, το διαθέσιμο καθοδικό δυναμικό δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες των ανοδικών σημείων. Έτσι, η συνολική διάβρωση ελαττώνεται στο ελάχιστο, το οποίο εξαρτάται κάθε φορά από τον αναστολέα που χρησιμοποιούμε και από τις ιδιότητες του συστήματος. Αν ελαττώσουμε τη συγκέντρωση του αναστολέα, ο συνολικός ρυθμός διάβρωσης μετά από έναν μικρό χρόνο προσαρμογής στον οποίο ενεργοποιούνται και πάλι τα καθοδικά σημεία, ακολουθεί αντίστροφη πορεία και αρχίζει και πάλι να ελαττώνεται. Η ενεργότητα των κυψελίδων αέρα ακολουθεί την ίδια πορεία με τα καθοδικά σημεία του μετάλλου. (Zacharopoulou et al, 2013)

Ως καθοδικοί αναστολείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ενώσεις: Υδροξείδιο του ψευδαργύρου, Φωσφορικός ψευδάργυρος, Ανθρακικό ασβέστιο, Φωσφορικό ασβέστιο.

Όμως, οι πιο πολλοί καθοδικοί αναστολείς, όπως οι αμίνες και τα φωσφορικά, έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη επιβράδυνση της πήξης του σκυροδέματος

➤ **Οργανικοί ή μικτοί αναστολείς διάβρωσης :**

Οι οργανικοί αναστολείς ονομάζονται επίσης και προσροφητικοί αναστολείς διάβρωσης και η δράση τους συνδυάζει ανοδική και καθοδική προστασία. Οι μικτοί αναστολείς διάβρωσης θεωρείται ότι παρέχουν την καλύτερη προστασία

από τη διάβρωση. Είναι συνήθως οργανικές ενώσεις με πολικές ομάδες (αμίνες, οργανικά οξέα). Δρουν και στα δυο τμήματα της ηλεκτροχημικής αντίδρασης μειώνοντας τόσο την ανοδική όσο και την καθοδική διεργασία, είτε προσροφημένοι στην μεταλλική επιφάνεια καλύπτοντάς τη με ένα προστατευτικό στρώμα είτε, στην περίπτωση της προστασίας του οπλισμού στο σκυρόδεμα, μεταβάλλοντας την επιφάνεια του σκυροδέματος σε υδρόφοβη εξασφαλίζοντας έτσι μείωση του εισερχόμενου οξυγόνου.

Με βάση τον τρόπο που προσροφούνται στην προστατευόμενη επιφάνεια, ταξινομούνται σε: αναστολείς φυσικής και χημικής ρόφησης. Οι αναστολείς φυσικής ρόφησης δρουν καλύπτοντας τα ενεργά κέντρα στην επιφάνεια του μετάλλου στα οποία οφείλεται η ύπαρξη γαλβανικών στοιχείων που είναι υπεύθυνα για τη διάβρωση. Ονομάζονται επίσης και πρωτογενείς, γιατί το στρώμα ρόφησης περιέχει μόνο τα μόρια του αναστολέα. Οι αναστολείς χημικής ρόφησης δρουν με επιφανειακή χημική αντίδραση στην επιφάνεια του μετάλλου την οποία καλύπτουν με το προϊόν της αντίδρασης. Ονομάζονται επίσης και δευτερογενείς, γιατί το στρώμα ρόφησης περιέχει το προϊόν της αντίδρασης μεταξύ του μετάλλου και του αναστολέα.

#### ➤ **Ανόργανοι αναστολείς**

Ως ανόργανοι αναστολείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλατα μερικών μετάλλων τα οποία συνήθως δημιουργούν στρώματα στην επιφάνεια του μετάλλου, αλλά μπορεί και να αντιδράσουν με το μέταλλο, όπως: χρωμικά άλατα, άλατα ψευδαργύρου, σύμπλοκα μολυβδενίου, φωσφορικά άλατα, νιτρικά άλατα και σύμπλοκα θεικών αλάτων

#### ➤ **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, δρουν 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 κράματά του. (Παναγιωτίδης Θ., 2011)

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.

Ένας αναστολέας χαρακτηρίζεται ασφαλής όταν με την προσθήκη του ελαττώνεται ομοιόμορφα η διάβρωση στην ανοδική επιφάνεια. Ο χαρακτηρισμός ισχύει για καθοδικούς και όχι για ανοδικούς αναστολείς. Αν χρησιμοποιηθεί μικρότερη συγκέντρωση καθοδικού αναστολέα θα επικαλυφθεί μόνο ένα μέρος της καθοδικής επιφάνειας και ο ρυθμός διάβρωσης θα μειωθεί. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα διάβρωσης θα μειωθεί και θα λάβει χώρα μικρότερη διάλυση στην άνοδο. Όταν η συγκέντρωση του ανοδικού αναστολέα είναι ανεπαρκής να καλύψει όλη την άνοδο, τότε η διάλυση εντοπίζεται στην εκτεθειμένη περιοχή και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κηλιδωματική διάβρωση. Για να αποφύγουμε την πιθανότητα αύξησης της διάβρωσης, οι αναστολείς πρέπει να προστίθενται σε περίσσεια.

Οι ιδιότητες ενός αναστολέα διάβρωσης που έχει επιλεγεί 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 είναι αποτελεσματικός στο pH και στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.
- Θα πρέπει να είναι συμβατός με το προοριζόμενο σύστημα προκειμένου να μην έχει ανεπιθύμητες παρενέργειες.
- Θα πρέπει να είναι ισχυρός δέκτης ή δότης ηλεκτρονίων ή και τα δύο ταυτόχρονα

- Θα πρέπει να προκαλεί πόλωση των αντίστοιχων ηλεκτροδίων σε σχετικά μικρό ρυθμό ροής ηλεκτρικού ρεύματος
- 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.

Οι αναστολές διάβρωσης που χρησιμοποιούνται στην πράξη περιέχουν περισσότερα του ενός δραστικά συστατικά ενώ υπάρχουν περιορισμοί ως προς την συγκέντρωσή τους λόγω του ότι πολλοί από αυτούς είναι τοξικοί. Ο βαθμός προστασίας,  $Z$ , που παρέχει ένας αναστολέας διάβρωσης δίνεται από τον τύπο:

$$Z\% = \frac{W_1 - W_2}{W_3} \quad (5.1)$$

όπου:  $Z\%$  = ο % βαθμός προστασίας που παρέχει ο αναστολέας ,  
 $W_1$ = ο ρυθμός μείωσης του πάχους σε mm/έτος  
 $W_2$ =ο ρυθμός μείωσης του πάχους χωρίς αναστολέα, σε mm/έτος  
 $W_3$ = ο ρυθμός μείωσης του πάχους με αναστολέα, σε mm/έτος

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

διδεισδυτικών 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 ρολλό 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.

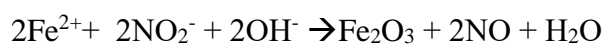
Αρχικά η χρήση των αναστολέων διάβρωσης ήταν η προσθήκη του αναστολέα ως πρόσθετο κατά την παραγωγή του σκυροδέματος. Σαν αναστολείς διάβρωσης είχαν προταθεί τα: νιτρώδες νάτριο ( $\text{NaNO}_2$ ), νιτρώδες κάλιο, χρωμικό κάλιο, βενζοϊκό νάτριο, εστέρες νατρίου κ.α.. Η χρήση των αναστολέων αυτών έδωσε θετικά αποτελέσματα όσον αφορά τη διάβρωση του οπλισμού και συγκεκριμένα το νιτρώδες νάτριο είχε τα καλύτερα αποτελέσματα. Ταυτόχρονα όμως παρουσίαζαν το πρόβλημα της μείωσης της θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος κατά 20-40%. Ακόμα το νιτρώδες νάτριο και το νιτρώδες κάλιο οδήγησαν σε αύξηση της πιθανότητας της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης, όταν το σκυρόδεμα περιέχει αδρανή ευαίσθητα σε αλκαλοπυριτική αντίδραση.

Η χρησιμοποίηση όμως του νιτρώδους ασβεστίου στη θέση του νιτρώδους νατρίου έδωσε για πρώτη φορά ταυτόχρονα αυξημένη αντοχή και αύξηση της αντίστασης τόσο στο ενανθρακωμένο σκυρόδεμα όσο και σε αυτό με χλωριόντα.

Ως τρόπος δράσης του νιτρώδες ασβεστίου ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) αναφέρεται η δημιουργία και συντήρηση ενός ανθεκτικού λεπτού παθητικού στρώματος στον χάλυβα οπλισμού, ακόμη και υπό συνθήκες παρουσίας χλωριόντων με συγκέντρωση πολύ υψηλότερη από την κρίσιμη για τη διάβρωση του χάλυβα ( $0,9 \text{ Kg/m}^3$ ).

Το  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$  αντιδρά με τα παραγόμενα προϊόντα των αντιδράσεων της ανοδικής περιοχής και χαρακτηρίζεται ανοδικός αναστολέας.

Η χημική αντίδραση του μηχανισμού προστασίας θεωρείται ότι είναι η :



Έτσι το  $(\text{NO}_2)^-$  ανταγωνίζεται τα χλωριόντα δεσμεύοντας τα ιόντα  $\text{Fe}^{2+}$  σχηματίζοντας σταθερό φιλμ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Άλλοι ερευνητές θεωρούν ότι η προστασία οφείλεται στο σχηματισμό κρυσταλλικού  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  στην περιοχή του οπλισμού. (Ρούτουλας Α., 2010)

Το νιτρώδες ασβέστιο έχει χρησιμοποιηθεί στο σκυρόδεμα στην Ευρώπη και στις Η.Π.Α για μακροχρόνιο διάστημα. Έρευνες απέδειξαν ότι:

- προστατεύει τον χάλυβα από την διαβρωτική δράση των χλωριόντων
- συμβάλει στην αύξηση της αποδοτικότητάς του με βελτίωση της ποιότητας του σκυροδέματος
- βελτιώνει την θλιπτική αντοχή
- ελαττώνει τον ρυθμό διάβρωσης όταν αυτή αρχίζει
- λειτουργεί και στην περίπτωση ύπαρξης ρωγμών

Οι παράγοντες που επηρεάζονται από τους αναστολείς διάβρωσης είναι:

- Ο ρυθμός εισόδου των χλωριόντων από το διαβρωτικό περιβάλλον
- Ο βαθμός με τον οποίο τα χλωριόντα χημικά ενσωματώνονται ή παγιδεύονται φυσικά στην επικάλυψη του σκυροδέματος
- Η περιεκτικότητα των χλωριόντων που ο οπλισμός μπορεί να ανεχθεί χωρίς να διαρρηχθεί το υπάρχον παθητικό φιλμ
- Ο ρυθμός εισόδου του διαλυμένου οξυγόνου που στηρίζει την καθοδική αντίδραση
- Η ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος και

- Η χημική σύσταση του ηλεκτρολύτη (όπως το διάλυμα των πόρων στο τσιμέντο).

Γενικά ο βαθμός προστασίας ενός αναστολέα διάβρωσης εξαρτάται από την συγκέντρωση του σε σχέση με την συγκέντρωση των χλωριόντων, π.χ. για το νιτρώδες ασβέστιο πρέπει να ικανοποιείται η σχέση  $\text{NO}_2^- / \text{Cl}^- \geq 1/6$ . Επομένως ο ρυθμός εισόδου των χλωριόντων και ο ρυθμός απόπλυσης του αναστολέα διάβρωσης καθορίζουν το χρόνο προστασίας.

#### **5.2.4. Χρήση ειδικών χαλύβων**

Όταν το οπλισμένο σκυρόδεμα βρίσκεται σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον μπορεί να γίνει χρήση ειδικών χαλύβων, π.χ. χάλυβας με επικαλύψεις ή γαλβανισμένος χάλυβας.

#### **Επιψευδαργυρωμένος ή Γαλβανισμένος Χάλυβας**

Η χρήση επιψευδαργυρωμένου χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα αυξάνει την προστασία του χάλυβα από ατμοσφαιρική διάβρωση και από διάβρωση από διάφορα φυσικά είδη νερού.

Η επιψευδαργύρωση του δομικού χάλυβα πραγματοποιείται με εμβάπτιση σε λουτρό τηγμένου ψευδαργύρου στους 450°C για ένα χρονικό διάστημα μερικών λεπτών.

Το πάχος της επιψευδαργύρωσης συνίσταται να είναι μεταξύ 150-200μm, και εξαρτάται από:

- Τη χημική σύσταση του χάλυβα.
- Τη διάμετρο της ράβδου του σιδήρου.
- Την κατάσταση της επιφάνειας του χάλυβα.
- Τις συνθήκες της επιψευδαργύρωσης (χρόνος εμβάπτισης, θερμοκρασία λουτρού).

Ο χάλυβας αρχικά καλύπτεται από ένα κράμα Fe-Zn και πάνω στο κράμα αυτό επικάθεται το στρώμα του ψευδαργύρου. Αν και τα μεγάλα πάχους επιστρώματα από άποψη διάβρωσης είναι επιθυμητά, έχουν όμως αρνητική επίδραση στη συνάφεια

Fe-Zn. Για το λόγο αυτό δεν πρέπει το πάχος της επιψευδαργύρωσης να είναι μεγαλύτερο από 200μm.

Ο ψευδάργυρος διαβρώνεται σε pH μεγαλύτερο από 12. Το σκυρόδεμα στην αρχική περίοδο των δύο χρόνων καταναλώνει στρώμα ψευδαργύρου γύρω στα 10μm. Στη συνέχεια ο ψευδάργυρος μεταπίπτει στη παθητική κατάσταση. Όταν με τη πάροδο του χρόνου το σκυρόδεμα αρχίσει να ενανθρακώνεται, τότε από κάποια χρονική στιγμή και μετά αρχίζει η διάβρωση του ψευδαργύρου. Όσο χρόνο διαβρώνεται ο ψευδάργυρος, ο χάλυβας δεν διαβρώνεται. Η διάβρωση του χάλυβα εμφανίζεται μετά τη κατανάλωση όλου του ψευδαργύρου. (Μπατής Γ., 2006)

Σε περίπτωση που η διάβρωση οφείλεται κατά κύριο λόγο στην είσοδο χλωριόντων στο σκυρόδεμα από το περιβάλλον, τότε ο ψευδάργυρος προστατεύει το χάλυβα μέχρι η συγκέντρωση των χλωριόντων να υπερβεί ένα όριο. Το όριο των χλωριόντων για την ενεργοποίηση της διάβρωσης του ψευδαργύρου είναι 1.5g Cl<sup>-</sup> ανά 100g τσιμέντου (Portland). Πάνω από το όριο αυτό η διάβρωση του ψευδαργύρου είναι ταχύτερη και δεν μπορεί παρά μόνο προσωρινά να προστατεύσει τη διάβρωση του χάλυβα.

Η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και στρώματος ψευδαργύρου είναι καλή εκτός όταν λόγω διάβρωσης του ψευδαργύρου υπάρχει έκλυση υδρογόνου οπότε η συνάφεια μειώνεται. Η προσθήκη CrO<sub>4</sub><sup>2n</sup> μπορεί να βελτιώσει τη συνάφεια στη περίπτωση αυτή.

Αν η θερμοκρασία ανέβει στους 60°C επέρχεται αντιστροφή του δυναμικού του γαλβανικού στοιχείου Fe-Zn και ο ψευδάργυρος δεν προστατεύει πλέον το χάλυβα. Η θερμοκρασία του σκυροδέματος αυξάνεται με την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Έχει διαπιστωθεί ότι σε θερμοκρασία 60°C δεν εμφανίζεται το φαινόμενο στον οπλισμό εφόσον το πάχος επικάλυψης είναι μεγαλύτερο από 3-4 cm.

Σε περίπτωση χρησιμοποίησης σε μια κατασκευή ταυτόχρονα επιψευδαργυρωμένου και μη επιψευδαργυρωμένου χάλυβα υπάρχει η δυνατότητα ανάπτυξης μακροστοιχείου μεταξύ των δύο ειδών χάλυβα. Στην περίπτωση επαφής δύο μετάλλων η ταχύτητα διάβρωσης εξαρτάται από:

- Τη διαφορά δυναμικού των δύο μετάλλων.
- Την αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη.
- Την παρουσία ενός οξειδωτικού μέσου.

Εφόσον οι παραπάνω προϋποθέσεις υπάρχουν τότε ο ψευδάργυρος διαλύεται προστατεύοντας τον ακάλυπτο οπλισμό σαν θυσιαζόμενη άνοδος μέχρι της πλήρους διάλυσης του.

### **Χάλυβας Με Επικάλυψη Εποξειδικών Ρητινών ή PVC**

Η χρησιμοποίηση διαφόρων ειδών ρητινών για την προστασία του χάλυβα από τη διάβρωση είναι μια συνηθισμένη μέθοδος προστασίας. Στην περίπτωση του χάλυβα στο σκυρόδεμα η μέθοδος των επικαλύψεων με οργανικά στρώματα που εφαρμόζεται στον υπό προστασία χάλυβα πρέπει να αντέχει στο υψηλό pH του σκυροδέματος και να έχει καλή συνάφεια με το σκυρόδεμα και τον δομικό χάλυβα. Τις απαιτήσεις αυτές πληρούν οι εποξειδικές ρητίνες. Για την εφαρμογή της εποξειδικής επικάλυψης στο δομικό χάλυβα η επιφάνειά του πρέπει να έχει επιμελώς καθαρισθεί από λάδια, λίπη, οξείδια ή άλλα προϊόντα διάβρωσης. Συνήθως ο καθαρισμός επιτυγχάνεται με αμμοβολή. Στην συνέχεια επιτυγχάνεται η επικάλυψη του χάλυβα με εποξειδικό επίστρωμα με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- Ηλεκτροστατική βαφή με χρώμα σε σκόνη και θέρμανση του χάλυβα στους 200-230°C.
- Θέρμανση του χάλυβα στους 200-250°C και στην συνέχεια εμβάπτιση σε ρευστοστερεά κλίνη χρώματος σε σκόνη.
- Επικάλυψη με ηλεκτροφορητική βαφή σε υδατικό διάλυμα χρώματος και στη συνέχεια θέρμανση.

Ενώ η συνάφεια μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος υφίσταται μείωση από 15-30%, η αντοχή σε διάβρωση αυξάνεται σημαντικά. Εάν όμως υπάρχει ρήξη στην συνέχεια της εποξειδικής επικάλυψης τότε υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης ιδιαίτερα όταν υπάρχει ηλεκτρική επαφή μεταξύ καλυμμένου και ακάλυπτου οπλισμού. Η διάβρωση του ακάλυπτου τμήματος στο σημείο ρήξης του εποξειδικού χρώματος εξαρτάται από την αγωγιμότητα του σκυροδέματος και τον λόγο επιφάνειας ανόδου / καθόδου, καθώς και από την κατάσταση του ακάλυπτου οπλισμού. Εξαιτίας της μικρής επιφάνειας του

εποξειδικού επιστρώματος που έχει αποκαλυφθεί από τη ρήξη και της μεγάλης επιφάνειας του ακάλυπτου οπλισμού, η ταχύτητα διάβρωσης στην περιοχή της ρήξης του εποξειδικού επιστρώματος είναι μεγάλη. (Μπατής Γ., 2006)

Οι εποξειδικές ρητίνες παρουσιάζουν καλή πρόσφυση στο χάλυβα και έχουν μεγάλη ανθεκτικότητα σε αλκαλικό περιβάλλον, όπως αυτό του σκυροδέματος. Όμως ορισμένοι ερευνητές αναφέρουν ότι οι επιχρισμένοι με ρητίνες χάλυβες παρουσιάζουν μειωμένη συνάφεια με το σκυρόδεμα. (Ρούτουλας Α., 2010)

Η έκθεση του εποξειδικού επιστρώματος σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 200° C καθιστά το εποξειδικό επίστρωμα μαλακό και εύκολα διαπερατό σε χλωριόντα.

Το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC) έχει μικρή διαπερατότητα από νερό, αέρια και ηλεκτρολύτες, παρουσιάζει δε μεγάλη ανθεκτικότητα σε χημική προσβολή από οξέα και βάσεις. Οι επικαλύψεις από PVC έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα με τις εποξειδικές ρητίνες.

### **Ανοξειδωτοι Χάλυβες**

Στην θέση του δομικού χάλυβα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ανοξειδωτος χάλυβας. Αυτό συμβαίνει εφόσον ο ανοξειδωτος χάλυβας έχει υψηλότερη αντοχή έναντι στη διάβρωση, σε σχέση με τον κοινό χάλυβα, και επιπλέον καλύπτει τις μηχανικές απαιτήσεις για τον δομικό χάλυβα.

Με τον όρο ανοξειδωτοι χάλυβες αναφερόμαστε σε μια ειδική κατηγορία χαλύβων, κατασκευασμένων από κράματα που περιέχουν στοιχεία όπως το χρώμιο, το νικέλιο, το μολυβδαίνιο, το τιτάνιο κ.α. Το χρώμιο είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία, στην επιφάνεια των ανοξειδωτων ράβδων, ενός πολύ λεπτού στρώματος οξειδίου του χρωμίου (παθητικό) με εξαιρετική πρόσφυση σε αυτήν, το οποίο λειτουργεί ως ασπίδα προστασίας από τη διάβρωση. Το παθητικό αυτό στρώμα έχει την ικανότητα να ξαναδημιουργείται σε περίπτωση τοπικών αφαιρέσεων του υλικού.

Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ανοξειδωτοι χάλυβες χωρίζονται σε 60 και πλέον κατηγορίες ποιότητας, ενώ ανάλογα με τη μικρογραφική τους δομή

κατατάσσονται σε τέσσερις τύπους (σε κάθε περίπτωση περιέχουν ελάχιστο άνθρακα).

- Μαρτενσιτικοί
- Φερριτικοί
- Ωστενιτικοί
- Φερριτικοί-Ωστενιτικοί (Duplex)

Οι τρεις τελευταίοι είναι και οι αυτοί που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, με τους ωστενιτικούς να είναι οι πιο δημοφιλείς. Χρησιμοποιούνται με τη μορφή ευθύγραμμων ράβδων με επιφανειακές ραβδώσεις, των 12 ή 14 μέτρων και διατίθενται σε διαμέτρους από 6 έως 40 mm (εύρος διαμέτρων αντίστοιχο με το διατιθέμενο για ράβδους συμβατικού χάλυβα). (Μαυροειδής Π. κ.α., 2006)

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες είναι πολύ καλό και μόνιμο αντισεισμικό μέτρο εξασφαλίζοντας μεγάλη διάρκεια ζωής στις κατασκευές.

Εξαιτίας του υψηλού τους κόστους συνιστώνται σε μεγάλης διάρκειας ζωής κατασκευές (π.χ. γέφυρες) και σε περιβάλλοντα όπου η χρήση κοινού χάλυβα μακροχρόνια θα κοστίσει περισσότερο λόγω συντήρησης και επισκευής.

(Δέδε Μ. και Δημόγλου Ε., 2007)

#### **5.2.5. Χρήση οροκτών πρόσθετων**

Κατά την διάρκεια των τελευταίων τριάντα ετών οι απαιτήσεις για τις κατασκευές για το σκυρόδεμα αυξήθηκαν. Νέες τεχνολογίες εφαρμόζονται στην δόμηση και απαιτούν μεταβολές των ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Ταυτόχρονα όμως και άλλοι λόγοι, όπως η συμπίεση του κόστους, η αυξανόμενη ρύπανση του περιβάλλοντος με επακόλουθο την αύξηση της διαβρωτικής επίδρασης στις κατασκευές (όξινη βροχή), οι απαιτήσεις για αυξημένα φορτία απαιτούν την μεταβολή των ιδιοτήτων του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος. Για να ανταποκριθεί το σκυρόδεμα στις νέες απαιτήσεις εμφανίζεται ένας μεγάλος αριθμός χημικών υλικών που προστίθενται κατά την ανάμιξη του σκυροδέματος και μεταβάλλουν σημαντικά τις ιδιότητές του.

Τα υλικά αυτά ονομάζονται πρόσθετα. Χωρίς την χρησιμοποίηση των προσθέτων δεν θα ήταν δυνατή η κατασκευή σημαντικών έργων από σκυρόδεμα.

Τα ορυκτά πρόσθετα αναστολής διάβρωσης στο σκυρόδεμα έχουν σαν στόχο τον περιορισμό της διάβρωσης του οπλισμού μέσω της μείωσης του πορώδους του συνεκτικού υλικού (τσιμεντοκονίας) του σκυροδέματος. Τέτοια υλικά είναι τα ποζολανικά που συνίσταται από αργιλοπυριτικές ενώσεις. Τα υλικά αυτά από μόνα τους δεν έχουν υδραυλικές ιδιότητες, αλλά με λεπτό τους διαμερισμό και παρουσία νερού παρουσιάζουν υδραυλικές ιδιότητες, λόγω της αντίδρασης τους με την υδράσβεστο.

Τα ποζολανικά υλικά είναι γνωστά από αρχαιοτάτων χρόνων και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την προέλευση τους:

- Φυσικές ποζολάνες, όπως Μηλαϊκή γη, προέρχονται από ηφαιστιογενείς πηγές (πυροκλαστικά υλικά).
- Τεχνητές ποζολάνες, αργιλοπυριτικά υλικά που προέρχονται από κάποια θερμική κατεργασία σαν απόβλητα. Τέτοια υλικά είναι η σκωρία υψικαμίνων (BFS) και η φαρίνα ηλεκτροφίλτρων παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου.

### **Ιπτάμενη Τέφρα**

Η Ιπτάμενη Τέφρα (I.T.) είναι ένα υλικό που παράγεται κατά την καύση κονιοποιημένων στερεών καυσίμων σε μεγάλες ατμοπαραγωγικές μονάδες. Οι Ιπτάμενες Τέφρες έχουν από μόνες τους υδραυλικές ιδιότητες αλλά συνήθως αυτές είναι ασθενείς.

Η σύσταση και η λεπτότητα της I.T. δεν είναι πάντα σταθερές και επομένως πρέπει να ελέγχονται. Για την ποιότητα του σκυροδέματος που πρόκειται να παραχθεί μεγάλη σημασία έχουν :

- Η ειδική επιφάνεια της I.T. (πρέπει να είναι  $> 2500 \text{ cm}^2/\text{g}$ ).
- Η περιεκτικότητα σε ενεργά συστατικά  $\text{SiO}_2$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
- Η περιεκτικότητα σε επιβλαβή συστατικά ( $\text{C} < 3\%$  και  $\text{SO}_2$ ).
- Η περιεκτικότητα σε ελεύθερη άσβεστο.

Η χρήση της Ιπτάμενης Τέφρας σαν πρόσθετο στο τσιμέντο, έχει τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Βελτιώνει την εργασιμότητα, αυξάνει την πλαστικότητα και την αντλησιμότητα του παραγομένου σκυροδέματος.
- Βελτιώνει την εμφάνιση της επιφάνειας του σκυροδέματος μετά το ξεκαλούπωμα.
- Έχει την ικανότητα να δεσμεύει τα χλωριόντα και έτσι προστατεύει τον σιδηροπλισμό από την διάβρωση.
- Λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας σε ελεύθερα άσβεστο αυξάνει την ταχύτητα της ενανθράκωσης.

### **Σκωρία υψικαμίνων**

Η σκωρία υψικαμίνων (slag, Schlacke) είναι υλικό μη μεταλλικό, το οποίο αποτελείται από πυριτικά και αργυλοπυριτικά άλατα του ασβεστίου. Οι σκωρίες έχουν από μόνες τους υδραυλικές ιδιότητες. Όταν όμως ενυδατώνονται μόνες τους, χωρίς την παρουσία του τσιμέντου πόρτλαντ, το ποσό του υδραυλικού υλικού που σχηματίζεται είναι μικρό και ο ρυθμός σχηματισμού του ανεπαρκής. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται πάντα σε μίγματα με τσιμέντο πόρτλαντ.

Η σκωρία είναι ένα παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας του χάλυβα. Η σκωρία δεν είναι μεταλλικό προϊόν και αποτελείται κατά βάση από πυριτικά και αργυλοπυριτικά άλατα του ασβεστίου.

Λόγω των υδραυλικών ιδιοτήτων της σκωρίας, σωματίδια κοκκομετρίας μικρότερης από τα 10μm συνεισφέρουν στις πρώιμες αντοχές, ενώ σωματίδια μεγαλύτερα από 10μm και μικρότερα από 45μm συνεισφέρουν στις τελικές αντοχές. Σωματίδια κοκκομετρίας μεγαλύτερης των 45μm είναι δύσκολο να ενυδατωθούν. Η σκωρία είναι υλικό κοκκομετρίας μικρότερης των 45μm. Παρασύρεται από το ρεύμα των καυσαερίων και συλλέγεται σε ειδικές εγκαταστάσεις αποκονίωσης (με μηχανικά ή ηλεκτροστατικά φίλτρα).

Η σκωρία όταν χρησιμοποιείται ως πρόσθετο στο τσιμέντο πόρτλαντ προσδίδει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Υψηλή τελική αντοχή, με χαμηλές πρώιμες αντοχές
- Υψηλή αναλογία σε κάμψη ως προς την αντοχή σε θλίψη.
- Αντίσταση στα ιόντα των θεικών και χλωρίου
- Χαμηλή θερμοκρασία ενυδάτωσης
- Μείωση της συρρίκνωσης με επακόλουθα την μείωση πορώδους και την διαπερατότητα του σκυροδέματος.

Τα τσιμέντα σκωρίας έχουν επίσης καλή εργασιμότητα και χαμηλή απαίτηση σε νερό.

Στην ενυδάτωση της σκωρίας σημαντικό ρόλο παίζει η επίδραση της θερμοκρασίας. Η ενυδάτωση επιτυγχάνεται στις υψηλές θερμοκρασίες και επιβραδύνεται στις χαμηλότερες, σε σχέση με την ενυδάτωση του τσιμέντου πόρτλαντ.

#### **Διογκωτικά ή μειωτικά της συρρίκνωσης του σκυροδέματος**

Τα διογκωτικά ή μειωτικά της συρρίκνωσης του σκυροδέματος (shrinkage reducers) είναι πρόσθετα που έχουν σαν σκοπό να μειώσουν την συρρίκνωση ή την συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος. Τα πρόσθετα αυτά περιέχουν ουσίες οι οποίες όταν έρθουν σε επαφή με το νερό δημιουργούν προϊόντα που διογκώνονται και έτσι αντισταθμίζουν την συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος. Ακόμη υπάρχουν διογκωτικά τα οποία μεταβάλλουν την επιφανειακή τάση του νερού παρεμποδίζοντας την συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος.

#### **Ρυθμιστές ιξώδους**

Οι ρυθμιστές ιξώδους (viscosity modifying admixtures) είναι ουσίες που μπορούν να μεταβάλλουν το ιξώδες του υγρού σκυροδέματος. Οι ουσίες αυτές είναι υδατικά διαλύματα συμπολυμερών με υψηλό μοριακό βάρος. Ρυθμίζουν το ιξώδες του σκυροδέματος ώστε να επιτυγχάνονται καταρχήν αντικρουόμενες ιδιότητες όπως υψηλή ρευστότητα, μεγάλη ταχύτητα ροής και αντίσταση στον διαχωρισμό. Οι ιδιότητες αυτές είναι απαραίτητες για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα έχει την ιδιότητα να καταλαμβάνει τον χώρο που του διατίθεται στα καλούπια χωρίς να απαιτηθεί δόνηση. Αυτό επιτυγχάνεται με τον

κατάλληλο σχεδιασμό του μίγματος τσιμέντου- αδρανών με χρήση κατάλληλων λεπτοκόκκων υλικών, υπερπλαστικοποιητών και ρυθμιστών ιξώδους

Η χρήση των προσθέτων σκυροδέματος απαιτεί προσοχή τόσο όσον αφορά την χρησιμοποιούμενη ποσότητα και όσον αφορά την ανάμιξή τους. Επομένως όταν τα πρόσθετα σκυροδέματος παρέχονται σε δοχεία πρέπει να σημαίνονται με ευκρίνεια με τις σχετικές πληροφορίες. Όταν το υλικό παρέχεται χύμα, οι ίδιες πληροφορίες πρέπει να δίδονται γραπτά κατά το χρόνο της παράδοσης.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

## 6. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Αντικείμενο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι η πειραματική μελέτη και διερεύνηση των οργανικών επικαλύψεων καθώς και των αναστολέων διάβρωσης είτε ως ψεκαζόμενων είτε ως πρόσθετων, για την προστασία του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος.

Η πειραματική μελέτη της παρούσας διδακτορικής διατριβής κινήθηκε σε δύο κατευθύνσεις.

Η πρώτη κατεύθυνση αναφέρεται στη χρήση μια οργανικής επικάλυψης η οποία περιέχει πτητικούς αναστολείς διάβρωσης και μπορεί να εφαρμοστεί σαν πρώτο χέρι στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Ακόμα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την επικάλυψη και των οπλισμών. Πάνω στην επικάλυψη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια οργανική επικάλυψη η οποία μπορεί να παρεμποδίσει τη μεταφορά του αναστολέα διάβρωσης προς το περιβάλλον. Η χρήση μιας τέτοιας οργανικής επικάλυψης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αντί του συνήθους ψεκασμού με αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Το πλεονέκτημα της επικάλυψης με πτητικούς αναστολείς διάβρωσης είναι ότι μειώνει το χρόνο και το κόστος της επιδιόρθωσης κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος.

Στη δεύτερη κατεύθυνση εξετάστηκε η χρήση του Νιτρικού Ασβεστίου. Είναι γνωστό ότι το νιτρώδες ασβέστιο έχει χρησιμοποιηθεί σαν αναστολέας διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα. Η χρήση του νιτρώδες ασβεστίου έχει ένα παρελθόν 60 ετών με πολύ καλά αποτελέσματα. Μειονέκτημά του είναι η σχετικά υψηλή τιμή του. Διάφοροι ερευνητές έχουν προτείνει τη χρήση νιτρικού ασβεστίου το οποίο κατά τις συνθήκες πήξης του σκυροδέματος μετατρέπεται σε νιτρώδες ασβέστιο. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάζεται η δυνατότητα προστασίας που μπορεί να παρέχει το νιτρικό ασβέστιο είτε ως πρόσμικτος είτε ως ψεκαζόμενος αναστολέα διάβρωσης.

## 7. ΥΛΙΚΑ

### 7.1. Χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος

Για την κατασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε χάλυβας S500s Tempcore διαμέτρου 10mm x 10 mm.

Οι χάλυβες της κατηγορίας αυτής διαθέτουν πλάγιες νευρώσεις, που εξασφαλίζουν υψηλή συνάφεια με το σκυρόδεμα, χαρακτηρίζονται ως συγκολλησιμοι χάλυβες και είναι προϊόντα θερμής έλασης. Η μέθοδος Tempcore συνίσταται σε μια διαδικασία κατά την οποία, αμέσως μετά τη θερμή έλαση (1000 ως 1050 °C) πραγματοποιείται ταχεία, έντονη ψύξη, η οποία προκαλεί μια “βαφή” του μετάλλου (quenching) σε βάθος 1.5 ως 2.0 mm, ενώ το εσωτερικό της διατομής παραμένει διάπυρο κατά την κατεργασία. Αποτέλεσμα αυτής της θερμικής κατεργασίας είναι η παραγωγή ενός όλκιμου προϊόντος λόγω της ύπαρξης του μαλακού πυρήνα (εσωτερικό της ράβδου) και της σκληρής εξωτερικής στοιβάδας που προσδίδει στο υλικό την υψηλή αντοχή. Έτσι δημιουργείται στην επιφάνεια του χάλυβα σκληρή μαρτενσιτική δομή, ενώ ο πυρήνας του χάλυβα παραμένει οστενιτικός. (KTX 2000)

Η χημική σύσταση των χαλύβδινων ράβδων τύπου S500s Tempcore (πίνακας 7.1) πληρεί τις προϋποθέσεις του προτύπου ΕΛΟΤ-971 για συγκολλησίμους χάλυβες και συγχρόνως του ισοδύναμου σε άνθρακα.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των χαλύβδινων ράβδων τύπου S500s Tempcore, σύμφωνα με τον ΚΤΧ και τα πρότυπα ΕΛΟΤ 959 και ΕΛΟΤ 971, δίνονται στον πίνακα 7.2.

**Πίνακας 7.1. Χημική σύσταση των χαλύβδινων ράβδων τύπου S500s Tempcore**

| Στοιχείο  | % κ.β. |
|-----------|--------|
| <b>C</b>  | 0,217  |
| <b>Mn</b> | 1,04   |
| <b>S</b>  | 0,047  |
| <b>P</b>  | 0,021  |
| <b>Si</b> | 0,151  |
| <b>C</b>  | 0,113  |
| <b>V</b>  | 0,002  |
| <b>Mo</b> | 0,021  |
| <b>Ni</b> | 0,097  |
| <b>Cu</b> | 0,41   |
| <b>N</b>  | 0,008  |

**Πίνακας 7.2. Μηχανικά χαρακτηριστικά των χαλύβδινων ράβδων τύπου S500s**

| Μέγεθος  | S500s       |
|--|-------------|
| <b>Όριο διαρροής <math>f_y</math> (MPa)</b>                                      | 500         |
| <b>Εφελκυστική αντοχή <math>f_t</math>(MPa)</b>                                  | 550         |
| <b>Λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής <math>f_t/f_y</math></b> | $\geq 1,05$ |

Η χημική σύσταση των χαλύβδινων ράβδων τύπου S500s Tempcore, διαμέτρου 1 cm και μήκους 10 cm, που χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση των τσιμεντοκονιαμάτων των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν κατά την πειραματική διαδικασία, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 7.3.:

**Πίνακας 7.3. Χημική σύσταση χάλυβα S500s Tempcore**

| <b>C</b>    | <b>Mn</b> | <b>S</b> | <b>P</b> | <b>Si</b> | <b>Ni</b> | <b>Cr</b> | <b>Cu</b> | <b>V</b> | <b>Mo</b> |
|-------------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| <b>0,18</b> | 0,99      | 0,047    | 0,023    | 0,150     | 0,09      | 0,09      | 0,21      | 0,002    | 0,021     |

Οι χαλύβδινοι οπλισμοί πριν τον εγκλεισμό τους στα δοκίμια τσιμεντοκονίας καθαρίστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ISO/DIS 8407.3, ξεπλύθηκαν με νερό βρύσης, με απιονισμένο νερό και στη συνέχεια έγινε εμβάπτιση σε ακετόνη. Τέλος οι οπλισμοί προτού εισαχθούν στο τσιμεντοκονίαμα, προζυγίστηκαν σε ψηφιακή ζυγαριά ακριβείας με ακρίβεια τετάρτου δεκαδικού ψηφίου 0,1mg, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός απώλειας μάζας λόγω διάβρωσής τους μετά τη λήξη του πειράματος.



Εικόνα 7.1 Εγκάρσια τομή ράβδου S500s Tempcore

## 7.2. Τσιμέντο

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των κυλινδρικών τσιμεντοκονιαμάτων ήταν τύπου Portland CEM I 42.5 N και για την κατασκευή των κυβικών δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland CEM II B-M (P-W-L) 42.5 N.

Οι χημικές συστάσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 7.4, ενώ οι ορυκτολογικές φάσεις των τσιμέντων, οι οποίες υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις εξισώσεις Bogue, φαίνονται στον Πίνακα 7.5.

Πίνακας 7.4. Χημική σύσταση τσιμέντου CEM I και CEM II B-M.

| Τύπος οξειδίου    | 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 | NaO  | SO <sub>3</sub> | Cl <sup>-</sup> | LOI   |
|-------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|------|-----------------|-----------------|-------|
| CEM I 42.5 N      | 19,50            | 4,80                           | 3,60                           | 61,50 | 3,40 | 0,69             | 0,22 | 2,60            | 0,01            | 3,50  |
| CEM II B-M 42.5 N | 18,60            | 4,10                           | 2,90                           | 60,50 | 2,00 | 0,66             | 0,34 | 3,60            | 0,05            | <8,50 |

**Πίνακας 7.5. Ορυκτολογική σύνθεση τσιμέντου CEM I και CEM II B-M.**

|                   | C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| CEM I 42.5 N      | 57,40            | 12,60            | 6,60             | 11,00             |
| CEM II B-M 42.5 N | 63,00            | 5,80             | 6,00             | 8,80              |

### 7.3. Αδρανή

Για την κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ασβεστολιθική άμμος λατομείου, η οποία πληρεί τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Στους πίνακες 7.6 και 7.7 φαίνεται η κοκκομετρική διαβάθμιση της άμμου κατά *EN 933-1* και η χημική της σύσταση αντίστοιχα.

**Πίνακας 7.6. Κοκκομετρική διαβάθμιση**

| Διάμετρος κόκκων  | % Σύσταση |
|-------------------|-----------|
| 4mm <             | 5,23      |
| 2mm < d < 4mm     | 24,13     |
| 1mm < d < 2mm     | 17,66     |
| 500μm < d < 1 mm  | 12,85     |
| 250μm < d < 500μm | 10,44     |
| d < 250μm         | 29,7      |

**Πίνακας 7.7. Χημική σύσταση άμμου**

| Οξείδια            | 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> | Cl <sup>-</sup> | LOI   |
|--------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------|
| <b>Ποσοστό (%)</b> | 1,22             | 0,45                           | 0,45                           | 57,80 | 0,45 | 0,04             | 0,22              | 2,60            | 0,01            | 39,54 |

### 7.4. Νερό

Το νερό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμίων όλων των πειραμάτων, προήλθε από το δίκτυο ύδρευσης του Ε.Μ.Π. Το νερό ύδρευσης της Πολυτεχνειούπολης προέρχεται από γεώτρηση και είναι σύμφωνο με τις απαιτήσεις του προτύπου *ΕΛΟΤ 345* και του ευρωπαϊκού προτύπου *DIN EN 1008*. Οι χημικές

αναλύσεις και οι φυσικοχημικές παράμετροι του νερού του Ε.Μ.Π (Οξενκιούν, Πετροπούλου, 2007) δίνονται στους πίνακες 7.8 και 7.9.

**Πίνακας 7.8. Χημική σύσταση νερού μίξης των κονιαμάτων/σκυροδεμάτων**

| Συγκέντρωση ιόντων (mg/l) |                 |                               |                              |                              |                |                 |                              |                              |                 |
|---------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|
|                           | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup> | Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup> | NH <sub>4</sub> |
| <b>Νερό ΕΜΠ</b>           | 63              | 28,2                          | 28                           | <0,02                        | 1,6            | 37,8            | 33,4                         | 98                           | <0,2            |

**Πίνακας 7.9. Φυσικοχημικές παράμετροι νερού ανάμιξης**

|                 | Σκληρότητα<br>CaCO <sub>3</sub> (°dH) | Αγωγιμότητα μS/cm | pH   |
|-----------------|---------------------------------------|-------------------|------|
| <b>Νερό ΕΜΠ</b> | 21,2                                  | 849               | 7,23 |

Δεδομένου ότι η ποσοστιαία αναλογία του νερού ανάμιξης είναι μικρή και συνεπώς και η περιεκτικότητα κάθε ξένης ουσίας είναι μικρή, γενικά υπάρχει μια ανοχή για την ποιότητα του νερού που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος.

### 7.5. Οργανική επικάλυψη και Αναστολείς διάβρωσης

Για την πρώτη κατηγορία δοκιμών που εξετάστηκαν (κυλινδρικά δοκίμια τσιμεντοκονιάματος) έγινε προσθήκη οργανικής επικάλυψης εποξεικής ρητίνης.

Η οργανική επικάλυψη που χρησιμοποιήθηκε είχε δύο επικαλυπτικά:

- Το πρώτο επικαλυπτικό (i) ήταν βερνίκι που περιείχε τον πτητικό αναστολέα διάβρωσης. Ο πτητικός αναστολέας διάβρωσης εξατμίζεται και η αέρια φάση εισέρχεται στο κονίαμα (ή σκυρόδεμα) και σχηματίζει ένα στρώμα παθητικό στην επιφάνεια του οπλισμού.
- Το δεύτερο επικαλυπτικό (ii) ήταν επίσης βερνίκι υδατοδιαλυτό το οποίο έχει υψηλό PH και έχει δυνατότητα παρεμπόδισης της υγρασίας στο κονίαμα. Αυτό εφαρμόζεται πάνω στην πρώτη επικάλυψη.

Στη δεύτερη κατηγορία δοκιμών (κυβικά δοκίμια) εξετάστηκε η ανθεκτικότητα σε διάβρωση με την προσθήκη αναστολέα διάβρωσης είτε πρόσμικτου είτε

ψεκαζόμενου. Ως αναστολείς διάβρωσης χρησιμοποιήθηκαν το Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ), το Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) και η Διμεθυλ-αιθανόλ-αμίνη ( $(\text{CH}_3)_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ ).

Ένας αναστολέας διάβρωσης ο οποίος βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο χρησιμοποιήθηκε ως πρόσμικτο στη μάζα του σκυροδέματος σε δύο διαφορετικές αναλογίες, 4% και 8% κ.β τσιμέντου.

Επίσης, τέσσερα δείγματα ψεκαζόμενων αναστολέων διάβρωσης εκ των οποίων τα δύο βασίζονται στο Νιτρικό Ασβέστιο και τα άλλα δύο στη Διμεθυλ-αιθανόλ-αμίνη και στο Νιτρώδες Ασβέστιο χρησιμοποιήθηκαν για σύγκριση ως προς την απόδοση.

## 8. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### 8.1. Ηλεκτροχημικές μετρήσεις

Οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι βασίζονται στην ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης και χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση του μηχανισμού διάβρωσης, καθώς και για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του μηχανισμού διάβρωσης στην πράξη.

Οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι επιτρέπουν τη μέτρηση της ταχύτητας διάβρωσης με γρήγορο και μη καταστρεπτικό τρόπο και επιτρέπουν τη μελέτη του μηχανισμού δράσης της διάβρωσης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε κατασκευές που δεν μπορούν να μελετηθούν με μετρήσεις της απώλειας βάρους. (Κουλουμπή, Ν., 2005)

Οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι:

- Δυναμικό διάβρωσης
- Καμπύλες πόλωσης
- Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης

#### 8.1.1. Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης $E_{corr}$

Το δυναμικό διάβρωσης  $E_{corr}$  ή δυναμικό ανοικτού κυκλώματος είναι το δυναμικό που αποκτά αυθόρμητα ένα μέταλλο όταν εκτεθεί στο περιβάλλον, μετράται ως προς ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς ενώ παράλληλα είναι απαραίτητη η απουσία ρεύματος διότι σε αντίθετη περίπτωση θα έδινε μια επιπλέον διαφορά δυναμικού η οποία θα προστίθετο στη μετρούμενη τιμή (Broomfield J.P., 1997).

Η χρονική καταγραφή του δυναμικού διάβρωσης ( $E_{corr}$ ) είναι από τις πιο συνηθισμένες τεχνικές, καθώς είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος και παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση του οπλισμού μέσα στο σκυρόδεμα συναρτήσει του χρόνου. Είναι μια μέθοδος που δείχνει την προδιάθεση για διάβρωση, δεν δίνει όμως πληροφορίες για την κινητική της διάβρωσης, συνεπώς δεν μπορεί να εκτιμηθεί η ταχύτητα με την οποία εξελίσσεται το φαινόμενο.

Η τεχνική της αποτίμησης του δυναμικού διάβρωσης περιγράφεται αναλυτικά στο πρότυπο ASTM C876-87.

Για τον προσδιορισμό του δυναμικού διάβρωσης μετράται η διαφορά δυναμικού του μετάλλου ως προς ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς (π.χ. κορεσμένου καλομέλανα, Ag/AgCl) με ένα βολτόμετρο.

Το δυναμικό διάβρωσης εξαρτάται από τον τύπο του μετάλλου, τις συνθήκες περιβάλλοντος, τη διαθεσιμότητα σε οξυγόνο, τα επαγόμενα ρεύματα και τη θερμοκρασία.

Παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση του οπλισμού, καθώς η μετατόπιση του δυναμικού προς ηλεκτροθετικές τιμές με την πάροδο του χρόνου, σημαίνει ότι ο χάλυβας προστατεύεται και δείχνει προδιάθεση μειωμένης διάβρωσης ενώ η μετατόπιση του δυναμικού διάβρωσης προς πιο ηλεκτραρνητικές τιμές δηλώνει προδιάθεση αυξημένης διάβρωσης δηλαδή ότι ο χάλυβας βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση.

**Πίνακας 8.1. Συσχέτιση μεταξύ τιμών του δυναμικού χαλύβδινου οπλισμού και της κατάστασης του σκυροδέματος**

| Διαφορά δυναμικού χάλυβα Ο.Σ. ως προς Cu/CuSO <sub>4</sub> , sat (mV) | Κατάσταση σκυροδέματος   |
|---|--|
| $\Delta V > -1100$  | Υγρό σκυρόδεμα χωρίς διαθεσιμότητα σε οξυγόνο  |
| $\Delta V < -600$   | Υγρασία, σκυρόδεμα με χλωριόντα  |
| $0 < \Delta V < +200$   | 1. Ύπαρξη υγρασίας, σκυρόδεμα χωρίς χλωριόντα<br>2. Ύπαρξη υγρασίας, σκυρόδεμα ενανθρακωμένο<br>3. Ξηρό και ενανθρακωμένο σκυρόδεμα<br>4. Ξηρό σκυρόδεμα |

Στον Πίνακα 8.1 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ των τιμών του δυναμικού και στο σκυρόδεμα και στον Πίνακα 8.2 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού χαλύβδινου οπλισμού και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο οπλισμός στο σκυρόδεμα, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87: «*Standard test method for Half Cell Potentials of reinforcing Steel in Concrete*».

**Πίνακας 8.2. Συσχέτιση μεταξύ των τιμών του δυναμικού χαλύβδινου οπλισμού και της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876- 87**

| Δυναμικό διάβρωσης χάλυβα Ο.Σ. ως προς Cu/CuSO <sub>4</sub> , sat (mV)        | Κατάσταση οπλισμού  |
|---|---|
| <b>E<sub>corr</sub> &gt; -200 mV<sub>CSE</sub></b>                            | Ο οπλισμός βρίσκεται στην παθητική κατάσταση (δεν διαβρώνεται), με 90% πιθανότητα |
| <b>-200 mV<sub>CSE</sub> &gt; E<sub>corr</sub> &gt; -350 mV<sub>CSE</sub></b> | Κατάσταση οπλισμού αβέβαιη  |
| <b>E<sub>corr</sub> &lt; -350 mV<sub>CSE</sub></b>                            | Ο οπλισμός βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση (διαβρώνεται), με 90% πιθανότητα         |

Τα ηλεκτρόδια αναφοράς που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης, είναι απαραίτητο να αναφέρονται. Τα ηλεκτρόδια αναφοράς που χρησιμοποιούνται συνήθως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 8.3., όπου δίνεται και η τιμή τους έναντι του ηλεκτροδίου του υδρογόνου (SHE).

**Πίνακας 8.3. Συνήθη ηλεκτρόδια αναφοράς για μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης**

| Ηλεκτρόδιο   | Ονομασία | Δυναμικό έναντι ηλεκτροδίου υδρογόνου |
|--|----------|---------------------------------------|
| <b>Κεκορεσμένου χαλκού/θειικού χαλκού</b>                            | CSE      | + 0,318 vs SHE                        |
| <b>Κεκορεσμένου καλομέλανα (Hg/Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) KCl</b> | CSE      | + 0,241 vs SHE                        |
| <b>Χλωριούχου αργύρου (Ag/AgCl) KCl</b>                              | SSCE     | + 0,199 vs SHE                        |

Οι μετρήσεις των δυναμικών διάβρωσης κατά την παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια ενός βολτόμετρου και ενός ηλεκτροδίου αναφοράς SSCE (Χλωριούχου αργύρου Ag/AgCl). Το ηλεκτρόδιο αναφοράς συνδέεται με ψηφιακό πολύμετρο υψηλής εσωτερικής αντίστασης, του οποίου ο θετικός πόλος συνδέεται με τον οπλισμό.

Στον παρακάτω πίνακα 8.4. φαίνεται η κατάσταση του οπλισμού σε σχέση με το δυναμικό διάβρωσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876/87.

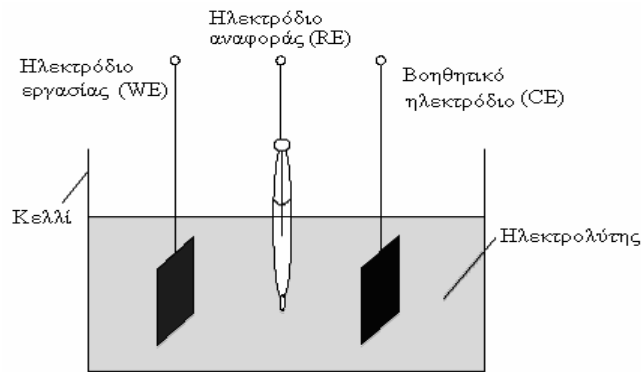
**Πίνακας 8.4. Πιθανότητα διάβρωσης για διάφορα είδη ηλεκτροδίων (Broomfield, 1997)**

| Ηλεκτρόδιο<br>Cu/CuSO <sub>4</sub> | Ag/AgCl<br>1.0M KCl | Πρότυπο<br>ηλεκτρόδιο<br>υδρογόνου | Ηλεκτρόδιο<br>καλομέλανα<br>(SCE) | Πιθανότητα<br>διάβρωσης                     |
|------------------------------------|---------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---|
| > -200 mV                          | > -100 mV           | > +120 mV                          | > -80 mV                          | <b>Χαμηλή (10% πιθανότητα διάβρωσης)</b>    |
| -200 ως -350 mV                    | -100 ως -250 mV     | +120 mV ως -30mV                   | -80 mV ως -230 mV                 | <b>Ενδιάμεση πιθανότητα διάβρωσης</b>       |
| < -350 mV                          | < -250 mV           | <-30 mV                            | < -230 mV                         | <b>Υψηλή (&gt;90% πιθανότητα διάβρωσης)</b> |
| < -500 mV                          | < -400 mV           | < -180 mV                          | < -380 mV                         | <b>Έντονη διάβρωση</b>                      |

#### **8.1.2. Ηλεκτροχημικός προσδιορισμός του ρυθμού διάβρωσης με τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης (LPR)**

Είναι η πλέον διαδεδομένη ηλεκτροχημική μέθοδος στη μελέτη γενικά της διάβρωσης. Λαμβάνεται πειραματικά η συνάρτηση  $i=f(E)$ , όπου  $i$  η πυκνότητα του ρεύματος και  $E$  το δυναμικό του εξεταζόμενου δοκιμίου μετρούμενο μέσω ηλεκτροδίου αναφοράς. Το δυναμικό  $E$  επιβάλλεται εξωτερικά (δηλ. το σύστημα εξαναγκάζεται να βρεθεί εκτός  $E_{corr}$ ) και ρυθμίζεται κατά βούληση μέσω ποτενσιοστάτου. Το ηλεκτροχημικό σύστημα αποτελείται από τρία ηλεκτρόδια:

- το ηλεκτρόδιο εργασίας (εξεταζόμενο δοκίμιο, working electrode)
- το ηλεκτρόδιο αναφοράς (reference electrode)
- και το βοηθητικό ηλεκτρόδιο, συνήθως από ηλεκτρογραφίτη, (counter electrode), όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.1. (Υφαντής Δ., 2000).



**Σχήμα 8.1: Σύστημα τριών ηλεκτροδίων σε ηλεκτροχημικό κελί**

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι τα εξής:

- Η ταχύτητα των μετρήσεων η οποία είναι πολύ χρήσιμη για συγκριτικά πειράματα, όπως για παράδειγμα η ποιοτική εκτίμηση διαφόρων αναστολέων
- Αποτελεί μια μη καταστρεπτική μέθοδο και επειδή η πόλωση που εφαρμόζεται είναι μικρή δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα η επιφάνεια του δοκιμίου
- Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για ακριβείς μετρήσεις πολύ μικρών ποσοστών διάβρωσης (μικρότερων από 0.1 mpy), οι οποίες είναι δύσκολο να πραγματοποιηθούν με συμβατικές τεχνικές απώλειας μάζας ή τεχνικές αναλυτικής χημείας.
- Οι μετρήσεις του ποσοστού διάβρωσης που προκύπτουν από την τεχνική αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε κατασκευές στις οποίες δεν μπορούν να ελεγχθούν οπτικά ή να υποβληθούν σε δοκιμές απώλειας μάζας (π.χ. υπόγειοι αγωγοί).
- Οι ωμικές πτώσεις τάσης είναι γενικά αμελητέες και μπορούν με τη βοήθεια της ηλεκτρονικής πρακτικά να μηδενιστούν.

Οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις βασίζονται στην ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης και μετρούν τις ηλεκτρικές ιδιότητες της ηλεκτρισμένης διπλοστοιβάδας, δηλαδή της διεπιφάνειας μετάλλου / διαλύματος. Η κινητική των ηλεκτροχημικών δράσεων ενός μετάλλου το οποίο διαβρώνεται μπορεί να προσδιοριστεί από τουλάχιστον τρεις παραμέτρους, όπως πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης  $i_{corr}$ , δυναμικό διάβρωσης  $E_{corr}$  και σταθερές Tafel ( $\beta_a$  και  $\beta_c$ ). Οπότε η συμπεριφορά του μετάλλου μπορεί να απεικονιστεί από τις καμπύλες πόλωσης ( $E - I$ ). Η εκτίμηση των παραπάνω

παραμέτρων οδηγεί στον προσδιορισμό της αντίστασης πόλωσης  $R_p$  και του ρυθμού διάβρωσης.

Έστω ότι κατά τη διάβρωση ενός μετάλλου ισχύει:



Από την εξίσωση Butler – Volmer η οποία παρέχει τη συμμετοχή της καθοδικής και της ανοδικής δράσης στο ρεύμα μιας αντίδρασης μεταφοράς φορτίου:

$$i = i_o \left\{ \exp\left(\frac{azFn}{RT}\right) - \exp\left[-\frac{(1-a)zFn}{RT}\right] \right\} \quad (8.3)$$

Όπου T: η απόλυτη θερμοκρασία σε K, R: Σταθερά των αερίων, z:ο αριθμός των ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων, a: παράγοντας συμμετρίας, F: η σταθερά Faraday

Για χαμηλές υπερτάσεις  $\eta = E - E_o$ , δηλαδή όταν  $\left(\frac{azFn}{RT}\right) \ll 1$  και  $\frac{(1-a)zFn}{RT} \ll 1$ ,

τότε οι εκθετικοί όροι της εξίσωσης (8.3) για την ανοδική και καθοδική συνιστώσα του ολικού ρεύματος μπορούν κατά προσέγγιση να αποδοθούν από τους δύο πρώτους όρους των αντιστοίχων σειρών Taylor, δηλαδή:

$$\exp\left(\frac{azFn}{RT}\right) = 1 + \frac{azFn}{RT} \quad (8.4)$$

$$\exp\left[-\frac{(1-a)zFn}{RT}\right] = 1 - \frac{(1-a)zFn}{RT} \quad (8.5)$$

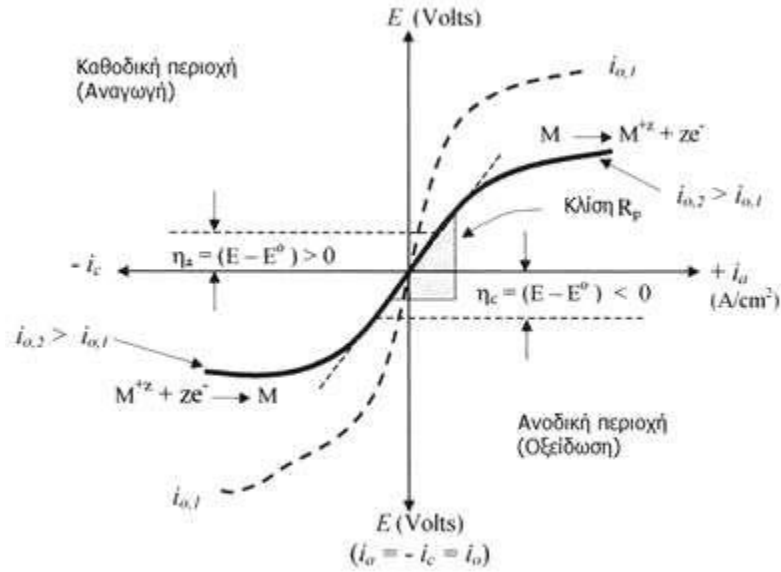
Με αντικατάσταση των αναπτυγμάτων Taylor (8.4) και (8.5) στην εξίσωση Bultle – Volmer προκύπτει ότι:

$$i = i_o \frac{zFn}{RT} \quad (8.6)$$

Από την εξίσωση (8.6), η οποία αποτελεί την οριακή μορφή της εξίσωσης Butler – Volmer, φαίνεται ότι για πολύ μικρές τιμές υπέρτασης  $|\eta| \leq 10 \text{ mV}$  δηλαδή για δυναμικό κοντά στο δυναμικό ισορροπίας, ισχύει η γραμμική σχέση μεταξύ δυναμικού και πυκνότητας ρεύματος.

Η κλίση της ευθείας αυτής για δυναμικό  $E = E_{\text{corr}}$  συνιστά την αντίσταση πόλωσης  $R_p$ ,

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} = \frac{n}{\Delta i} \quad (8.7)$$



**Σχήμα 8.2:** *Ανοδική και καθοδική περιοχή των δυναμικών E συναρτήσει της πυκνότητας του ρεύματος*

Κατά τη διαδικασία της διάβρωσης, ο ρυθμός της ανοδικής και της καθοδικής δράσης αποτελούν ζεύγος αντιδράσεων στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου για συγκεκριμένη πυκνότητα ρεύματος γνωστή ως  $i_{corr}$ . Σε σταθερές συνθήκες (steady state conditions), οι πυκνότητες ρεύματος στην ισορροπία είναι:  $i_a = -i_c = i_{corr}$ .

Όταν εφαρμόζεται πόλωση από το δυναμικό διάβρωσης, η υπέρταση σε σχέση με την ανοδική και καθοδική πυκνότητα ρεύματος είναι:

$$n_a = \beta_a \log\left(\frac{i_a}{i_{o,1}}\right) = \beta_a \log\left(\frac{i_a}{i_{corr}}\right), \quad n_a = \Delta E = (E - E_{corr}) > 0 \quad (8.8)$$

$$n_c = -\beta_c \log\left(\frac{i_c}{i_{o,1}}\right) = -\beta_c \log\left(\frac{i_c}{i_{corr}}\right), \quad n_c = \Delta E = (E - E_{corr}) < 0 \quad (8.9)$$

Λύνοντας τις παραπάνω σχέσεις (8.8) και (8.9) ως προς την ανοδική και καθοδική πυκνότητα ρεύματος τότε η συνολική πυκνότητα ρεύματος είναι:

$$i = i_a - i_c = i_o \left\{ \exp\left[\frac{2,303(E - E_{corr})}{\beta_a}\right] - \exp\left[\frac{2,303(E - E_{corr})}{\beta_c}\right] \right\} \quad (8.10)$$

Η παραπάνω εξίσωση (8.10) αποτελεί μια άλλη μορφή της εξίσωσης Butler – Volmer, η οποία ποσοτικοποιεί τις κινητικές παραμέτρους της ηλεκτροχημικής διάβρωσης.

Από την πρώτη παράγωγο της πυκνότητας ρεύματος ως προς το δυναμικό προκύπτει:

$$\left(\frac{di}{dE}\right) = 2,303 \text{ } i_{corr} \left\{ \beta \alpha^{-1} \exp\left[\frac{2,303(E-E_{corr})}{\beta \alpha}\right] - \beta c^{-1} \exp\left[\frac{2,303(E-E_{corr})}{\beta c}\right] \right\} \quad (8.11)$$

Για  $E=E_{corr}$ , προκύπτει από την εξίσωση (8.11):

$$\left(\frac{di}{dE}\right)_{E-E_{corr}} = 2,303 \text{ } i_{corr} \left(\frac{\beta \alpha + \beta c}{\beta \alpha \beta c}\right) \quad (8.12)$$

$$Rp = \left(\frac{di}{dE}\right)_{E-E_{corr}}^{-1} = \frac{\beta \alpha \beta c}{2,303 \text{ } i_{corr} (\beta \alpha + \beta c)} = \frac{B}{i_{corr}} \quad (8.13)$$

Όπου B η σταθερά Stearn- Geary ίση με  $B = \frac{\beta \alpha \beta c}{2,303 (\beta \alpha + \beta c)}$ , η οποία συνδέεται με την ανοδική  $\beta \alpha$  και καθοδική  $\beta c$  σταθερά Tafel.

Για το οπλιμένο σκυρόδεμα οι τιμές της σταθεράς B κυμαίνονται από 26mV (B=26mV όταν ο οπλισμός στο σκυρόδεμα είναι ενεργός) έως 52 mV (B=52 mV όταν ο οπλισμός στο σκυρόδεμα είναι παθητικός).

Από την εξίσωση (8.13) προκύπτει ότι η αντίσταση πόλωσης  $R_p$  είναι αντιστρόφως ανάλογη της πυκνότητας ρεύματος.

Η διαδικασία και η μέθοδος μέτρησης του  $R_p$  περιγράφονται στο πρότυπο ASTM G59 - 97(2009) «Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements» και εμπεριέχεται στην ετήσια έκδοση των ASTM (American Testing Society for Testing Materials) κανονισμών Vol. 03.02.

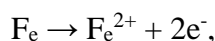
Η τεχνική της Γραμμικής Πόλωσης συνίσταται στη σάρωση του δυναμικού σε μια περιοχή πόλωσης  $\pm 20$  mV από το δυναμικό διάβρωσης και την καταγραφή του αντίστοιχου ρεύματος.

Για την διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών μετρήσεων η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε περιλάμβανε Ποτενσιοστάτη / Γαλβανοστάτη της E.G & Model 263

συνδεδεμένο με υπολογιστή για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων. Για την επεξεργασία των ηλεκτροχημικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε λογισμικό *Softcorr III* της εταιρίας *E.G & G Princeton Research*. Οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πρότυπο κελί ηλεκτρόλυσης σε συνθήκες περιβάλλοντος. Η διάταξη ήταν τριών ηλεκτροδίων περιλάμβανε ως ηλεκτρόδιο αναφοράς ηλεκτρόδιο Ag/AgCl, το ηλεκτρόδιο εργασίας ήταν ο εγκιβωτισμένος οπλισμός, ενώ ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο άνθρακα. Τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν πλήρως σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. και ο ηλεκτρολύτης ήταν το διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος.

### **8.1.3. Προσδιορισμός του ρυθμού διάβρωσης μέσω της τεχνικής της γραμμικής πόλωσης (Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας)**

Όταν ένα μέταλλο διαβρώνεται είναι ισοδύναμο με ένα κύκλωμα ή ένα κελί στο οποίο η κατανάλωση ενέργειας συμβαίνει με την παραγωγή των προϊόντων διάβρωσης. Αυτό μπορεί να προσδιοριστεί από τη μέτρηση της διαλυμένης ποσότητας του μετάλλου, με την μέτρηση της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο δημιουργείται από την ανοδική αντίδραση του σιδήρου:



και καταναλώνεται από την καθοδική αντίδραση:



Με βάση το νόμο του Faraday μετατρέποντας τη ροή των ηλεκτρονίων σε απώλεια μάζας προκύπτει:

$$m = \frac{Mit}{zF} \quad (8.14)$$

Όπου,  $m$  = η μάζα του μετάλλου που καταναλώνεται (g),

$M$  = το ατομικό βάρος του μετάλλου (56g για το Fe)

$I$  = το ηλεκτρικό ρεύμα (A)

$t$  = ο χρόνος (s)

$z$  = ο αριθμός ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων ( $z=2$  για την αντίδραση  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^{-}$ )

$F$  = η σταθερά Faraday (A s)

Ο ρυθμός διάβρωσης του οπλισμού εκφράζεται σε μικρόμετρα ανά έτος ( $\mu\text{m}/\text{y}$ ), δηλαδή σε απομείωση της διατομής οπλισμού.

Η μετατροπή της απομείωσης της διατομής οπλισμού σε ένταση ρεύματος γίνεται σύμφωνα με τη εξίσωση (8.15):

$$\text{ρυθμός διάβρωσης} = \frac{i_{\text{corr}} t_a M}{z F d_M} 10^6 \quad (8.15)$$

Όπου,  $i_{\text{corr}}$  = η πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης ( $\text{A/m}^2$ ),

$t_a$  = ο χρόνος έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον (s)

$M$  = το ατομικό βάρος του μετάλλου ( $M=0,056 \text{ Kg/mol}$  για το Fe)

$z$  = ο αριθμός ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων ( $z=2$  για το Fe)

$F$  = η σταθερά Faraday ( $96485 \text{ Cb/mol}$ )

$d_M$  = η πυκνότητα του μετάλλου ( $d_{\text{Fe}} = 7860 \text{ Kg/m}^3$  για το Fe)

#### 8.1.4. Μέτρηση της απώλειας μάζας

Η μέτρηση της απώλειας μάζας των οπλισμών ανήκει στις καταστροφικές μεθόδους, καθώς απαιτείται η καταστροφή του δοκιμίου. Η εκτίμηση της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού πραγματοποιείται με το σπάσιμο των δοκιμίων μετά από ένα σημαντικό χρονικό διάστημα έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Για τους υπολογισμούς της απώλειας μάζας των χάλυβων οπλισμού σκυροδέματος ως αρχικό βάρος λαμβάνεται το βάρος των οπλισμών πριν την έκθεσή τους στο διαβρωτικό περιβάλλον και ως τελικό βάρος λαμβάνεται το βάρος των οπλισμών μετά την έκθεσή τους στο διαβρωτικό περιβάλλον, αφού πρώτα απομακρυνθούν τα οξείδια (σκουριά). Η διαφορά βάρους προκύπτει από τη διαφορά της αρχικής μείον της τελικής τιμής μάζας του οπλισμού.

Για τον προσδιορισμό της μάζας των χάλυβων οπλισμού σκυροδέματος πριν την έκθεση τους στο περιβάλλον διάβρωσης, οι οπλισμοί ξεπλένονται με απιονισμένο νερό και εμβαπτίζονται σε ακετόνη για την απομάκρυνση των λιπαρών ουσιών από την επιφάνεια τους. Τέλος ζυγίζονται με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου  $0,1\text{mg}$  (ISO/DIS 8407.3).

Για την εκτίμηση της διάβρωσης υπολογίζεται το ποσοστό επί της εκατό της μεταβολής κατά βάρος των οπλισμών, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta m = \frac{m_{\text{αρχ}} - m_{\text{τελ}}}{m_{\text{αρχ}}} 100 \quad (8.16)$$

Όπου  $m_{\text{αρχ}}$  : το αρχικό βάρος του οπλισμού πριν την έκθεσή του στο διαβρωτικό περιβάλλον

$m_{\text{τελ}}$  : το τελικό βάρος του οπλισμού μετά την έκθεσή του στο διαβρωτικό περιβάλλον .

Ο ρυθμός διάβρωσης του οπλισμού δίνεται από τη σχέση:

$$CR = \frac{8,76 \cdot 10^{-7} \Delta m}{A T D} \quad (8.17)$$

Όπου: CR (corrosion rate) = ο ρυθμός διάβρωσης,

$\Delta m$  = η απώλεια μάζας του οπλισμού (g)

$A$  = η επιφάνεια του οπλισμού ( $\text{cm}^2$ )

$D$  = η πυκνότητα δομικού χάλυβα ίση με  $7,8 \text{g/cm}^3$

$T$  = ο χρόνος έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον (h).

## 8.2. Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης

Η ικανότητα ενός κυκλώματος να αντιστέκεται στη ροή του ρεύματος ονομάζεται ηλεκτρική αντίσταση και εκφράζεται από το νόμο του Ohm:

$$R = \frac{V}{I} \quad (8.18)$$

Όταν σε ένα κύκλωμα που διαρρέεται από εναλασσόμενο ρεύμα υπάρχει αντίσταση μαζί με αυτεπαγωγή ή και χωρητικότητα, τότε δημιουργείται μια δυσκολία στη διέλευση του εναλασσόμενου ρεύματος, η οποία προέρχεται από την καθαρά ωμική αντίσταση που υπάρχει στο κύκλωμα και την ολική αντίσταση που εμφανίζεται σε αυτό, που μπορεί να είναι χωρητική ή επαγωγική. Η ολική αυτή αντίσταση που παρουσιάζει ένα κύκλωμα στη διέλευση του εναλασσόμενου ρεύματος, λέγεται σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος ή εμπέδηση  $Z$ .

Η μέτρηση της εμπέδησης ηλεκτροχημικών συστημάτων και ειδικότερα η εξάρτηση από τη συχνότητα είναι γνωστή ως τεχνική φασματοσκοπίας ηλεκτροχημικής εμπέδησης ή ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης. Με τη μέθοδο αυτή μελετάται η απόκριση ενός ηλεκτροχημικού συστήματος υπό την επίδραση ενός περιοδικού σήματος (ηλεκτρικού ρεύματος ή δυναμικού) μικρής έντασης. (Καραντώνης, Α., 2009).

Η ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης αποτελεί μια μη καταστροφική μέθοδο για τη μελέτη ηλεκτροχημικών φαινομένων και τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται ευρύτατα, καθώς αποτελεί μια αξιόπιστη μέθοδο, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε μικρές μεταβολές των συστημάτων που εξετάζονται. Επίσης, η ανάλυση της απόκρισης είναι δυνατό να προσφέρει πληροφορίες σχετικά με την ηλεκτροχημική διεπιφάνεια, τη δομή της και τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε αυτή.

Σε αντίθεση με τις ηλεκτροχημικές μεθόδους συνεχούς ρεύματος, η φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης παρέχει τη δυνατότητα διαχωρισμού της αντίστασης πόλωσης που σχετίζεται με το ποσοστό διάβρωσης από την αντίσταση της διηλεκτρικής επικάλυψης.

Κατά την ηλεκτροχημική φασματοσκοπία εμπέδησης καταγράφεται η απόκριση του υπό εξέταση συστήματος σε μια μικρή εξωτερική διαταραχή (εναλλασσόμενη τάση) και σε ένα προκαθορισμένο εύρος συχνοτήτων. Η σύνθετη αντίσταση του συστήματος υπολογίζεται από τις τιμές της εναλλασσόμενης τάσης και του παραγόμενου ρεύματος.

Για τις μετρήσεις με τη μέθοδο της ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης, το υπό εξέταση σύστημα τοποθετείται σε ένα ηλεκτροχημικό κελλί, το οποίο περιέχει ένα υδατικό διαλύτη, το ηλεκτρόδιο αναφοράς, το ηλεκτρόδιο εργασίας και το βοηθητικό ηλεκτρόδιο. Ο ποτενσιοστάτης με τον οποίο συνδέεται το ηλεκτροχημικό κελλί, μετράει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων αναφοράς και εργασίας. Η εμπέδηση του βοηθητικού ηλεκτροδίου και η αντίσταση του ηλεκτρολύτη δεν γίνονται αισθητές όταν χρησιμοποιείται ποτενσιοστάτης τριών ηλεκτροδίων. (Κουλουμπής Ν., 2005)

Μια μικρού πλάτους ημιτονοειδής τάση εφαρμόζεται στο ηλεκτροχημικό κελλί και στη συνέχεια γίνεται η μέτρηση της απόκρισης του συστήματος, ίδιας συχνότητας με τη διέγερση αλλά διαφορετικού πλάτους και φάσης.

Η σύνθετη αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση (8.19):

$$Z = \frac{E}{I} \quad (8.19)$$

Όπου  $E = E_0 \sin \omega t$  και  $I = I_0 \sin(\omega t + \varphi)$ .

Η σύνθετη αντίσταση αποτελείται από δύο στοιχεία, ένα πραγματικό, που είναι η καθαρά ωμική αντίσταση του κυκλώματος και ένα φανταστικό που είναι η αντίδραση που παρουσιάζει το κύκλωμα κατά την διέλευση του εναλλασσομένου ρεύματος μέσα από αυτό.

Αντικαθιστώντας τα  $E$  και  $I$  με τη μιγαδική τους μορφή, έχουμε:

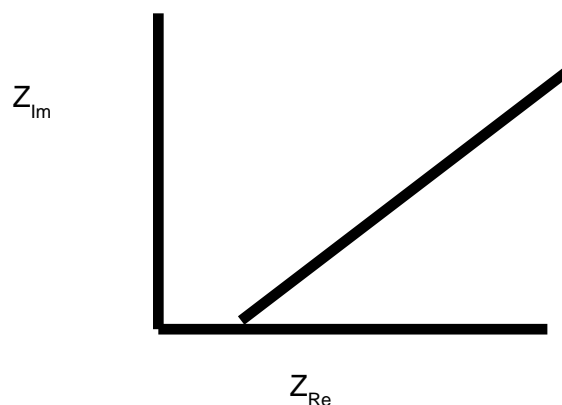
$$E = E_0 e^{j\omega t} \text{ και } I = I_0 e^{j(\omega t - \varphi)}$$

$$\text{Συνεπώς, } Z = \frac{E_0}{I_0} e^{j\varphi} = |Z| (\cos\varphi + j\sin\varphi) = Z' + jZ'' \quad (8.20)$$

Όπου  $Z'$  και  $Z''$ , το πραγματικό και μιγαδικό μέρος του  $Z$  αντίστοιχα.

$$\text{Ισχύει: } Z = [(Z')^2 + (Z'')^2]^{1/2} \quad (8.21)$$

$$\text{και } \varphi = \arctan(Z'' / Z') \quad (8.22)$$



**Σχήμα 8.3: Διανυσματική παράσταση της σύνθετης αντίστασης**

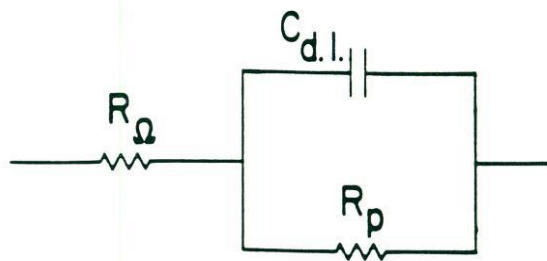
Κατά την εκτίμηση του φάσματος στην ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης, γίνεται η παραδοχή ότι η σχέση μεταξύ τάσης και ρεύματος είναι γραμμική και η σύνθετη αντίσταση είναι ανεξάρτητη του πλάτους του εφαρμοζόμενου συστήματος. Σε απλά συστήματα μπορεί να θεωρηθεί ότι η κατανομή του ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων ακολουθεί το νόμο του Laplace  $\nabla^2 V = 0$ , ενώ σε πιο σύνθετες γεωμετρίες εμφανίζονται αποκλίσεις που συνδέονται με το γεγονός ότι η κατανομή του ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων μέτρησης δεν είναι ανεξάρτητη της συχνότητας διέγερσης.

Η μελέτη των διαφόρων συστημάτων πραγματοποιείται με μεγάλη ακρίβεια μέσω της διαμόρφωσης ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων, τα στοιχεία των οποίων εξομοιώνουν τα μεμονωμένα ηλεκτροχημικά φαινόμενα και διεργασίες του υπό μελέτη συστήματος και επιτρέπουν την μοντελοποίηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

Τα ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα γενικά περιλαμβάνουν ιδανικά στοιχεία κυκλωμάτων όπως αντιστάσεις, πυκνωτές, στοιχεία αυτεπαγωγής κλπ.

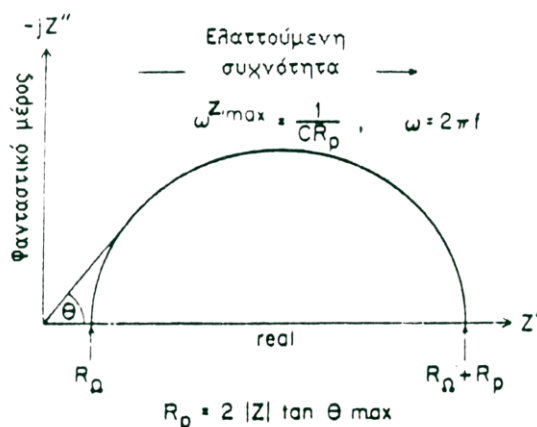
Η εμπέδηση μπορεί να εφαρμοστεί στην έρευνα της αντοχής στη διάβρωση προστατευτικών οργανικών επικαλύψεων μεταλλικών υλικών. Το σύστημα αυτό είναι πολυπλοκότερο διότι εκτός της μεταλλικής επιφάνειας υπάρχει η διεπιφάνεια μετάλλου - οργανικής στοιβάδας και το σύστημα επηρεάζεται από τις ιδιότητες της οργανικής επικάλυψης (π.χ. χημική σύσταση, διαπερατότητα, πάχος στοιβάδας, πορώδες, κλπ). (Υφαντής Δ., 2000)

Το κύκλωμα στο σχήμα 8.4 απεικονίζει το ισοδύναμο κύκλωμα χρησιμοποιείται συνήθως για να περιγράψει τη διαβρωτική διαδικασία σε ένα μέταλλο, το οποίο είναι εκτεθειμένο σε διαβρωτικό περιβάλλον. Τα στοιχεία που αποτελούν το κύκλωμα είναι η αντίσταση του ηλεκτρολύτη  $R_s$ , ένας πυκνωτής  $C_{dl}$ , που αντιπροσωπεύει τη χωρητικότητα της διπλοστοιβάδας που δημιουργείται στη διεπιφάνεια μετάλλου – ηλεκτρολύτη και η αντίσταση  $R_p$  στη μεταφορά φορτίου μέσω της διπλοστοιβάδας.



**Σχήμα 8.4: Παράσταση του απλούστερου RC ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος**

Η πιο συνηθισμένη μορφή παρουσίασης της εμπέδησης είναι η χρήση διαγραμμάτων του  $Z$ . Τα διαγράμματα Nyquist ή Cole-Cole χρησιμοποιούνται πιο συχνά για την εκτίμηση των παραμέτρων όπως: την αντίσταση του διαλύματος ( $R_s$ ), την αντίσταση πόλωσης ( $R_p$ ) και τη χωρητικότητα της διπλοστοιβάδας ( $Cdl$ ). Στα διαγράμματα Nyquist απεικονίζονται τα μεγέθη  $Z''(\omega)$  και  $Z'(\omega)$ , δηλαδή το μιγαδικό μέρος της σύνθετης αντίστασης ( $Z''$ ) συναρτήσει του πραγματικού ( $Z'$ ). Στα πλεονεκτήματα των διαγραμμάτων Nyquist περιλαμβάνονται: η δυνατότητα υπολογισμού της αντίστασης του διαλύματος με την προέκταση της καμπύλης στον άξονα x, η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων δύο ή περισσότερων ξεχωριστών πειραμάτων. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της απεικόνισης με διαγράμματα Nyquist είναι ότι δεν είναι εμφανή η συχνότητα και ως αποτέλεσμα ο υπολογισμός της χωρητικότητας της διπλοστοιβάδας είναι πιο περίπλοκος.

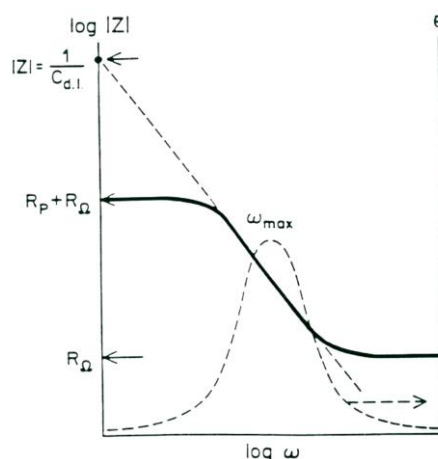


**Σχήμα 8.5: Διάγραμμα Nyquist για ένα απλό ηλεκτροχημικό κελί**

Το διάγραμμα Bode απεικονίζει το μέτρο της σύνθετης αντίστασης  $|Z|$ , συνήθως σε λογαριθμική κλίμακα, συναρτήσει της συχνότητας. Επίσης το διάγραμμα διαφοράς

φάσης απεικονίζει τη διαφορά φάσης  $\Phi$  σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Τα δύο αυτά διαγράμματα συνδυάζονται αρκετές φορές σε ένα μόνο διάγραμμα με δύο κατακόρυφους άξονες αριστερά το  $|Z|$  και δεξιά το  $\Phi$ .

Στην περίπτωση που το ισοδύναμο κύκλωμα είναι του σχήματος 8.4 τότε οι τιμές των αντιστάσεων υπολογίζονται από την προέκταση των οριζοντίων τμημάτων του διαγράμματος Bode και από τις τομές του ημικυκλίου του διαγράμματος Nyquist με τον άξονα του  $Z'$ . Οι τιμές της χωρητικότητας υπολογίζονται προεκτείνοντας το επικλινές ευθύγραμμο τμήμα του διαγράμματος Bode με θεωρητική κλίση  $-1$  στο σημείο  $\omega = 1 \text{ rad/sec}$  ή  $\log \omega = 0$ . Στο σημείο αυτό ισχύει  $Z = 1/CdI$  και έτσι προκύπτει η τιμή του  $CdI$ .



**Σχήμα 8.6: Μικτό Διάγραμμα Bode για ένα από ηλεκτροχημικό κελί**

Η τεχνική της ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της προστασίας που παρέχεται από αναστολείς διάβρωσης και για τη μελέτη του μηχανισμού δράσης τους με υπολογισμό μεγεθών όπως ο βαθμός κάλυψης της επιφάνειας από τον αναστολέα και ο προσδιορισμός των μοντέλων ισόθερμων καμπύλων, καθώς οι παράμετροι που σχετίζονται με τη διαδικασία της διάβρωσης στην επιφάνεια ενός ηλεκτροδίου όπως η αντίσταση μεταφοράς φορτίου, η αντίσταση πόλωσης, και η χωρητικότητα της διπλοστοιβάδας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τη χρήση των ισοδύναμων κυκλωμάτων για τη μελέτη διαφόρων συστημάτων και των ηλεκτροχημικών φαινομένων που συμβαίνουν σε αυτά.

### 8.3 Οπτικός έλεγχος - Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)

Η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM) είναι μια από τις πιο νέες και ευέλικτες τεχνικές ανάλυσης της μικροδομής μεγάλου αριθμού υλικών. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης λειτουργεί όπως και το οπτικό μικροσκόπιο με τη διαφορά ότι αντί για φως χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας. Η δέσμη των ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος και από την αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων με την επιφάνεια προκύπτουν σημαντικές πληροφορίες σε σχέση με τα άτομα των στοιχείων του εξεταζόμενου υλικού. Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων από τα άτομα των στοιχείων, κυρίως δευτερογενή και οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια καθώς και ακτίνες X, επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας και έτσι παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τη μορφολογία και τη σύσταση της επιφάνειας.

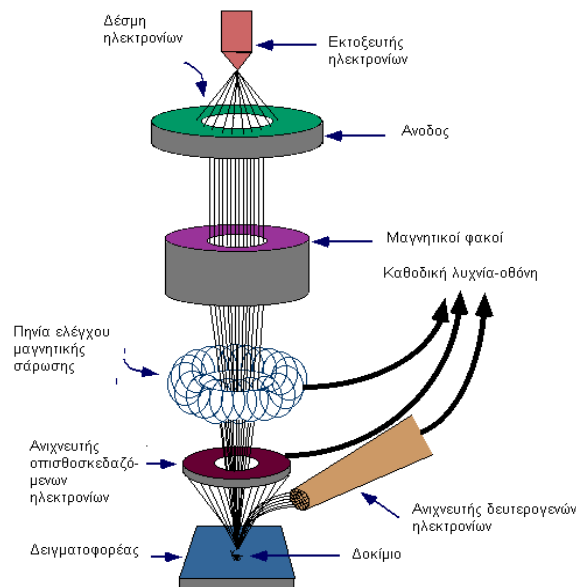
Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης έχει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως είναι η τρισδιάστατη και η εις βάθος απεικόνιση των στερεών δειγμάτων και η μεγάλη ανάλυση που φθάνει μέχρι το 1nm-5nm. Με την εφαρμογή ενός συστήματος ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτίνων X που δημιουργούνται στην επιφάνεια από την προσπίπτουσα δέσμη, μπορεί να γίνει ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση του υλικού και έτσι το SEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξέταση μικροδομής στερεών δειγμάτων και για να δώσει εικόνες υψηλού βαθμού διείσδυσης. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης αποτελείται από το σύστημα παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων, το σύστημα κατεύθυνσης της δέσμης ηλεκτρονίων, το σύστημα πληροφοριών το οποίο περιλαμβάνει τους αισθητήρες που δέχονται τα διάφορα σήματα που εκπέμπονται ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της δέσμης ηλεκτρονίων με το δείγμα, το σύστημα κενού, καθώς και το σύστημα μεγέθυνσης, παρουσίασης και καταγραφής αποτελεσμάτων.

Τα βασικά στάδια λειτουργίας ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου είναι:

- Ο σχηματισμός μιας δέσμης ηλεκτρονίων από την πηγή η οποία επιταχύνεται προς το δείγμα μέσω ενός θετικού ηλεκτρικού δυναμικού

- Μια λεπτή εστιασμένη μονόχρωματική δέσμη η οποία δημιουργείται χρησιμοποιώντας μεταλλικά ανοίγματα, ηλεκτρομαγνητικούς φακούς και πηνία σάρωσης, σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος
- Οι αλληλεπιδράσεις της δέσμης δείγματος καταγράφονται από τους ανιχνευτές και μετατρέπονται σε εικόνα.

Στο σχήμα 8.7. φαίνονται τα βασικά στάδια λειτουργίας του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.



**Σχήμα 8.7: Διάγραμμα λειτουργίας μικροσκοπίου**

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy – SEM) χρησιμοποιεί μία λεπτή δέσμη ηλεκτρονίων ενέργειας 1 – 50 keV, η οποία, αφού περάσει από μία ακολουθία δύο ή τριών φακών εστίασης (συνδυασμένοι με κατάλληλα διαφράγματα) καταλήγει να έχει μία διάμετρο 2-10nm. Η λεπτή αυτή δέσμη κατευθύνεται με την βοήθεια ενός πηνίου οδήγησης, έτσι ώστε να σαρώνει με περιοδικό τρόπο την υπο μελέτη επιφάνεια του δείγματος. Η προσπίπτουσα δέσμη προκαλεί την εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων και ηλεκτρονίων που έχουν υποστεί ελαστική σκέδαση ή χαμηλή απώλεια ενέργειας, καθώς και ακτίνες X αλλά προκαλείται και φωταύγεια. Όλα τα σήματα αλλά κυρίως των δευτεροταγών και των οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων ενισχύονται και στην συνέχεια διαμορφώνουν την

ένταση της δέσμης η οποία προσπίπτει στην φθορίζουσα οθόνη ακολουθώντας την ίδια σάρωση η οποία οδηγεί την δέσμη του μικροσκοπίου. Αποτέλεσμα αυτού είναι να εμφανίζεται μεγεθυμένη εικόνα στην φθορίζουσα οθόνη της επιφάνειας που σαρώνει η δέσμη του μικροσκοπίου. (Κυριακίδης Γ. και Μπίνας Β., 2014)

Ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης περιλαμβάνει τους διαφόρους ανιχνευτές που δέχονται τα σήματα που παράγονται από την αλληλεπίδραση της δέσμης ηλεκτρονίων με το δείγμα και το σύστημα παρουσίασης (μεγένθυση-παρουσίαση-καταγραφή). Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι ανιχνευτές δευτερογενών ηλεκτρονίων όπως ο ανιχνευτής Everhart – Thornley (ETD), ο ανιχνευτής ευρέως πεδίου (Large Field Detector, LFD), ο ανιχνευτής σε ατμοσφαιρική πίεση (Gaseous Electron Detector GED), ο ανιχνευτής διόδου στερεάς φάσης (Solid State Electron Detector, SSED) για τα οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια (BSE), καθώς και ο ανιχνευτής διόδου λιθίου – πυριτίου (SiLi), με τον οποίο ανιχνεύουμε ενεργειακή διασπορά ακτίνων - X (Energy Dispersive Spectrometer, EDS).

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης χρησιμοποιείται ευρύτατα σε όλα τα πεδία που μας ενδιαφέρει η γεωμετρία και η σύσταση της μικροδομής, σε μεγάλο αριθμό δειγμάτων, καθώς έχει το πλεονέκτημα της μεγάλης δυνατότητας εστίασης και αλλαγής μεγέθυνσης σε ένα ευρύ πεδίο, απαιτείται ελάχιστη προετοιμασία του δείγματος και προσφέρει τρισδιάστατα διαγράμματα. Με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης δίνεται η δυνατότητα να γίνονται ποσοτικές αναλύσεις με γεωμετρικές λεπτομέρειες και να γίνεται διαχωρισμός των φάσεων. Έτσι, μπορεί να μελετηθεί η διάβρωση, η επικάλυψη επιφανειών, καθώς και οι δομές των προστατευτικών επικαλυπτικών και η αποτελεσματικότητά τους. (Κούη, Μ., 2009 )

#### **8.4 Μετρήσεις αντίστασης σκυροδέματος**

Η ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος σχετίζεται με το ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα αφού η διάβρωση αποτελεί ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο και για να προκληθεί διάβρωση θα πρέπει το ιοντικό ρεύμα (ionic current), δηλαδή το ηλεκτρικό

ρεύμα με τη μορφή ροής φορτισμένων ιόντων στο νερό των πόρων να περάσει από τις ανόδους στις καθόδους.

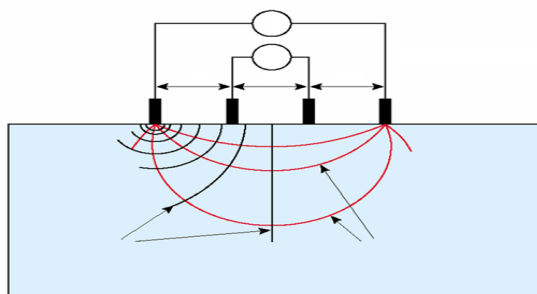
Για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μετρητής αντίστασης τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων (four probe resistivity meter) ή Wenner Probe. Ο συγκεκριμένος μετρητής δημιουργήθηκε αρχικά για τη μέτρηση της αντίστασης του εδάφους όμως με κάποιες εξειδικευμένες τροποποιήσεις χρησιμοποιείται συχνά για τη μέτρηση της αντίστασης του σκυροδέματος η οποία υποδηλώνει την πιθανότητα διάβρωσης αν ο χάλυβας αποπαθητικοποιηθεί.

Τα περισσότερα συστήματα μέτρησης της αντίστασης χρησιμοποιούν τέσσερα βοηθητικά ηλεκτρόδια, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.8.



**Εικόνα 8.1** Μετρητής αντίστασης τεσσάρων ηλεκτροδίων

Τα εξωτερικά ηλεκτρόδια περνούν το ρεύμα διαμέσου του σκυροδέματος ενώ τα εσωτερικά ανιχνεύουν τη διαφορά της τάσης. Ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 8.9.



**Σχήμα 8.8:** Τρόπος λειτουργίας του *Wenner probe*

**Πηγή:** *Canin, 2016*

Η αντίσταση  $\rho$  που μετράται, για ένα ημι-άπειρο ομογενές υλικό, δίνεται από τη Σχέση 8.23 (Broomfield, J.P., 2007):

$$\rho = 2 \pi \alpha \frac{V}{I} \quad (8.23)$$

όπου  $\alpha$ : είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων,

$I$ : είναι το εφαρμοζόμενο ρεύμα διαμέσου των εξωτερικών ηλεκτροδίων και

$V$ : είναι η τάση που μετρείται μεταξύ των εσωτερικών ηλεκτροδίων

Η ηλεκτρική αντίσταση αποτελεί ένδειξη της ποσότητας υγρασίας στους πόρους και του μεγέθους και της στρεβλότητας του συστήματος των πόρων. Το μέγεθος της αντίστασης επηρεάζεται από την ποιότητα του σκυροδέματος, η οποία επηρεάζεται από την περιεκτικότητα σε τσιμέντο, την αναλογία νερού/τσιμέντου, τη σκλήρυνση και τα πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν.

Το επίπεδο συγκέντρωσης των χλωριόντων δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αντίσταση αφού υπάρχουν ήδη πολλά ιόντα διαλυμένα στο νερό των πόρων και η παρουσία λίγων ιόντων παραπάνω δεν διαφοροποιεί σημαντικά την κατάσταση.

Ωστόσο τα χλωριόντα στο σκυρόδεμα μπορεί να είναι υγροσκοπικά, δηλαδή να προκαλούν περισσότερη συγκράτηση νερού στο σκυρόδεμα, και για το λόγο αυτό χρεώνεται συχνά στα χλωριόντα η συμβολή στη μείωση της αντίστασης του σκυροδέματος (Broomfield, J.P., 2007).

Η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος σχετίζεται συνήθως με το ρυθμό διάβρωσης. Στον Πίνακα 8.5 παρουσιάζεται ο επικρατέστερος τρόπος ερμηνείας των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης που λαμβάνεται με το σύστημα των τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων.

**Πίνακας 8.5. Εμπειρικός συσχετισμός της αντίστασης του σκυροδέματος που λαμβάνεται με το σύστημα των τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων**

| Αντίσταση σκυροδέματος<br>(concrete resistivity) | Ρυθμός διάβρωσης<br>(corrosion rate) |
|--|--------------------------------------|
| >20 kΩcm   | Χαμηλός                              |
| 10 – 20 kΩcm                                     | Χαμηλός μέχρι μέτριος                |
| 5 – 10 kΩcm                                      | Υψηλός                               |
| < 5 kΩcm   | Πολύ υψηλός                          |

Πηγή: Broomfield, 2007

Αντίστοιχα για την ερμηνεία των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης που λαμβάνεται με το σύστημα δύο βοηθητικών ηλεκτροδίων, στον Πίνακα 8.6 παρουσιάζεται ο συσχετισμός της αντίστασης του σκυροδέματος και του ρυθμού διάβρωσης.

**Πίνακας 8.6. Εμπειρικός συσχετισμός της αντίστασης του σκυροδέματος που λαμβάνεται με το σύστημα των δυο βοηθητικών ηλεκτροδίων**

| Αντίσταση σκυροδέματος<br>(concrete resistivity) | Ρυθμός διάβρωσης<br>(corrosion rate)                             |
|--|--|
| >100 kΩcm  | Δεν μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ ενεργού και παθητικού χάλυβα |
| 50 – 100 kΩcm                                    | Χαμηλός  |
| 10 – 50 kΩcm                                     | Μέτριος έως υψηλός   |
| < 10 kΩcm  | Δεν μπορεί να γίνει έλεγχος με την αντίσταση                     |

Πηγή: Broomfield, 2007

### 8.5 Βαθμός προστασίας

Η προστασία που προσφέρει ένα σύστημα έναντι της διάβρωσης του οπλισμού του σκυροδέματος αξιολογείται με τον προσδιορισμό του βαθμού προστασίας, όπως ορίζεται παρακάτω:

$$\text{βαθμός προστασίας (\%)} = \frac{(m' - m'')}{m'} * 100\% \quad (8.23)$$

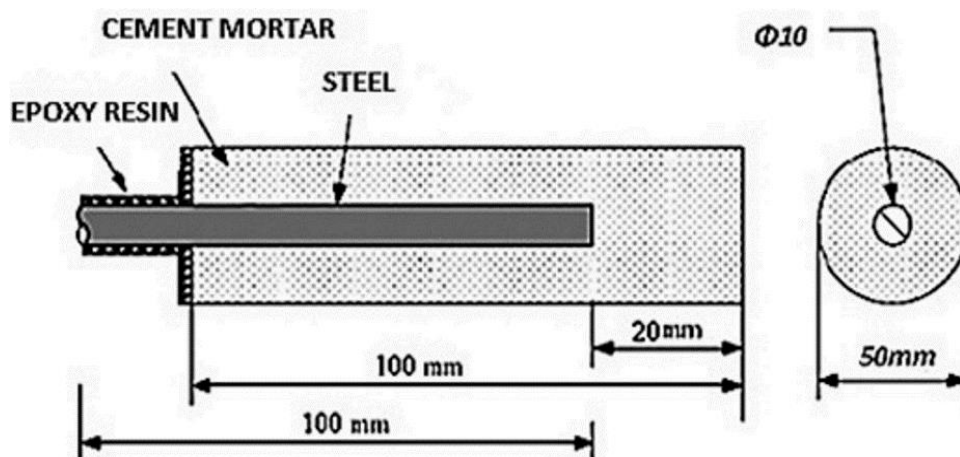
Όπου:  $m'$  η ποσοστιαία απώλεια βάρους των οπλισμών των δοκιμίων χωρίς προστασία και

$m''$  η ποσοστιαία απώλεια βάρους των οπλισμών των δοκιμίων με εφαρμογή προστατευτικού συστήματος

## 9 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΚΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

### 9.1. Δοκίμια κυλινδρικά τσιμεντοκονιάματος

Για την κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Portland CEM I 42.5N, ασβεστολιθική άμμος (0-4mm) και νερό δικτύου ΕΜΠ με σταθερό λόγο τσιμέντο: άμμος: νερό = 1:3:0.5. Κατασκευάστηκαν δοκίμια οπλισμένης τσιμεντοκονίας ύψους 100mm και διαμέτρου 50mm, στα οποία τοποθετήθηκε ομοαξονικά οπλισμός τύπου *Tempcore* B500C ύψους 100mm και διαμέτρου 10mm (ΕΛΟΤ 1421-37). Ο οπλισμός τοποθετήθηκε σε ύψος 20mm από τη βάση των δοκιμίων.



Σχήμα 9.1: Μορφή και διαστάσεις δοκιμίων τσιμεντοκονίας

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος έγινε καθαρισμός των ράβδων χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν και των καλουπιών στα οποία τοποθετείται ο τσιμεντοπολτός μέχρι τη σκλήρυνση.

Στα καλούπια απαιτείται καθαρισμός και λείανση της εσωτερικής επιφάνειάς τους πριν από κάθε χρήση τους ώστε να αποκολλούνται εύκολα τα δοκίμια μετά τη σκλήρυνση του τσιμεντοκονιάματος και να αποφεύγονται ανωμαλίες στην επιφάνειά τους.

Ο καθαρισμός των ράβδων χάλυβα που θα χρησιμοποιήθηκαν ως ενίσχυση καθώς πραγματοποιήθηκε με την τοποθέτησή τους σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος και παρέμειναν σε αυτό περίπου 10-15 λεπτά. Στη συνέχεια ξεπλύθηκαν διαδοχικά με νερό βρύσης, απιονισμένο νερό και τέλος εμβαπτίσθηκαν σε ακετόνη. Μετά τον καθαρισμό της επιφάνειας κάθε ράβδος ζυγίζεται σε ζυγό ακριβείας και καταγράφεται το βάρος της με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου (ISO/DIS 8407.3).

Ο οπλισμός μονώνεται από το περιβάλλον με την τοποθέτηση πλαστικού υλικού μικρής διαμέτρου γύρω από το προεξέχον άκρο του οπλισμού. Μέσα στο πλαστικό κομμάτι περιχύνεται μίγμα από κόλλα δύο συστατικών εποξειδικής ρητίνης σε αναλογία 1:0.8. Για να μην υπάρχει ροή της κόλλας στη περίμετρο των δοκιμών τοποθετείται αρχικά χαρτοταινία γύρω από κάθε δοκίμιο. Η διαδικασία εφαρμογής της κόλλας επαναλαμβάνεται 2 ή και 3 φορές, έως ότου υπάρξει πλήρης μόνωση του οπλισμού. Μετά απο την μόνωση των οπλισμών τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε κατάλληλα δοχεία με νερό και παρέμειναν για 2 ημέρες με σκοπό την ενυδάτωση των δοκιμών.

Στον παρακάτω Πίνακα 9.1 περιγράφονται αναλυτικά όλες οι ομάδες των δοκιμών.

**Πίνακας 9.1. Είδος και σύσταση κυλινδρικών δοκιμών τσιμεντοκονιάματος**

| α/α             | Είδος δοκιμών  | Σύσταση δοκιμών                    |
|-----------------|--|------------------------------------|
| <b>ΟΜΑΔΑ Α</b>  | Εφαρμογή των επικαλυπτικών i και ii της οργανικής επικάλυψης στην επιφάνεια του κονιάματος                                 | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.5 |
| <b>ΟΜΑΔΑ Β</b>  | Εφαρμογή των επικαλυπτικών i και ii της οργανικής επικάλυψης στην επιφάνεια του οπλισμού                                   | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.5 |
| <b>ΟΜΑΔΑ Γ</b>  | Εφαρμογή των επικαλυπτικών i και ii της οργανικής επικάλυψης στην επιφάνεια του κονιάματος και στην επιφάνεια του οπλισμού | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.5 |
| <b>ΟΜΑΔΑ Δ</b>  | Αναφοράς (Χωρίς εφαρμογή επικάλυψης)   | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.5 |
| <b>ΟΜΑΔΑ Α1</b> | Εφαρμογή του επικαλυπτικού i της οργανικής επικάλυψης στην επιφάνεια του κονιάματος  | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.5 |
| <b>ΟΜΑΔΑ Α2</b> | Εφαρμογή του επικαλυπτικού ii της οργανικής επικάλυψης στην επιφάνεια του κονιάματος                                       | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.5 |

Δοκίμια των ομάδων Α, Β, Γ και Δ των κυλινδρικών δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος εκτέθηκαν σε στην Ατμόσφαιρα της Πολυτεχνειούπολης στην περιοχή του Ζωγράφου, καθώς και σε διάλυμα 3,5% NaCl. Δοκίμια των ομάδων Α, Α1, Α2 και Δ τοποθετήθηκαν σε θάλαμος αλατονέφωσης και στη συνέχεια σε διάλυμα 3,5% NaCl.

### ***9.1.1. Κατασκευή δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος εκτεθειμένα σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον***

Κατασκευάστηκε μια ομάδα δοκιμίων από 8 δοκίμια από τα οποία στα 2 δοκίμια έχει εφαρμοστεί η οργανική επικάλυψη (i και ii επικαλυπτικά) στην εξωτερική επιφάνεια του κονιάματος (Ομάδα Α), στα 2 δοκίμια εφαρμόστηκε η επικάλυψη (i και ii επικαλυπτικά) στην επιφάνεια του οπλισμού (Ομάδα Β), στα 2 δοκίμια εφαρμόστηκε η οργανική επικάλυψη (i και ii επικαλυπτικά) τόσο στην επιφάνεια του οπλισμού όσο και στην εξωτερική επιφάνεια του κονιάματος (Ομάδα Γ) καθώς και 2 δοκίμια αναφοράς (Ομάδα Δ) στα οποία δεν εφαρμόστηκε η οργανική επικάλυψη.

#### ***9.1.1.1. Περιβάλλον έκθεσης***

Τα δοκίμια οπλισμένης τσιμεντοκονιάς παρέμειναν σε ατμοσφαιρικές συνθήκες στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου για 720 ημέρες.

#### ***9.1.1.2. Μέθοδοι χαρακτηρισμού***

Έγινε μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης των χαλύβων των τσιμεντοκονιαμάτων στην ατμόσφαιρα ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς για συνολικό διάστημα 720 ημερών ανά 15 ημέρες.

### ***9.1.2. Κατασκευή δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος σε θάλαμο αλατονέφωσης***

Κατασκευάστηκε μια ομάδα δοκιμίων από 12 δοκίμια από τα οποία στα 3 δοκίμια έχει εφαρμοστεί η πρώτη στρώση της επικάλυψης στην εξωτερική επιφάνεια του κονιάματος, στα 3 δοκίμια εφαρμόστηκε η δεύτερη στρώση της επικάλυψης στην εξωτερική επιφάνεια του κονιάματος, στα 3 δοκίμια εφαρμόστηκαν και οι δύο στρώσεις της επικάλυψης στην εξωτερική επιφάνεια του κονιάματος, ενώ 3 δοκίμια

αποτελούν τα δοκίμια αναφοράς, στα οποία δεν εφαρμόστηκε η οργανική επικάλυψη.

#### **9.1.2.1. Περιβάλλον έκθεσης**

Για την εκτίμηση της διάβρωσης σε επιταχυνόμενο περιβάλλον, τα δοκίμια όλων των κατηγοριών παρέμειναν σε θάλαμο αλατονέφωσης για 19 ημέρες και στη συνέχεια εμβαπτίστηκαν μεικώς σε διάλυμα 3,5 % κ.β. χλωριούχου νατρίου (NaCl) για 238 ημέρες.

Οι συνθήκες που επικρατούσαν εντός θαλάμου ήταν υγρασία RH=99%, θερμοκρασία 35 °C και NaCl 5% κ.β.

Η συσκευή αλατονέφωσης δημιουργεί σε ένα κλειστό θάλαμο (θάλαμος πειραμάτων) τις κατάλληλες συνθήκες ώστε να επιταχυνθεί η διάβρωση των εξεταζόμενων υλικών. Συνήθως επιδιώκεται οι συνθήκες αυτές να αναπαράγουν όσο το δυνατόν πιο πιστά τις επιπτώσεις από τις πραγματικές συνθήκες, εξασφαλίζοντας και την αύξηση του ρυθμού διάβρωσης.

Με τη ρύθμιση της θερμοκρασίας εντός του θαλάμου και τον ψεκασμό με κατάλληλο διαβρωτικό μέσο (συνήθως χρησιμοποιείται διάλυμα NaCl), επιτυγχάνονται οι κατάλληλες συνθήκες για την επιτάχυνση της διάβρωσης. Η θερμοκρασία στον θάλαμο πειραμάτων μεταβάλλεται από 15 °C έως 45 °C. Τα δοκίμια που βρίσκονται μέσα στο θάλαμο δέχονται την επίδραση του ομοιόμορφου ψεκασμού του διαλύματος που χρησιμοποιείται ως διαβρωτικό μέσο και υπόκεινται στους μηχανισμούς διάβρωσης.

Η συσκευή του θαλάμου αλατονέφωσης αποτελείται από:

- Τον θάλαμο πειραμάτων όπου τοποθετούνται τα υπό εξέταση υλικά. Το μεγεθός του διαφέρει ανάλογα με τον κατασκευαστή και είναι κατασκευασμένος από αντιδιαβρωτικά υλικά ή υλικά με ανθεκτική αντιδιαβρωτική επίστρωση. Ο θάλαμος δεν διαβρώνεται και μπορεί να αντέξει θερμικές και υγρομετρικές μεταβολές. Κλείνει με κατάλληλο κινητό κάλυμμα, το οποίο εφαρμόζει αεροστεγώς και αποτρέπει η απώλεια θερμότητας.

- Το σύστημα αποθήκευσης, τροφοδοσίας και εκνέφωσης του διαβρωτικού μέσου. Το σύστημα περιλαμβάνει κατάλληλη δεξαμενή όπου είναι αποθηκευμένο το διαβρωτικό μέσο, το οποίο οδηγείται σε κατάλληλο ακροφύσιο μέσα στο θάλαμο πειραμάτων μαζί με υγρό αέρα που προέρχεται από τον υγροποιητή, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια «ομίχλη» στο θάλαμο όπου βρίσκονται τα δοκίμια. Η θερμοκρασία της ρυθμίζεται από τη θερμοκρασία του υγρού αέρα που παράγει ο υγροποιητής.
- Το σύστημα ελέγχου και καταγραφής των συνθηκών μέσα στο θάλαμο πειραμάτων. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα Η/Υ και ένα μεγάλο πλήθος αισθητήρων που βρίσκεται κυρίως μέσα στο θάλαμο πειραμάτων. Ο Η/Υ καταγράφει τις ενδείξεις των αισθητήρων και τις συγκρίνει με κάποιες προδιαγεγραμμένες τιμές. Σε περίπτωση που οι ενδείξεις αποκλίνουν από τις αντίστοιχες προδιαγραφές τότε ο Η/Υ ενεργοποιεί κατάλληλες ηλεκτρομηχανικές/ ηλεκτρονικές διατάξεις που αποκαθιστούν τις επιθυμητές συνθήκες. Έτσι, με τη βοήθεια του Η/Υ η αλατονέφωση μπορεί να λειτουργεί αδιάκοπα για πολλές ημέρες ακολουθώντας ένα προδιαγεγραμμένο πρόγραμμα μεταβολών των συνθηκών μέσα στο θάλαμο των πειραμάτων.

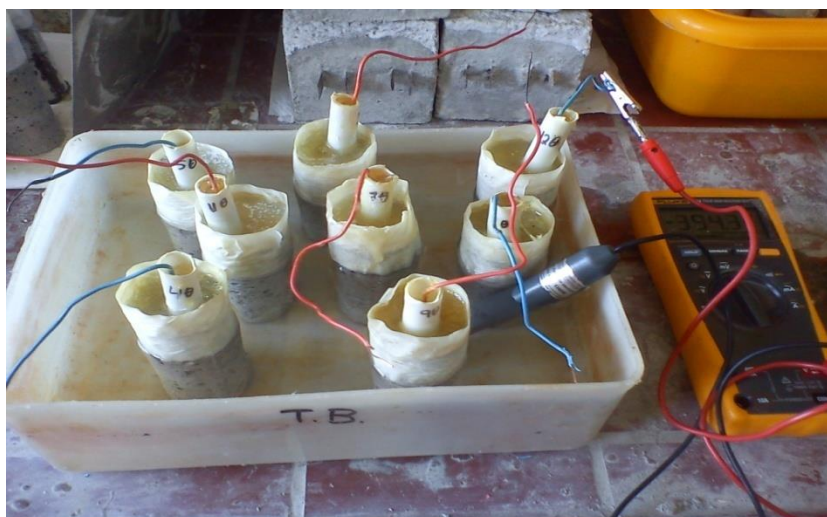
Ο θάλαμος αλατονέφωσης που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία της παρούσας εργασίας φαίνεται στην εικόνα 9.1.



**Εικόνα 9.1 Θάλαμος αλατονέφωσης**

### **9.1.2.2. Μέθοδοι χαρακτηρισμού**

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της διάβρωσης είναι η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης των χαλύβων των τσιμεντοκονιαμάτων ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς, το οποίο προσφέρει πληροφορίες για την πιθανότητα διάβρωσής του. Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρόδιο Ag/AgCl στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσης διατριβής. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς τοποθετήθηκε στο διάλυμα χλωριούχου νατρίου στο οποίο ήταν εμβαπτισμένα τα δοκίμια και το ηλεκτρόδιο μέτρησης συνδέθηκε μέσω ηλεκτρικής επαφής με το χάλυβα του τσιμεντοκονιάματος. Κατά τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε ένα βολτόμετρο. Οι μετρήσεις του δυναμικού που ελήφθησαν για κάθε δοκίμιο κατεγράφησαν και αποτυπώθηκαν σε διαγράμματα, συναρτήσει του χρόνου.



**Εικόνα 9.2 Μέτρηση δυναμικού**

### **9.1.3. Κατασκευή δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος σε διάλυμα 3,5% NaCl**

Κατασκευάστηκε μια ομάδα δοκιμίων από 18 δοκίμια από τα οποία στα 6 δοκίμια έχει εφαρμοστεί η εφαρμοστεί η οργανική επικάλυψη (i και ii επικαλυπτικά) στην εξωτερική επιφάνεια του κονιάματος, στα 6 δοκίμια εφαρμόστηκε η οργανική επικάλυψη (i και ii επικαλυπτικά) στην επιφάνεια του οπλισμού και στα 6 δοκίμια εφαρμόστηκε η οργανική επικάλυψη (i και ii επικαλυπτικά) τόσο στην επιφάνεια του οπλισμού όσο και στην εξωτερική επιφάνεια του κονιάματος. Η επικάλυψη

εφαρμόστηκε με ψεκάσμο και στις τρεις κατηγορίες. Επίσης, κατασκευάστηκαν και 6 δοκίμια στα οποία δεν εφαρμόστηκε η οργανική επικάλυψη και χρησιμοποιήθηκαν ως δοκίμια αναφοράς.

#### **9.1.3.1. Περιβάλλον έκθεσης**

Τα δοκίμια όλων των κατηγοριών εκτέθηκαν σε μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl.

#### **9.1.3.2. Μέθοδοι χαρακτηρισμού**

Για την μελέτη της αποτελεσματικότητας των αναστολέων διάβρωσης χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος είναι η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης των χαλύβων των τσιμεντοκονιαμάτων και η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο προσδιορισμός αντίστασης γραμμικής πόλωσης.

#### **Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα**

Η μέτρηση του δυναμικού του χάλυβα ως προς κάποιο ηλεκτρόδιο αναφοράς προσφέρει πληροφορίες για την πιθανότητα διάβρωσής του. Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρόδιο Ag/AgCl στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσης διατριβής. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς τοποθετήθηκε στο διάλυμα χλωριούχου νατρίου στο οποίο ήταν εμβαπτισμένα τα δοκίμια και το ηλεκτρόδιο μέτρησης συνδέθηκε μέσω ηλεκτρικής επαφής με το χάλυβα του τσιμεντοκονιάματος. Κατά τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε ένα βολτόμετρο. Οι μετρήσεις του δυναμικού που ελήφθησαν για κάθε δοκίμιο κατεγράφησαν και αποτυπώθηκαν σε διαγράμματα, συναρτήσεως του χρόνου.

Η μέθοδος αυτή είναι απλή στην εφαρμογή της και γρήγορη και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ευρύτατα και σύμφωνα με τον ASTM C 876-87, από τις τιμές του μετρούμενου δυναμικού, μπορούν να εξαχθούν τα εξής ενδεχόμενα:

Όταν  $E > -100$  mV, κατά πιθανότητα 90%, δεν συμβαίνει διάβρωση.

Όταν  $E < -250$  mV, κατά πιθανότητα 90%, συμβαίνει διάβρωση.

Όταν  $-100$  mV  $> E > -250$ , δεν είναι βέβαιο αν συμβαίνει ή όχι διάβρωση.

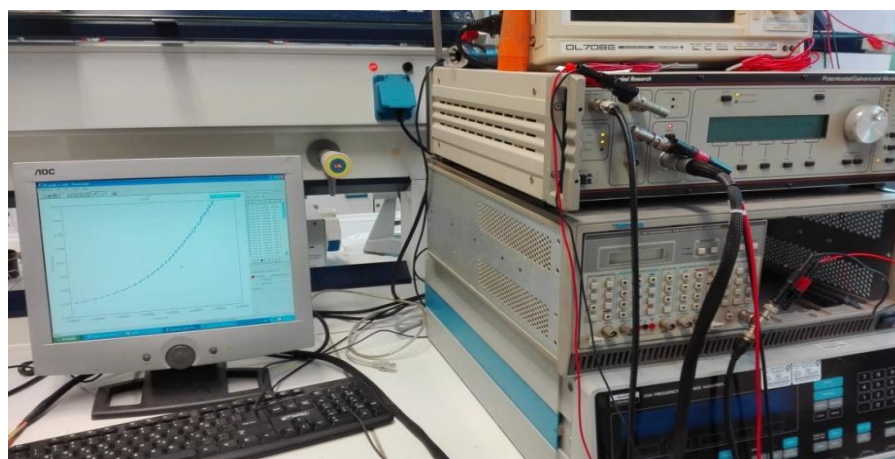
### **Γραμμική Πόλωση**

Για την εφαρμογή της μεθόδου, απαιτείται να προσδιοριστεί πρώτα το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα. Εφαρμόζονται διάφορα δυναμικά στο χάλυβα και μετράται κάθε φορά το ρεύμα αποκρίσεως. Τα εφαρμοζόμενα δυναμικά είναι μερικές δεκάδες mV μεγαλύτερα και μικρότερα από το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα. Με τις τιμές του δυναμικού  $E$  και τις αντίστοιχες τιμές εντάσεως ρεύματος  $I$ , συντάσσεται το διάγραμμα  $E - I$  το οποίο ονομάζεται καμπύλη πόλωσης. Παθητικότητα στον χάλυβα υπάρχει όταν η μεταβολή  $\Delta E/\Delta I$  είναι μεγάλη (μεγάλη αντίσταση πόλωσης). Όταν η κλίση της καμπύλης γίνεται σχεδόν μηδενική (δηλαδή όταν για μικρή αύξηση στο δυναμικό, παρατηρούνται μεγάλες αυξήσεις στην ένταση ρεύματος), η σχετική περιοχή χαρακτηρίζεται ως «μεταπαθητική περιοχή» (μετά από κάποιο δυναμικό ETP). Όταν συμβαίνει τοπική διάβρωση, η παθητικότητα στο χάλυβα χάνεται για μικρότερες τιμές του δυναμικού σε σχέση με το δυναμικό ETP της γενικής διάβρωσης του χάλυβα.

Η μέθοδος ελέγχου της διάβρωσης του χάλυβα με τη σύνταξη των καμπυλών πόλωσης έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να ελέγχει την επίδραση των πρόσθετων σκυροδέματος πάνω στη διάβρωση του χάλυβα καθώς και την επιρροή των μεταβολών των συνθηκών του περιβάλλοντος πάνω στη διάβρωση του χάλυβα. Παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα ότι απαιτεί ώρες ή ακόμα και μέρες για να πραγματοποιηθεί κυρίως όταν πρόκειται για μετρήσεις σε εξωτερικούς χώρους. Ο αριθμός των μετρήσεων σε αυτήν την περίπτωση περιορίζεται και υπάρχει και ο κίνδυνος λανθασμένης σύνταξης των καμπυλών. Εφαρμογή δυναμικών αρκετά διαφορετικών από το δυναμικό διάβρωσης μπορεί να μεταβάλλει τη διεπιφάνεια μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών μετρήσεων περιελάμβανε ποτενσιοστάτη / γαλβανοστάτη της E.G & Model 263 συνδεδεμένο με υπολογιστή για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων. Για την επεξεργασία των ηλεκτροχημικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε λογισμικό Softcorr III της εταιρίας E G & G Princeton Research. Κατά την διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων χρησιμοποιούνται τρία ηλεκτρόδια. Ως ηλεκτρόδιο

αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο Ag/AgCl. Το ηλεκτρόδιο εργασίας είναι ο υπό εξέταση οπλισμός, ενώ ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκαν μπάρες γραφίτη οι οποίες εφάπτονται στην επιφάνεια του δοκιμίου και είναι βραχυκυκλωμένες μεταξύ τους. Ο ηλεκτρολύτης ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ήταν το διαβρωτικό διάλυμα.



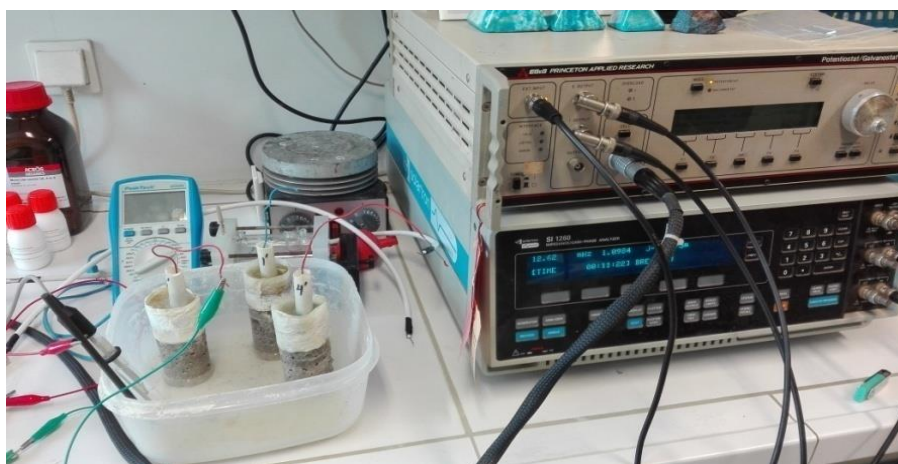
**Εικόνα 9.3 Πειραματική διάταξη για την διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών μετρήσεων**

### **Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης**

Για τις μετρήσεις της ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης χρησιμοποιήθηκε το ίδιο ηλεκτροχημικό κελί που χρησιμοποιήθηκε και για τις μετρήσεις της γραμμικής πόλωσης. Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο Ag/AgCl. Το ηλεκτρόδιο εργασίας είναι ο υπό εξέταση οπλισμός, ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκε μπάρα γραφίτη και ηλεκτρολύτης ήταν το διαβρωτικό περιβάλλον (υδατικό διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl). Οι μετρήσεις έγιναν σε συνθήκες περιβάλλοντος με τον ηλεκτρολύτη (υδατικό διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl).

Για την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης χρησιμοποιήθηκε ποτενσιοστάτης / γαλβανοστάτης τύπου 263A από την EG&G Princeton Applied Research, καθώς και γεννήτρια παλμών 1260 Impedance Gain-Phase Analyzer της Solartron (εικόνα 9.3). Η γεννήτρια έχει τη δυνατότητα ημιτονοειδούς μεταβολής του δυναμικού μεταβλητής συχνότητας (Καραντώνης Α. & Δραγατογιάννης Δ., 2009). Για την ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το

αντίστοιχο λογισμικό Zplot της Solartron και για την επεξεργασία τους το Zview της Solartron.



**Εικόνα 9.4 Πειραματική διάταξη για την διεξαγωγή των μετρήσεων ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης**

Πριν από κάθε μέτρηση, το βυθισμένο στον ηλεκτρολύτη δοκίμιο σπλισμένου τσιμεντοκονιάματος έμενε σε ανοικτό κύκλωμα μέχρι τη σταθεροποίηση του δυναμικού του, τιμή που αναφέρεται ως δυναμικό διάβρωσης,  $E_{corr}$ . Οι μετρήσεις της ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης (EIS) πραγματοποιήθηκαν με την επιβολή ημιτονοειδούς διέγερσης μικρού πλάτους (10 mV) σε εύρος συχνοτήτων από 1 MHz έως 1 mHz και καταγραφή του μέτρου της σύνθετης αντίστασης και της διαφοράς φάσης. Με μια λογαριθμική σάρωση συχνοτήτων λαμβάνεται κάθε τιμή.

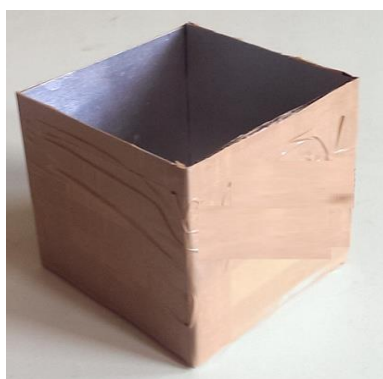
## **9.2 Δοκίμια τσιμεντοκονιάματος κυβικά**

### **9.2.1. Δοκίμια με αναλογία τσιμέντου:άμμου:νερού 1:3:0.50 και 1:3:0.65**

Για την κατασκευή των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος αναμίχθηκαν τσιμέντο Portland (EN 197-1) τύπου CEM II/B-M(P-W-L) 42,5N και ασβεστολιθική άμμος (EN 12620), και προστέθηκε ποσότητα διαλύματος NaCl 5kg/m<sup>3</sup>.

Κατασκευάστηκαν δύο ομάδες κυβικών δοκιμίων. Στην πρώτη ομάδα η αναλογία τσιμέντου:άμμου:νερού είναι 1:3:0.5, ενώ στη δεύτερη ομάδα η αναλογία είναι 1:3:0.65.

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος έγινε καθαρισμός των καλούπιών μέσα στα οποία τοποθετήθηκε ο τσιμεντοπολτός μέχρι τη σκλήρυνση και λείανση της εσωτερικής επιφάνειάς τους έτσι ώστε να αποκολλούνται εύκολα τα δοκίμια μετά την σκλήρυνση του τσιμεντοκονιάματος, αλλά και να αποφεύγονται ανωμαλίες στην επιφάνειά τους.



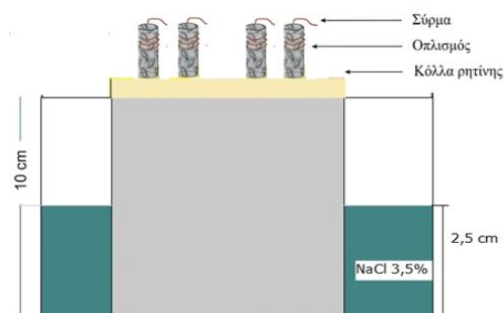
**Εικόνα 9.5 Κυβικό καλούπι από ανοξείδωτο χάλυβα διαστάσεων 10cm X 10cm**

Επίσης έγινε καθαρισμός των ράβδων χάλυβα που θα χρησιμοποιήθηκαν ως ενίσχυση καθώς. Οι ράβδοι του χάλυβα τοποθετήθηκαν σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος και παρέμειναν σε αυτό περίπου 10-15 λεπτά. Στη συνέχεια ξεπλύθηκαν διαδοχικά με νερό βρύσης, απιονισμένο νερό και τέλος εμβαπίστηκαν σε ακετόνη. Η διαδικασία καθαρισμού του χάλυβα είναι πολύ σημαντική και γίνεται με σκοπό την ενεργοποίηση της επιφάνειάς του, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί καλύτερη πρόσδεση με το τσιμεντοκονίαμα, όταν ο χάλυβας θα τοποθετηθεί μέσα σε αυτό. Τέλος με τη διαδικασία αυτή απομακρύνονται σκόνες και οξείδια από την επιφάνειά του καθώς και άλλα ανεπιθύμητα σωματίδια. Μετά τον καθαρισμό της επιφάνειας κάθε ράβδος ζυγίζεται σε ζυγό ακριβείας και καταγράφεται το βάρος της με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου (ISO/DIS 8407.3). Οι οπλισμοί έχουν μήκος 10cm και διάμετρο 1cm.

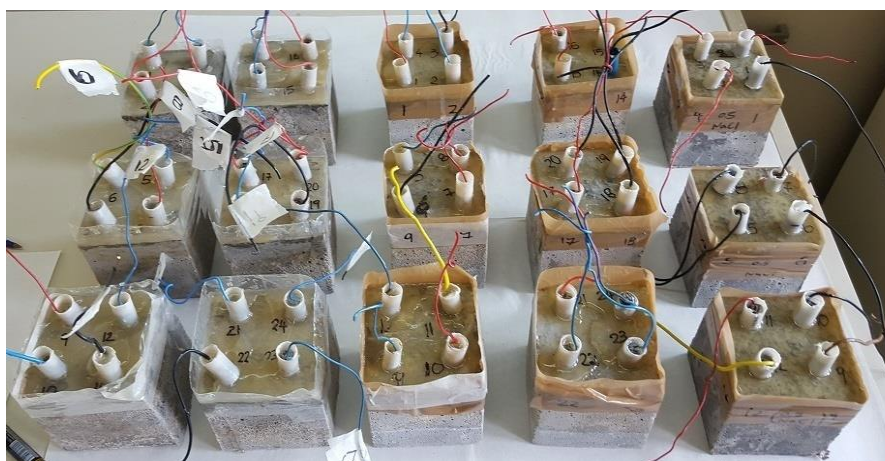
Στα δοκίμια τοποθετήθηκαν τοποθετούνται 4 οπλισμοί σε κάθε δοκίμιο. Μετά από 3 ημέρες το τσιμεντοκονίαμα είχε πλέον στερεοποιηθεί και έτσι τα δοκίμια απομακρύνθηκαν από τα καλούπια. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε πλαστικό υλικό μικρής διαμέτρου γύρω από το προεξέχον άκρο του οπλισμού και μέσα στο πλαστικό κομμάτι περιχύνεται μίγμα από κόλλα δύο συστατικών εποξειδικής ρητίνης σε

αναλογία 1:0.8 με σκοπό τη μόνωση του οπλισμού από το περιβάλλον. Μετά απο τη μόνωση των οπλισμών τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε κατάλληλα δοχεία με νερό και παρέμειναν για 28 ημέρες με σκοπό την ενυδάτωση των δοκιμίων.

Στο σχήμα 9.2 και στην εικόνα 9.5 φαίνεται η μορφή των κυβικών δοκιμίων.



**Σχήμα 9.2: Μορφή των κυβικών δοκιμίων**



**Εικόνα 9.6 Ομάδες δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα**

Ο πρόσμικτος αναστολέας προστέθηκε στο διάλυμα  $\text{NaCl } 5\text{kg/m}^3$  αντίστοιχα με την περιεκτικότητα.

Στους Πίνακες 9.2 και 9.3 περιγράφονται αναλυτικά όλες οι ομάδες των δοκιμίων.

**Πίνακας 9.2. Είδος και σύσταση δοκιμών με ψεκαζόμενο αναστολέα**

| a/a                   | Είδος δοκιμών                        | Αριθμός δοκιμών | Σύσταση δοκιμών   |
|-----------------------|--------------------------------------|-----------------|---|
| <b>ΨΕΚ I (0.5)</b>    | Ψεκαζόμενος αναστολέας 1             | 3               | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.5<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u>  |
| <b>ΨΕΚ II (0.5)</b>   | Ψεκαζόμενος αναστολέας 2             | 3               | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.5<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u>  |
| <b>ΨΕΚ III (0.5)</b>  | Ψεκαζόμενος αναστολέας 3             | 3               | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.5<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u>  |
| <b>ΨΕΚ IV (0.5)</b>   | Ψεκαζόμενος αναστολέας 4             | 3               | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.5<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u>  |
| <b>ΑΝΑΦ (0.5)</b>     | Αναφοράς (Χωρίς αναστολέα διάβρωσης) | 3               | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.5<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u>  |
| <b>ΨΕΚ I (0.65)</b>   | Ψεκαζόμενος αναστολέας 1             | 3               | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.65<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u> |
| <b>ΨΕΚ II (0.65)</b>  | Ψεκαζόμενος αναστολέας 2             | 3               | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.65<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u> |
| <b>ΨΕΚ III (0.65)</b> | Ψεκαζόμενος αναστολέας 3             | 3               | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.65<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u> |
| <b>ΨΕΚ IV (0.65)</b>  | Ψεκαζόμενος αναστολέας 4             | 3               | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.65<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u> |
| <b>ΑΝΑΦ (0.65)</b>    | Αναφοράς (Χωρίς αναστολέα διάβρωσης) | 3               | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.65<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u> |

Όπου:

ο Ψεκαζόμενος αναστολέας 1 βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ )

ο Ψεκαζόμενος αναστολέας 2 βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ )

Ο Ψεκαζόμενος αναστολέας 1 και ο Ψεκαζόμενος αναστολέας 2 διαφοροποιούνται ως προς τη συγκέντρωση και το είδος των οργανικών οξέων που συνοδεύουν τον αναστολέα διάβρωσης.

ο Ψεκαζόμενος αναστολέας 3 βασίζεται στη Διμεθυλ-αιθανόλ-αμίνη ( $(\text{CH}_3)_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ )

ο Ψεκαζόμενος αναστολέας 4 βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ).

**Πίνακας 9.3. Είδος και σύσταση δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα**

| α/α                           | Είδος δοκιμίων                                       | Αριθμός δοκιμίων | Σύσταση δοκιμίων  |
|-------------------------------|--|------------------|---|
| <b>ΠΡΟΣΜ Ι<br/>4% (0.5)</b>   | Χρήση αναστολέα 5 (4%κ.β. cem) ως πρόσθετο           | 3                | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.5<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u>  |
| <b>ΠΡΟΣΜ ΙΙ<br/>4% (0.5)</b>  | Χρήση αναστολέα 4 (4%κ.β. cem) ως πρόσθετο           | 3                | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.5<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u>  |
| <b>ΠΡΟΣΜ Ι<br/>8% (0.5)</b>   | Χρήση αναστολέα 5 (8%κ.β. cem) ως πρόσθετο           | 3                | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.5<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u>  |
| <b>ΑΝΑΦ (0.5)</b>             | Αναφοράς (Χωρίς αναστολέα διάβρωσης)                 | 3                | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.5<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u>  |
| <b>ΠΡΟΣΜ Ι<br/>4% (0.65)</b>  | Χρήση αναστολέα διάβρωσης 5 (4%κ.β. cem) ως πρόσθετο | 3                | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.65<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u> |
| <b>ΠΡΟΣΜ ΙΙ<br/>4% (0.65)</b> | Χρήση αναστολέα διάβρωσης 4 (4%κ.β. cem) ως πρόσθετο | 3                | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.65<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u> |
| <b>ΠΡΟΣΜ Ι<br/>8% (0.65)</b>  | Χρήση αναστολέα διάβρωσης 5 (8%κ.β. cem) ως πρόσθετο | 3                | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.65<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u> |
| <b>ΑΝΑΦ (0.65)</b>            | Αναφοράς (Χωρίς αναστολέα διάβρωσης)                 | 3                | Τσιμέντο/ Άμμος/ Νερό<br>1/ 3/ 0.65<br><u>Προσθήκη NaCl 5kg/m<sup>3</sup></u> |

Ο αναστολέας 5 που χρησιμοποιήθηκε ως πρόσμικτος βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) και ο αναστολέας 4 βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ).

### 9.2.2. Περιβάλλον έκθεσης

Τα δοκίμια όλων των κατηγοριών εκτέθηκαν σε μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl.

### 9.2.3. Μέθοδοι χαρακτηρισμού

Για την μελέτη της αποτελεσματικότητας των αναστολέων διάβρωσης χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος είναι η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης των χαλύβων των τσιμεντοκονιαμάτων και η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο προσδιορισμός αντίστασης γραμμικής πόλωσης.

#### Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα

Η μέτρηση του δυναμικού του χάλυβα ως προς κάποιο ηλεκτρόδιο αναφοράς προσφέρει πληροφορίες για την πιθανότητα διάβρωσής του. Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρόδιο Ag/AgCl στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσης διατριβής. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς τοποθετήθηκε στο διάλυμα χλωριούχου νατρίου στο οποίο ήταν εμβαπτισμένα τα δοκίμια και το ηλεκτρόδιο μέτρησης συνδέθηκε μέσω ηλεκτρικής επαφής με το χάλυβα του τσιμεντοκονιάματος. Κατά τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε ένα βολτόμετρο. Οι μετρήσεις του δυναμικού που ελήφθησαν για κάθε δοκίμιο κατεγράφησαν και αποτυπώθηκαν σε διαγράμματα, συναρτήσει του χρόνου.

Η μέθοδος αυτή είναι απλή στην εφαρμογή της και γρήγορη και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ευρύτατα και σύμφωνα με τον ASTM C 876-87, από τις τιμές του μετρούμενου δυναμικού, μπορούν να εξαχθούν τα εξής ενδεχόμενα:

Όταν  $E > -100$  mV, κατά πιθανότητα 90%, δεν συμβαίνει διάβρωση.

Όταν  $E < -250$  mV, κατά πιθανότητα 90%, συμβαίνει διάβρωση.

Όταν  $-100$  mV  $> E > -250$ , δεν είναι βέβαιο αν συμβαίνει ή όχι διάβρωση.

#### Γραμμική Πόλωση

Για την εφαρμογή της μεθόδου, απαιτείται να προσδιοριστεί πρώτα το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα. Εφαρμόζονται διάφορα δυναμικά στο χάλυβα και μετράται κάθε φορά το ρεύμα αποκρίσεως. Τα εφαρμοζόμενα δυναμικά είναι μερικές δεκάδες mV μεγαλύτερα και μικρότερα από το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα. Με τις τιμές του δυναμικού  $E$  και τις αντίστοιχες τιμές εντάσεως ρεύματος  $I$ , συντάσσεται το διάγραμμα  $E - I$  το οποίο ονομάζεται καμπύλη πόλωσης. Παθητικότητα στον χάλυβα υπάρχει όταν η μεταβολή  $\Delta E/\Delta I$  είναι μεγάλη (μεγάλη αντίσταση πόλωσης). Όταν η

κλίση της καμπύλης γίνεται σχεδόν μηδενική (δηλαδή όταν για μικρή αύξηση στο δυναμικό, παρατηρούνται μεγάλες αυξήσεις στην ένταση ρεύματος), η σχετική περιοχή χαρακτηρίζεται ως «μεταπαθητική περιοχή» (μετά από κάποιο δυναμικό ETP).

Όταν συμβαίνει τοπική διάβρωση, η παθητικότητα στο χάλυβα χάνεται για μικρότερες τιμές του δυναμικού σε σχέση με το δυναμικό ETP της γενικής διάβρωσης του χάλυβα.

Η μέθοδος ελέγχου της διάβρωσης του χάλυβα με τη σύνταξη των καμπυλών πόλωσης έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να ελέγχει την επίδραση των πρόσθετων σκυροδέματος πάνω στη διάβρωση του χάλυβα καθώς και την επιρροή των μεταβολών των συνθηκών του περιβάλλοντος πάνω στη διάβρωση του χάλυβα.

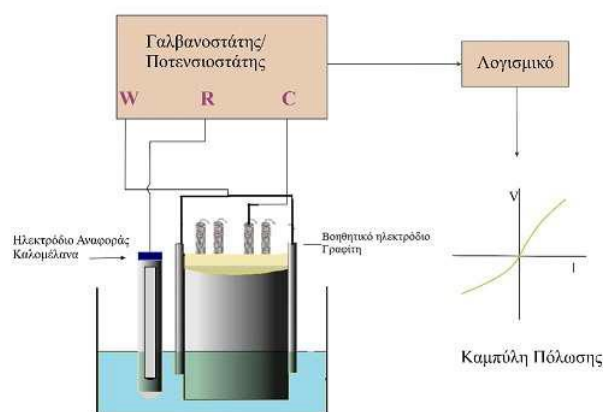
Παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα ότι απαιτεί ώρες ή ακόμα και μέρες για να πραγματοποιηθεί κυρίως όταν πρόκειται για μετρήσεις σε εξωτερικούς χώρους. Ο αριθμός των μετρήσεων σε αυτήν την περίπτωση περιορίζεται και υπάρχει και ο κίνδυνος λανθασμένης σύνταξης των καμπυλών. Εφαρμογή δυναμικών αρκετά διαφορετικών από το δυναμικό διάβρωσης μπορεί να μεταβάλλει τη διεπιφάνεια μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών μετρήσεων περιελάμβανε ποτενσιοστάτη / γαλβανοστάτη της E.G & Model 263 συνδεδεμένο με υπολογιστή για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων.



**Εικόνα 9.7 Ποτενσιοστάτης γραμμικής πόλωσης E.G & Model 263**

Για την επεξεργασία των ηλεκτροχημικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε λογισμικό Softcorr III της εταιρίας E G & G Princeton Research. Κατά την διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων χρησιμοποιούνται τρία ηλεκτρόδια. Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο Ag/AgCl, ως ηλεκτρόδιο εργασίας είναι ο υπό εξέταση οπλισμός, ενώ ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκαν μπάρες γραφίτη. Ο ηλεκτρολύτης ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ήταν το διαβρωτικό διάλυμα. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.3.



**Σχήμα 9.3: Πειραματική διάταξη**

Στην τεχνική γραμμικής πόλωσης ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος πολώθηκε σε μικρό εύρος δυναμικών  $\pm 20\text{mV}$  από το δυναμικό ισορροπίας του ( $E_{eq}$ ) και ελήφθη διάγραμμα σάρωσης των δυναμικών συναρτήσει της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης. Στην περιοχή κοντά στο  $I = 0$  (A), η συνάρτηση του δυναμικού ως προς την πυκνότητα του ρεύματος ακολουθεί τον νόμο του Ohm (γραμμική μεταβολή ρεύματος ως προς δυναμικό). Για κάθε μέτρηση δοκιμίου, βρίσκεται το δυναμικό διάβρωσης (για  $I=0$ ) καθώς και η αντίσταση διάβρωσης  $R_p$  ( $\Omega$ ). Οι μετρήσεις με τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης λάμβαναν χώρα κάθε μήνα για όλα τα δοκίμια.

### 9.3. Δοκίμια άοπλα τσιμεντοκονιάματος διαστάσεων 28 x 20 x 5 εκ.

Για την κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Portland CEM I 42.5N, ασβεστολιθική άμμος (0-4mm) και νερό δικτύου ΕΜΠ με σταθερό λόγο τσιμέντο: άμμος: νερό = 1:3:0.5.

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος έγινε καθαρισμός των καλουπιών μέσα στα οποία τοποθετήθηκε ο τσιμεντοπολτός μέχρι τη σκλήρυνση και λείανση της εσωτερικής επιφάνειάς τους έτσι ώστε να αποκολλούνται εύκολα τα δοκίμια μετά την σκλήρυνση του τσιμεντοκονιάματος, αλλά και να αποφεύγονται ανωμαλίες στην επιφάνειά τους.



**Εικόνα 9.8 Δοκίμια άοπλα τσιμεντοκονιάματος διαστάσεων 28 x 20 x 5 εκ**

Κατασκευάστηκαν 2 άοπλα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος στα οποία εφαρμόστηκε η οργανική επικάλυψη ως εξής:

1. Δοκίμιο αναφοράς (χωρίς επικάλυψη)
2. Δοκίμιο με εφαρμογή των δύο επικαλυπτικών της οργανικής επικάλυψης (i και ii) στη μια επιφάνεια του δοκιμίου

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν 5 άοπλα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος διαστάσεων 28 x 20 x 5 εκ, στα οποία εφαρμόστηκε η οργανική επικάλυψη ως εξής:

1. Δοκίμιο αναφοράς (χωρίς επικάλυψη)
2. Δοκίμιο με εφαρμογή του πρώτου επικαλυπτικού (i) της οργανικής επικάλυψης στη μια επιφάνεια του δοκιμίου
3. Δοκίμιο με εφαρμογή του δεύτερου επικαλυπτικού (ii) της οργανικής επικάλυψης στη μια επιφάνεια του
4. Δοκίμιο με εφαρμογή και των δύο επικαλυπτικών (i και ii) της οργανικής επικάλυψης στη μια επιφάνεια του

5. Δοκίμιο με εφαρμογή δύο στρώσεων από το πρώτο επικαλυπτικό (i) και δύο στρώσεων από το δεύτερο επικαλυπτικό (ii) της οργανικής επικάλυψης στη μια επιφάνεια του.



**Εικόνα 9.9 Εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης σε άοπλα δοκίμια**

## **10. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

### **10.1. Κατηγορία I: Επίδραση οργανικής επικάλυψης στη διάβρωση οπλισμών**

#### ***10.1.1. Διάβρωση μακράς διάρκειας στην ατμόσφαιρα***

Για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης στην ατμόσφαιρα κατασκευάστηκαν 4 ομάδες δοκιμίων ως εξής:

Ομάδα Α: Δοκίμια με εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης (i και ii επικαλυπτικά) στην επιφάνεια του κονιάματος

Ομάδα Β: Δοκίμια με εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης (i και ii επικαλυπτικά) στην επιφάνεια του οπλισμού

Ομάδα Γ: Δοκίμια με εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης (i και ii επικαλυπτικά) στην επιφάνεια του κονιάματος και στην επιφάνεια του οπλισμού

Ομάδα Δ: Δοκίμια Αναφοράς (χωρίς επικάλυψη)

#### ***10.1.1.1. Χρονική εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης***

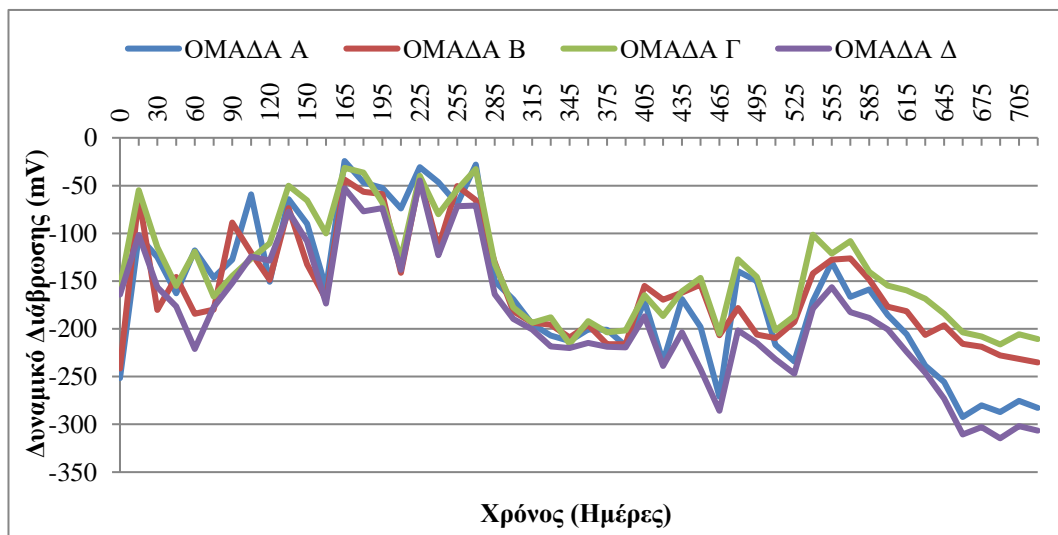
Το δυναμικό διάβρωσης των δοκιμίων για συνολικό χρόνο έκθεσης 720 ημερών στο περιβάλλον της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, μετρήθηκε σε τακτά χρονικά διαστήματα, ανά 15 ημέρες ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl.

Τα αναλυτικά αποτελέσματα του μέσου όρου των μετρήσεων των δυναμικών διάβρωσης για κάθε ομάδα δοκιμίων φαίνεται στον Πίνακα 10.1. Στο σχήμα 10.1 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου για όλες τις ομάδες δοκιμίων.

**Πίνακας 10.1. Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης σε ατμοσφαιρική διάβρωση**

| <b>Ημέρες</b> | <b>ΟΜΑΔΑ Α</b> | <b>ΟΜΑΔΑ Β</b> | <b>ΟΜΑΔΑ Γ</b> | <b>ΟΜΑΔΑ Δ</b> |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>0</b>      | -251,500       | -241,500       | -156,000       | -164,000       |
| <b>15</b>     | -102,700       | -61,700        | -54,950        | -101,900       |
| <b>30</b>     | -125,000       | -180,300       | -114,400       | -156,400       |
| <b>45</b>     | -162,800       | -145,600       | -154,950       | -176,550       |
| <b>60</b>     | -117,900       | -184,200       | -119,050       | -221,200       |
| <b>75</b>     | -146,450       | -179,950       | -166,250       | -177,300       |
| <b>90</b>     | -127,450       | -88,650        | -144,550       | -152,150       |
| <b>105</b>    | -59,350        | -120,250       | -126,700       | -124,300       |
| <b>120</b>    | -150,550       | -148,650       | -110,550       | -128,600       |
| <b>135</b>    | -64,350        | -73,750        | -50,300        | -77,150        |
| <b>150</b>    | -89,950        | -132,500       | -65,600        | -108,400       |
| <b>157</b>    | -157,300       | -169,200       | -100,100       | -173,400       |
| <b>165</b>    | -24,300        | -43,950        | -31,450        | -52,950        |
| <b>180</b>    | -46,750        | -56,400        | -36,250        | -77,100        |
| <b>195</b>    | -52,650        | -58,750        | -67,950        | -73,450        |
| <b>210</b>    | -73,950        | -141,400       | -126,250       | -138,200       |
| <b>225</b>    | -30,850        | -42,850        | -39,800        | -44,700        |
| <b>240</b>    | -46,400        | -115,000       | -79,850        | -122,950       |
| <b>255</b>    | -69,300        | -50,500        | -54,050        | -71,500        |
| <b>270</b>    | -28,200        | -65,250        | -32,850        | -70,800        |
| <b>285</b>    | -149,950       | -130,200       | -131,850       | -163,700       |
| <b>300</b>    | -169,000       | -181,500       | -177,500       | -189,450       |
| <b>315</b>    | -194,800       | -193,500       | -193,700       | -200,600       |
| <b>330</b>    | -206,950       | -195,450       | -187,950       | -218,300       |
| <b>345</b>    | -212,550       | -208,850       | -215,700       | -220,100       |
| <b>360</b>    | -200,650       | -196,000       | -192,000       | -214,700       |
| <b>375</b>    | -201,100       | -216,150       | -203,700       | -218,600       |
| <b>390</b>    | -217,650       | -216,150       | -201,500       | -219,350       |
| <b>405</b>    | -171,200       | -155,000       | -164,900       | -186,800       |
| <b>420</b>    | -234,450       | -169,350       | -186,600       | -238,900       |
| <b>435</b>    | -168,900       | -161,950       | -160,850       | -203,650       |
| <b>450</b>    | -197,800       | -153,700       | -146,600       | -242,200       |
| <b>465</b>    | -271,150       | -206,550       | -205,150       | -285,700       |
| <b>480</b>    | -139,550       | -178,200       | -127,200       | -201,650       |
| <b>495</b>    | -150,050       | -206,050       | -145,750       | -214,700       |
| <b>510</b>    | -216,800       | -209,650       | -201,700       | -231,900       |
| <b>525</b>    | -234,050       | -192,850       | -186,450       | -246,850       |
| <b>540</b>    | -170,700       | -142,000       | -101,450       | -178,950       |
| <b>555</b>    | -130,150       | -127,700       | -121,350       | -156,250       |
| <b>570</b>    | -166,400       | -126,400       | -108,200       | -182,400       |

| Ημέρες | ΟΜΑΔΑ Α  | ΟΜΑΔΑ Β  | ΟΜΑΔΑ Γ  | ΟΜΑΔΑ Δ  |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| 585    | -158,700 | -148,500 | -140,300 | -188,700 |
| 600    | -185,600 | -176,900 | -154,600 | -200,800 |
| 615    | -205,800 | -181,500 | -159,700 | -224,200 |
| 630    | -238,400 | -206,400 | -168,600 | -245,800 |
| 645    | -255,600 | -196,200 | -184,100 | -272,900 |
| 660    | -292,300 | -215,800 | -203,500 | -310,600 |
| 675    | -280,100 | -218,700 | -207,900 | -302,800 |
| 690    | -287,200 | -227,800 | -216,300 | -314,600 |
| 705    | -275,400 | -231,600 | -205,700 | -301,700 |
| 720    | -282,600 | -235,200 | -210,800 | -306,400 |



Σχήμα 10.1: Δυναμικό διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου για τα δοκίμια εκτεθειμένα σε ατμοσφαιρική διάβρωση

### Μερικό συμπέρασμα 1:

Από το σχήμα 10.1 προκύπτει ότι μετά τις 260 ημέρες το δυναμικό διάβρωσης φαίνεται να έχει ηλεκτροαρνητικότερες τιμές και για τις 4 ομάδες δοκιμίων. Καλύτερη διαβρωτική συμπεριφορά παρουσιάζουν τα δοκίμια της ομάδας Γ, ενώ τις πιο ηλεκτραρνητικές τιμές έχουν τα δοκίμια αναφοράς (ομάδα Δ). Μετά από 720 ημέρες (24 μήνες) παραμονής στην ατμόσφαιρα φαίνεται ότι τα δοκίμια με εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης (i και ii επικαλυπτικά) και στην επιφάνεια του κονιάματος και στην επιφάνεια του οπλισμού παρουσιάζουν ηλεκτροθετικότερες τιμές σε σχέση με τις άλλες ομάδες δοκιμίων, ενώ τα δοκίμια που δεν έχουν επικάλυψη παρουσιάζουν τις πιο ηλεκτραρνητικές τιμές (-300 mV).

### 10.1.1.2. Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας

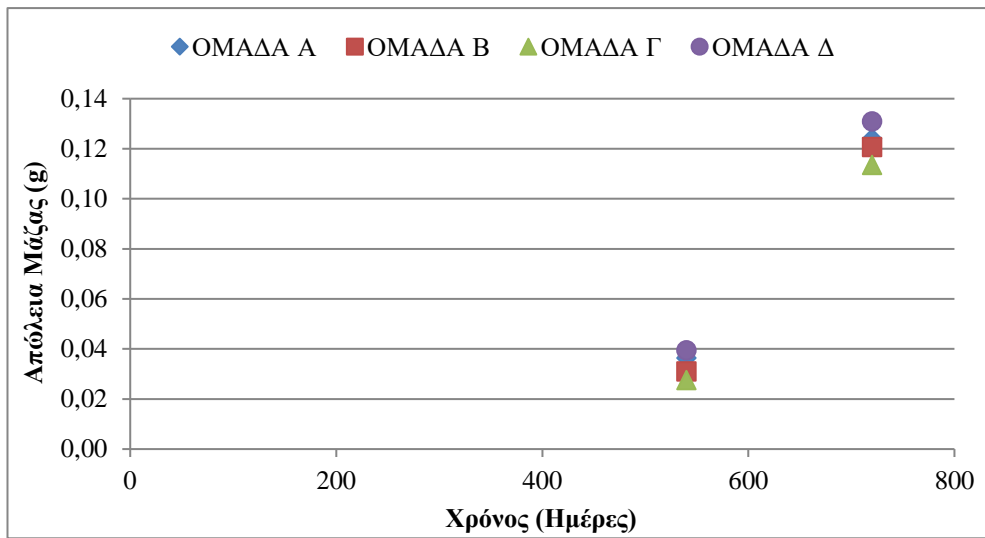
Για τον υπολογισμό της απώλειας μάζας των οπλισμών σπάστηκαν δοκίμια και από τις τέσσερις ομάδες δοκιμίων στις 540 ημέρες (18 μήνες) και στις 720 ημέρες (24 μήνες) από την ημερομηνία έκθεσης των δοκιμίων στην ατμόσφαιρα. Στους Πίνακες 10.2 και 10.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα απώλειας μάζας και για τις τέσσερις κατηγορίες δοκιμίων και στα σχήματα 10.2, 10.3, και 10.4 απεικονίζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

**Πίνακας 10.2. Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων σε ατμοσφαιρική διάβρωση (χρόνος έκθεσης 18 μήνες)**

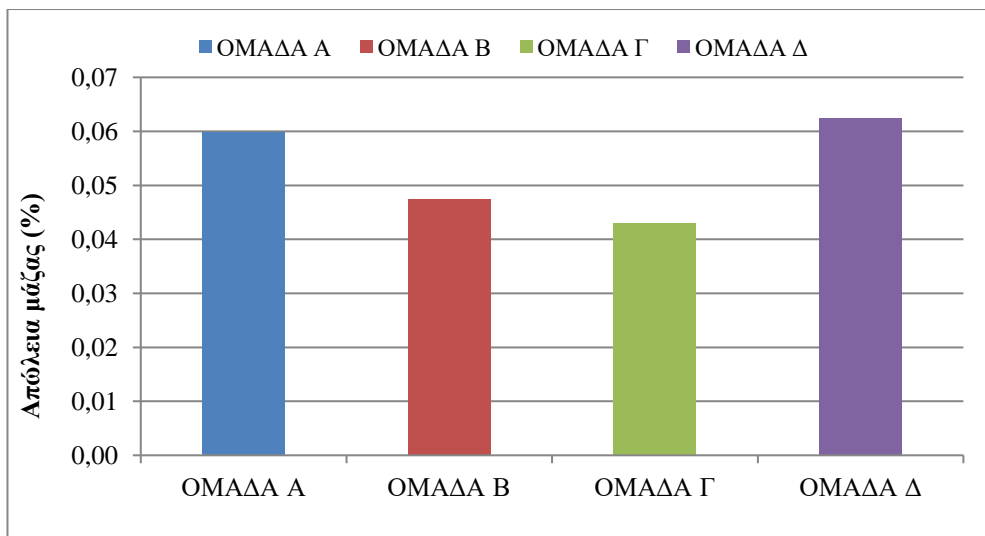
|                | παρχ (g) | μτελ (g) | Απώλεια Μάζας (g) | Απώλεια Μάζας (%) |
|----------------|----------|----------|-------------------|-------------------|
| <b>Ομάδα Α</b> | 60,6995  | 60,6632  | 0,0363            | 0,0598            |
| <b>Ομάδα Β</b> | 65,3338  | 65,3028  | 0,0310            | 0,0474            |
| <b>Ομάδα Γ</b> | 64,0573  | 64,0298  | 0,0275            | 0,0429            |
| <b>Ομάδα Δ</b> | 63,1922  | 63,1528  | 0,0394            | 0,0623            |

**Πίνακας 10.3. Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων σε ατμοσφαιρική διάβρωση (χρόνος έκθεσης 24 μήνες)**

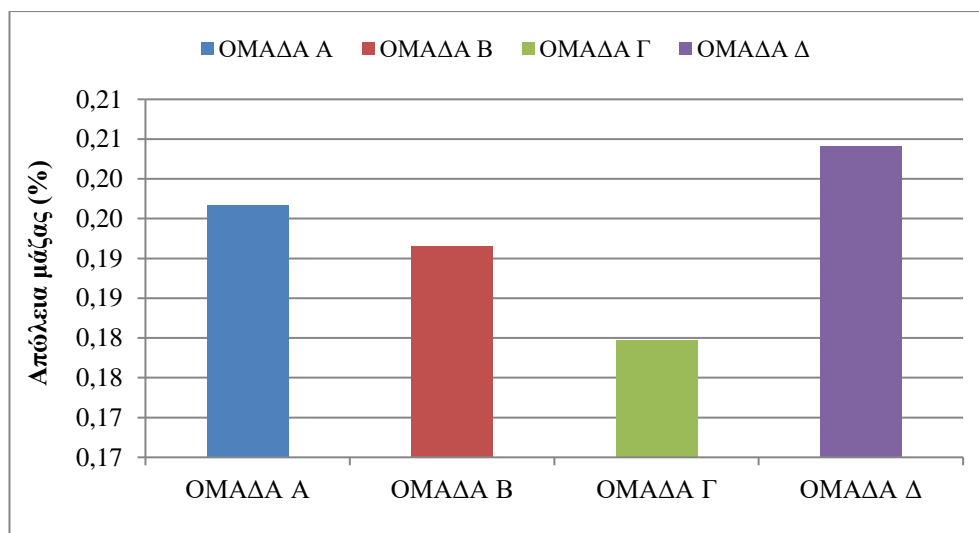
|                | παρχ (g) | μτελ (g) | Απώλεια Μάζας (g) | Απώλεια Μάζας (%) |
|----------------|----------|----------|-------------------|-------------------|
| <b>Ομάδα Α</b> | 62,9904  | 62,8665  | 0,1239            | 0,1967            |
| <b>Ομάδα Β</b> | 62,9904  | 62,8698  | 0,1206            | 0,1915            |
| <b>Ομάδα Γ</b> | 63,1525  | 63,039   | 0,1135            | 0,1797            |
| <b>Ομάδα Δ</b> | 64,1206  | 63,9897  | 0,1309            | 0,2041            |



**Σχήμα 10.2:** Απώλεια μάζας (g) των οπλισμών δοκιμίων και των τεσσάρων ομάδων σε ατμοσφαιρική διάβρωση



**Σχήμα 10.3:** Απώλεια μάζας (%) οπλισμών δοκιμίων και των τεσσάρων ομάδων σε ατμοσφαιρική διάβρωση (χρόνος έκθεσης 18 μήνες)



**Σχήμα 10.4:** Απώλεια μάζας (%) οπλισμών δοκιμίων και των τεσσάρων ομάδων σε ατμοσφαιρική διάβρωση (χρόνος έκθεσης 24 μήνες)

### Μερικό Συμπέρασμα 2:

Από τον παραπάνω πίνακα και τα αντίστοιχα διαγράμματα ατμοσφαιρικής έκθεσης των δοκιμίων οπλισμού τσιμεντοκονιάματος για 18 και 24 μήνες, παρατηρείται ότι τα δοκίμια που εκτέθηκαν στην ατμόσφαιρα παρουσίασαν μικρές τιμές απώλειας μάζας των οπλισμών. Αυτό οφείλεται και στο γεγονός ότι η διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος δεν είναι τόσο έντονη όσο η διαβρωτικότητα περιβάλλοντος προσομοίωσης θαλασσινού νερού. Παρατηρείται ότι τα δοκίμια των ομάδων Α, Β και Γ, στα οποία εφαρμόστηκε προστατευτικό σύστημα, είχαν μικρότερη απώλεια μάζας σε σχέση με τα δοκίμια της ομάδας Δ, στην οποία δεν έχει εφαρμοστεί προστασία.

Τα δοκίμια της ομάδας Γ, δηλαδή αυτά που η οργανική επικάλυψη εφαρμόστηκε τόσο στην επιφάνεια του κονιάματος όσο και στην επιφάνεια του οπλισμού, παρουσίασαν τη μικρότερη απώλεια μάζας σε σχέση με τις άλλες ομάδες δοκιμίων.

#### 10.1.2. Επιταχυνόμενη διάβρωση με μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5 % κ.β. NaCl

Για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης του χάλυβα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl κατασκευάστηκαν 4 ομάδες δοκιμίων ως εξής:

Ομάδα Α: Επικάλυψη (i και ii επικαλυπτικά) στην επιφάνεια του κονιάματος

Ομάδα Β: Επικάλυψη (i και ii επικαλυπτικά) στην επιφάνεια του οπλισμού

Ομάδα Γ: Επικάλυψη (i και ii επικαλυπτικά) στην επιφάνεια του κονιάματος και στην επιφάνεια του οπλισμού

Ομάδα Δ: Αναφοράς

#### 10.1.2.1. Χρονική εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης

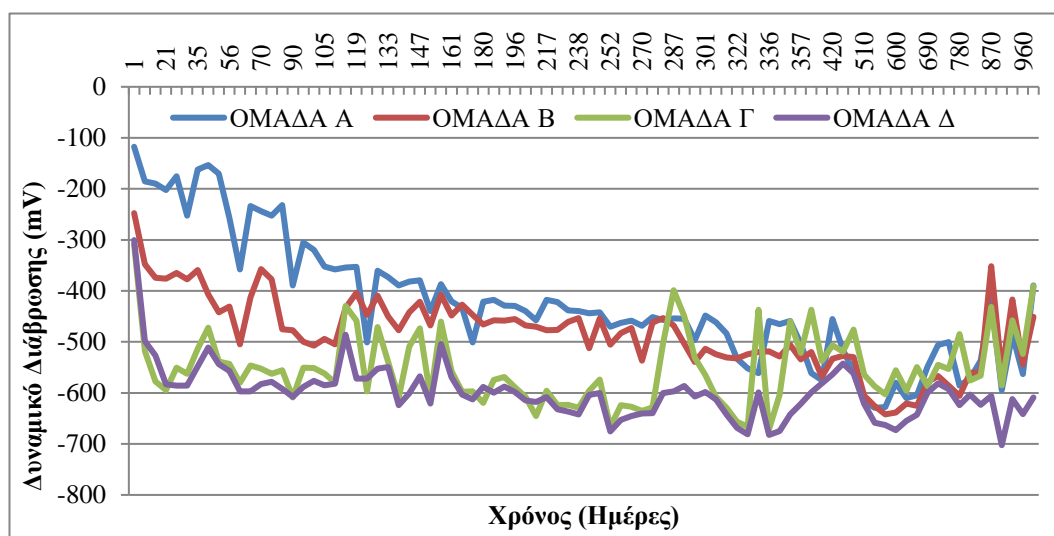
Το δυναμικό διάβρωσης των δοκιμίων για συνολικό χρόνο έκθεσης 34 μηνών στο διαβρωτικό περιβάλλον μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl, μετρήθηκε σε τακτά χρονικά διαστήματα (ανά 7 ημέρες για τον πρώτο χρόνο και ανά 30 ημέρες για το υπόλοιπο διάστημα) σε όλους τους οπλισμούς ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl. Τα αναλυτικά αποτελέσματα του μέσου όρου των μετρήσεων των δυναμικών διάβρωσης για κάθε ομάδα δοκιμίων φαίνεται στον Πίνακα 10.4. Στο σχήμα 10.5 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου για όλες τις ομάδες δοκιμίων .

**Πίνακας 10.4. Δυναμικό Διάβρωσης για 4 ομάδες δοκιμίων μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl**

| Ημέρες | Ομάδα Α  | Ομάδα Β  | Ομάδα Γ  | Ομάδα Δ  |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| 1      | -117,500 | -247,600 | -309,350 | -300,500 |
| 7      | -185,650 | -348,150 | -518,050 | -498,700 |
| 14     | -189,700 | -374,100 | -577,800 | -526,900 |
| 21     | -202,250 | -375,900 | -594,300 | -583,200 |
| 28     | -175,350 | -365,150 | -550,450 | -585,900 |
| 30     | -252,433 | -377,228 | -562,379 | -586,000 |
| 35     | -162,250 | -359,150 | -513,600 | -548,400 |
| 42     | -153,500 | -407,000 | -471,950 | -511,200 |
| 49     | -170,500 | -442,000 | -538,500 | -543,700 |
| 56     | -256,700 | -430,650 | -542,900 | -556,800 |
| 60     | -358,041 | -504,837 | -579,939 | -597,000 |
| 63     | -233,400 | -412,350 | -546,500 | -597,100 |
| 70     | -243,800 | -357,150 | -552,650 | -582,400 |
| 77     | -252,433 | -377,228 | -562,379 | -578,300 |
| 84     | -231,900 | -475,100 | -555,700 | -592,100 |
| 90     | -389,528 | -476,907 | -608,945 | -608,000 |
| 91     | -305,250 | -499,800 | -550,400 | -588,200 |
| 98     | -319,900 | -507,450 | -550,950 | -576,400 |
| 105    | -352,250 | -494,300 | -562,000 | -585,100 |
| 108    | -358,041 | -504,837 | -579,939 | -581,900 |
| 112    | -354,250 | -433,000 | -429,600 | -486,300 |

| <b>Ημέρες</b> | <b>Ομάδα Α</b> | <b>Ομάδα Β</b> | <b>Ομάδα Γ</b> | <b>Ομάδα Δ</b> |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>119</b>    | -353,150       | -403,550       | -458,600       | -572,100       |
| <b>120</b>    | -500,943       | -446,924       | -596,871       | -572,000       |
| <b>126</b>    | -360,500       | -409,550       | -470,900       | -552,700       |
| <b>133</b>    | -373,300       | -450,300       | -539,200       | -549,600       |
| <b>138</b>    | -389,528       | -476,907       | -608,945       | -624,200       |
| <b>140</b>    | -381,550       | -441,750       | -509,400       | -600,700       |
| <b>147</b>    | -379,450       | -421,400       | -473,700       | -567,800       |
| <b>150</b>    | -439,376       | -467,600       | -607,956       | -620,740       |
| <b>154</b>    | -386,900       | -407,400       | -460,000       | -504,300       |
| <b>161</b>    | -420,650       | -448,600       | -557,800       | -569,200       |
| <b>168</b>    | -433,200       | -426,800       | -597,600       | -603,100       |
| <b>175</b>    | -500,943       | -446,924       | -596,871       | -612,800       |
| <b>180</b>    | -421,350       | -465,807       | -619,680       | -587,972       |
| <b>182</b>    | -417,650       | -458,000       | -574,300       | -599,500       |
| <b>189</b>    | -428,750       | -458,100       | -568,950       | -587,400       |
| <b>196</b>    | -429,750       | -455,500       | -589,150       | -598,300       |
| <b>203</b>    | -439,376       | -467,600       | -607,956       | -614,512       |
| <b>210</b>    | -457,566       | -470,511       | -645,263       | -617,841       |
| <b>217</b>    | -417,700       | -477,250       | -596,050       | -608,400       |
| <b>224</b>    | -421,900       | -476,550       | -624,250       | -632,100       |
| <b>231</b>    | -438,350       | -460,900       | -623,350       | -636,800       |
| <b>238</b>    | -439,500       | -453,500       | -629,000       | -642,100       |
| <b>240</b>    | -444,073       | -512,374       | -595,588       | -603,667       |
| <b>245</b>    | -442,250       | -453,850       | -573,650       | -600,200       |
| <b>252</b>    | -470,000       | -505,500       | -666,500       | -675,300       |
| <b>259</b>    | -462,700       | -483,100       | -623,800       | -652,700       |
| <b>266</b>    | -458,500       | -472,500       | -627,350       | -645,100       |
| <b>270</b>    | -468,635       | -536,797       | -635,349       | -640,112       |
| <b>273</b>    | -451,200       | -462,000       | -628,650       | -639,800       |
| <b>280</b>    | -456,950       | -453,600       | -502,300       | -600,300       |
| <b>287</b>    | -453,950       | -468,100       | -398,550       | -597,200       |
| <b>294</b>    | -454,450       | -503,850       | -449,400       | -586,500       |
| <b>300</b>    | -496,352       | -539,383       | -531,020       | -607,217       |
| <b>301</b>    | -448,300       | -513,600       | -565,050       | -598,400       |
| <b>308</b>    | -461,350       | -524,250       | -607,700       | -612,800       |
| <b>315</b>    | -483,200       | -530,450       | -628,950       | -642,500       |
| <b>322</b>    | -533,100       | -532,400       | -656,700       | -668,700       |
| <b>329</b>    | -552,150       | -524,000       | -666,200       | -681,400       |
| <b>330</b>    | -561,162       | -519,729       | -437,193       | -598,665       |
| <b>336</b>    | -459,200       | -518,900       | -671,400       | -682,500       |
| <b>343</b>    | -465,100       | -528,400       | -603,100       | -674,800       |

| Ημέρες | Ομάδα Α  | Ομάδα Β  | Ομάδα Γ  | Ομάδα Δ  |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| 350    | -459,150 | -506,200 | -459,850 | -642,200 |
| 357    | -503,800 | -534,100 | -522,050 | -621,800 |
| 360    | -561,162 | -519,729 | -437,193 | -598,665 |
| 390    | -575,089 | -568,060 | -537,282 | -581,223 |
| 420    | -455,492 | -533,195 | -506,443 | -563,997 |
| 450    | -515,230 | -527,628 | -518,936 | -542,775 |
| 480    | -559,551 | -529,882 | -476,204 | -561,965 |
| 510    | -616,445 | -605,515 | -564,249 | -621,664 |
| 540    | -629,335 | -626,136 | -586,913 | -658,342 |
| 570    | -627,642 | -642,078 | -602,531 | -663,153 |
| 600    | -579,937 | -638,703 | -555,450 | -672,986 |
| 630    | -610,283 | -620,993 | -595,694 | -654,951 |
| 660    | -604,626 | -625,160 | -549,162 | -642,913 |
| 690    | -548,558 | -579,144 | -587,165 | -599,755 |
| 720    | -506,114 | -567,235 | -545,015 | -581,233 |
| 750    | -500,515 | -585,755 | -552,905 | -592,652 |
| 780    | -585,693 | -606,081 | -484,920 | -623,765 |
| 810    | -572,089 | -560,694 | -575,674 | -603,112 |
| 840    | -536,919 | -559,122 | -566,317 | -623,260 |
| 870    | -415,505 | -351,900 | -431,652 | -605,549 |
| 900    | -594,452 | -562,138 | -585,382 | -702,494 |
| 930    | -484,828 | -417,251 | -457,954 | -612,285 |
| 960    | -563,483 | -544,159 | -523,741 | -641,412 |
| 990    | -389,089 | -450,580 | -390,692 | -609,213 |



Σχήμα 10.5: Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε οπλισμένα δοκίμια με οργανική επικάλυψη μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl για διάστημα 960 ημερών

### **Μερικό συμπέρασμα 3:**

Όπως φαίνεται από το ανωτέρω διάγραμμα, το δυναμικό διάβρωσης των χαλύβων παρουσιάζει στην αρχή πτώση των δυναμικών από τα  $-100\text{mV} \div -300\text{mV}$  προς τα  $-350\text{mV} \div -700\text{mV}$ , όπου και σταθεροποιούνται μέχρι το τέλος της περιόδου έκθεσης.

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87, οι οπλισμοί παρουσιάζουν διάβρωση σε εκτεταμένο βαθμό. Από το γράφημα παρατηρείται ότι η εφαρμογή του αναστολέα επέφερε μετακίνηση του δυναμικού σε ηλεκτροθετικότερη τιμή σε σχέση με τα δοκίμια χωρίς αναστολέα διάβρωσης. Από τις μετρήσεις προκύπτει ότι η εφαρμογή του αναστολέα διάβρωσης επί του κονιάματος επέφερε μετακίνηση του δυναμικού σε ηλεκτροθετικότερη τιμή για τους πρώτους 10 μήνες, σε σχέση με την εφαρμογή του αναστολέα διάβρωσης μόνο στον οπλισμό. Μετά τον 11<sup>ο</sup> μήνα από τις μετρήσεις προκύπτει ότι η εφαρμογή του αναστολέα διάβρωσης στον οπλισμό και στο κονίαμα επέφερε μετακίνηση του δυναμικού σε ηλεκτροθετικότερες τιμές.

#### **10.1.2.2. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας**

Για τον προσδιορισμό της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας έγιναν μετρήσεις γραμμικής πόλωσης ανά μήνα για συνολικό χρόνο έκθεσης 34 μηνών στο διαβρωτικό περιβάλλον μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl, σε όλες τις ομάδες δοκιμίων. Η πειραματική διάταξη για τη διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών μετρήσεων περιελάμβανε Ποτενσιοστάτη/ Γαλβανοστάτη της E.G. & Model 263 συνδεδεμένο με υπολογιστή για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων. Για την επεξεργασία των ηλεκτροχημικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε λογισμικό Power Suite της εταιρείας E.G. & G Princeton Research. Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο Ag/AgCl, ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκε ράβδος άνθρακα διαστάσεων 100mm μήκος και 10mm διάμετρο και ηλεκτρόδιο εργασίας ο υπό εξέταση χάλυβας. Η περιοχή πόλωσης του χάλυβα ήταν  $\pm 10\text{mV}$  από το δυναμικό διάβρωσης ( $E_{\text{corr}}$ ) του υπό εξέταση χάλυβα Ο.Σ και το βήμα σάρωσης ( $Scan\ rate$ ) του δυναμικού ήταν  $0,1\text{mV}/\text{sec}$ .

Η κλίση της καμπύλης στην αρχή των αξόνων, δηλαδή για  $E = E_{\text{corr}}$ , ονομάζεται αντίσταση πόλωσης  $R_p$ , και δίδεται από τη σχέση:

$$R_p = B / I_{\text{corr}}$$

Συνεπώς το «ρεύμα διάβρωσης» του χάλυβα,  $I_{corr}$  υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_{corr} = B / R_p$$

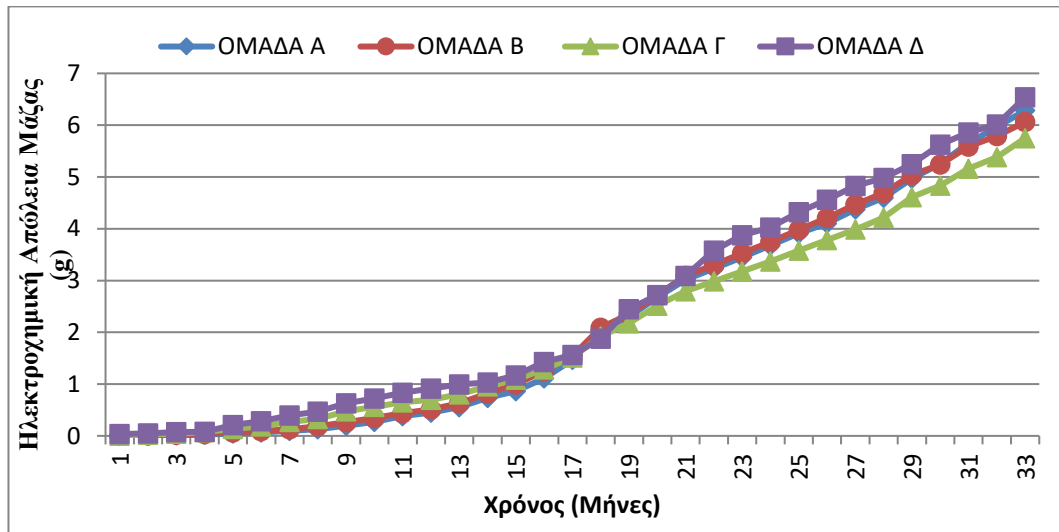
Η σταθερά  $B$  εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος (το είδος του τσιμέντου, το λόγο  $N/T$ , τη συντήρηση του σκυροδέματος και την κατάσταση του οπλισμού) και συνήθως κυμαίνονται από 13 έως 52 mV. Για χάλυβα που ευρίσκεται στην παθητική κατάσταση (περιοχή δυναμικών μεταξύ  $E_p$  και  $E_{TP}$ ) αναφέρεται η τιμή  $B=52\text{mV}$ , ενώ για χάλυβα στην ενεργή κατάσταση (δυναμικά ηλεκτροθετικότερα του  $E_{TP}$  ή ηλεκτραρνητικότερα του  $E_p$ ) η τιμή  $B=26\text{mV}$ .

Ο επακριβής προσδιορισμός της σταθεράς  $B$  για ένα είδος σκυροδέματος απαιτεί μακροχρόνια πειράματα για τον προσδιορισμό της άμεσης απώλειας βάρους του σιδηροπλισμού και τη συσχέτισή του με την ηλεκτροχημική απώλεια βάρους, όπως αυτή υπολογίζεται βάσει του νόμου του Faraday από το ρεύμα διάβρωσης όπως προκύπτει από την προηγούμενη σχέση. Στην παρούσα εργασία οι τιμές του  $I_{corr}$  υπολογίστηκαν θεωρώντας ότι ο χάλυβας ήταν στην ενεργή κατάσταση, δηλαδή για  $B = 26\text{mV}$ .

Στον Πίνακα 10.5 παρουσιάζονται οι τιμές της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας (g) και στο σχήμα 10.6. δίνεται η γραφική παράσταση της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας των 4 ομάδων δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον.

**Πίνακας 10.5. Τιμές ηλεκτροχημικής απώλειας για τις 4 ομάδες δοκιμών**

| <b>Μήνες</b> | <b>Ομάδα Α</b> | <b>Ομάδα Β</b> | <b>Ομάδα Γ</b> | <b>Ομάδα Δ</b> |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>1</b>     | 0,0014         | 0,0034         | 0,0074         | 0,0364         |
| <b>2</b>     | 0,0062         | 0,0126         | 0,0224         | 0,0459         |
| <b>3</b>     | 0,0130         | 0,0237         | 0,0439         | 0,0740         |
| <b>4</b>     | 0,0265         | 0,0391         | 0,0761         | 0,0789         |
| <b>5</b>     | 0,0455         | 0,0643         | 0,1334         | 0,2099         |
| <b>6</b>     | 0,0650         | 0,0914         | 0,1834         | 0,2856         |
| <b>7</b>     | 0,0992         | 0,1299         | 0,2711         | 0,3972         |
| <b>8</b>     | 0,1306         | 0,1858         | 0,3285         | 0,4720         |
| <b>9</b>     | 0,1975         | 0,2663         | 0,4751         | 0,6320         |
| <b>10</b>    | 0,2705         | 0,3479         | 0,5605         | 0,7240         |
| <b>11</b>    | 0,3820         | 0,4394         | 0,6464         | 0,8324         |
| <b>12</b>    | 0,4526         | 0,5138         | 0,7002         | 0,9150         |
| <b>13</b>    | 0,5557         | 0,6322         | 0,8006         | 0,9920         |
| <b>14</b>    | 0,7354         | 0,8231         | 0,9548         | 1,0320         |
| <b>15</b>    | 0,8620         | 0,9931         | 1,0900         | 1,1650         |
| <b>16</b>    | 1,1120         | 1,2510         | 1,2865         | 1,4240         |
| <b>17</b>    | 1,4701         | 1,5434         | 1,5156         | 1,5620         |
| <b>18</b>    | 2,0415         | 2,0870         | 1,9244         | 1,8760         |
| <b>19</b>    | 2,2992         | 2,3454         | 2,1772         | 2,4500         |
| <b>20</b>    | 2,6775         | 2,7145         | 2,5128         | 2,7214         |
| <b>21</b>    | 3,0129         | 3,0870         | 2,7901         | 3,0922         |
| <b>22</b>    | 3,2308         | 3,3013         | 2,9868         | 3,5756         |
| <b>23</b>    | 3,4510         | 3,5269         | 3,1754         | 3,8761         |
| <b>24</b>    | 3,6800         | 3,7420         | 3,3656         | 4,0216         |
| <b>25</b>    | 3,9125         | 3,9782         | 3,5781         | 4,3217         |
| <b>26</b>    | 4,1050         | 4,2092         | 3,7828         | 4,5609         |
| <b>27</b>    | 4,3754         | 4,4670         | 3,9841         | 4,8273         |
| <b>28</b>    | 4,6005         | 4,6921         | 4,2174         | 4,9801         |
| <b>29</b>    | 4,9712         | 5,0381         | 4,6093         | 5,2445         |
| <b>30</b>    | 5,2523         | 5,2408         | 4,8319         | 5,6218         |
| <b>31</b>    | 5,6553         | 5,5850         | 5,1614         | 5,8602         |
| <b>32</b>    | 5,9638         | 5,7892         | 5,3846         | 6,0145         |
| <b>33</b>    | 6,2858         | 6,0604         | 5,7490         | 6,5372         |



*Σχήμα 10.6: Ηλεκτροχημική απώλεια για τους οπλισμούς δοκιμίων σε διάλυμα 3,5% NaCl*

#### **Μερικό συμπέρασμα 4:**

Από το γράφημα γενικά προκύπτει ότι η ηλεκτροχημική απώλεια μάζας αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου για όλες τις κατηγορίες δοκιμίων. Επίσης η εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης, η οποία περιέχει αναστολέα διάβρωσης, οδήγησε σε μικρότερη μείωση της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας στα δοκίμια που η οργανική επικάλυψη (i και ii επικαλυπτικά) είχε εφαρμοστεί και επί του κονιάματος και στον οπλισμό. Μετά τους 19 μήνες παρατηρείται μικρότερη απώλεια μάζας στα δοκίμια στα οποία έχει γίνει εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης (i και ii επικαλυπτικά) και επί του κονιάματος και στον οπλισμό (Ομάδα Γ).

#### **10.1.2.3. Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας**

Για τον υπολογισμό της απώλειας μάζας των οπλισμών σπάστηκαν δοκίμια και από τις τέσσερις ομάδες δοκιμίων στους 12, 18, 24 και 30 μήνες. Στο σχήμα 10.7 απεικονίζεται η απώλεια μάζας των οπλισμών συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον.

**Πίνακας 10.6. Απώλεια μάζας των δοκιμίων μετά από 12 μήνες**

|                | <b>μαρχ (g)</b> | <b>πτελ (g)</b> | <b>Απώλεια μάζας (g)</b> | <b>Απώλεια μάζας (%)</b> |
|----------------|-----------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>Ομάδα Α</b> | 62,9959         | 62,9473         | 0,0486                   | 0,0771                   |
| <b>Ομάδα Β</b> | 62,0132         | 61,9600         | 0,0532                   | 0,0858                   |
| <b>Ομάδα Γ</b> | 60,7500         | 60,6883         | 0,0617                   | 0,1016                   |
| <b>Ομάδα Δ</b> | 61,5840         | 61,5148         | 0,0692                   | 0,1124                   |

**Πίνακας 10.7. Απώλεια μάζας των δοκιμίων μετά από 18 μήνες**

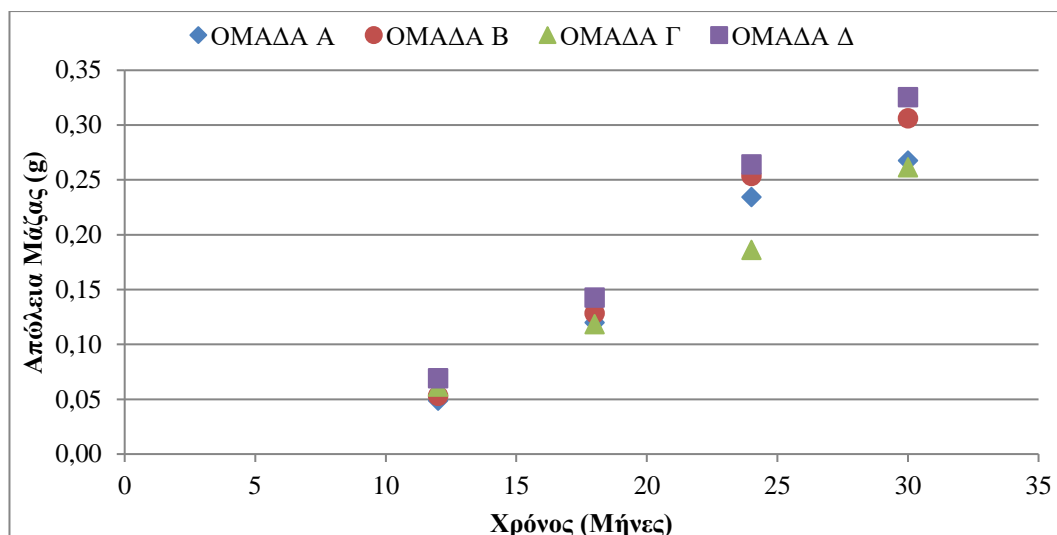
|                | <b>μαρχ (g)</b> | <b>πτελ (g)</b> | <b>Απώλεια μάζας (g)</b> | <b>Απώλεια μάζας (%)</b> |
|----------------|-----------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>Ομάδα Α</b> | 59,8868         | 59,7670         | 0,1198                   | 0,2000                   |
| <b>Ομάδα Β</b> | 62,1220         | 61,9936         | 0,1284                   | 0,2067                   |
| <b>Ομάδα Γ</b> | 62,5423         | 62,4238         | 0,1185                   | 0,1895                   |
| <b>Ομάδα Δ</b> | 62,1897         | 62,0470         | 0,1427                   | 0,2295                   |

**Πίνακας 10.8. Απώλεια μάζας των δοκιμίων μετά από 24 μήνες**

|                | <b>μαρχ (g)</b> | <b>πτελ (g)</b> | <b>Απώλεια μάζας (g)</b> | <b>Απώλεια μάζας (%)</b> |
|----------------|-----------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>Ομάδα Α</b> | 60,5075         | 60,2732         | 0,2343                   | 0,3872                   |
| <b>Ομάδα Β</b> | 62,6510         | 62,3974         | 0,2536                   | 0,4048                   |
| <b>Ομάδα Γ</b> | 61,8675         | 61,6812         | 0,1863                   | 0,3011                   |
| <b>Ομάδα Δ</b> | 61,5643         | 61,3001         | 0,2642                   | 0,4291                   |

**Πίνακας 10.9. Απώλεια μάζας των δοκιμίων μετά από 30 μήνες**

|                | <b>μαρχ (g)</b> | <b>πτελ (g)</b> | <b>Απώλεια μάζας (g)</b> | <b>Απώλεια μάζας (%)</b> |
|----------------|-----------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>Ομάδα Α</b> | 62,3755         | 62,1079         | 0,2676                   | 0,4290                   |
| <b>Ομάδα Β</b> | 61,1428         | 60,8367         | 0,3061                   | 0,5006                   |
| <b>Ομάδα Γ</b> | 62,2534         | 61,9919         | 0,2615                   | 0,4201                   |
| <b>Ομάδα Δ</b> | 62,0985         | 61,7731         | 0,3254                   | 0,5240                   |



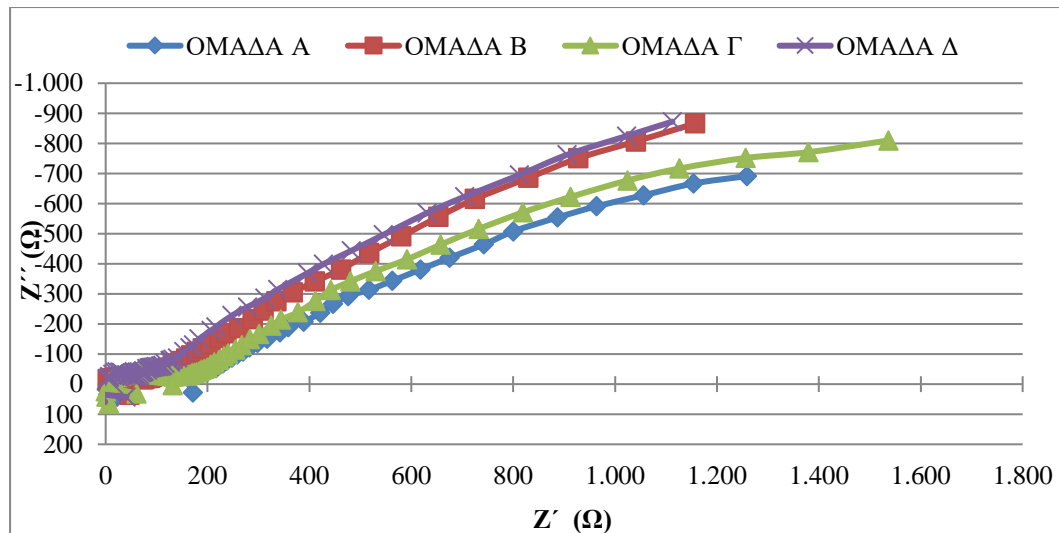
**Σχήμα 10.7:** Απώλεια μάζας (g) μετά από 12, 18, 24 και 30 μήνες παραμονής σε διάλυμα 3,5% NaCl

#### Μερικό συμπέρασμα 5:

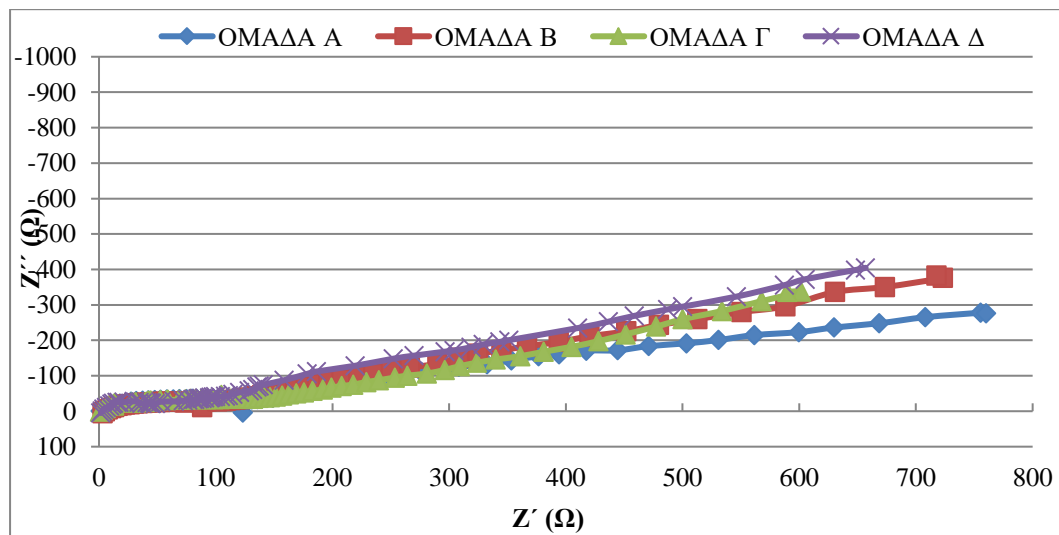
Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρατηρείται ότι και τα τρία συστήματα προσέφεραν προστασία στα δοκίμια. Επίσης, ενώ τους πρώτους 12 μήνες προκύπτει ότι τα δοκίμια με εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης με αναστολέα διάβρωσης (i και ii επικαλυπτικά) επί του κονιάματος (Ομάδα Β) είχαν μικρότερη απώλεια μάζας οπλισμού, στη συνέχεια τα δοκίμια με εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης (i και ii επικαλυπτικά) επί του κονιάματος και στον οπλισμό (Ομάδα Γ) παρουσιάζουν μικρότερη απώλεια μάζας οπλισμού.

#### 10.1.2.4. Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης

Οι μετρήσεις ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης έγιναν σε όλες τις ομάδες δοκιμίων μετά από 10 μήνες και 18 μήνες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον μερικής εμβάπτισης στο διάλυμα 3.5 % κ.β. NaCl και προέκυψαν τα διαγράμματα των σχημάτων 10.8 και 10.9, όπου όπου το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης ( $Z''$ ) σχεδιάζεται ως προς το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης ( $Z'$ ).



**Σχήμα 10.8:** Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης μετά από 10 μήνες σε διαβρωτικό περιβάλλον



**Σχήμα 10.9:** Ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης μετά από 18 μήνες σε διαβρωτικό περιβάλλον

Στον Πίνακα 10.10 παρουσιάζονται οι τιμές των αντιστάσεων πόλωσης όπως προέκυψαν από τα παραπάνω διαγράμματα Nyquist.

**Πίνακας 10.10. Τιμές της αντίστασης πόλωσης (Rp) από την ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης**

|                | Rp ( $\Omega$ ) μετά από 10 μήνες σε<br>διάλυμα 3.5% κ.β. NaCl | Rp ( $\Omega$ ) μετά από 18 μήνες σε<br>διάλυμα 3.5% κ.β. NaCl |
|----------------|--|--|
| <b>Ομάδα Α</b> | 155,60   | 130,00   |
| <b>Ομάδα Β</b> | 104,40   | 132,20   |
| <b>Ομάδα Γ</b> | 169,20   | 159,40   |
| <b>Ομάδα Δ</b> | 100,50   | 126,30   |

#### **Μερικό συμπέρασμα 6:**

Από τα σχήματα 10.8 και 10.9 και τον Πίνακα 10.10 παρατηρείται ότι η αντίσταση πόλωσης των χαλύβων οπλισμού όλων των δοκιμίων μετά από 18 μήνες ήταν μικρότερη αυτών των 10 μηνών, όπως αναμενόταν, αφού τα δοκίμια μετά από 18 μήνες ήταν περισσότερο διαβρωμένα. Οι χάλυβες στα δοκίμια αναφοράς (Ομάδα Δ) παρουσίασαν τη μικρότερη αντίσταση πόλωσης, είτε στους 10 μήνες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον, είτε στους 18 μήνες έκθεσης. Τη μεγαλύτερη αντίσταση πόλωσης εμφάνισαν τα δοκίμια στα οποία η οργανική επικάλυψη (i και ii επικαλυπτικά) εφαρμόστηκε τόσο στην επιφάνεια του κονιάματος, όσο και στην επιφάνεια του οπλισμού (Ομάδα Γ).

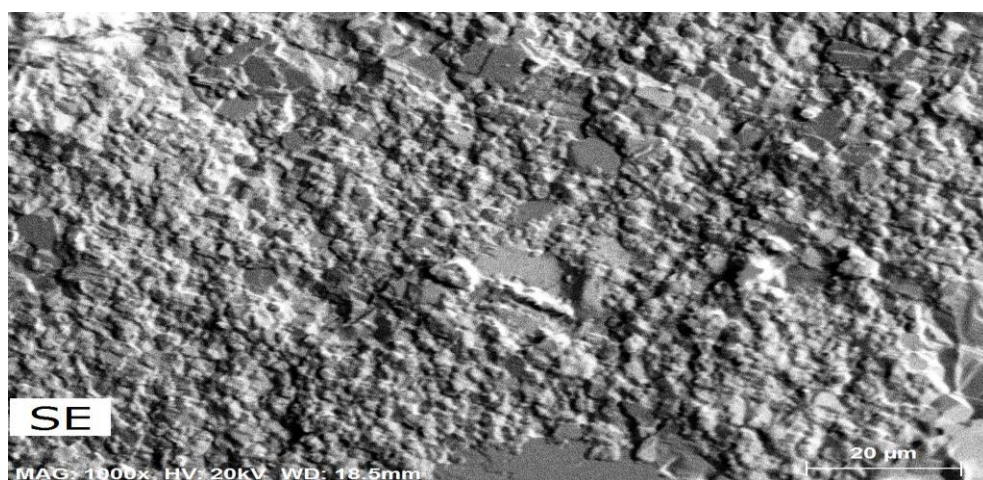
Οι τιμές της αντίστασης πόλωσης που προέκυψαν από την ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις τιμές που προέκυψαν από τις ηλεκτροχημικές μετρήσεις και αυτό δείχνει ότι σε πολύπλοκα συστήματα η ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης δίνει καλύτερα αποτελέσματα.

#### **10.1.2.5. Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης**

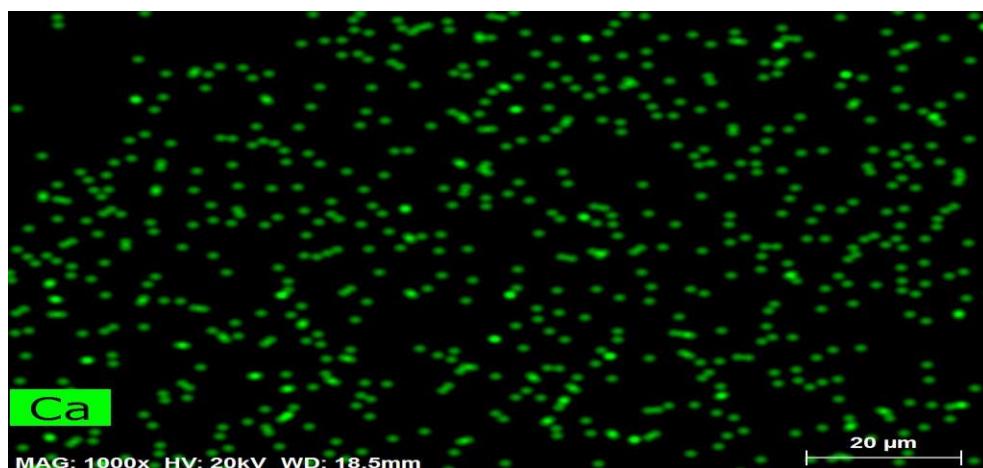
Προκειμένου να εξεταστεί το ενδεχόμενο του διαχωρισμού του αναστολέα διάβρωσης από το κονίαμα χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Το SEM δίνει πληροφορίες που αφορούν κυρίως στη μορφολογία και στη σύσταση της επιφανείας ενός υλικού, καθώς επίσης μπορεί να γίνει ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση του υλικού που εξετάζεται. Για την εξέταση μέσω SEM, χρησιμοποιήθηκε

ένα δοκίμιο της Ομάδας Γ, στο οποίο έχει γίνει εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης (i και ii επικαλυπτικά) επί του κονιάματος και στον οπλισμό, καθώς και ένα δοκίμιο από την Ομάδα Δ (δοκίμιο αναφοράς χωρίς την εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης).

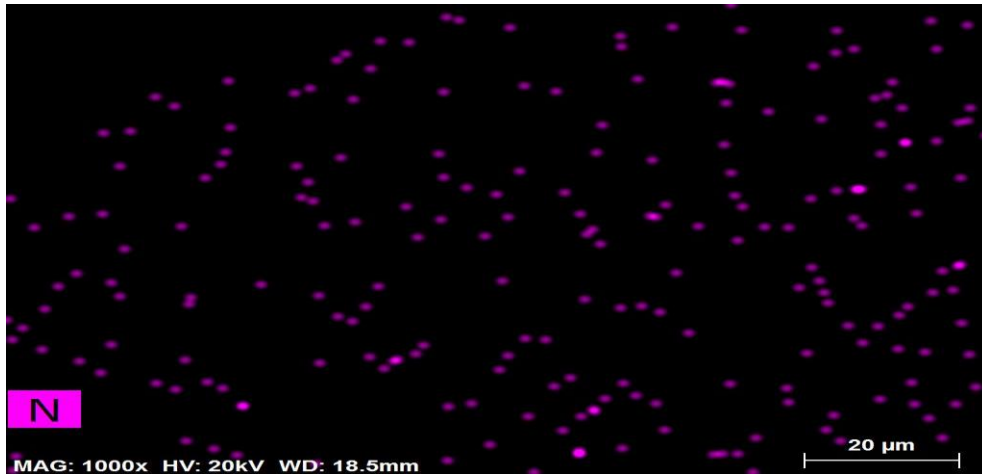
Στις παρακάτω εικόνες 10.1 έως 10.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του SEM για το δοκίμιο της Ομάδας Γ (περιέχει αναστολέα διάβρωσης), καθώς και η χαρτογράφηση των στοιχείων: ασβέστιο (Ca), άζωτο (N) και άνθρακας (C).



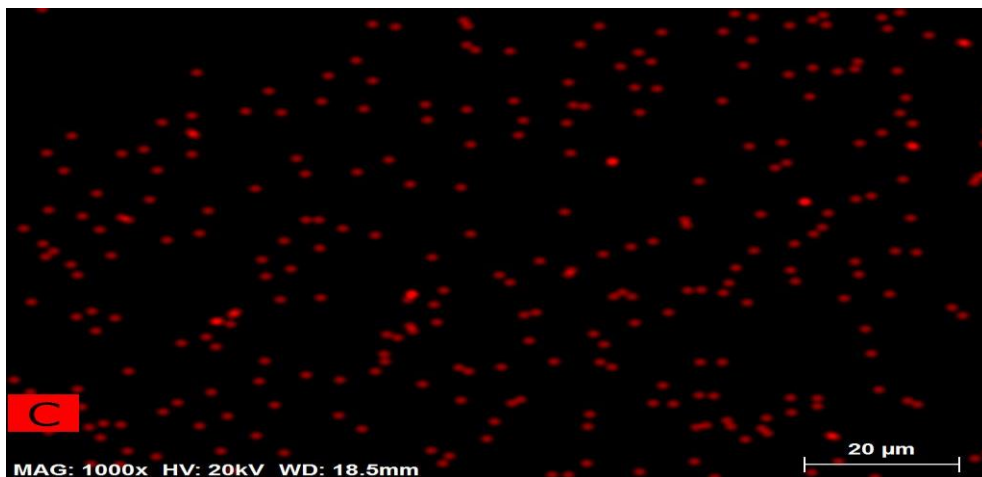
*Εικόνα 10.1 Ανάλυση SEM σε δοκίμιο της ομάδας Γ (περιέχει αναστολέα διάβρωσης)*



*Εικόνα 10.2 Χαρτογράφηση στοιχείου Ca σε δοκίμιο της ομάδας Γ (περιέχει αναστολέα διάβρωσης)*

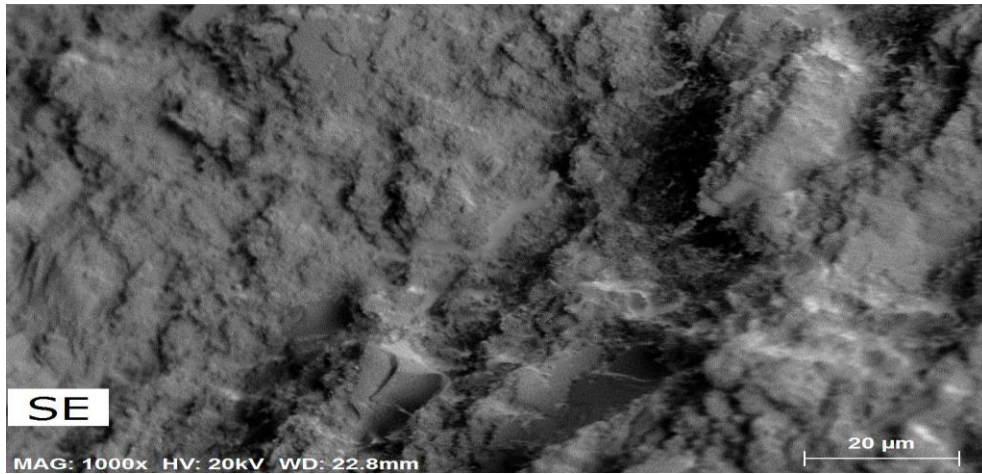


*Εικόνα 10.3 Χαρτογράφηση στοιχείου N σε δοκίμιο της ομάδας Γ (περιέχει αναστολέα διάβρωσης)*

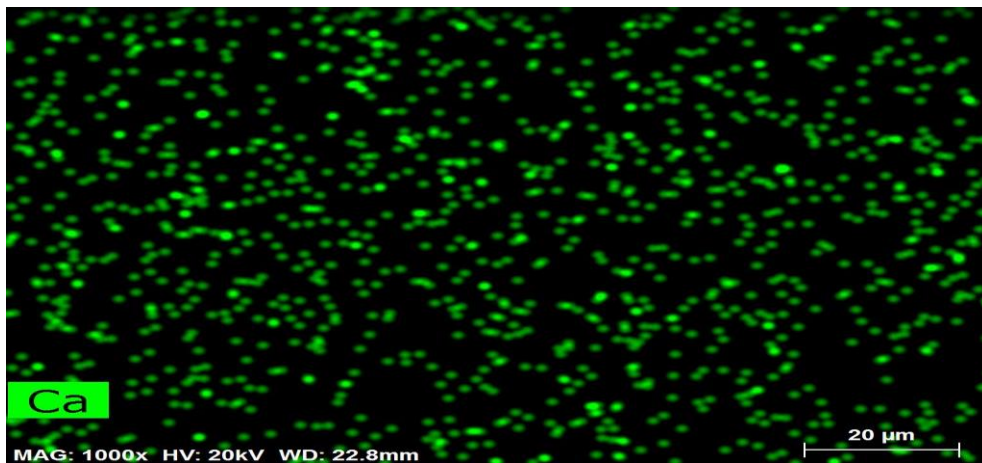


*Εικόνα 10.4 Χαρτογράφηση στοιχείου C σε δοκίμιο της ομάδας Γ (περιέχει αναστολέα διάβρωσης)*

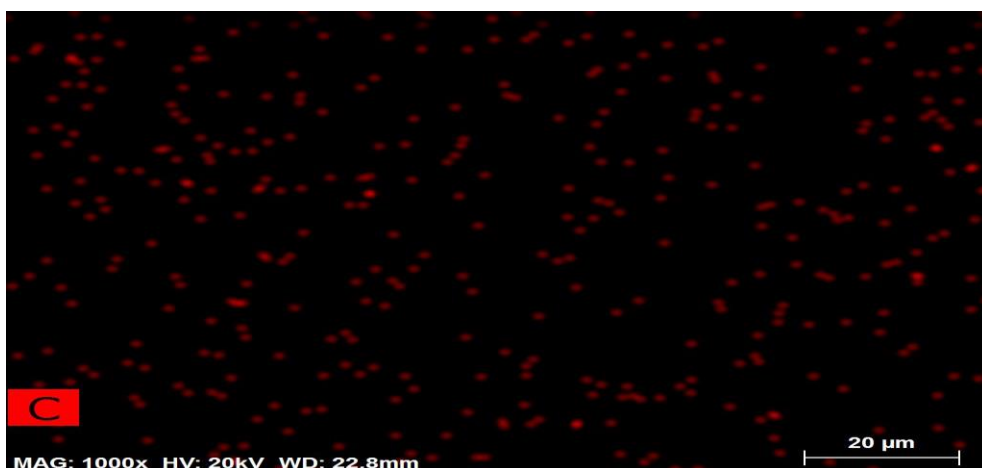
Αντίστοιχα, στις παρακάτω εικόνες 10.5 έως 10.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του SEM για το δοκίμιο της Ομάδας Δ (δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης), καθώς και η χαρτογράφηση των στοιχείων: ασβέστιο (Ca) και άνθρακας (C). Δεν εντοπίστηκε άζωτο (N) στο δοκίμιο που δεν είχε γίνει εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης, όπως αναμενόταν καθώς δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης.



*Εικόνα 10.5 Ανάλυση SEM σε δοκίμιο της ομάδας Δ (δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης)*



*Εικόνα 10.6 Χαρτογράφηση στοιχείου Ca σε δοκίμιο της ομάδας Δ (δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης)*



*Εικόνα 10.7 Χαρτογράφηση στοιχείου C σε δοκίμιο της ομάδας Δ (δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης)*

### **Μερικό συμπέρασμα 7:**

Από τις παραπάνω εικόνες της ανάλυσης του SEM, καθώς και της χαρτογράφησης των χημικών στοιχείων Ca, N και C, παρατηρείται ότι ο αναστολέας διάβρωσης είναι κατανεμημένος στο κονίαμα και δεν βρίσκεται συγκεντρωμένος σε κάποιο σημείο, όπως θα έπρεπε να συμβαίνει στην περίπτωση που ο αναστολέας είχε αποχωριστεί από το κονίαμα.

#### ***10.1.3. Επιταχυνόμενη διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης***

Για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης του χάλυβα σε θάλαμο αλατονέφωσης κατασκευάστηκαν 4 ομάδες δοκιμίων ως εξής:

Ομάδα A1: Επικάλυψη στην επιφάνεια του κονιάματος με το i επικαλυπτικό της οργανικής επικάλυψης

Ομάδα A2: Επικάλυψη στην επιφάνεια του κονιάματος με το ii επικαλυπτικό της οργανικής επικάλυψης

Ομάδα A: Επικάλυψη στην επιφάνεια του κονιάματος με τα i και ii επικαλυπτικά της οργανικής επικάλυψης

Ομάδα Δ: Αναφοράς, χωρίς εφαρμογή επικάλυψης στην επιφάνεια του κονιάματος

Τα δοκίμια όλων των κατηγοριών τοποθετήθηκαν αρχικά σε θάλαμο αλατονέφωσης για 19 ημέρες. Την ημέρα που τα δοκίμια βγήκαν από το θάλαμο σπάστηκε ένα δοκίμιο από κάθε κατηγορία. Στη συνέχεια τα υπόλοιπα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl και κάθε 7 ημέρες γινόταν μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα με τη βοήθεια ενός βολτόμετρου.

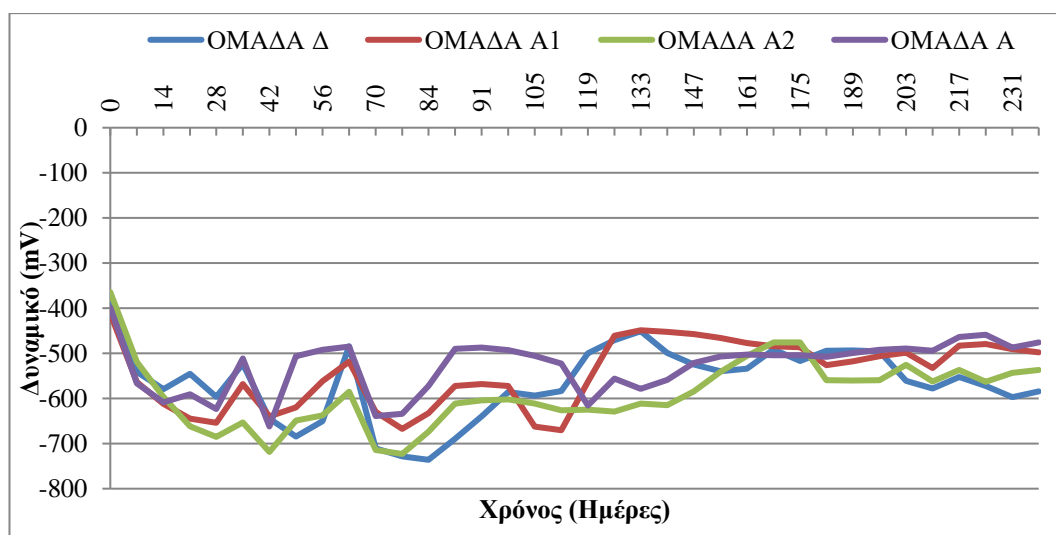
##### ***10.1.3.1. Χρονική εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης***

Στον Πίνακα 10.11 φαίνονται οι τιμές του μέσου όρου των δυναμικών διάβρωσης για τις τέσσερις κατηγορίες δοκιμίων. Το δυναμικό διάβρωσης μετρήθηκε σε όλους τους οπλισμούς ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl, κάθε 7 ημέρες για συνολικά 238 ημέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

**Πίνακας 10.11. Τιμές Δυναμικού Διάβρωσης σε mV για τις 4 ομάδες δοκιμίων**

| Ημέρες | Ομάδα Α1 | Ομάδα Α2 | Ομάδα Α | Ομάδα Δ |
|--------|----------|----------|---------|---------|
| 0      | -412,4   | -364,5   | -398,9  | -391,6  |
| 7      | -563,6   | -519,5   | -566,5  | -540,9  |
| 14     | -612,3   | -596,6   | -608,4  | -579,5  |
| 21     | -644,7   | -661,8   | -591,0  | -545,6  |
| 28     | -654,1   | -685,2   | -623,7  | -596,7  |
| 35     | -568,1   | -653,2   | -511,1  | -523,1  |
| 42     | -639,5   | -718,7   | -662,2  | -644,5  |
| 49     | -620,1   | -649,2   | -506,7  | -684,7  |
| 56     | -562,0   | -637,7   | -492,3  | -650,5  |
| 63     | -518,3   | -585,3   | -485,1  | -484,2  |
| 70     | -629,5   | -714,5   | -639,0  | -710,5  |
| 77     | -667,5   | -723,0   | -634,0  | -728,5  |
| 84     | -632,5   | -673,7   | -572,4  | -736,0  |
| 91     | -572,6   | -611,7   | -489,9  | -689,5  |
| 91     | -567,9   | -604,5   | -487,4  | -639,9  |
| 98     | -572,6   | -602,3   | -492,8  | -585,9  |
| 105    | -662,5   | -611,7   | -505,6  | -593,8  |
| 112    | -670,4   | -626,6   | -522,4  | -583,5  |
| 119    | -563,1   | -625,1   | -615,9  | -500,0  |
| 126    | -461,3   | -628,9   | -556,4  | -471,1  |
| 133    | -448,6   | -611,1   | -578,5  | -451,1  |
| 140    | -452,4   | -614,8   | -559,1  | -499,1  |
| 147    | -457,3   | -584,3   | -521,1  | -524,9  |
| 154    | -465,8   | -541,5   | -506,9  | -539,7  |
| 161    | -477,1   | -505,9   | -503,1  | -533,9  |
| 168    | -484,2   | -475,6   | -504,5  | -491,8  |
| 175    | -486,5   | -475,8   | -504,4  | -517,1  |
| 182    | -526,1   | -559,4   | -508,0  | -494,1  |
| 189    | -517,9   | -560,5   | -499,6  | -493,6  |
| 196    | -506,3   | -559,7   | -492,3  | -495,6  |
| 203    | -498,9   | -525,5   | -489,3  | -561,2  |
| 210    | -532,7   | -562,7   | -494,0  | -578,4  |
| 217    | -482,9   | -537,2   | -463,7  | -552,4  |
| 224    | -479,5   | -563,4   | -459,2  | -572,4  |
| 231    | -490,6   | -543,5   | -487,5  | -596,9  |
| 238    | -498,1   | -536,9   | -475,7  | -584,3  |

Με βάση τις παραπάνω τιμές των δυναμικών διάβρωσης για τις τέσσερις κατηγορίες δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου έκθεσης των δοκιμίων σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl και μετά από 19 ημέρες παραμονής σε θάλαμο αλατονέφωσης, προκύπτει το διάγραμμα του σχήματος 10.10.



*Σχήμα 10.10: Δυναμικό Διάβρωσης των οπλισμών δοκιμίων μετά από παραμονή σε θάλαμο αλατονέφωσης και σε διάλυμα 3,5% NaCl συναρτήσει του χρόνου έκθεσης*

#### **Μερικό συμπέρασμα 8:**

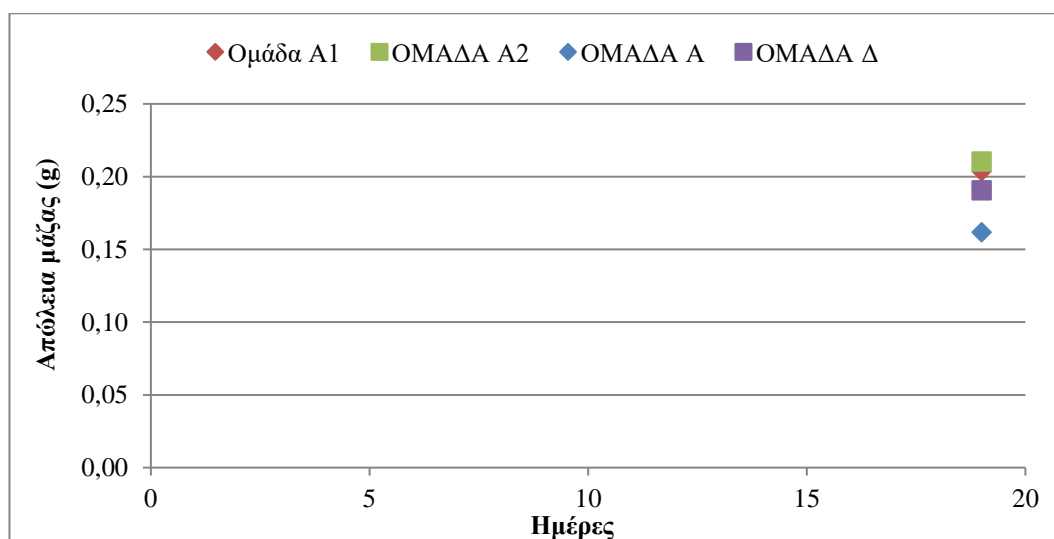
Στο σχήμα 10.10 φαίνεται το δυναμικό διάβρωσης των οπλισμών συναρτήσει του χρόνου ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι τα δυναμικά των τεσσάρων ομάδων μέχρι τις 90 ημέρες παραμονής στο διάλυμα 3,5% NaCl, κυμαίνονται μεταξύ -400mV και -700mV, ενώ μετά τις 90 ημέρες και μέχρι τις 238 ημέρες κυμαίνονται από -450 mV μέχρι -600 mV. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87 υπάρχει υψηλή πιθανότητα διάβρωσης. Τα δοκίμια στα οποία έχει γίνει εφαρμογή και των δύο επικαλυπτικών (i και ii) (Ομάδα Α) φαίνεται μετά τις 170 ημέρες να εμφανίζουν πιο ηλεκτραρνητικές τιμές από τις υπόλοιπες ομάδες δοκιμίων. Επίσης, μετά τις 190 ημέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον φαίνεται τα δοκίμια αναφοράς (Ομάδα Δ) να παρουσιάζουν πιο ηλεκτραρνητικές τιμές σε σχέση με τα δοκίμια στα οποία έχει εφαρμοστεί προστασία.

### 10.1.3.2. Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας του οπλισμού

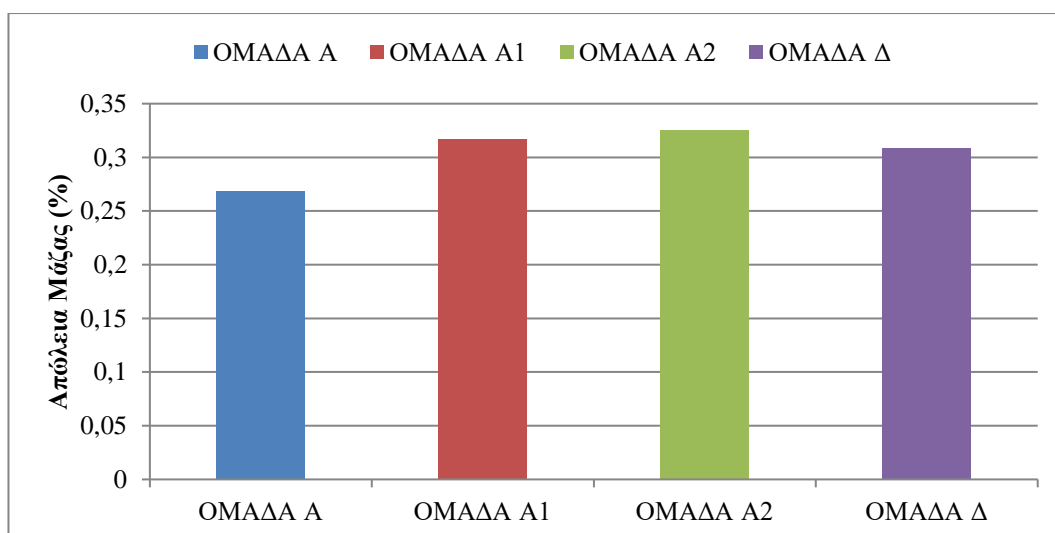
Μετά την παραμονή των τεσσάρων κατηγοριών δοκιμίων στο θάλαμο αλατονέφωσης, έγινε μέτρηση της απώλειας μάζας σε ένα δοκίμιο από κάθε κατηγορία. Στον Πίνακα 10.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα απώλειας μάζας για τα δοκίμια των τεσσάρων κατηγοριών και στα σχήματα 10.11 και 10.12 τα αντίστοιχα διαγράμματα.

**Πίνακας 10.12. Απώλεια μάζας των δοκιμίων μετά από 19 ημέρες σε θάλαμο αλατονέφωσης**

|                 | παρχ (g) | μτελ (g) | Απώλεια μάζας (g) | Απώλεια μάζας (%) |
|-----------------|----------|----------|-------------------|-------------------|
| <b>Ομάδα Α1</b> | 64,2642  | 64,0605  | 0,2037            | 0,3170            |
| <b>Ομάδα Α2</b> | 64,6142  | 64,4038  | 0,2104            | 0,3256            |
| <b>Ομάδα Α</b>  | 60,2605  | 60,0989  | 0,1616            | 0,2682            |
| <b>Ομάδα Δ</b>  | 61,7791  | 61,5885  | 0,1906            | 0,3085            |



**Σχήμα 10.11: Απώλεια μάζας (g) των οπλισμών δοκιμίων μετά από 19 ημέρες σε θάλαμο αλατονέφωσης**



**Σχήμα 10.12:** Απώλεια μάζας (%) σε οπλισμούς δοκιμίων μετά από 19 ημέρες παραμονής σε θάλαμο αλατονέφωσης

Από τον παραπάνω πίνακα και τα αντίστοιχα διαγράμματα φαίνεται ότι μετά από 19 ημέρες παραμονής σε θάλαμο αλατονέφωσης τα δοκίμια στα οποία είχαν εφαρμοστεί τα i και ii επικαλυπτικά της οργανικής επικάλυψης παρουσίασαν τη μικρότερη απώλεια μάζας.

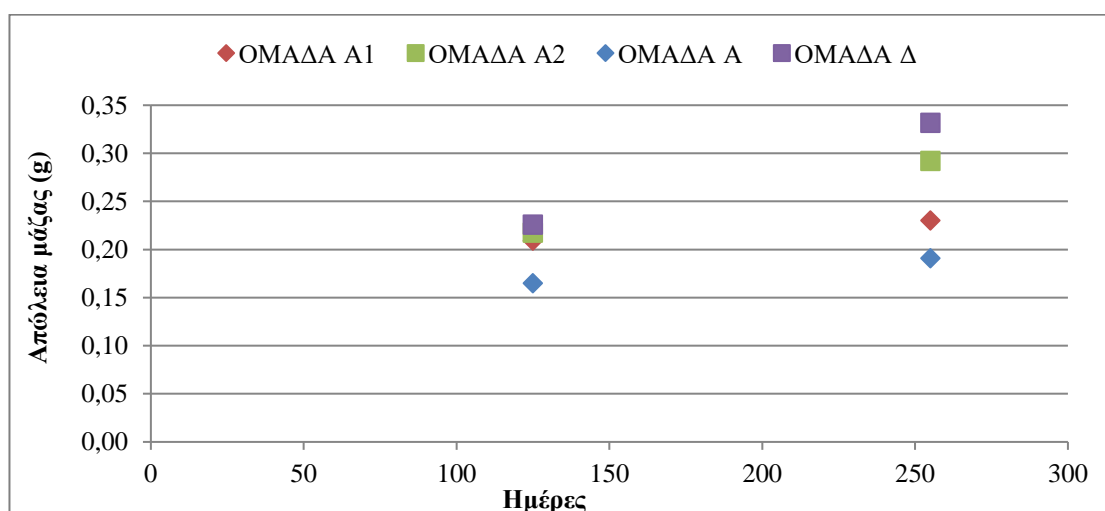
Στους Πίνακες 10.13 και 10.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα απώλειας μάζας για τα δοκίμια των τεσσάρων κατηγοριών μετά από 125 και 255 ημέρες παραμονής στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl αντίστοιχα και στα σχήματα 10.13 και 10.14 τα αντίστοιχα διαγράμματα.

**Πίνακας 10.13.** Απώλεια μάζας των δοκιμίων μετά από 125 ημέρες παραμονής στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl

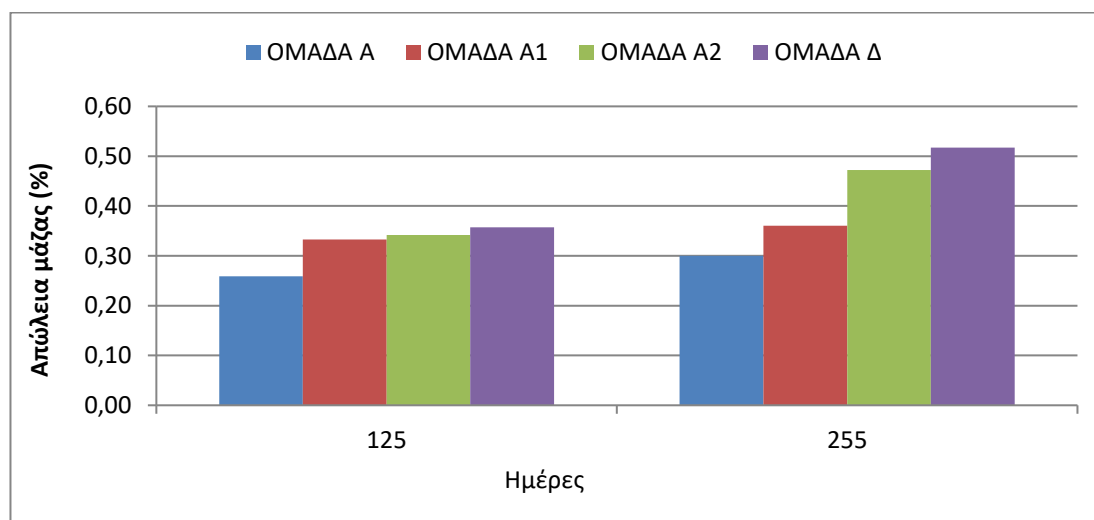
|                 | μαρχ (g) | μτελ (g) | Απώλεια μάζας (g) | Απώλεια μάζας (%) |
|-----------------|----------|----------|-------------------|-------------------|
| <b>Ομάδα Α1</b> | 62,7955  | 62,9695  | 0,2257            | 0,3571            |
| <b>Ομάδα Α2</b> | 63,569   | 62,5863  | 0,2092            | 0,3331            |
| <b>Ομάδα Α</b>  | 63,6431  | 63,3516  | 0,2174            | 0,3420            |
| <b>Ομάδα Δ</b>  | 63,1952  | 63,4783  | 0,1648            | 0,2589            |

**Πίνακας 10.14. Απώλεια μάζας των δοκιμίων μετά από 255 ημέρες παραμονής στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl**

|                 | παρχ (g) | μτελ (g) | Απώλεια μάζας (g) | Απώλεια μάζας (%) |
|-----------------|----------|----------|-------------------|-------------------|
| <b>Ομάδα Α1</b> | 63,9403  | 63,7100  | 0,2303            | 0,3602            |
| <b>Ομάδα Α2</b> | 61,8029  | 61,5110  | 0,2919            | 0,4723            |
| <b>Ομάδα Α</b>  | 63,5798  | 63,3889  | 0,1909            | 0,3003            |
| <b>Ομάδα Δ</b>  | 64,0544  | 63,7229  | 0,3315            | 0,5175            |



**Σχήμα 10.13: Απώλεια μάζας (g) οπλισμών δοκιμίων μετά από 19 ημέρες σε θάλαμο αλατονέφωσης και 125 και 255 ημέρες σε διάλυμα 3,5% NaCl.**



**Σχήμα 10.14: Απώλεια μάζας (%) οπλισμών δοκιμίων μετά από 19 ημέρες σε θάλαμο αλατονέφωσης και 125 και 255 ημέρες σε διάλυμα 3,5% NaCl.**

### **Μερικό συμπέρασμα 9:**

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι τα δοκίμια αναφοράς (Ομάδα Δ) έχουν τη μεγαλύτερη απώλεια μάζας μετά από 255 ημέρες παραμονής στο διάλυμα 3,5% NaCl, ενώ τα δοκίμια στα οποία έχουν εφαρμοστεί και τα δύο επικαλυπτικά (i και ii) της οργανικής επικάλυψης (Ομάδα Α) παρουσιάζουν τη μικρότερη απώλεια μάζας.

#### **10.1.4. Μετρήσεις ειδικής αντίστασης**

Για τις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκε η συσκευή της εταιρείας Proceq Testing Instruments (εικόνα 10.8).



*Εικόνα 10.8 Συσκευή μέτρησης της ειδικής αντίστασης σκυροδέματος*

Έγιναν μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του σκυροδέματος σε δύο ομάδες δοκιμίων. (εικόνα 10.9)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης στην πρώτη ομάδα δοκιμίων μετά από 83 και 85 ημέρες παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.15, ενώ τα αποτελέσματα των μετρήσεων της δεύτερης ομάδας δοκιμίων μετά από 70 ημέρες από την κατασκευής τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.16.



*Εικόνα 10.9 Μέτρηση ειδικής αντίστασης σκυροδέματος*

**Πίνακας 10.15. Μετρήσεις ειδικής αντίστασης στην 1η ομάδα δοκιμών**

| Δοκίμια  | 83 ΗΜΕΡΕΣ                              |  | 85 ΗΜΕΡΕΣ                              |  |
|--|--|--|--|--|
|  | Μέτρηση στην επιφάνεια χωρίς επικάλυψη | Μέτρηση στην επιφάνεια χωρίς επικάλυψη | Μέτρηση στην επιφάνεια χωρίς επικάλυψη | Μέτρηση στην επιφάνεια χωρίς επικάλυψη |
| Χωρίς επικάλυψη  | 59 ΚΩΜ cm                              | 84 ΚΩΜ cm                              | 70 ΚΩΜ cm                              | 82 ΚΩΜ cm                              |
|  | Μέτρηση στην επιφάνεια χωρίς επικάλυψη | Μέτρηση στην επιφάνεια με επικάλυψη    | Μέτρηση στην επιφάνεια χωρίς επικάλυψη | Μέτρηση στην επιφάνεια με επικάλυψη    |
| Εφαρμογή i και ii επικαλυπτικού της οργανικής επικάλυψης σε μια μεγάλη επιφάνεια | 30 ΚΩΜ cm                              | 99 ΚΩΜ cm                              | 37 ΚΩΜ cm                              | >99 ΚΩΜ cm                             |

**Πίνακας 10.16. Μετρήσεις ειδικής αντίστασης στην 2η ομάδα δοκιμίων μετά από 70 ημέρες κατασκευής των δοκιμίων**

| Δοκίμια  | Μέτρηση στην επιφάνεια χωρίς επικάλυψη | Μέτρηση στην επιφάνεια με επικάλυψη |
|--|--|-------------------------------------|
| Χωρίς επικάλυψη  | 74 ΚΩΜ cm                              | 57 ΚΩΜ cm                           |
| Εφαρμογή i επικαλυπτικού της οργανικής επικάλυψης σε μια μεγάλη επιφάνεια  | 63 ΚΩΜ cm                              | 37 ΚΩΜ cm                           |
| Εφαρμογή ii επικαλυπτικού της οργανικής επικάλυψης σε μια μεγάλη επιφάνεια   | 60 ΚΩΜ cm                              | 36 ΚΩΜ cm                           |
| Εφαρμογή i και ii επικαλυπτικού της οργανικής επικάλυψης σε μια μεγάλη επιφάνεια   | 61 ΚΩΜ cm                              | 34 ΚΩΜ cm                           |
| Εφαρμογή 2 στρώσεων του i επικαλυπτικού και 2 στρώσεων του ii επικαλυπτικού της οργανικής επικάλυψης σε μια μεγάλη επιφάνεια | 41 ΚΩΜ cm                              | 44 ΚΩΜ cm                           |

**Μερικό συμπέρασμα 10:**

Από τους παραπάνω Πίνακες 10.15 και 10.16 παρατηρούμε ότι σε όλες τις μετρήσεις του δυναμικού αναφοράς ότι όσο αυξάνεται ο χρόνος αυξάνεται και η ειδική αντίσταση. Αυτό είναι φυσιολογικό διότι προχωράει η ενυδάτωση του σκυροδέματος. Αντίθετα παρατηρείται ότι σε όλα τα δοκίμια με επικάλυψη η ειδική αντίσταση του κονιάματος μεταβάλλεται και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση κονιάματος είναι μικρότερη από αυτή του κονιάματος. Η πτώση αυτή της ειδικής αντίστασης οφείλεται σε δύο λόγους: α) στη διατήρηση υψηλότερου ποσοστού υγρασίας λόγω της παρεμπόδισης εξάτμισης από τη μία επιφάνεια και β) στη διάχυση του αναστολέα διάβρωσης από το επικαλυπτικό (i) προς το κονίαμα. Επομένως η δράση του διαχεόμενου αναστολέα διάβρωσης έχει δύο επιπτώσεις: μια στην επιφάνεια του χάλυβα όπου δημιουργεί παθητικό στρώμα, αλλά ταυτόχρονα μειώνει και την ειδική ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος.

## **10.2 Κατηγορία II: Επίδραση αναστολέα διάβρωσης στη διάβρωση οπλισμών**

### **10.2.1. Επιταχυνόμενη διάβρωση με μερική εμπάπτιση σε διάλυμα 3,5 % κ.β. NaCl σε τσιμεντοκονιάματα με αναλογία νερού 0,5%**

Για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης του χάλυβα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl κατασκευάστηκαν οκτώ (8) ομάδες δοκιμίων σε τσιμεντοκονιάματα με αναλογία τσιμέντο:αδρανών:νερό 1:3:0,5 ως εξής:

Ομάδα ΨΕΚ I (0,5): Με εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης ο οποίος βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) ως ψεκαζόμενο

Ομάδα ΨΕΚ II (0,5): Με εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης ο οποίος βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) ως ψεκαζόμενο και με διαφορά από τον ΨΕΚ I ως προς τη συγκέντρωση και το είδος των οργανικών οξέων που συνοδεύουν τον αναστολέα διάβρωσης

Ομάδα ΨΕΚ III (0,5): Με εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης ο οποίος βασίζεται στη Διμεθυλ-αιθανόλ-αμίνη ( $(\text{CH}_3)_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ ) ως ψεκαζόμενο

Ομάδα ΨΕΚ IV (0,5): Με εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης ο οποίος βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) ως ψεκαζόμενο

Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0.5): Με εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης ο οποίος βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) ως πρόσμικτο με αναλογία 4%

Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0.5): Με εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης ο οποίος βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) ως πρόσμικτο με αναλογία 8%

Ομάδα ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0.5): Με εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης ο οποίος βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) ως πρόσμικτο με αναλογία 4%

Ομάδα ΑΝΑΦ (0.5): Αναφοράς, χωρίς εφαρμογή αναστολέα

#### **10.2.1.1. Χρονική εξέλιξη του Δυναμικού Διάβρωσης**

Στον Πίνακα 10.17 φαίνονται οι τιμές του μέσου όρου των δυναμικών διάβρωσης για τις ομάδες δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και στον Πίνακα 10.18 οι τιμές του μέσου όρου των δυναμικών διάβρωσης για τις ομάδες δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης. Το δυναμικό διάβρωσης μετρήθηκε σε όλους τους οπλισμούς ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl, κάθε 7 ημέρες για συνολικά 720 ημέρες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

**Πίνακας 10.17. Τιμές Δυναμικού Διάβρωσης σε mV για τις ομάδες δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,5**

| <b>Ημέρες</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ I (0,5)</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ II (0,5)</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ III (0,5)</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ IV (0,5)</b> | <b>Ομάδα ΑΝΑΦ (0,5)</b> |
|---------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>0</b>      | -73,582                  | -78,100                   | -81,200                    | -91,250                   | -105,121                |
| <b>7</b>      | -134,900                 | -103,908                  | -82,725                    | -138,883                  | -147,918                |
| <b>14</b>     | -146,872                 | -145,515                  | -100,706                   | -141,994                  | -149,357                |
| <b>28</b>     | -178,980                 | -177,892                  | -114,733                   | -155,158                  | -170,500                |
| <b>30</b>     | -159,948                 | -206,087                  | -112,910                   | -186,692                  | -221,559                |
| <b>35</b>     | -148,670                 | -208,908                  | -138,755                   | -146,950                  | -226,480                |
| <b>42</b>     | -207,818                 | -192,358                  | -170,973                   | -148,864                  | -284,910                |
| <b>49</b>     | -221,580                 | -202,150                  | -189,064                   | -195,973                  | -322,810                |
| <b>56</b>     | -255,478                 | -211,100                  | -209,991                   | -210,300                  | -347,050                |
| <b>60</b>     | -410,937                 | -214,855                  | -306,497                   | -212,267                  | -399,507                |
| <b>63</b>     | -421,720                 | -237,892                  | -275,934                   | -211,332                  | -395,650                |
| <b>70</b>     | -432,150                 | -242,442                  | -268,973                   | -212,711                  | -392,800                |
| <b>77</b>     | -452,150                 | -276,525                  | -254,367                   | -218,944                  | -380,900                |
| <b>84</b>     | -467,920                 | -317,592                  | -255,383                   | -218,567                  | -309,025                |
| <b>90</b>     | -464,801                 | -297,181                  | -382,389                   | -213,900                  | -397,126                |
| <b>91</b>     | -426,291                 | -308,717                  | -268,692                   | -219,622                  | -308,311                |
| <b>98</b>     | -432,127                 | -289,025                  | -279,042                   | -215,178                  | -213,075                |
| <b>105</b>    | -408,309                 | -343,717                  | -291,100                   | -237,333                  | -369,057                |
| <b>112</b>    | -419,618                 | -369,358                  | -297,267                   | -241,789                  | -306,588                |
| <b>119</b>    | -402,509                 | -369,575                  | -245,817                   | -244,933                  | -288,014                |
| <b>120</b>    | -410,641                 | -384,489                  | -338,900                   | -235,604                  | -386,048                |
| <b>126</b>    | -395,255                 | -364,208                  | -295,333                   | -247,256                  | -320,413                |
| <b>133</b>    | -407,482                 | -380,700                  | -280,092                   | -254,356                  | -311,263                |
| <b>140</b>    | -404,727                 | -367,058                  | -299,325                   | -247,100                  | -303,238                |
| <b>147</b>    | -400,936                 | -372,117                  | -375,400                   | -269,138                  | -357,225                |
| <b>150</b>    | -442,739                 | -401,165                  | -364,842                   | -270,962                  | -342,070                |
| <b>161</b>    | -405,273                 | -362,833                  | -322,933                   | -293,250                  | -351,000                |
| <b>168</b>    | -388,445                 | -429,725                  | -374,300                   | -310,075                  | -364,738                |
| <b>175</b>    | -422,491                 | -412,133                  | -329,708                   | -350,863                  | -346,063                |
| <b>180</b>    | -449,309                 | -340,474                  | -394,488                   | -334,549                  | -430,857                |
| <b>182</b>    | -418,245                 | -406,775                  | -350,350                   | -355,175                  | -384,163                |
| <b>189</b>    | -411,100                 | -350,242                  | -357,350                   | -357,688                  | -382,388                |
| <b>196</b>    | -420,636                 | -368,083                  | -357,583                   | -370,063                  | -435,511                |
| <b>203</b>    | -395,236                 | -385,350                  | -398,142                   | -336,544                  | -394,056                |
| <b>210</b>    | -425,983                 | -385,911                  | -341,346                   | -340,073                  | -495,174                |
| <b>217</b>    | -387,673                 | -364,250                  | -396,300                   | -321,200                  | -378,233                |
| <b>224</b>    | -422,055                 | -366,058                  | -386,250                   | -316,900                  | -434,789                |
| <b>231</b>    | -419,209                 | -349,750                  | -383,808                   | -303,978                  | -416,456                |

| <b>Ημέρες</b> | <b>Ομάδα<br/>ΨΕΚ I (0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΨΕΚ II (0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΨΕΚ III (0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΨΕΚ IV (0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΑΝΑΦ (0,5)</b> |
|---------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| <b>238</b>    | -419,292                     | -361,675                      | -347,558                       | -316,956                      | -356,844                    |
| <b>240</b>    | -421,461                     | -332,091                      | -316,214                       | -275,119                      | -506,128                    |
| <b>245</b>    | -442,800                     | -357,742                      | -351,267                       | -320,918                      | -459,100                    |
| <b>252</b>    | -427,655                     | -354,350                      | -327,917                       | -346,390                      | -409,433                    |
| <b>259</b>    | -396,000                     | -347,008                      | -328,192                       | -349,000                      | -372,090                    |
| <b>266</b>    | -410,591                     | -329,833                      | -358,508                       | -344,960                      | -378,810                    |
| <b>270</b>    | -371,164                     | -349,032                      | -336,183                       | -309,405                      | -574,649                    |
| <b>273</b>    | -416,409                     | -364,875                      | -321,833                       | -359,050                      | -391,736                    |
| <b>280</b>    | -393,082                     | -371,950                      | -306,533                       | -358,840                      | -396,680                    |
| <b>287</b>    | -383,991                     | -383,583                      | -296,645                       | -366,456                      | -417,482                    |
| <b>294</b>    | -378,555                     | -374,917                      | -353,000                       | -354,211                      | -372,082                    |
| <b>300</b>    | -380,864                     | -398,018                      | -370,630                       | -355,556                      | -475,036                    |
| <b>301</b>    | -389,482                     | -410,392                      | -348,083                       | -376,322                      | -430,056                    |
| <b>308</b>    | -357,818                     | -314,708                      | -320,967                       | -328,567                      | -314,622                    |
| <b>315</b>    | -399,373                     | -384,667                      | -289,833                       | -357,150                      | -362,433                    |
| <b>322</b>    | -422,827                     | -323,342                      | -263,725                       | -310,400                      | -464,500                    |
| <b>329</b>    | -423,164                     | -368,475                      | -330,917                       | -338,940                      | -453,111                    |
| <b>330</b>    | -390,702                     | -377,721                      | -339,788                       | -327,985                      | -438,141                    |
| <b>334</b>    | -351,445                     | -361,845                      | -314,518                       | -327,985                      | -408,490                    |
| <b>336</b>    | -416,427                     | -365,933                      | -314,518                       | -352,890                      | -428,378                    |
| <b>343</b>    | -427,727                     | -408,917                      | -285,775                       | -426,000                      | -450,111                    |
| <b>350</b>    | -393,500                     | -373,873                      | -247,433                       | -382,130                      | -378,456                    |
| <b>357</b>    | -443,818                     | -424,583                      | -249,808                       | -442,700                      | -424,333                    |
| <b>360</b>    | -377,360                     | -342,417                      | -320,191                       | -353,119                      | -375,554                    |
| <b>364</b>    | -327,227                     | -342,417                      | -313,013                       | -353,119                      | -322,152                    |
| <b>371</b>    | -370,675                     | -355,038                      | -383,225                       | -394,733                      | -324,850                    |
| <b>378</b>    | -355,563                     | -320,463                      | -389,200                       | -392,783                      | -251,467                    |
| <b>385</b>    | -356,538                     | -319,700                      | -318,825                       | -370,950                      | -290,529                    |
| <b>390</b>    | -482,454                     | -388,736                      | -444,138                       | -372,674                      | -552,878                    |
| <b>392</b>    | -357,063                     | -283,975                      | -406,988                       | -329,243                      | -267,857                    |
| <b>399</b>    | -461,400                     | -385,350                      | -422,950                       | -376,957                      | -373,771                    |
| <b>406</b>    | -493,750                     | -403,800                      | -419,813                       | -375,814                      | -385,771                    |
| <b>413</b>    | -509,538                     | -421,263                      | -422,275                       | -369,200                      | -445,586                    |
| <b>420</b>    | -487,146                     | -435,090                      | -290,294                       | -351,145                      | -380,513                    |
| <b>427</b>    | -476,575                     | -388,600                      | -310,125                       | -373,400                      | -428,286                    |
| <b>434</b>    | -511,638                     | -459,563                      | -274,425                       | -372,114                      | -450,500                    |
| <b>441</b>    | -498,038                     | -453,438                      | -285,600                       | -376,086                      | -344,757                    |
| <b>448</b>    | -474,875                     | -423,050                      | -304,400                       | -375,271                      | -388,571                    |
| <b>450</b>    | -413,076                     | -451,354                      | -348,844                       | -386,913                      | -423,445                    |
| <b>455</b>    | -419,575                     | -433,925                      | -331,375                       | -367,243                      | -380,471                    |

| <b>Ημέρες</b> | <b>Ομάδα<br/>ΨΕΚ I (0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΨΕΚ II (0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΨΕΚ III (0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΨΕΚ IV (0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΑΝΑΦ (0,5)</b> |
|---------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| <b>462</b>    | -402,713                     | -403,650                      | -378,650                       | -362,575                      | -371,214                    |
| <b>469</b>    | -373,112                     | -391,456                      | -352,865                       | -369,141                      | -380,532                    |
| <b>476</b>    | -369,788                     | -383,338                      | -347,525                       | -377,550                      | -382,014                    |
| <b>480</b>    | -373,121                     | -400,419                      | -371,987                       | -396,768                      | -555,509                    |
| <b>483</b>    | -471,063                     | -412,725                      | -332,313                       | -374,013                      | -476,957                    |
| <b>490</b>    | -463,513                     | -392,288                      | -308,388                       | -378,013                      | -535,143                    |
| <b>497</b>    | -435,100                     | -387,425                      | -355,363                       | -378,913                      | -539,414                    |
| <b>504</b>    | -394,400                     | -385,413                      | -300,625                       | -369,000                      | -513,386                    |
| <b>510</b>    | -350,989                     | -419,048                      | -468,743                       | -384,850                      | -436,192                    |
| <b>511</b>    | -387,400                     | -379,750                      | -359,500                       | -368,675                      | -353,729                    |
| <b>518</b>    | -382,475                     | -411,963                      | -410,550                       | -381,138                      | -332,857                    |
| <b>525</b>    | -366,625                     | -444,700                      | -408,113                       | -376,000                      | -477,950                    |
| <b>532</b>    | -374,750                     | -399,375                      | -417,000                       | -372,713                      | -596,975                    |
| <b>539</b>    | -355,575                     | -423,150                      | -391,525                       | -358,313                      | -628,175                    |
| <b>540</b>    | -410,730                     | -424,528                      | -335,528                       | -411,318                      | -562,121                    |
| <b>546</b>    | -333,825                     | -436,275                      | -275,488                       | -353,625                      | -634,725                    |
| <b>553</b>    | -380,500                     | -433,825                      | -322,313                       | -375,388                      | -705,100                    |
| <b>560</b>    | -381,250                     | -429,300                      | -431,625                       | -372,013                      | -777,500                    |
| <b>567</b>    | -345,550                     | -422,600                      | -452,300                       | -367,663                      | -463,475                    |
| <b>570</b>    | -404,571                     | -418,935                      | -342,783                       | -391,366                      | -435,684                    |
| <b>574</b>    | -352,725                     | -438,150                      | -466,150                       | -372,400                      | -420,125                    |
| <b>581</b>    | -391,450                     | -347,300                      | -345,150                       | -389,325                      | -573,950                    |
| <b>588</b>    | -390,600                     | -349,700                      | -385,925                       | -372,350                      | -568,900                    |
| <b>595</b>    | -395,150                     | -351,425                      | -412,050                       | -365,763                      | -535,625                    |
| <b>600</b>    | -415,652                     | -414,802                      | -338,452                       | -413,541                      | -513,442                    |
| <b>602</b>    | -341,300                     | -293,125                      | -315,438                       | -340,113                      | -489,950                    |
| <b>609</b>    | -327,667                     | -415,075                      | -346,288                       | -371,163                      | -469,000                    |
| <b>616</b>    | -307,925                     | -371,550                      | -367,443                       | -339,700                      | -493,575                    |
| <b>623</b>    | -289,767                     | -336,250                      | -408,575                       | -344,500                      | -447,100                    |
| <b>630</b>    | -448,341                     | -395,432                      | -325,3424                      | -446,587                      | -478,685                    |
| <b>637</b>    | -282,300                     | -323,625                      | -352,960                       | -323,275                      | -408,400                    |
| <b>644</b>    | -291,700                     | -320,150                      | -249,250                       | -348,063                      | -507,100                    |
| <b>651</b>    | -279,667                     | -305,300                      | -256,340                       | -345,300                      | -481,225                    |
| <b>658</b>    | -285,775                     | -302,180                      | -270,050                       | -312,560                      | -454,360                    |
| <b>660</b>    | -459,371                     | -382,051                      | -314,654                       | -404,371                      | -456,845                    |
| <b>665</b>    | -303,420                     | -301,615                      | -297,400                       | -315,702                      | -352,600                    |
| <b>672</b>    | -332,200                     | -292,425                      | -296,850                       | -330,538                      | -296,150                    |
| <b>679</b>    | -346,967                     | -289,650                      | -292,860                       | -311,300                      | -290,525                    |
| <b>686</b>    | -362,300                     | -339,100                      | -288,530                       | -344,400                      | -350,950                    |
| <b>690</b>    | -438,712                     | -396,654                      | -321,562                       | -438,788                      | -463,582                    |

| Ημέρες | Ομάδα ΨΕΚ I (0,5) | Ομάδα ΨΕΚ II (0,5) | Ομάδα ΨΕΚ III (0,5) | Ομάδα ΨΕΚ IV (0,5) | Ομάδα ΑΝΑΦ (0,5) |
|--------|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| 693    | -355,400          | -309,875           | -312,595            | -304,625           | -378,125         |
| 700    | -348,520          | -304,920           | -276,540            | -315,640           | -382,345         |
| 707    | -352,630          | -312,410           | -286,510            | -309,816           | -376,412         |
| 714    | -341,608          | -299,252           | -285,400            | -321,525           | -395,450         |
| 720    | -345,912          | -300,705           | -292,550            | -441,321           | -496,577         |

**Πίνακας 10.18. Τιμές Δυναμικού Διάβρωσης σε mV για τις ομάδες δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,5**

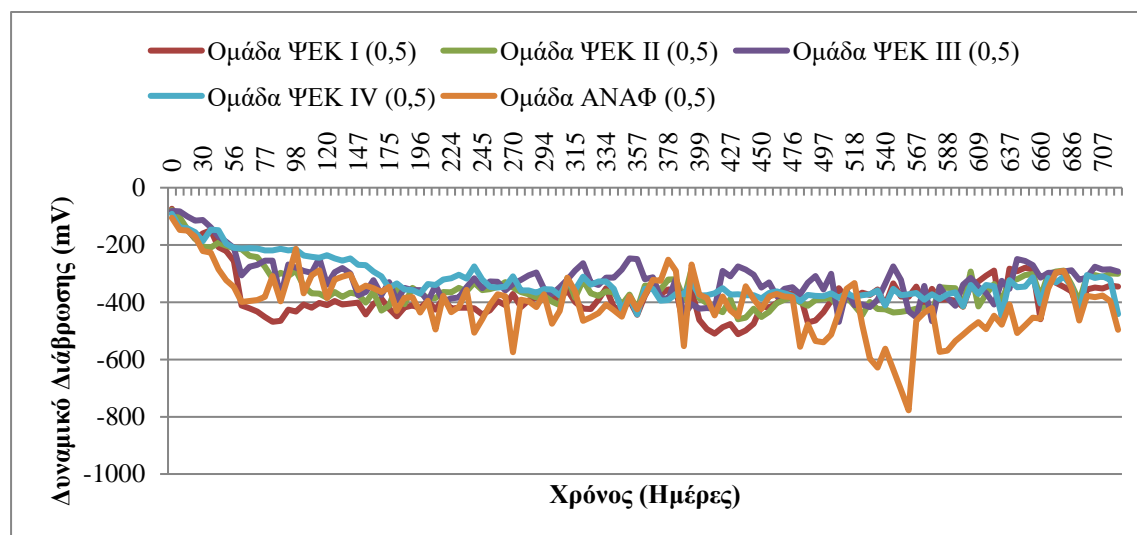
| Ημέρες | Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,5) | Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,5) | Ομάδα ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,5) | Ομάδα ΑΝΑΦ (0,5) |
|--------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------|
| 0      | -186,700               | -258,167               | -175,113                | -105,121         |
| 7      | -246,720               | -330,200               | -181,645                | -147,918         |
| 14     | -245,328               | -336,747               | -195,203                | -149,357         |
| 28     | -244,800               | -341,333               | -208,794                | -170,500         |
| 30     | -267,565               | -370,793               | -219,650                | -221,559         |
| 35     | -294,664               | -336,800               | -223,514                | -226,480         |
| 42     | -290,800               | -348,091               | -238,755                | -284,910         |
| 49     | -291,340               | -345,255               | -232,746                | -322,810         |
| 56     | -316,567               | -346,473               | -241,952                | -347,050         |
| 60     | -285,071               | -386,134               | -248,430                | -399,507         |
| 63     | -265,490               | -356,756               | -236,872                | -395,650         |
| 70     | -243,308               | -359,227               | -238,754                | -392,800         |
| 77     | -272,092               | -340,933               | -251,924                | -380,900         |
| 84     | -276,117               | -366,673               | -248,532                | -309,025         |
| 90     | -283,606               | -379,925               | -262,156                | -397,126         |
| 91     | -254,883               | -361,382               | -259,654                | -308,311         |
| 98     | -229,392               | -350,136               | -261,354                | -213,075         |
| 105    | -246,158               | -339,818               | -264,865                | -369,057         |
| 112    | -226,967               | -319,908               | -270,901                | -306,588         |
| 119    | -239,667               | -320,042               | -278,350                | -288,014         |
| 120    | -284,481               | -366,861               | -277,638                | -386,048         |
| 126    | -231,450               | -318,567               | -269,243                | -320,413         |
| 133    | -232,817               | -316,208               | -275,783                | -311,263         |
| 140    | -240,825               | -323,925               | -286,328                | -303,238         |
| 147    | -225,750               | -308,875               | -283,745                | -357,225         |
| 150    | -341,514               | -389,215               | -276,806                | -342,070         |
| 161    | -243,000               | -303,000               | -268,954                | -351,000         |
| 168    | -241,542               | -317,708               | -294,352                | -364,738         |

| <b>Ημέρες</b> | <b>Ομάδα<br/>ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4%<br/>(0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΑΝΑΦ (0,5)</b> |
|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------|
| 175           | -219,925                          | -303,100                          | -281,446                               | -346,063                    |
| 180           | -313,316                          | -356,770                          | -276,253                               | -430,857                    |
| 182           | -209,992                          | -306,017                          | -294,324                               | -384,163                    |
| 189           | -215,450                          | -293,675                          | -288,772                               | -382,388                    |
| 196           | -214,392                          | -307,192                          | -296,895                               | -435,511                    |
| 203           | -229,975                          | -297,150                          | -318,347                               | -394,056                    |
| 210           | -291,096                          | -349,379                          | -324,112                               | -495,174                    |
| 217           | -202,792                          | -287,508                          | -302,425                               | -378,233                    |
| 224           | -202,458                          | -208,467                          | -311,982                               | -434,789                    |
| 231           | -207,733                          | -281,042                          | -298,645                               | -416,456                    |
| 238           | -203,583                          | -286,900                          | -286,883                               | -356,844                    |
| 240           | -285,956                          | -325,587                          | -274,325                               | -506,128                    |
| 245           | -269,808                          | -308,600                          | -296,892                               | -459,100                    |
| 252           | -239,475                          | -255,367                          | -300,521                               | -409,433                    |
| 259           | -238,283                          | -276,333                          | -322,642                               | -372,090                    |
| 266           | -236,308                          | -274,058                          | -320,856                               | -378,810                    |
| 270           | -280,982                          | -312,524                          | -335,824                               | -574,649                    |
| 273           | -234,033                          | -293,917                          | -326,347                               | -391,736                    |
| 280           | -227,425                          | -270,058                          | -309,552                               | -396,680                    |
| 287           | -241,092                          | -265,600                          | -314,864                               | -417,482                    |
| 294           | -230,108                          | -267,150                          | -300,546                               | -372,082                    |
| 300           | -285,355                          | -311,151                          | -307,460                               | -475,036                    |
| 301           | -239,967                          | -277,383                          | -308,642                               | -430,056                    |
| 308           | -232,842                          | -256,992                          | -312,874                               | -314,622                    |
| 315           | -251,192                          | -294,958                          | -309,659                               | -362,433                    |
| 322           | -247,425                          | -278,408                          | -315,641                               | -464,500                    |
| 329           | -250,725                          | -278,950                          | -320,875                               | -453,111                    |
| 330           | -284,565                          | -301,094                          | -329,105                               | -438,141                    |
| 334           | -268,372                          | -311,830                          | -336,548                               | -408,490                    |
| 336           | -237,025                          | -260,625                          | -342,452                               | -428,378                    |
| 343           | -276,083                          | -283,500                          | -332,124                               | -450,111                    |
| 350           | -228,333                          | -249,083                          | -329,898                               | -378,456                    |
| 357           | -252,000                          | -310,917                          | -315,647                               | -424,333                    |
| 360           | -317,279                          | -312,908                          | -317,126                               | -375,554                    |
| 364           | -323,368                          | -303,680                          | -305,542                               | -322,152                    |
| 371           | -270,988                          | -275,938                          | -288,964                               | -324,850                    |
| 378           | -264,513                          | -269,938                          | -276,941                               | -251,467                    |
| 385           | -248,250                          | -241,275                          | -272,633                               | -290,529                    |
| 390           | -250,696                          | -336,547                          | -252,783                               | -552,878                    |
| 392           | -248,888                          | -263,225                          | -268,744                               | -267,857                    |

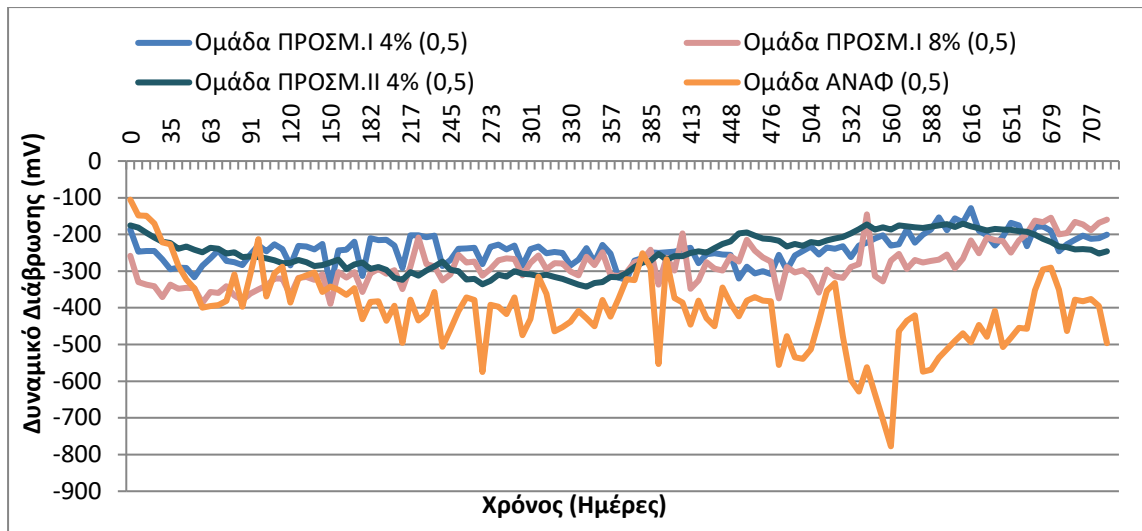
| <b>Ημέρες</b> | <b>Ομάδα<br/>ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4%<br/>(0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΑΝΑΦ (0,5)</b> |
|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------|
| <b>399</b>    | -247,125                          | -297,975                          | -259,216                               | -373,771                    |
| <b>406</b>    | -240,488                          | -197,375                          | -258,982                               | -385,771                    |
| <b>413</b>    | -236,688                          | -347,975                          | -250,254                               | -445,586                    |
| <b>420</b>    | -278,735                          | -325,131                          | -246,324                               | -380,513                    |
| <b>427</b>    | -254,175                          | -275,650                          | -249,748                               | -428,286                    |
| <b>434</b>    | -251,088                          | -293,113                          | -236,925                               | -450,500                    |
| <b>441</b>    | -255,025                          | -298,825                          | -225,852                               | -344,757                    |
| <b>448</b>    | -255,838                          | -259,113                          | -218,928                               | -388,571                    |
| <b>450</b>    | -319,934                          | -273,859                          | -197,355                               | -423,445                    |
| <b>455</b>    | -287,888                          | -214,363                          | -194,362                               | -380,471                    |
| <b>462</b>    | -306,075                          | -244,438                          | -203,544                               | -371,214                    |
| <b>469</b>    | -300,558                          | -262,653                          | -210,787                               | -380,532                    |
| <b>476</b>    | -307,663                          | -274,263                          | -212,631                               | -382,014                    |
| <b>480</b>    | -255,916                          | -374,524                          | -217,362                               | -555,509                    |
| <b>483</b>    | -297,763                          | -288,975                          | -232,846                               | -476,957                    |
| <b>490</b>    | -257,150                          | -303,850                          | -225,785                               | -535,143                    |
| <b>497</b>    | -245,463                          | -297,850                          | -230,982                               | -539,414                    |
| <b>504</b>    | -233,338                          | -316,857                          | -220,352                               | -513,386                    |
| <b>510</b>    | -254,341                          | -358,350                          | -223,806                               | -436,192                    |
| <b>511</b>    | -235,850                          | -295,600                          | -215,962                               | -353,729                    |
| <b>518</b>    | -239,150                          | -314,329                          | -211,298                               | -332,857                    |
| <b>525</b>    | -232,200                          | -318,500                          | -206,454                               | -477,950                    |
| <b>532</b>    | -262,075                          | -288,650                          | -197,392                               | -596,975                    |
| <b>539</b>    | -230,425                          | -280,775                          | -185,624                               | -628,175                    |
| <b>540</b>    | -222,462                          | -145,302                          | -172,402                               | -562,121                    |
| <b>546</b>    | -210,825                          | -313,067                          | -186,347                               | -634,725                    |
| <b>553</b>    | -202,375                          | -327,767                          | -180,985                               | -705,100                    |
| <b>560</b>    | -230,550                          | -271,000                          | -186,362                               | -777,500                    |
| <b>567</b>    | -226,725                          | -253,000                          | -175,648                               | -463,475                    |
| <b>570</b>    | -185,530                          | -293,849                          | -178,320                               | -435,684                    |
| <b>574</b>    | -222,100                          | -269,700                          | -180,694                               | -420,125                    |
| <b>581</b>    | -200,900                          | -276,500                          | -182,352                               | -573,950                    |
| <b>588</b>    | -186,450                          | -272,150                          | -179,266                               | -568,900                    |
| <b>595</b>    | -153,525                          | -269,100                          | -175,327                               | -535,625                    |
| <b>600</b>    | -188,235                          | -254,352                          | -171,452                               | -513,442                    |
| <b>602</b>    | -156,450                          | -291,967                          | -179,685                               | -489,950                    |
| <b>609</b>    | -167,575                          | -266,425                          | -170,652                               | -469,000                    |
| <b>616</b>    | -128,225                          | -216,350                          | -178,146                               | -493,575                    |
| <b>623</b>    | -190,000                          | -251,700                          | -182,898                               | -447,100                    |
| <b>630</b>    | -202,147                          | -208,216                          | -188,934                               | -478,685                    |

| Ημέρες | Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,5) | Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,5) | Ομάδα ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,5) | Ομάδα ΑΝΑΦ (0,5) |
|--------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------|
| 637    | -230,500               | -215,575               | -184,654                | -408,400         |
| 644    | -205,833               | -218,350               | -186,321                | -507,100         |
| 651    | -168,633               | -249,900               | -187,973                | -481,225         |
| 658    | -175,620               | -216,580               | -190,682                | -454,360         |
| 660    | -231,735               | -197,460               | -192,644                | -456,845         |
| 665    | -179,800               | -162,100               | -200,832                | -352,600         |
| 672    | -178,350               | -166,967               | -212,336                | -296,150         |
| 679    | -190,125               | -154,133               | -220,847                | -290,525         |
| 686    | -245,875               | -200,200               | -232,789                | -350,950         |
| 690    | -226,741               | -196,582               | -234,820                | -463,582         |
| 693    | -214,200               | -165,667               | -240,754                | -378,125         |
| 700    | -203,590               | -172,350               | -239,882                | -382,345         |
| 707    | -211,585               | -188,700               | -241,326                | -376,412         |
| 714    | -210,408               | -168,800               | -252,351                | -395,450         |
| 720    | -200,340               | -159,410               | -245,673                | -496,577         |

Στα σχήματα 10.15 και 10.16 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου για τις ομάδες δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα και για τις ομάδες δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα αντίστοιχα.



*Σχήμα 10.15: Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε οπλισμένα δοκίμια με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl για διάστημα 720 ημερών*



**Σχήμα 10.16:** Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσεως του χρόνου έκθεσης σε οπλισμένα δοκίμια με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl για διάστημα 720 ημερών

#### Μερικό συμπέρασμα 11:

Στα σχήματα 10.15 και 10.16 φαίνεται το δυναμικό διάβρωσης των οπλισμών συναρτήσεως του χρόνου ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι τα δυναμικά όλων των ομάδων δοκιμίων κατά το μεγαλύτερο διάστημα παραμονής στο διάλυμα 3,5% NaCl, κυμαίνονται μεταξύ -200mV και -500mV. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87 υπάρχει υψηλή πιθανότητα διάβρωσης. Τα δοκίμια στα οποία έχει γίνει προσθήκη του αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτου φαίνεται να εμφανίζουν πιο ηλεκτροθετικές τιμές από τις υπόλοιπες ομάδες δοκιμίων (τιμές -150 έως -400 mV). Επίσης, τα δοκίμια αναφοράς φαίνεται να παρουσιάζουν πιο ηλεκτραρνητικές τιμές σε σχέση με τα δοκίμια στα οποία έχει εφαρμοστεί προστασία.

#### 10.2.1.2. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας

Για τον προσδιορισμό της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας έγιναν μετρήσεις γραμμικής πόλωσης ανά μήνα για συνολικό χρόνο έκθεσης 24 μηνών στο διαβρωτικό περιβάλλον μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl, σε όλες τις ομάδες δοκιμίων. Η πειραματική διάταξη για τη διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών μετρήσεων περιελάμβανε Ποτενσιοστάτη/ Γαλβανοστάτη της E.G. & Model 263 συνδεδεμένο με

υπολογιστή για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων. Για την επεξεργασία των ηλεκτροχημικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε λογισμικό Power Suite της εταιρείας E.G. & G Princeton Research. Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο Ag/AgCl, ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκε ράβδος άνθρακα διαστάσεων 100mm μήκους και 10mm διάμετρο και ηλεκτρόδιο εργασίας ο υπό εξέταση χάλυβας. Η περιοχή πόλωσης του χάλυβα ήταν  $\pm 10\text{mV}$  από το δυναμικό διάβρωσης ( $E_{\text{corr}}$ ) του υπό εξέταση χάλυβα Ο.Σ και το βήμα σάρωσης ( $Scan\ rate$ ) του δυναμικού ήταν  $0,1\text{mV/sec}$ .

Οι τιμές της αντίστασης πόλωσης  $R_p$  που υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στους Πίνακες 10.19 και 10.20, ενώ η γραφική παράσταση της αντίστασης πόλωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον φαίνεται στα Σχήματα 10.17 και 10.18.

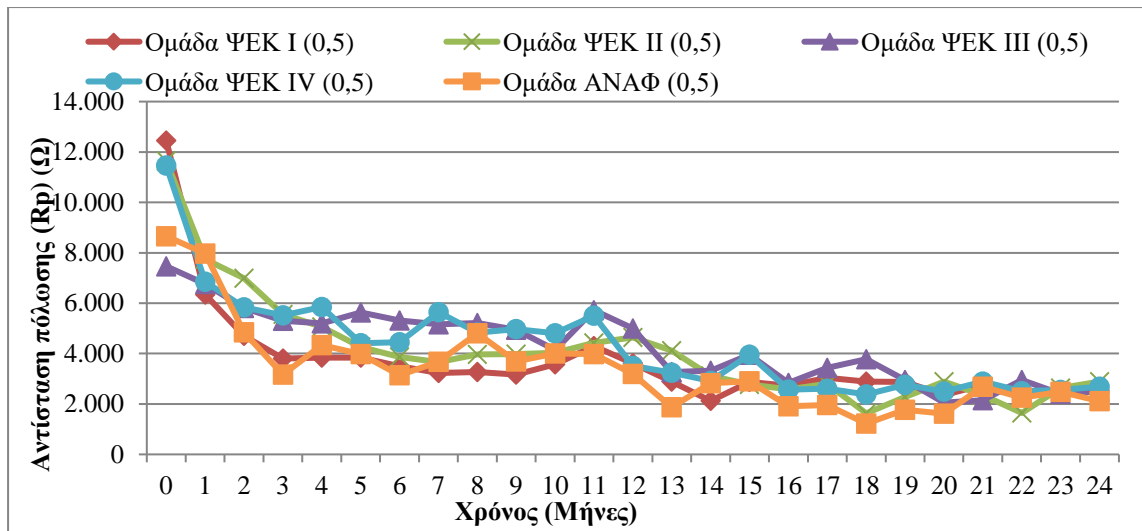
**Πίνακας 10.19. Τιμές της αντίστασης πόλωσης ( $R_p$ ) για τις ομάδες δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,5**

| Μήνες | Ομάδα ΨΕΚ I (0,5) | Ομάδα ΨΕΚ II (0,5) | Ομάδα ΨΕΚ III (0,5) | Ομάδα ΨΕΚ IV (0,5) | Ομάδα ΑΝΑΦ (0,5) |
|-------|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| 0     | 12.451,317        | 11.651,955         | 7.463,947           | 11.457,937         | 8.657,044        |
| 1     | 6.346,838         | 7.737,143          | 6.756,423           | 6.852,363          | 7.969,146        |
| 2     | 4.706,022         | 6.986,984          | 5.808,613           | 5.839,486          | 4.848,115        |
| 3     | 3.806,091         | 5.550,075          | 5.301,969           | 5.514,558          | 3.167,229        |
| 4     | 3.839,580         | 5.064,445          | 5.201,816           | 5.846,463          | 4.341,439        |
| 5     | 3.834,704         | 4.256,539          | 5.634,833           | 4.407,822          | 3.979,539        |
| 6     | 3.500,061         | 3.867,524          | 5.313,104           | 4.453,610          | 3.146,540        |
| 7     | 3.232,761         | 3.661,203          | 5.166,055           | 5.649,900          | 3.670,391        |
| 8     | 3.272,584         | 3.961,947          | 5.210,941           | 4.827,091          | 4.803,349        |
| 9     | 3.173,585         | 3.977,776          | 4.949,184           | 4.972,243          | 3.685,164        |
| 10    | 3.573,431         | 4.027,525          | 4.145,718           | 4.810,437          | 4.000,943        |
| 11    | 4.293,175         | 4.428,530          | 5.725,550           | 5.503,671          | 3.985,621        |
| 12    | 3.618,440         | 4.647,490          | 4.997,576           | 3.516,622          | 3.196,534        |
| 13    | 2.886,684         | 4.116,822          | 3.267,400           | 3.245,942          | 1.877,083        |
| 14    | 2.120,774         | 3.119,146          | 3.316,760           | 2.913,605          | 2.825,454        |
| 15    | 2.870,778         | 2.780,064          | 3.957,018           | 3.954,020          | 2.904,048        |
| 16    | 2.727,587         | 2.582,080          | 2.834,049           | 2.572,330          | 1.907,825        |
| 17    | 3.040,533         | 2.796,462          | 3.439,474           | 2.612,749          | 1.961,334        |

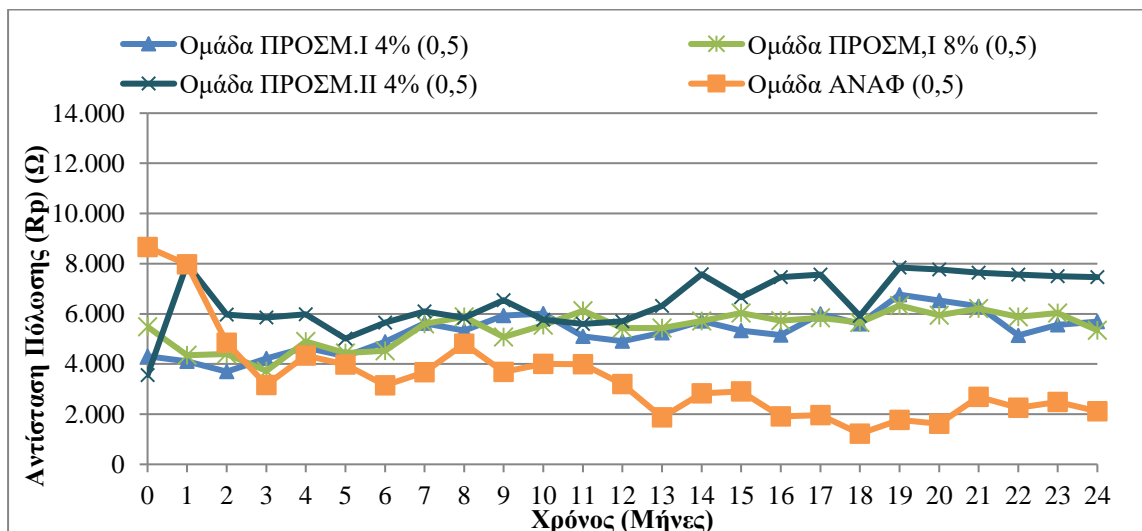
| Μήνες | Ομάδα ΨΕΚ I (0,5) | Ομάδα ΨΕΚ II (0,5) | Ομάδα ΨΕΚ III (0,5) | Ομάδα ΨΕΚ IV (0,5) | Ομάδα ΑΝΑΦ (0,5) |
|-------|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| 18    | 2.882,143         | 1.629,754          | 3.776,129           | 2.378,130          | 1.221,617        |
| 19    | 2.879,751         | 2.278,561          | 2.952,416           | 2.765,177          | 1.773,363        |
| 20    | 2.354,323         | 2.883,652          | 2.053,889           | 2.495,326          | 1.621,587        |
| 21    | 2.762,177         | 2.358,457          | 2.150,487           | 2.892,104          | 2.687,521        |
| 22    | 2.408,081         | 1.649,144          | 2.954,251           | 2.511,081          | 2.255,239        |
| 23    | 2.472,654         | 2.632,252          | 2.407,632           | 2.557,692          | 2.482,623        |
| 24    | 2.535,689         | 2.886,541          | 2.511,247           | 2.682,441          | 2.118,656        |

**Πίνακας 10.20. Τιμές της αντίστασης πόλωσης (Rp) για τις ομάδες δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,5**

| Μήνες | Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,5) | Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,5) | Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Π 4% (0,5) | Ομάδα ΑΝΑΦ (0,5) |
|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------|
| 0     | 4.308,948              | 5.484,348              | 3560,613               | 8.657,044        |
| 1     | 4.111,039              | 4.346,934              | 7983,642               | 7.969,146        |
| 2     | 3.695,672              | 4.394,735              | 5975,764               | 4.848,115        |
| 3     | 4.227,101              | 3.723,007              | 5854,755               | 3.167,229        |
| 4     | 4.655,678              | 4.893,999              | 5985,126               | 4.341,439        |
| 5     | 4.310,972              | 4.431,729              | 5016,984               | 3.979,539        |
| 6     | 4.885,423              | 4.532,101              | 5645,547               | 3.146,540        |
| 7     | 5.618,884              | 5.603,442              | 6096,698               | 3.670,391        |
| 8     | 5.326,936              | 5.883,283              | 5845,944               | 4.803,349        |
| 9     | 5.936,498              | 5.075,623              | 6548,362               | 3.685,164        |
| 10    | 6.007,195              | 5.545,135              | 5765,151               | 4.000,943        |
| 11    | 5.098,428              | 6.117,548              | 5596,168               | 3.985,621        |
| 12    | 4.906,507              | 5.438,390              | 5696,757               | 3.196,534        |
| 13    | 5.237,345              | 5.431,738              | 6314,852               | 1.877,083        |
| 14    | 5.713,197              | 5.712,942              | 7571,284               | 2.825,454        |
| 15    | 5.336,980              | 6.032,518              | 6658,365               | 2.904,048        |
| 16    | 5.153,167              | 5.729,788              | 7456,423               | 1.907,825        |
| 17    | 5.995,125              | 5.843,429              | 7558,787               | 1.961,334        |
| 18    | 5.598,443              | 5.647,619              | 5916,464               | 1.221,617        |
| 19    | 6.763,710              | 6.332,070              | 7845,189               | 1.773,363        |
| 20    | 6.532,415              | 5.938,548              | 7765,335               | 1.621,587        |
| 21    | 6.298,016              | 6.213,365              | 7645,874               | 2.687,521        |
| 22    | 5.142,388              | 5.881,536              | 7563,648               | 2.255,239        |
| 23    | 5557,692               | 6028,674               | 7498,352               | 2.482,623        |
| 24    | 5682,441               | 5349,347               | 7462,445               | 2.118,656        |



**Σχήμα 10.17:** Αντίσταση πόλωσης ( $R_p$ ) δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα και αναλογία νερού 0,5 συναρτήσε του χρόνου παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον



**Σχήμα 10.18:** Αντίσταση πόλωσης ( $R_p$ ) δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα και αναλογία νερού 0,5 συναρτήσε του χρόνου παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον

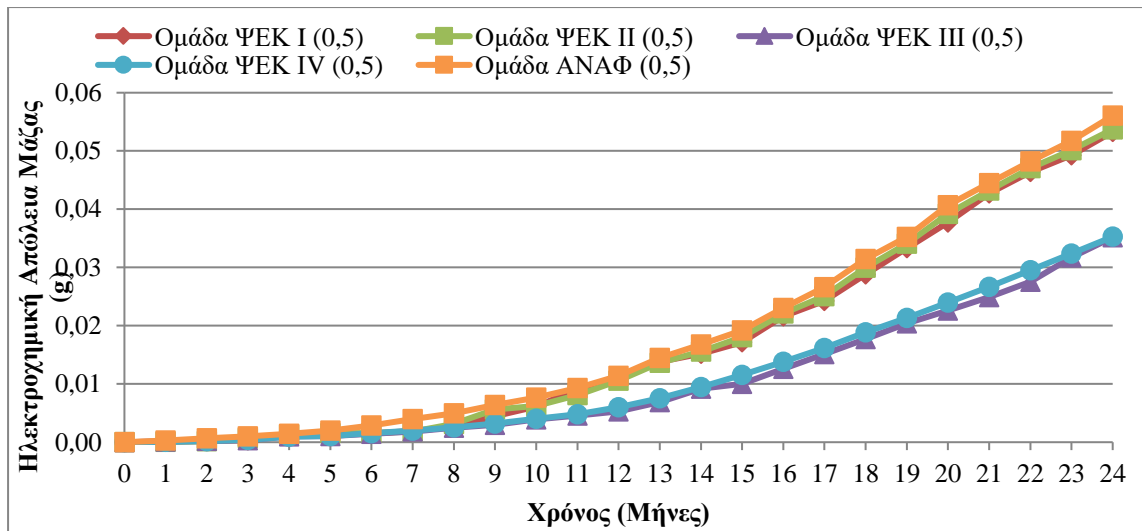
Στη συνέχεια με βάση τις τιμές του ρεύματος διάβρωσης του χάλυβα,  $I_{corr}$ , υπολογίστηκαν οι τιμές της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας (g), όπως φαίνονται στους Πίνακες 10.21 και 10.22. Στα σχήματα 10.19 και 10.20 δίνονται οι γραφικές παραστάσεις της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας των δοκιμίων συναρτήσε του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον.

**Πίνακας 10.21. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα και αναλογία νερού 0,5**

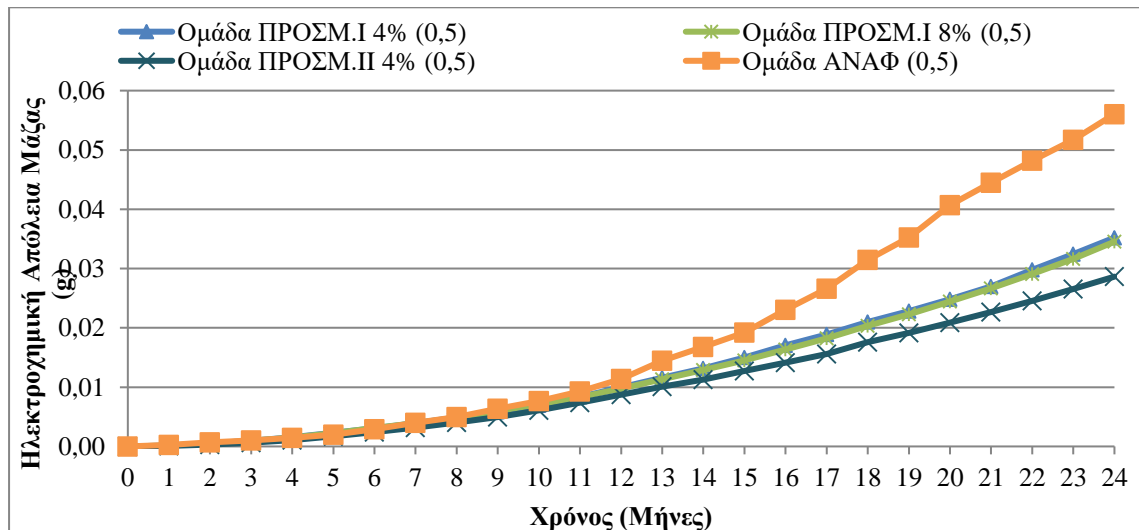
| <b>Μήνες</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ I (0,5)</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ II (0,5)</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ III (0,5)</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ IV (0,5)</b> | <b>Ομάδα ΑΝΑΦ (0,5)</b> |
|--------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>0</b>     | 0,0000                   | 0,0000                    | 0,0000                     | 0,0000                    | 0,0000                  |
| <b>1</b>     | 0,0001                   | 0,0001                    | 0,0001                     | 0,0001                    | 0,0003                  |
| <b>2</b>     | 0,0002                   | 0,0002                    | 0,0002                     | 0,0002                    | 0,0007                  |
| <b>3</b>     | 0,0003                   | 0,0007                    | 0,0003                     | 0,0004                    | 0,0010                  |
| <b>4</b>     | 0,0013                   | 0,0013                    | 0,0010                     | 0,0010                    | 0,0014                  |
| <b>5</b>     | 0,0014                   | 0,0016                    | 0,0010                     | 0,0011                    | 0,0020                  |
| <b>6</b>     | 0,0015                   | 0,0016                    | 0,0014                     | 0,0015                    | 0,0029                  |
| <b>7</b>     | 0,0019                   | 0,0018                    | 0,0018                     | 0,0020                    | 0,0040                  |
| <b>8</b>     | 0,0026                   | 0,0031                    | 0,0025                     | 0,0026                    | 0,0049                  |
| <b>9</b>     | 0,0045                   | 0,0056                    | 0,0030                     | 0,0032                    | 0,0064                  |
| <b>10</b>    | 0,0061                   | 0,0062                    | 0,0039                     | 0,0040                    | 0,0076                  |
| <b>11</b>    | 0,0091                   | 0,0081                    | 0,0046                     | 0,0048                    | 0,0093                  |
| <b>12</b>    | 0,0111                   | 0,0106                    | 0,0053                     | 0,0060                    | 0,0114                  |
| <b>13</b>    | 0,0138                   | 0,0136                    | 0,0069                     | 0,0075                    | 0,0145                  |
| <b>14</b>    | 0,0152                   | 0,0155                    | 0,0092                     | 0,0094                    | 0,0168                  |
| <b>15</b>    | 0,0172                   | 0,0181                    | 0,0100                     | 0,0116                    | 0,0192                  |
| <b>16</b>    | 0,0216                   | 0,0221                    | 0,0126                     | 0,0138                    | 0,0230                  |
| <b>17</b>    | 0,0242                   | 0,0251                    | 0,0151                     | 0,0162                    | 0,0266                  |
| <b>18</b>    | 0,0288                   | 0,0300                    | 0,0177                     | 0,0189                    | 0,0315                  |
| <b>19</b>    | 0,0333                   | 0,0341                    | 0,0204                     | 0,0213                    | 0,0352                  |
| <b>20</b>    | 0,0377                   | 0,0392                    | 0,0226                     | 0,0240                    | 0,0407                  |
| <b>21</b>    | 0,0427                   | 0,0432                    | 0,0249                     | 0,0267                    | 0,0445                  |
| <b>22</b>    | 0,0464                   | 0,0471                    | 0,0275                     | 0,0295                    | 0,0482                  |
| <b>23</b>    | 0,0492                   | 0,0501                    | 0,0317                     | 0,0324                    | 0,0517                  |
| <b>24</b>    | 0,0533                   | 0,0537                    | 0,0352                     | 0,0353                    | 0,0560                  |

**Πίνακας 10.22. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα και αναλογία νερού 0,5**

| <b>Μήνες</b> | <b>Ομάδα<br/>ΠΡΟΣΜ.Ι 4%<br/>(0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΠΡΟΣΜ.Ι 8%<br/>(0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΠΡΟΣΜ.Π 4%<br/>(0,5)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΑΝΑΦ (0,5)</b> |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| 0            | 0,0000                                | 0,0000                                | 0,0000                                | 0,0000                      |
| 1            | 0,0002                                | 0,0001                                | 0,0001                                | 0,0003                      |
| 2            | 0,0005                                | 0,0004                                | 0,0003                                | 0,0007                      |
| 3            | 0,0010                                | 0,0010                                | 0,0006                                | 0,0010                      |
| 4            | 0,0015                                | 0,0015                                | 0,0011                                | 0,0014                      |
| 5            | 0,0023                                | 0,0022                                | 0,0017                                | 0,0020                      |
| 6            | 0,0031                                | 0,0031                                | 0,0024                                | 0,0029                      |
| 7            | 0,0039                                | 0,0039                                | 0,0032                                | 0,0040                      |
| 8            | 0,0049                                | 0,0048                                | 0,0041                                | 0,0049                      |
| 9            | 0,0059                                | 0,0060                                | 0,0049                                | 0,0064                      |
| 10           | 0,0070                                | 0,0071                                | 0,0061                                | 0,0076                      |
| 11           | 0,0084                                | 0,0083                                | 0,0074                                | 0,0093                      |
| 12           | 0,0100                                | 0,0097                                | 0,0087                                | 0,0114                      |
| 13           | 0,0116                                | 0,0113                                | 0,0101                                | 0,0145                      |
| 14           | 0,0132                                | 0,0129                                | 0,0113                                | 0,0168                      |
| 15           | 0,0150                                | 0,0145                                | 0,0127                                | 0,0192                      |
| 16           | 0,0170                                | 0,0163                                | 0,0141                                | 0,0230                      |
| 17           | 0,0189                                | 0,0182                                | 0,0156                                | 0,0266                      |
| 18           | 0,0210                                | 0,0203                                | 0,0176                                | 0,0315                      |
| 19           | 0,0228                                | 0,0223                                | 0,0192                                | 0,0352                      |
| 20           | 0,0248                                | 0,0245                                | 0,0209                                | 0,0407                      |
| 21           | 0,0270                                | 0,0267                                | 0,0226                                | 0,0445                      |
| 22           | 0,0298                                | 0,0291                                | 0,0245                                | 0,0482                      |
| 23           | 0,0325                                | 0,0316                                | 0,0265                                | 0,0517                      |
| 24           | 0,0352                                | 0,0345                                | 0,0286                                | 0,0560                      |



*Σχήμα10.19: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,5*



*Σχήμα10.20: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,5*

### Μερικό συμπέρασμα 12:

Από το σχήμα 10.19 παρατηρείται ότι τα δοκίμια αναφοράς, καθώς και τα δοκίμια της ομάδας ΨΕΚ II (0,5) παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας μετά από 24 μήνες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον. Τη μικρότερη ηλεκτροχημική απώλεια παρουσιάζουν τα δοκίμια των ομάδων ΨΕΚ III και ΨΕΚ IV. Από το σχήμα 10.20 παρατηρείται ότι τη μικρότερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας φαίνεται να παρουσιάζει η ομάδα ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,5), δηλαδή τα δοκίμια στα οποία ο

αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) προστέθηκε ως πρόσμικτο με αναλογία 4%. Από τα δικάμια στα οποία ο αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) προστέθηκε ως πρόσθετο, η ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,5) (με αναλογία αναστολέα διάβρωσης 8%) παρουσιάζει μικρότερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας σε σχέση με την ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0.5), (με αναλογία αναστολέα διάβρωσης 4%).

### 10.2.1.3. Σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας

Για τον υπολογισμό της απώλειας μάζας των οπλισμών σπάστηκαν δοκίμια και από τις επτά ομάδες δοκιμίων στους 12, 18 και 24 μήνες από την ημερομηνία έκθεσης των δοκιμίων στο διαβρωτικό περιβάλλον. Στους Πίνακες 10.23, 10.24 και 10.25 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα απώλειας μάζας και για τις επτά ομάδες δοκιμίων μετά από 12, 18 και 24 μήνες και στα σχήματα 10.21 και 10.22 απεικονίζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

**Πίνακας 10.23. Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με αναλογία νερού 0,5 στους 12 μήνες**

|                            | μαρχ (g) | πτελ (g) | Απώλεια Μάζας (g) | Απώλεια Μάζας (%) |
|----------------------------|----------|----------|-------------------|-------------------|
| <b>Ομάδα ΨΕΚ Ι (0,5)</b>   | 65,0398  | 64,8993  | 0,1405            | 0,2160            |
|                            | 64,5104  | 64,3955  | 0,1149            | 0,1781            |
|                            | 65,0126  | 64,8128  | 0,1998            | 0,3073            |
|                            | 68,2576  | 68,1504  | 0,1072            | 0,1571            |
| <b>Μ.Ο. ΨΕΚ Ι (0,5)</b>    |          |          | <b>0,1406</b>     | <b>0,2146</b>     |
| <b>Ομάδα ΨΕΚ ΙΙ (0,5)</b>  | 66,1041  | 66,0198  | 0,0843            | 0,1275            |
|                            | 68,0034  | 67,8654  | 0,1380            | 0,2029            |
|                            | 63,7985  | 63,6511  | 0,1474            | 0,2310            |
|                            | 62,9275  | 62,8008  | 0,1267            | 0,2013            |
| <b>Μ.Ο. ΨΕΚ ΙΙ (0,5)</b>   |          |          | <b>0,1241</b>     | <b>0,1907</b>     |
| <b>Ομάδα ΨΕΚ ΙΙΙ (0,5)</b> | 60,6925  | 60,5879  | 0,1046            | 0,1723            |
|                            | 64,4387  | 64,3280  | 0,1107            | 0,1718            |
|                            | 68,2505  | 68,1845  | 0,0660            | 0,0967            |
|                            | 62,6342  | 62,3538  | 0,2804            | 0,4477            |
| <b>Μ.Ο. ΨΕΚ ΙΙΙ (0,5)</b>  |          |          | <b>0,1404</b>     | <b>0,2221</b>     |
| <b>Ομάδα ΨΕΚ ΙV (0,5)</b>  | 65,8177  | 65,7245  | 0,0932            | 0,1416            |
|                            | 61,0906  | 60,9934  | 0,0972            | 0,1591            |
|                            | 66,5964  | 66,4685  | 0,1279            | 0,1921            |

|                                |                               |         |               |               |
|--------------------------------|-------------------------------|---------|---------------|---------------|
|                                | 61,6075                       | 61,4992 | 0,1083        | 0,1758        |
|                                | <b>M.O. ΨΕΚ IV (0,5)</b>      |         | <b>0,1067</b> | <b>0,1671</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,5)</b>  | 64,6703                       | 64,5824 | 0,0879        | 0,1359        |
|                                | 61,8059                       | 61,7474 | 0,0585        | 0,0947        |
|                                | 61,6327                       | 61,4996 | 0,1331        | 0,2160        |
|                                | 61,621                        | 61,5136 | 0,1074        | 0,1743        |
|                                | <b>M.O. ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,5)</b>  |         | <b>0,0967</b> | <b>0,1552</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,5)</b>  | 65,7599                       | 65,6070 | 0,1529        | 0,2325        |
|                                | 62,2357                       | 62,1156 | 0,1201        | 0,1930        |
|                                | 64,1364                       | 64,1259 | 0,0105        | 0,0164        |
|                                | 61,7442                       | 61,6296 | 0,1146        | 0,1856        |
|                                | <b>M.O. ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,5)</b>  |         | <b>0,0995</b> | <b>0,1569</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,5)</b> | 63,5621                       | 63,4519 | 0,1102        | 0,1734        |
|                                | 62,3284                       | 62,2329 | 0,0955        | 0,1532        |
|                                | 61,5483                       | 61,4536 | 0,0947        | 0,1539        |
|                                | 64,6542                       | 64,5497 | 0,1045        | 0,1616        |
|                                | <b>M.O. ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,5)</b> |         | <b>0,1012</b> | <b>0,1605</b> |
| <b>Ομάδα ΑΝΑΦ (0,5)</b>        | 64,1253                       | 63,9785 | 0,1468        | 0,2289        |
|                                | 64,1239                       | 64,001  | 0,1229        | 0,1917        |
|                                | 63,9575                       | 63,7602 | 0,1973        | 0,3085        |
|                                | 62,7604                       | 62,5751 | 0,1853        | 0,2952        |
|                                | <b>M.O. ΑΝΑΦ (0,5)</b>        |         | <b>0,1631</b> | <b>0,2561</b> |

**Πίνακας 10.24. Απώλεια μάζας σπλισμών δοκιμίων με αναλογία νερού 0,5 στους 18 μήνες**

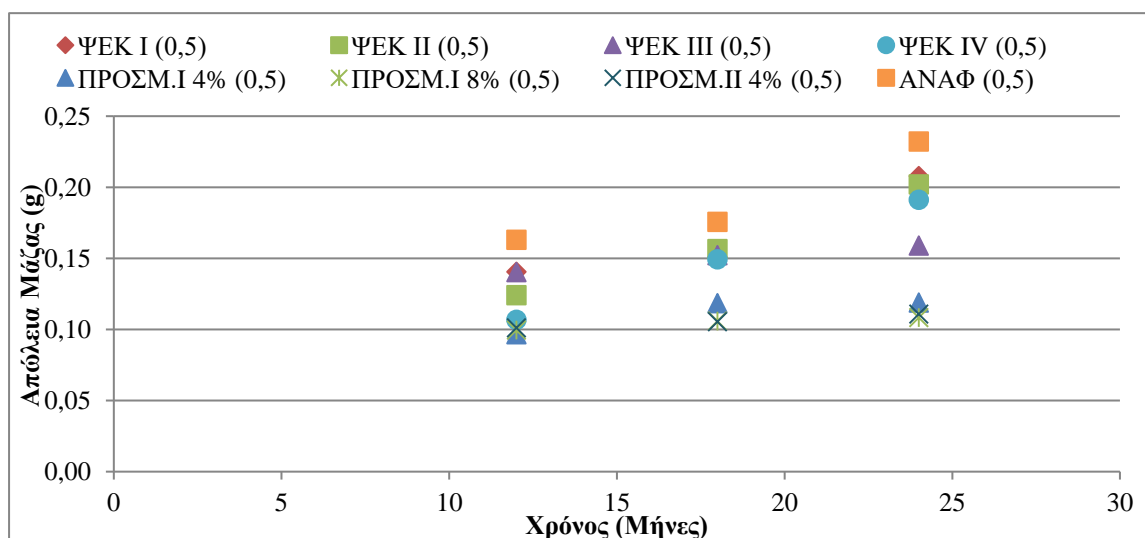
|                            | <b>παρχ (g)</b>           | <b>πτελ (g)</b> | <b>Απώλεια Μάζας (g)</b> | <b>Απώλεια Μάζας (%)</b> |
|----------------------------|---------------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>Ομάδα ΨΕΚ I (0,5)</b>   | 63,7316                   | 63,6023         | 0,1293                   | 0,2029                   |
|                            | 66,6738                   | 66,4981         | 0,1757                   | 0,2635                   |
|                            | 62,7562                   | 62,6095         | 0,1467                   | 0,2338                   |
|                            | <b>M.O. ΨΕΚ I (0,5)</b>   |                 | <b>0,1506</b>            | <b>0,2334</b>            |
| <b>Ομάδα ΨΕΚ II (0,5)</b>  | 62,8616                   | 62,6828         | 0,1788                   | 0,2844                   |
|                            | 63,4711                   | 63,3173         | 0,1538                   | 0,2423                   |
|                            | 65,8618                   | 65,7248         | 0,137                    | 0,2080                   |
|                            | <b>M.O. ΨΕΚ II (0,5)</b>  |                 | <b>0,1565</b>            | <b>0,2449</b>            |
| <b>Ομάδα ΨΕΚ III (0,5)</b> | 63,3941                   | 63,2773         | 0,1168                   | 0,1842                   |
|                            | 63,5041                   | 63,3504         | 0,1537                   | 0,2420                   |
|                            | 62,0766                   | 61,8902         | 0,1864                   | 0,3003                   |
|                            | <b>M.O. ΨΕΚ III (0,5)</b> |                 | <b>0,1523</b>            | <b>0,2422</b>            |

|                                |         |         |               |               |
|--------------------------------|---------|---------|---------------|---------------|
| <b>Ομάδα ΨΕΚ IV (0,5)</b>      | 62,6460 | 62,4932 | 0,1528        | 0,2439        |
|                                | 62,9538 | 62,7845 | 0,1693        | 0,2689        |
|                                | 67,4541 | 67,3282 | 0,1259        | 0,1866        |
| <b>M.O. ΨΕΚ IV (0,5)</b>       |         |         | <b>0,1493</b> | <b>0,2332</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,5)</b>  | 64,2027 | 64,1059 | 0,0968        | 0,1508        |
|                                | 63,5860 | 63,4592 | 0,1268        | 0,1994        |
|                                | 66,6730 | 66,5412 | 0,1318        | 0,1977        |
| <b>M.O. ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,5)</b>   |         |         | <b>0,1185</b> | <b>0,1826</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,5)</b>  | 62,4381 | 62,3313 | 0,1068        | 0,1710        |
|                                | 62,1083 | 62,0023 | 0,1060        | 0,1707        |
|                                | 62,1358 | 62,0308 | 0,1050        | 0,1690        |
| <b>M.O. ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,5)</b>   |         |         | <b>0,1059</b> | <b>0,1702</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,5)</b> | 62,5222 | 62,4086 | 0,1136        | 0,1817        |
|                                | 61,8372 | 61,7298 | 0,1074        | 0,1737        |
|                                | 62,1238 | 62,0326 | 0,0912        | 0,1468        |
|                                | 63,4292 | 63,3198 | 0,1094        | 0,1725        |
| <b>M.O. ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,5)</b>  |         |         | <b>0,1054</b> | <b>0,1687</b> |
| <b>Ομάδα ΑΝΑΦ (0,5)</b>        | 65,4959 | 65,3118 | 0,1841        | 0,2811        |
|                                | 63,4515 | 63,3108 | 0,1407        | 0,2217        |
|                                | 63,0564 | 62,8542 | 0,2022        | 0,3207        |
| <b>M.O. ΑΝΑΦ (0,5)</b>         |         |         | <b>0,1757</b> | <b>0,2745</b> |

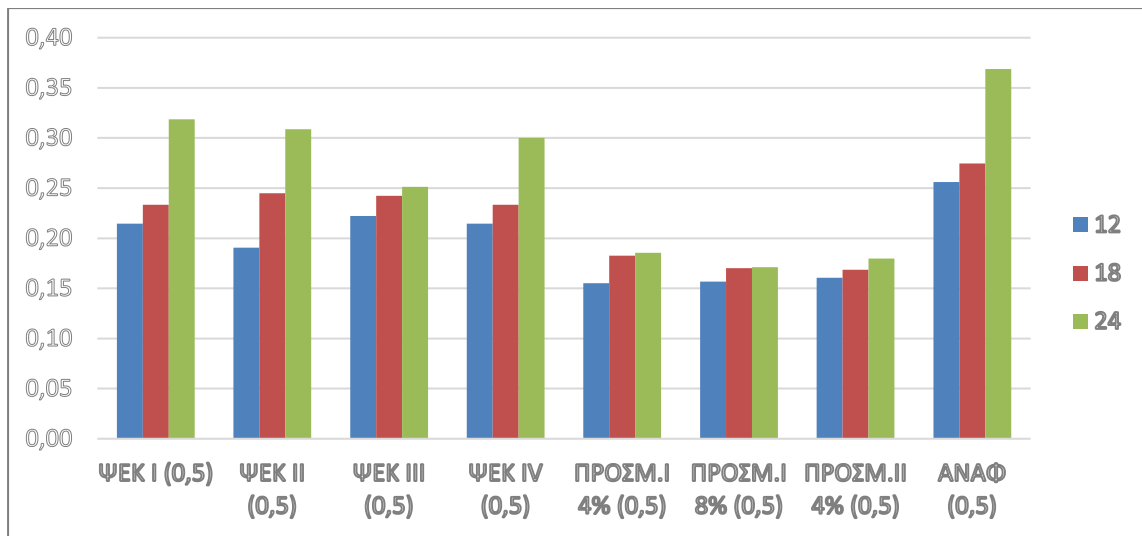
**Πίνακας 10.25. Απώλεια μάζας σπλισμών δοκιμίων με αναλογία νερού 0,5 στους 24 μήνες**

|                            | <b>μαρχ<br/>(g)</b> | <b>πτειλ<br/>(g)</b> | <b>Απώλεια<br/>Μάζας (g)</b> | <b>Απώλεια<br/>Μάζας (%)</b> |
|----------------------------|---------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>Ομάδα ΨΕΚ I (0,5)</b>   | 63,4490             | 63,2994              | 0,1496                       | 0,2358                       |
|                            | 67,2205             | 67,0016              | 0,2189                       | 0,3256                       |
|                            | 65,1803             | 64,9974              | 0,1829                       | 0,2806                       |
|                            | 64,6528             | 64,3732              | 0,2796                       | 0,4325                       |
| <b>M.O. ΨΕΚ I (0,5)</b>    |                     |                      | <b>0,2078</b>                | <b>0,3186</b>                |
| <b>Ομάδα ΨΕΚ ΙΙ (0,5)</b>  | 68,7766             | 68,5364              | 0,2402                       | 0,3492                       |
|                            | 62,7215             | 62,6162              | 0,1053                       | 0,1679                       |
|                            | 63,7319             | 63,4711              | 0,2608                       | 0,4092                       |
| <b>M.O. ΨΕΚ ΙΙ (0,5)</b>   |                     |                      | <b>0,2021</b>                | <b>0,3088</b>                |
| <b>Ομάδα ΨΕΚ ΙΙΙ (0,5)</b> | 64,7568             | 64,6089              | 0,1479                       | 0,2284                       |
|                            | 63,3644             | 63,2195              | 0,1449                       | 0,2287                       |
|                            | 61,8179             | 61,6397              | 0,1782                       | 0,2883                       |
|                            | 63,6137             | 63,4481              | 0,1656                       | 0,2603                       |
| <b>M.O. ΨΕΚ ΙΙΙ (0,5)</b>  |                     |                      | <b>0,1592</b>                | <b>0,2514</b>                |

|                                 |         |         |               |               |
|---------------------------------|---------|---------|---------------|---------------|
| <b>Ομάδα ΨΕΚ IV (0,5)</b>       | 63,0178 | 62,8462 | 0,1716        | 0,2723        |
|                                 | 62,7604 | 62,5654 | 0,195         | 0,3107        |
|                                 | 63,984  | 63,7523 | 0,2317        | 0,3621        |
|                                 | 65,0282 | 64,8622 | 0,166         | 0,2553        |
| <b>Μ.Ο. ΨΕΚ IV (0,5)</b>        |         |         | <b>0,1911</b> | <b>0,3001</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ. I 4% (0,5)</b>  | 64,8974 | 64,7788 | 0,1186        | 0,1828        |
|                                 | 62,125  | 62,0094 | 0,1156        | 0,1861        |
|                                 | 64,1515 | 64,0271 | 0,1244        | 0,1939        |
|                                 | 65,3943 | 65,2771 | 0,1172        | 0,1792        |
| <b>Μ.Ο. ΠΡΟΣΜ. I 4% (0,5)</b>   |         |         | <b>0,1190</b> | <b>0,1855</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ. I 8% (0,5)</b>  | 63,1744 | 63,0738 | 0,1006        | 0,1592        |
|                                 | 63,3752 | 63,2717 | 0,1035        | 0,1633        |
|                                 | 63,4648 | 63,3436 | 0,1212        | 0,1910        |
| <b>Μ.Ο. ΠΡΟΣΜ. I 8% (0,5)</b>   |         |         | <b>0,1084</b> | <b>0,1712</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ. II 4% (0,5)</b> | 61,1345 | 61,0184 | 0,1161        | 0,1899        |
|                                 | 62,2353 | 62,1355 | 0,0998        | 0,1604        |
|                                 | 60,9248 | 60,8172 | 0,1076        | 0,1766        |
|                                 | 62,2395 | 62,1198 | 0,1197        | 0,1923        |
| <b>Μ.Ο. ΠΡΟΣΜ. II 4% (0,5)</b>  |         |         | <b>0,1108</b> | <b>0,1798</b> |
| <b>Ομάδα ΑΝΑΦ (0,5)</b>         | 62,2467 | 62,0117 | 0,235         | 0,3775        |
|                                 | 62,2987 | 62,1165 | 0,1822        | 0,2925        |
|                                 | 64,0217 | 63,7423 | 0,2794        | 0,4364        |
| <b>Μ.Ο. ΑΝΑΦ (0,5)</b>          |         |         | <b>0,2322</b> | <b>0,3688</b> |



*Σχήμα 10.21: Απώλεια μάζας (g) των σπλισμών δοκιμίων των δοκιμίων με αναλογία νερού 0,5 μετά από 12, 18 και 24 μήνες στο διαβρωτικό περιβάλλον*



*Σχήμα 10.22: Απώλεια μάζας (%) οπλισμών δοκιμίων των δοκιμίων με αναλογία νερού 0,5 μετά από 12, 18 και 24 μήνες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον*

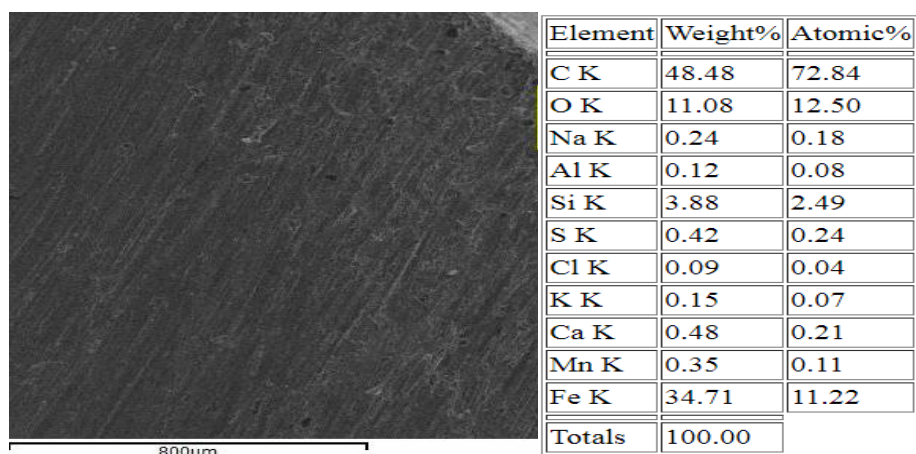
### **Μερικό συμπέρασμα 13:**

Από τα σχήματα 10.21 και 10.22 παρατηρείται ότι η απώλεια μάζας των οπλισμών αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Τα δοκίμια αναφοράς παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απώλεια μάζας του οπλισμού μετά από 12, 18 και 24 μήνες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον, ενώ ακολουθούν τα δοκίμια της ομάδας ΨΕΚ I, ΨΕΚ II και ΨΕΚ IV με μικρή διαφορά. Από τα δοκίμια στα οποία ο αναστολέας εφαρμόστηκε ως ψεκαζόμενος στο κονίαμα, τη μικρότερη απώλεια μάζας παρουσιάζουν τα δοκίμια της ομάδας ΨΕΚ III. Τα δοκίμια με τη μικρότερη απώλεια μάζας είναι αυτά στα οποία ο αναστολέας διάβρωσης έχει προστεθεί ως πρόσμικτος με αναλογία 4% και 8%. Συγκριτικά με τις δύο ομάδες στις οποίες ο αναστολέας διάβρωσης έχει προστεθεί ως πρόσμικτος, παρατηρείται ότι μετά την πάροδο 24 μηνών τα δοκίμια στα οποία ο αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) και έχει προστεθεί ως πρόσμικτος με αναλογία 4%, καθώς και τα δοκίμια στα οποία ο αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) και έχει προστεθεί ως πρόσμικτος με αναλογία 8%, παρουσιάζουν τη μικρότερη απώλεια μάζας.

#### 10.2.1.4. Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης

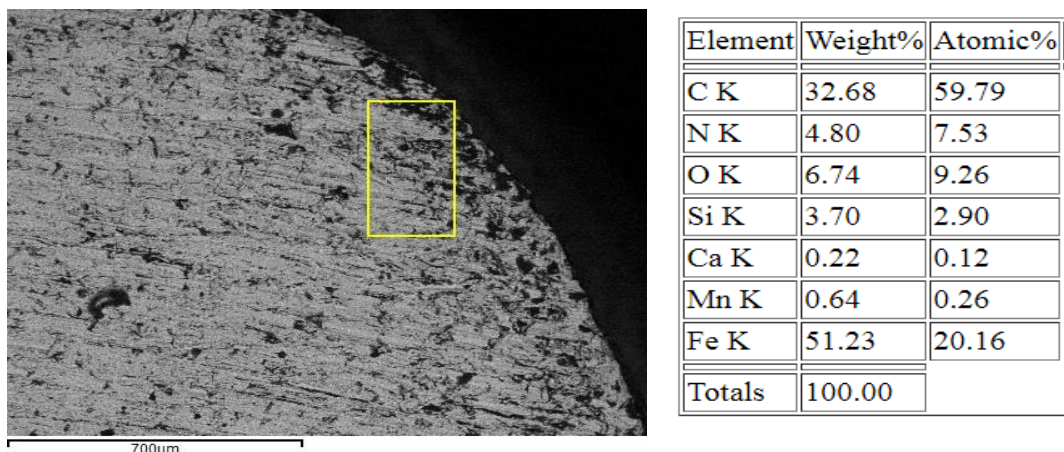
Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης δίνει πληροφορίες που αφορούν κυρίως στη μορφολογία και στη σύσταση της επιφανείας. Το SEM χρησιμοποιείται για την εξέταση μικροδομής στερεών δειγμάτων και για να δίνει εικόνες υψηλού βαθμού διείσδυσης Εφαρμόζοντας ένα σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτίνων X που δημιουργούνται στην επιφάνεια από την προσπίπτουσα δέσμη, μπορεί να γίνει ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση του υλικού.

Η παρακάτω φωτογραφία SEM (εικόνα 10.10) απεικονίζει τμήμα της επιφάνειας του οπλισμού σε δοκίμιο αναφοράς με αναλογία τσιμέντου/αδρανών/νερό: 1/3/0.5 χωρίς αναστολέα διάβρωσης. Από την ανάλυση του EDAX προκύπτει ότι η αναλογία σε άζωτο (N) είναι μηδενική.



**Εικόνα 10.10 Απεικόνιση οπλισμού δοκιμίου αναφοράς με αναλογία 0,5 και ανάλυση EDAX σημείου**

Στην παρακάτω εικόνα SEM (εικόνα 10.11) απεικονίζεται ο οπλισμός δοκιμίου με αναλογία τσιμέντου/αδρανών/νερό: 1/3/0.5 και ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης (ομάδα ΨΕΚ II). Στην περίπτωση αυτή η αναλογία αζώτου είναι 4,8 %.



**Εικόνα 10.11 Απεικόνιση οπλισμού δοκιμίου με ψεκαζόμενο αναστολέα #2  
ανάλυση EDAX σημείου**

#### **Μερικό συμπέρασμα 14:**

Από την σύγκριση των δύο παραπάνω φωτογραφιών και αναλύσεων Edax προκύπτει ότι ο αναστολέας διάβρωσης 2 (Ομάδα ΨΕΚ II) έχει φτάσει στην επιφάνεια του οπλισμού (όπως προκύπτει από την περιεκτικότητα του N) και προστατεύει τον οπλισμό, όπως είναι φανερό από την περιεκτικότητα οξυγόνου της επιφάνειας του χάλυβα.

#### **10.2.1.5. Διάχυση ψεκαζόμενου αναστολέα διάβρωσης στο σκυρόδεμα.**

Η μέτρηση της διάχυσης βασίστηκε στην ανίχνευση των νιτρικών σε δείγματα σκόνης σκυροδέματος από διάφορα βάθη. Η ανίχνευση των νιτρικών στηρίζεται σε χρωστικές αντιδράσεις του υδατικού εκχυλίσματος του δείγματος με σουλφανιλικό οξύ και α-ναφθυλαμίνη. Το τελικό διάλυμα απορροφά έντονα σε μήκος κύματος  $\lambda=520$  nm, και πραγματοποιείται φασματοφωτομετρικός προσδιορισμός της περιεκτικότητας του δείγματος σε  $\text{NaNO}_2$ . Χρησιμοποιήθηκε φασματόμετρο τύπου SpectroquantNOVA 60 (εικόνα 10.12).



**Εικόνα 10.12 Μέτρηση ανίχνευσης νιτρικών σε δείγματα σκυροδέματος.**

Στον Πίνακα 10.26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των νιτρικών σε δείγμα σκόνης σκυροδέματος από δοκίμια στα οποία είχε προστεθεί ο αναστολέας διάβρωσης 1 (Ομάδα ΨΕΚ I (0,5)) και ο αναστολέας διάβρωσης 2 (Ομάδα ΨΕΚ II (0,5)) ως ψεκαζόμενος.

**Πίνακας 10.26. Αποτελέσματα Μετρήσεων νιτρικών.**

| Βάθος σε cm | Νιτρικά που ανιχνεύθηκαν στον Ψεκαζόμενο 1 σε mg/L | Νιτρικά που ανιχνεύθηκαν στον Ψεκαζόμενο 2 σε mg/L |
|-------------|--|--|
| 0-1         | 3.7  | 4.4  |
| 1-3         | 0.98   | 2.2  |
| 3-4         | 0.38   | 0.77   |
| 4-5         | 0.09   | 0.18   |

**Μερικό συμπέρασμα 15:**

Από τις μετρήσεις της ανίχνευσης νιτρικών στα δείγματα σκυροδέματος που περιείχαν τον αναστολέα διάβρωσης ως ψεκαζόμενο προέκυψε ότι και στους δύο αναστολείς διάβρωσης έχουν διαχυθεί οι νιτρικές και νιτρώδες ρίζες και έχουν φθάσει στην επιφάνεια του οπλισμού. Επίσης, ο ψεκαζόμενος αναστολέας διάβρωσης 2 (Ομάδα ΨΕΚ II (0,5)) έχει καλύτερη διάχυση απο τον αναστολέα διάβρωσης 1 (Ομάδα ΨΕΚ I (0,5)).

### **10.2.2. Επιταχυνόμενη διάβρωση με μερική εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5 % κ.β. NaCl σε τσιμεντοκονιάματα με αναλογία νερού 0,65%**

Για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης του χάλυβα σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl κατασκευάστηκαν οκτώ (8) ομάδες δοκιμίων σε τσιμεντοκονιάματα με αναλογία τσιμέντο:αδρανών:νερό 1:3:0,65 ως εξής:

Ομάδα ΨΕΚ I (0,65): Με εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης ο οποίος βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) ως ψεκαζόμενο

Ομάδα ΨΕΚ II (0,65): Με εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης ο οποίος βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) ως ψεκαζόμενο και με διαφορά από τον ΨΕΚ I ως προς τη συγκέντρωση και το είδος των οργανικών οξέων που συνοδεύουν τον αναστολέα διάβρωσης

Ομάδα ΨΕΚ III (0,65): Με εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης ο οποίος βασίζεται στη Διμεθυλ-αιθανόλ-αμίνη ( $(\text{CH}_3)_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$ ) ως ψεκαζόμενο

Ομάδα ΨΕΚ IV (0,65): Με εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης ο οποίος βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) ως ψεκαζόμενο

Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,65): Με εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης ο οποίος βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) ως πρόσμικτο με αναλογία 4%

Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,65): Με εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης ο οποίος βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) ως πρόσμικτο με αναλογία 8%

Ομάδα ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,65): Με εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης ο οποίος βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) ως πρόσμικτο με αναλογία 4%

Ομάδα ΑΝΑΦ (0,65): Αναφοράς, χωρίς εφαρμογή αναστολέα

#### **10.2.2.1. Χρονική εξέλιξη Δυναμικού Διάβρωσης**

Στον Πίνακα 10.27 φαίνονται οι τιμές του μέσου όρου των δυναμικών διάβρωσης για τις ομάδες δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης, ενώ στον Πίνακα 10.28 οι τιμές του μέσου όρου των δυναμικών διάβρωσης για τις ομάδες δοκιμίων με τον πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης. Το δυναμικό διάβρωσης μετρήθηκε σε όλους τους οπλισμούς ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl, κάθε 30 ημέρες για συνολικά 24 μήνες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

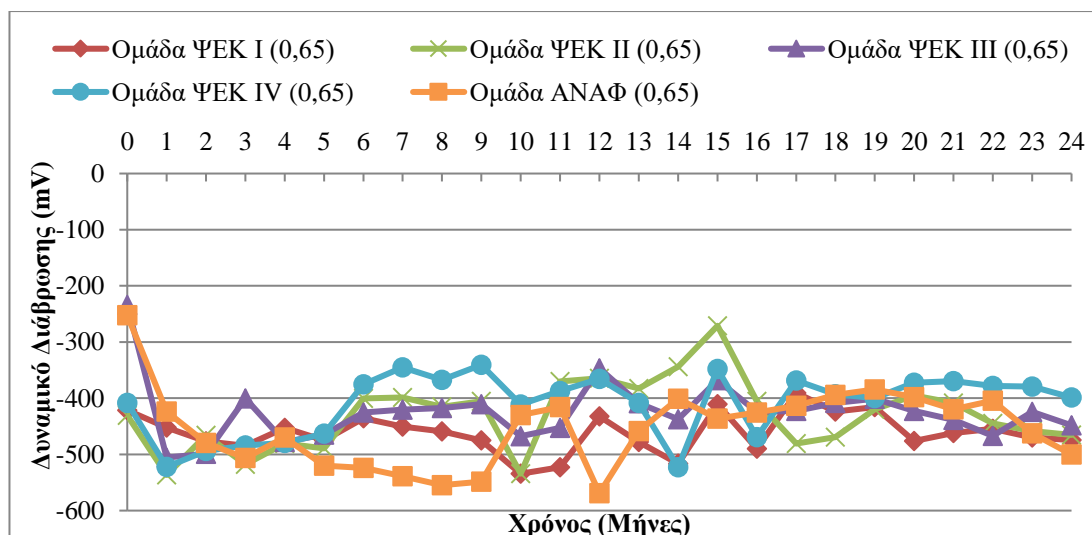
**Πίνακας 10.27. Τιμές του μέσου όρου των δυναμικών διάβρωσης για τις ομάδες δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,65.**

| <b>Μήνες</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ I (0,65)</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ II (0,65)</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ III (0,65)</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ IV (0,65)</b> | <b>Ομάδα ΑΝΑΦ (0,65)</b> |
|--------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| <b>0</b>     | -421,457                  | -430,632                   | -233,661                    | -408,441                   | -252,076                 |
| <b>1</b>     | -452,316                  | -536,558                   | -505,572                    | -522,359                   | -423,584                 |
| <b>2</b>     | -476,657                  | -465,583                   | -498,900                    | -493,726                   | -479,344                 |
| <b>3</b>     | -484,634                  | -517,877                   | -400,094                    | -484,312                   | -506,346                 |
| <b>4</b>     | -452,560                  | -480,518                   | -478,062                    | -479,585                   | -469,808                 |
| <b>5</b>     | -474,742                  | -489,462                   | -464,679                    | -463,111                   | -519,919                 |
| <b>6</b>     | -435,655                  | -400,045                   | -425,485                    | -375,323                   | -524,004                 |
| <b>7</b>     | -450,204                  | -398,685                   | -420,243                    | -345,047                   | -538,508                 |
| <b>8</b>     | -459,058                  | -415,008                   | -417,282                    | -367,140                   | -554,775                 |
| <b>9</b>     | -475,224                  | -405,425                   | -410,805                    | -340,565                   | -548,196                 |
| <b>10</b>    | -534,306                  | -534,342                   | -467,331                    | -411,158                   | -429,902                 |
| <b>11</b>    | -522,556                  | -369,874                   | -452,681                    | -387,152                   | -415,556                 |
| <b>12</b>    | -432,069                  | -364,178                   | -346,652                    | -365,544                   | -569,006                 |
| <b>13</b>    | -477,581                  | -382,542                   | -409,126                    | -408,298                   | -458,724                 |
| <b>14</b>    | -516,397                  | -344,008                   | -437,611                    | -522,997                   | -400,951                 |
| <b>15</b>    | -410,596                  | -270,996                   | -367,655                    | -347,680                   | -436,115                 |
| <b>16</b>    | -489,548                  | -405,233                   | -424,401                    | -469,263                   | -425,373                 |
| <b>17</b>    | -390,431                  | -480,429                   | -422,529                    | -368,453                   | -413,175                 |
| <b>18</b>    | -423,699                  | -469,007                   | -408,421                    | -392,878                   | -393,781                 |
| <b>19</b>    | -415,549                  | -419,863                   | -400,685                    | -399,869                   | -384,237                 |
| <b>20</b>    | -475,981                  | -395,147                   | -422,549                    | -372,123                   | -398,122                 |
| <b>21</b>    | -462,116                  | -408,518                   | -438,564                    | -369,425                   | -419,503                 |
| <b>22</b>    | -454,614                  | -444,704                   | -467,156                    | -377,862                   | -404,064                 |
| <b>23</b>    | -469,732                  | -458,672                   | -424,364                    | -379,224                   | -462,351                 |
| <b>24</b>    | -474,355                  | -465,445                   | -448,396                    | -398,456                   | -500,324                 |

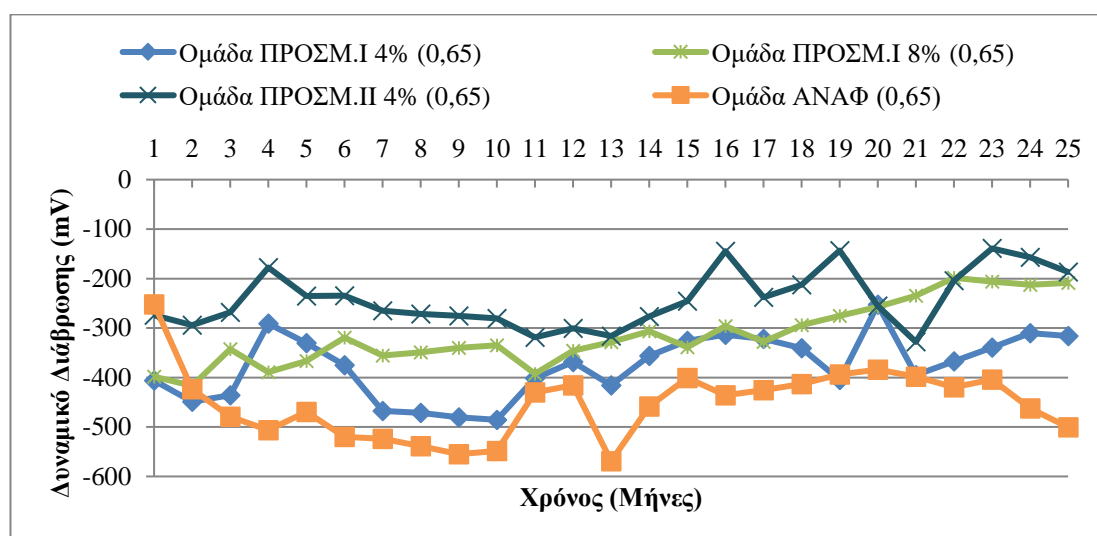
**Πίνακας 10.28. Τιμές του μέσου όρου των δυναμικών διάβρωσης για τις ομάδες δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,65**

| Μήνες | Ομάδα<br>ΠΡΟΣΜ.Ι 4%<br>(0,65) | Ομάδα<br>ΠΡΟΣΜ.Ι 8%<br>(0,65) | Ομάδα<br>ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4%<br>(0,65) | Ομάδα<br>ΑΝΑΦ (0,65) |
|-------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| 0     | -405,986                      | -398,040                      | -274,113                       | -252,076             |
| 1     | -449,053                      | -416,804                      | -294,385                       | -423,584             |
| 2     | -436,073                      | -342,773                      | -268,535                       | -479,344             |
| 3     | -291,041                      | -388,980                      | -177,607                       | -506,346             |
| 4     | -330,462                      | -366,886                      | -235,211                       | -469,808             |
| 5     | -375,029                      | -319,135                      | -234,605                       | -519,919             |
| 6     | -467,332                      | -355,542                      | -265,012                       | -524,004             |
| 7     | -471,541                      | -348,877                      | -271,543                       | -538,508             |
| 8     | -480,235                      | -340,036                      | -275,149                       | -554,775             |
| 9     | -485,587                      | -335,113                      | -280,806                       | -548,196             |
| 10    | -401,248                      | -392,223                      | -318,547                       | -429,902             |
| 11    | -368,452                      | -345,628                      | -300,401                       | -415,556             |
| 12    | -416,082                      | -328,325                      | -316,418                       | -569,006             |
| 13    | -356,028                      | -306,501                      | -276,655                       | -458,724             |
| 14    | -325,799                      | -338,913                      | -245,604                       | -400,951             |
| 15    | -313,590                      | -296,005                      | -144,616                       | -436,115             |
| 16    | -322,206                      | -327,647                      | -237,797                       | -425,373             |
| 17    | -340,905                      | -294,210                      | -212,479                       | -413,175             |
| 18    | -404,707                      | -275,061                      | -143,073                       | -393,781             |
| 19    | -252,832                      | -257,107                      | -255,163                       | -384,237             |
| 20    | -395,003                      | -234,805                      | -328,043                       | -398,122             |
| 21    | -367,452                      | -198,523                      | -204,152                       | -419,503             |
| 22    | -339,188                      | -206,339                      | -139,098                       | -404,064             |
| 23    | -310,524                      | -212,425                      | -156,783                       | -462,351             |
| 24    | -315,892                      | -208,578                      | -186,574                       | -500,324             |

Στα σχήματα 10.22 και 10.23 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του δυναμικού διάβρωσης συναρτήσεως του χρόνου για τις ομάδες δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και με πρόσμικτο αναστολέα αντίστοιχα.



Σχήμα.10.23: Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσεως του χρόνου έκθεσης σε δοκίμια με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,65 μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl



Σχήμα.10.24: Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσεως του χρόνου έκθεσης σε δοκίμια με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,65 μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl

### Μερικό συμπέρασμα 16:

Όπως προκύπτει από τα σχήματα 10.23 και 10.24 στο οποίο φαίνεται το δυναμικό διάβρωσης των οπλισμών συναρτήσεως του χρόνου ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl, τα δυναμικά όλων των ομάδων δοκιμίων κατά το μεγαλύτερο διάστημα παραμονής στο διάλυμα 3,5% NaCl, κυμαίνονται μεταξύ -200mV και -550mV. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87 υπάρχει υψηλή πιθανότητα διάβρωσης.

Τα δοκίμια στα οποία έχει προστεθεί ο αναστολέας διάβρωσης ως ψεκαζόμενος φαίνεται να παρουσιάζουν πιο ηλεκτραρνητικές τιμές με εξαίρεση τα δοκίμια στα οποία ο ψεκαζόμενος αναστολέας διάβρωσης βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) (Ομάδα ΨΕΚ IV (0,65)) .

Τα δοκίμια στα οποία έχει γίνει προσθήκη του αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτου φαίνεται να εμφανίζουν πιο ηλεκτροθετικές τιμές από τις ομάδες δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και οι τιμές τους μετά την πάροδο 24 μηνών κυμαίνονται από -200 έως -300 mV. Ειδικότερα, τα δοκίμια στα οποία ο αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ), έχει προστεθεί ως πρόσμικτος με αναλογία 4% (ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,65)), παρουσιάζει τις πιο ηλεκτροθετικές τιμές. Επίσης, τα δοκίμια στα οποία έχει προστεθεί ο αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) ως πρόσμικτος με αναλογία 8% (ΠΡΟΣΜ.Ι. 8% (0,65)), φαίνεται να παρουσιάζουν πιο ηλεκτροθετικές τιμές σε σχέση με τα δοκίμια στα οποία έχει προστεθεί ο αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) ως πρόσμικτος με αναλογία 4% (ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,65)).

#### **10.2.2.2. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας**

Για τον προσδιορισμό της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας έγιναν μετρήσεις γραμμικής πόλωσης ανά μήνα για συνολικό χρόνο έκθεσης 24 μηνών στο διαβρωτικό περιβάλλον μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl, σε όλες τις ομάδες δοκιμίων. Η πειραματική διάταξη για τη διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών μετρήσεων περιελάμβανε Ποτενσιοστάτη/ Γαλβανοστάτη της E.G. & Model 263 συνδεδεμένο με υπολογιστή για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων. Για την επεξεργασία των ηλεκτροχημικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε λογισμικό Power Suite της εταιρείας E.G. & G Princeton Research. Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο Ag/AgCl, ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκε ράβδος άνθρακα διαστάσεων 100mm μήκους και 10mm διάμετρο και ηλεκτρόδιο εργασίας ο υπό εξέταση χάλυβας. Η περιοχή πόλωσης του χάλυβα ήταν  $\pm 10\text{mV}$  από το δυναμικό διάβρωσης (E<sub>corr</sub>) του υπό εξέταση χάλυβα Ο.Σ και το βήμα σάρωσης (Scan rate) του δυναμικού ήταν 0,1mV/sec.

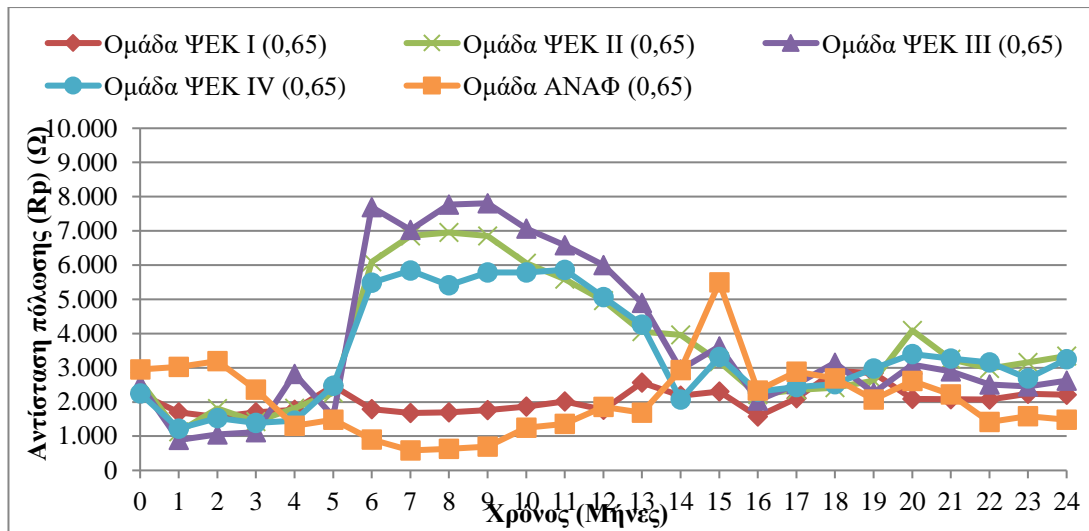
Οι τιμές της αντίστασης πόλωσης  $R_p$  που υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στους Πίνακες 10.29 και 10.30, ενώ οι γραφικές παραστάσεις της αντίστασης πόλωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον για τα δοκίμια με ψεκαζόμενο αναστολέα και για τα δοκίμια με τον πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης φαίνονται στα Σχήματα 10.25 και 10.26.

**Πίνακας 10.29. Τιμές της αντίστασης πόλωσης ( $R_p$ ) για τις ομάδες δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα και αναλογία νερού 0,65**

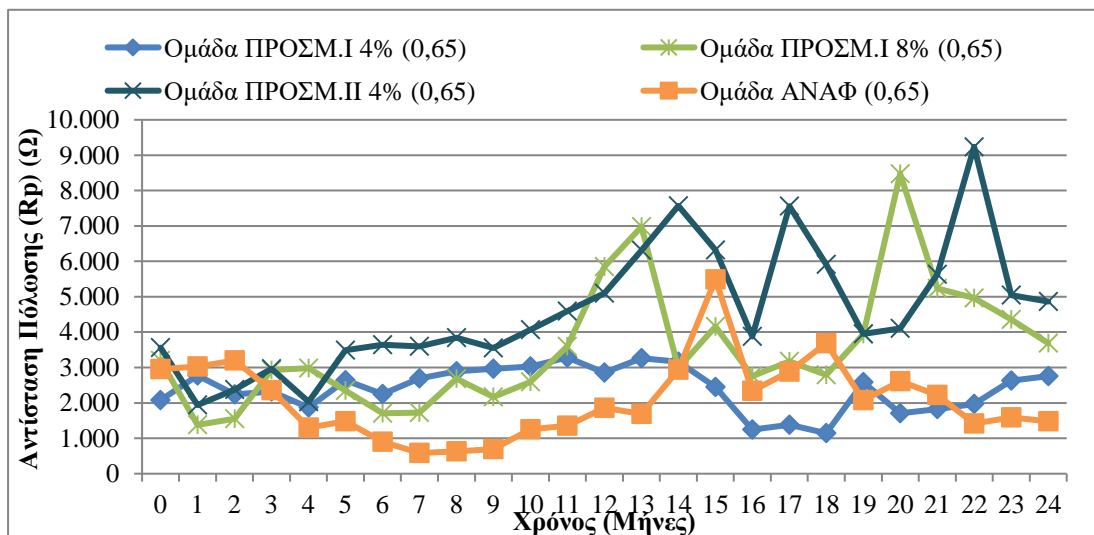
| Μήνες | Ομάδα ΨΕΚ I (0,65) | Ομάδα ΨΕΚ II (0,65) | Ομάδα ΨΕΚ III (0,65) | Ομάδα ΨΕΚ IV (0,65) | Ομάδα ΑΝΑΦ (0,65) |
|-------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-------------------|
| 0     | 2.240,164          | 2.607,621           | 2.506,702            | 2.249,138           | 2.952,761         |
| 1     | 1.700,323          | 1.123,316           | 889,691              | 1.223,937           | 3.028,130         |
| 2     | 1.560,056          | 1.806,930           | 1.054,210            | 1.532,747           | 3.197,090         |
| 3     | 1.694,547          | 1.425,307           | 1.117,660            | 1.387,333           | 2.362,324         |
| 4     | 1.768,022          | 1.820,051           | 2.822,326            | 1.453,775           | 1.301,073         |
| 5     | 2.474,620          | 2.266,903           | 1.573,083            | 2.474,718           | 1.479,008         |
| 6     | 1.789,182          | 6.098,536           | 7.692,320            | 5.482,157           | 902,001           |
| 7     | 1.681,327          | 6.854,205           | 7.029,129            | 5.846,004           | 584,325           |
| 8     | 1.692,504          | 6.954,241           | 7.769,024            | 5.412,032           | 629,372           |
| 9     | 1.758,554          | 6.851,657           | 7.808,332            | 5.784,158           | 694,012           |
| 10    | 1.865,145          | 6.058,608           | 7.068,052            | 5.789,487           | 1.250,850         |
| 11    | 2.015,892          | 5.584,774           | 6.584,003            | 5.862,628           | 1.356,812         |
| 12    | 1.769,132          | 4.965,003           | 6.004,128            | 5.064,463           | 1.859,454         |
| 13    | 2.563,065          | 4.058,002           | 4.896,078            | 4.256,156           | 1.685,108         |
| 14    | 2.184,953          | 3.957,062           | 2.946,753            | 2.073,220           | 2.936,244         |
| 15    | 2.305,686          | 3.171,799           | 3.626,171            | 3.316,581           | 5.491,564         |
| 16    | 1.571,035          | 2.213,449           | 2.040,079            | 2.304,220           | 2.335,653         |
| 17    | 2.105,826          | 2.350,588           | 2.516,497            | 2.436,864           | 2.883,658         |
| 18    | 2.902,800          | 2.413,293           | 3.145,842            | 2.518,147           | 3.689,127         |
| 19    | 2.846,180          | 2.626,120           | 2.269,906            | 2.982,250           | 2.075,216         |
| 20    | 2.090,705          | 4.092,811           | 3.090,851            | 3.400,648           | 2.614,104         |
| 21    | 2.077,332          | 3.254,783           | 2.892,456            | 3.265,506           | 2.218,655         |
| 22    | 2.068,896          | 2.975,608           | 2.507,980            | 3.155,288           | 1.413,379         |
| 23    | 2.235,448          | 3.157,685           | 2.450,627            | 2.684,354           | 1.587,324         |
| 24    | 2.208,324          | 3.345,684           | 2.618,622            | 3.246,974           | 1.482,651         |

**Πίνακας 10.30. Τιμές της αντίστασης πόλωσης (Rp) για τις ομάδες δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα και αναλογία νερού 0,65**

| <b>Μήνες</b> | <b>Ομάδα<br/>ΠΡΟΣΜ.Ι 4%<br/>(0,65)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΠΡΟΣΜ.Ι 8%<br/>(0,65)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΠΡΟΣΜ.Π 4%<br/>(0,65)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΑΝΑΦ<br/>(0,65)</b> |
|--------------|--|--|--|----------------------------------|
| <b>0</b>     | 2.080,946                              | 3.200,343                              | 3.560,608                              | 2.952,761                        |
| <b>1</b>     | 2.772,481                              | 1.378,534                              | 1.938,647                              | 3.028,130                        |
| <b>2</b>     | 2.241,420                              | 1.553,532                              | 2.375,765                              | 3.197,090                        |
| <b>3</b>     | 2.317,743                              | 2.926,794                              | 2.961,914                              | 2.362,324                        |
| <b>4</b>     | 1.865,027                              | 2.980,040                              | 2.032,797                              | 1.301,073                        |
| <b>5</b>     | 2.634,707                              | 2.351,531                              | 3.485,181                              | 1.479,008                        |
| <b>6</b>     | 2.250,583                              | 1.709,012                              | 3.645,350                              | 902,001                          |
| <b>7</b>     | 2.690,302                              | 1.721,125                              | 3.596,458                              | 584,325                          |
| <b>8</b>     | 2.888,148                              | 2.684,274                              | 3.845,326                              | 629,372                          |
| <b>9</b>     | 2.965,000                              | 2.168,028                              | 3.548,122                              | 694,012                          |
| <b>10</b>    | 3.025,542                              | 2.596,635                              | 4.065,057                              | 1.250,850                        |
| <b>11</b>    | 3.284,540                              | 3.596,214                              | 4.596,332                              | 1.356,812                        |
| <b>12</b>    | 2.854,482                              | 5.846,543                              | 5.096,000                              | 1.859,454                        |
| <b>13</b>    | 3.258,998                              | 6.984,112                              | 6.314,000                              | 1.685,108                        |
| <b>14</b>    | 3.159,886                              | 2.985,205                              | 7.571,215                              | 2.936,244                        |
| <b>15</b>    | 2.452,808                              | 4.161,191                              | 6.317,966                              | 5.491,564                        |
| <b>16</b>    | 1.243,773                              | 2.751,820                              | 3.881,835                              | 2.335,653                        |
| <b>17</b>    | 1.377,259                              | 3.170,057                              | 7.558,787                              | 2.883,658                        |
| <b>18</b>    | 1.143,962                              | 2.795,009                              | 5.916,464                              | 3.689,127                        |
| <b>19</b>    | 2.580,895                              | 3.939,777                              | 3.949,405                              | 2.075,216                        |
| <b>20</b>    | 1.709,132                              | 8.472,785                              | 4.099,713                              | 2.614,104                        |
| <b>21</b>    | 1.822,542                              | 5.236,545                              | 5.628,631                              | 2.218,655                        |
| <b>22</b>    | 1.972,483                              | 4.961,643                              | 9.237,340                              | 1.413,379                        |
| <b>23</b>    | 2.632,846                              | 4.352,847                              | 5.042,608                              | 1.587,324                        |
| <b>24</b>    | 2.754,622                              | 3.689,653                              | 4.862,981                              | 1.482,651                        |



**Σχήμα 10.25:** Αντίσταση πόλωσης ( $R_p$ ) δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,65 συναρτήσει του χρόνου παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον



**Σχήμα 10.26:** Αντίσταση πόλωσης ( $R_p$ ) δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,65 συναρτήσει του χρόνου παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον

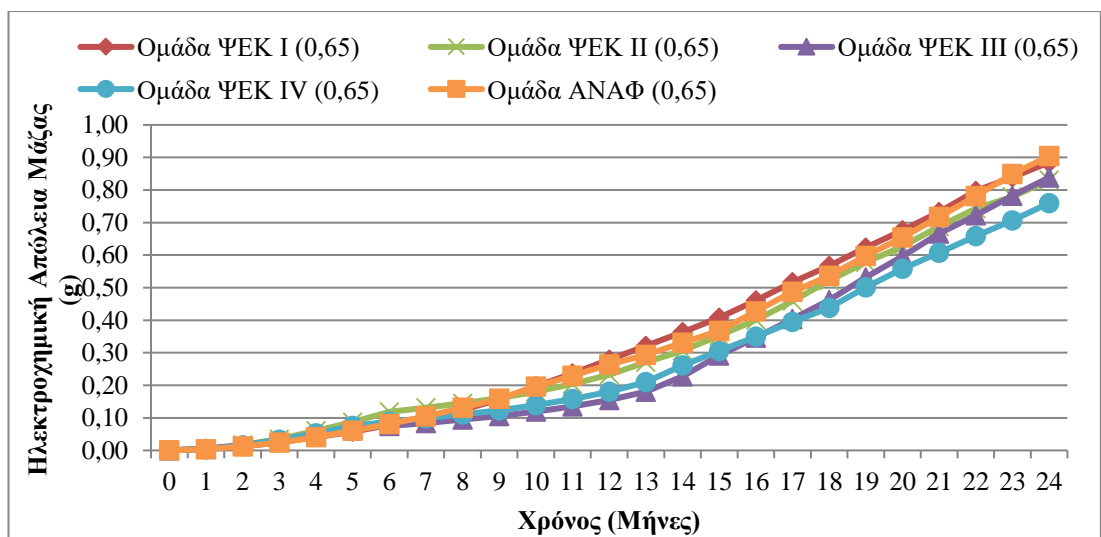
Στη συνέχεια με βάση τις τιμές του ρεύματος διάβρωσης του χάλυβα,  $I_{corr}$ , υπολογίστηκαν οι τιμές της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας (g), όπως φαίνονται στους Πίνακες 10.31 και 10.32 και στα σχήματα 10.27 και 10.28 δίνονται οι γραφικές παραστάσεις της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον.

**Πίνακας 10.31. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,65**

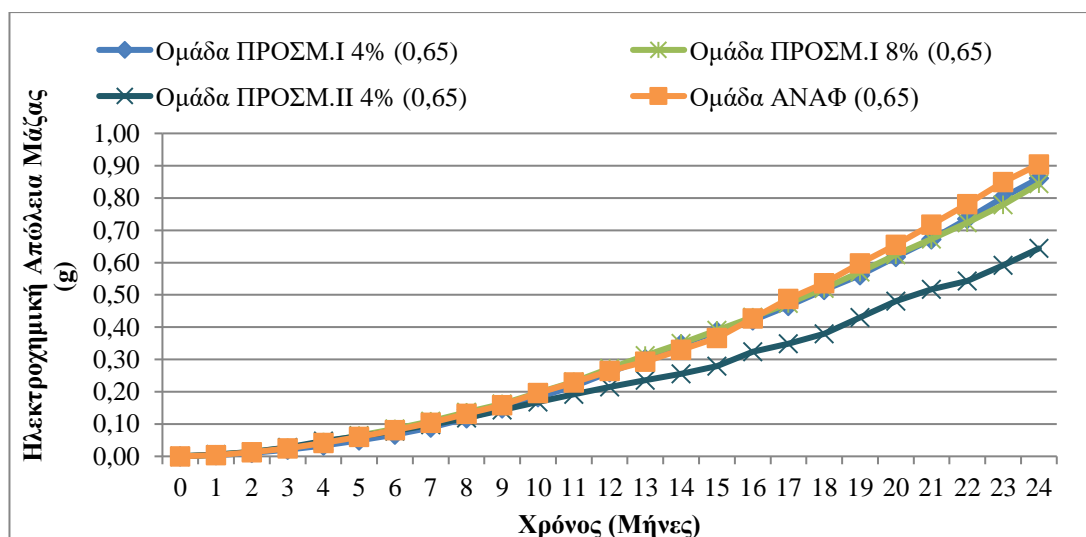
| <b>Μήνες</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ I (0,65)</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ II (0,65)</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ III (0,65)</b> | <b>Ομάδα ΨΕΚ IV (0,65)</b> | <b>Ομάδα ΑΝΑΦ (0,65)</b> |
|--------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| <b>0</b>     | 0,0003                    | 0,0003                     | 0,0003                      | 0,0003                     | 0,0002                   |
| <b>1</b>     | 0,0046                    | 0,0051                     | 0,0057                      | 0,0038                     | 0,0037                   |
| <b>2</b>     | 0,0127                    | 0,0176                     | 0,0160                      | 0,0151                     | 0,0127                   |
| <b>3</b>     | 0,0249                    | 0,0353                     | 0,0307                      | 0,0330                     | 0,0244                   |
| <b>4</b>     | 0,0403                    | 0,0608                     | 0,0480                      | 0,0527                     | 0,0411                   |
| <b>5</b>     | 0,0574                    | 0,0872                     | 0,0674                      | 0,0754                     | 0,0604                   |
| <b>6</b>     | 0,0783                    | 0,1189                     | 0,0749                      | 0,0876                     | 0,0810                   |
| <b>7</b>     | 0,1000                    | 0,1311                     | 0,0845                      | 0,0988                     | 0,1042                   |
| <b>8</b>     | 0,1245                    | 0,1448                     | 0,0944                      | 0,1103                     | 0,1314                   |
| <b>9</b>     | 0,1568                    | 0,1606                     | 0,1055                      | 0,1232                     | 0,1587                   |
| <b>10</b>    | 0,1969                    | 0,1803                     | 0,1192                      | 0,1391                     | 0,1960                   |
| <b>11</b>    | 0,2364                    | 0,2039                     | 0,1353                      | 0,1578                     | 0,2292                   |
| <b>12</b>    | 0,2790                    | 0,2328                     | 0,1546                      | 0,1802                     | 0,2641                   |
| <b>13</b>    | 0,3214                    | 0,2712                     | 0,1802                      | 0,2099                     | 0,2937                   |
| <b>14</b>    | 0,3636                    | 0,3058                     | 0,2280                      | 0,2609                     | 0,3304                   |
| <b>15</b>    | 0,4078                    | 0,3521                     | 0,2911                      | 0,3057                     | 0,3671                   |
| <b>16</b>    | 0,4604                    | 0,4003                     | 0,3468                      | 0,3493                     | 0,4270                   |
| <b>17</b>    | 0,5168                    | 0,4591                     | 0,4032                      | 0,3948                     | 0,4872                   |
| <b>18</b>    | 0,5673                    | 0,5213                     | 0,4614                      | 0,4385                     | 0,5364                   |
| <b>19</b>    | 0,6231                    | 0,5775                     | 0,5318                      | 0,5007                     | 0,5978                   |
| <b>20</b>    | 0,6757                    | 0,6269                     | 0,5966                      | 0,5577                     | 0,6546                   |
| <b>21</b>    | 0,7322                    | 0,6883                     | 0,6666                      | 0,6075                     | 0,7177                   |
| <b>22</b>    | 0,7975                    | 0,7433                     | 0,7220                      | 0,6583                     | 0,7811                   |
| <b>23</b>    | 0,8396                    | 0,7792                     | 0,7820                      | 0,7064                     | 0,8491                   |
| <b>24</b>    | 0,8848                    | 0,8306                     | 0,8384                      | 0,7598                     | 0,9042                   |

**Πίνακας 10.32. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,65**

| <b>Μήνες</b> | <b>Ομάδα<br/>ΠΡΟΣΜ.Ι 4%<br/>(0,65)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΠΡΟΣΜ.Ι 8%<br/>(0,65)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΠΡΟΣΜ.Π 4%<br/>(0,65)</b> | <b>Ομάδα<br/>ΑΝΑΦ (0,65)</b> |
|--------------|--|--|--|------------------------------|
| <b>0</b>     | 0,0003                                 | 0,0002                                 | 0,0002                                 | 0,0002                       |
| <b>1</b>     | 0,0036                                 | 0,0045                                 | 0,0053                                 | 0,0037                       |
| <b>2</b>     | 0,0112                                 | 0,0134                                 | 0,0140                                 | 0,0127                       |
| <b>3</b>     | 0,0210                                 | 0,0268                                 | 0,0274                                 | 0,0244                       |
| <b>4</b>     | 0,0336                                 | 0,0444                                 | 0,0475                                 | 0,0411                       |
| <b>5</b>     | 0,0493                                 | 0,0642                                 | 0,0618                                 | 0,0604                       |
| <b>6</b>     | 0,0677                                 | 0,0851                                 | 0,0782                                 | 0,0810                       |
| <b>7</b>     | 0,0892                                 | 0,1092                                 | 0,0976                                 | 0,1042                       |
| <b>8</b>     | 0,1177                                 | 0,1363                                 | 0,1183                                 | 0,1314                       |
| <b>9</b>     | 0,1489                                 | 0,1621                                 | 0,1436                                 | 0,1587                       |
| <b>10</b>    | 0,1829                                 | 0,1973                                 | 0,1681                                 | 0,1960                       |
| <b>11</b>    | 0,2173                                 | 0,2313                                 | 0,1919                                 | 0,2292                       |
| <b>12</b>    | 0,2606                                 | 0,2721                                 | 0,2154                                 | 0,2641                       |
| <b>13</b>    | 0,3016                                 | 0,3123                                 | 0,2359                                 | 0,2937                       |
| <b>14</b>    | 0,3472                                 | 0,3493                                 | 0,2554                                 | 0,3304                       |
| <b>15</b>    | 0,3860                                 | 0,3900                                 | 0,2797                                 | 0,3671                       |
| <b>16</b>    | 0,4210                                 | 0,4306                                 | 0,3243                                 | 0,4270                       |
| <b>17</b>    | 0,4656                                 | 0,4738                                 | 0,3488                                 | 0,4872                       |
| <b>18</b>    | 0,5152                                 | 0,5201                                 | 0,3798                                 | 0,5364                       |
| <b>19</b>    | 0,5607                                 | 0,5709                                 | 0,4304                                 | 0,5978                       |
| <b>20</b>    | 0,6171                                 | 0,6240                                 | 0,4802                                 | 0,6546                       |
| <b>21</b>    | 0,6724                                 | 0,6732                                 | 0,5173                                 | 0,7177                       |
| <b>22</b>    | 0,7349                                 | 0,7232                                 | 0,5427                                 | 0,7811                       |
| <b>23</b>    | 0,8022                                 | 0,7785                                 | 0,5912                                 | 0,8491                       |
| <b>24</b>    | 0,8609                                 | 0,8441                                 | 0,6437                                 | 0,9042                       |



Σχήμα 10.27: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με ψεκαζόμενο αναστολέα με αναλογία νερού 0,65



Σχήμα 10.28: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα με αναλογία νερού 0,65

### Μερικό συμπέρασμα 17:

Από το σχήμα 10.27 παρατηρείται ότι τα δοκίμια αναφοράς, καθώς και τα δοκίμια της ομάδας ΨΕΚ I (0,65) (ψεκαζόμενος αναστολέας 1) παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας μετά από 24 μήνες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον, ενώ τη μικρότερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας φαίνεται να παρουσιάζουν οι ομάδες ΨΕΚ III (0,65) και ΨΕΚ IV (0,65). Αντίστοιχα από το σχήμα 10.28 παρατηρείται ότι τα δοκίμια αναφοράς έχουν τη μεγαλύτερη ηλεκτροχημική

απώλεια μάζας, ενώ ακολουθούν τα δοκίμια της ομάδας ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,65) (πρόσθετος αναστολέας σε ποσοστό 4%) και της ομάδας ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,65) (πρόσθετος αναστολέας σε ποσοστό 8%). Τη μικρότερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας εμφανίζουν τα δοκίμια της ομάδας ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,65).

### 10.2.2.3. Σταθμικός προσδιορισμός απώλειας μάζας

Για τον υπολογισμό της απώλειας μάζας των οπλισμών σπάστηκαν δοκίμια και από τις οκτώ ομάδες δοκιμίων στους 12, 18 και 24 μήνες από την ημερομηνία έκθεσης των δοκιμίων στο διαβρωτικό περιβάλλον. Στους Πίνακες 10.33, 10.34 και 10.35 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα απώλειας μάζας και για τις επτά ομάδες δοκιμίων μετά από 12, 18 και 24 μήνες αντίστοιχα και στα σχήματα 10.29 και 10.30 απεικονίζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

**Πίνακας 10.33. Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων με αναλογία νερού 0,65 στους 12 μήνες**

|                             | μαρχ (g)                   | μτελ (g) | Απώλεια Μάζας (g) | Απώλεια Μάζας (%) |
|-----------------------------|----------------------------|----------|-------------------|-------------------|
| <b>Ομάδα ΨΕΚ Ι (0,65)</b>   | 64,3002                    | 64,1508  | 0,1494            | 0,2323            |
|                             | 63,9343                    | 63,7391  | 0,1952            | 0,3053            |
|                             | 61,6561                    | 61,4651  | 0,1910            | 0,3098            |
|                             | 60,1480                    | 59,9735  | 0,1745            | 0,2901            |
|                             | <b>M.O. ΨΕΚ Ι (0,65)</b>   |          | <b>0,1775</b>     | <b>0,2844</b>     |
| <b>Ομάδα ΨΕΚ ΙΙ (0,65)</b>  | 62,0259                    | 61,9832  | 0,0427            | 0,0688            |
|                             | 64,8306                    | 64,6724  | 0,1582            | 0,2440            |
|                             | 63,4426                    | 63,2236  | 0,2190            | 0,3452            |
|                             | 59,9672                    | 59,7782  | 0,1890            | 0,3152            |
|                             | <b>M.O. ΨΕΚ ΙΙ (0,65)</b>  |          | <b>0,1522</b>     | <b>0,2433</b>     |
| <b>Ομάδα ΨΕΚ ΙΙΙ (0,65)</b> | 64,0485                    | 63,8798  | 0,169             | 0,2634            |
|                             | 62,2590                    | 62,0924  | 0,167             | 0,2676            |
|                             | 62,4825                    | 62,3691  | 0,113             | 0,1815            |
|                             | 62,0867                    | 61,9492  | 0,138             | 0,2215            |
|                             | <b>M.O. ΨΕΚ ΙΙΙ (0,65)</b> |          | <b>0,1466</b>     | <b>0,2335</b>     |
| <b>Ομάδα ΨΕΚ ΙV (0,65)</b>  | 64,8776                    | 64,8165  | 0,0611            | 0,0942            |
|                             | 64,7347                    | 64,4258  | 0,3089            | 0,4772            |
|                             | 60,9868                    | 60,8941  | 0,0927            | 0,1520            |
|                             | 64,1524                    | 64,0358  | 0,1166            | 0,1818            |
|                             | <b>M.O. ΨΕΚ ΙV (0,65)</b>  |          | <b>0,1448</b>     | <b>0,2263</b>     |

|                                 |         |         |               |               |
|---------------------------------|---------|---------|---------------|---------------|
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,65)</b>  | 63,4864 | 63,3776 | 0,1088        | 0,1714        |
|                                 | 64,0018 | 63,8865 | 0,1153        | 0,1802        |
|                                 | 65,5905 | 65,3236 | 0,2669        | 0,4069        |
|                                 | 65,4575 | 65,2952 | 0,1623        | 0,2479        |
| <b>Μ.Ο. ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,65)</b>   |         |         | <b>0,1633</b> | <b>0,2516</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,65)</b>  | 64,2713 | 64,1093 | 0,1620        | 0,2521        |
|                                 | 64,8785 | 64,7238 | 0,1547        | 0,2384        |
|                                 | 62,0939 | 61,9344 | 0,1595        | 0,2569        |
|                                 | 61,2757 | 61,1034 | 0,1723        | 0,2812        |
| <b>Μ.Ο. ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,65)</b>   |         |         | <b>0,1621</b> | <b>0,2571</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,65)</b> | 62,5946 | 62,4878 | 0,1068        | 0,1706        |
|                                 | 61,7546 | 61,6499 | 0,1047        | 0,1695        |
|                                 | 63,5892 | 63,4791 | 0,1101        | 0,1731        |
|                                 | 61,2550 | 61,1498 | 0,1052        | 0,1717        |
| <b>Μ.Ο. ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,65)</b>  |         |         | <b>0,1067</b> | <b>0,1713</b> |
| <b>Ομάδα ΑΝΑΦ (0,65)</b>        | 62,2043 | 62,0146 | 0,1897        | 0,3050        |
|                                 | 64,8140 | 64,6175 | 0,1965        | 0,3032        |
|                                 | 64,0641 | 63,8622 | 0,2019        | 0,3152        |
|                                 | 62,9912 | 62,8078 | 0,1834        | 0,2912        |
| <b>Μ.Ο. ΑΝΑΦ (0,65)</b>         |         |         | <b>0,1929</b> | <b>0,3036</b> |

**Πίνακας 10.34. Απώλεια μάζας σπλισμών δοκιμίων με αναλογία νερού 0,65 στους 18 μήνες**

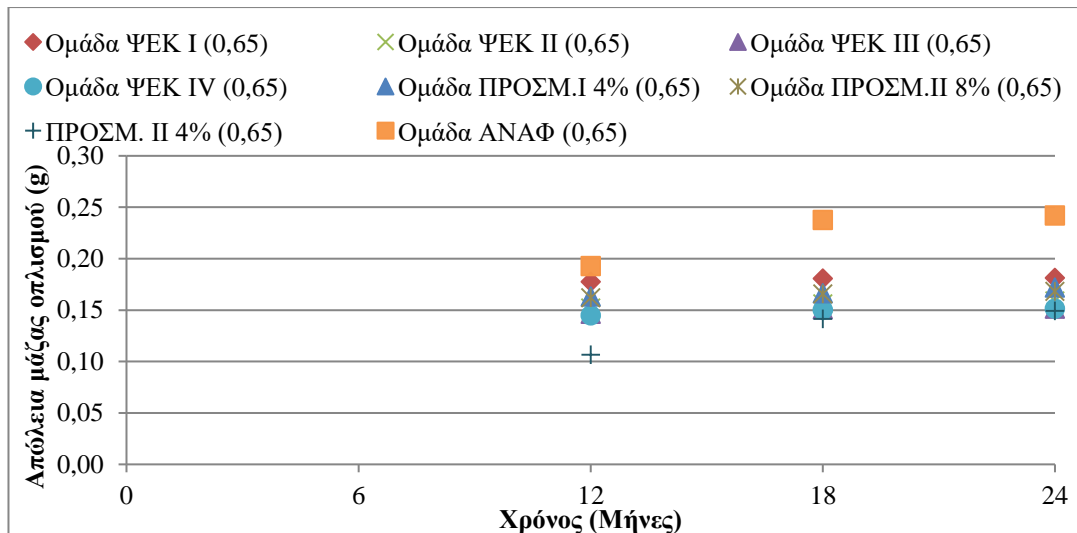
|                             | <b>μαρχ (g)</b> | <b>πτειλ (g)</b> | <b>Απώλεια Μάζας (g)</b> | <b>Απώλεια Μάζας (%)</b> |
|-----------------------------|-----------------|------------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>Ομάδα ΨΕΚ Ι (0,65)</b>   | 63,4422         | 63,2518          | 0,1904                   | 0,3001                   |
|                             | 60,8412         | 60,6627          | 0,1785                   | 0,2934                   |
|                             | 62,1459         | 61,9685          | 0,1774                   | 0,2855                   |
|                             | 65,2292         | 65,0523          | 0,1769                   | 0,2712                   |
| <b>Μ.Ο. ΨΕΚ Ι (0,65)</b>    |                 |                  | <b>0,1808</b>            | <b>0,2875</b>            |
| <b>Ομάδα ΨΕΚ ΙΙ (0,65)</b>  | 62,0335         | 61,8786          | 0,1549                   | 0,2497                   |
|                             | 63,0303         | 62,8844          | 0,1459                   | 0,2315                   |
|                             | 60,8748         | 60,7125          | 0,1623                   | 0,2666                   |
|                             | 61,1771         | 61,0164          | 0,1607                   | 0,2627                   |
| <b>Μ.Ο. ΨΕΚ ΙΙ (0,65)</b>   |                 |                  | <b>0,1560</b>            | <b>0,2526</b>            |
| <b>Ομάδα ΨΕΚ ΙΙΙ (0,65)</b> | 63,7241         | 63,5623          | 0,1618                   | 0,2539                   |
|                             | 60,4090         | 60,2647          | 0,1443                   | 0,2389                   |
|                             | 62,9898         | 62,8422          | 0,1476                   | 0,2343                   |
|                             | 66,1910         | 63,5623          | 0,1618                   | 0,2256                   |
| <b>Μ.Ο. ΨΕΚ ΙΙΙ (0,65)</b>  |                 |                  | <b>0,1508</b>            | <b>0,2382</b>            |

|                                 |         |         |               |               |
|---------------------------------|---------|---------|---------------|---------------|
| <b>Ομάδα ΨΕΚ IV (0,65)</b>      | 64,6974 | 64,5765 | 0,1209        | 0,1869        |
|                                 | 64,8756 | 64,7209 | 0,1547        | 0,2385        |
|                                 | 61,9017 | 61,7412 | 0,1605        | 0,2593        |
|                                 | 63,8793 | 63,7144 | 0,1649        | 0,2581        |
| <b>M.O. ΨΕΚ IV (0,65)</b>       |         |         | <b>0,1503</b> | <b>0,2357</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,65)</b>  | 61,7436 | 61,5726 | 0,1710        | 0,2770        |
|                                 | 62,1375 | 61,9674 | 0,1701        | 0,2737        |
|                                 | 60,1507 | 59,9818 | 0,1689        | 0,2808        |
|                                 | 62,7384 | 62,5828 | 0,1556        | 0,2480        |
| <b>M.O. ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,65)</b>   |         |         | <b>0,1664</b> | <b>0,2699</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,65)</b>  | 62,7482 | 62,5924 | 0,1558        | 0,2483        |
|                                 | 66,7047 | 66,5495 | 0,1552        | 0,2327        |
|                                 | 61,9642 | 61,7831 | 0,1811        | 0,2923        |
|                                 | 63,5871 | 63,4165 | 0,1706        | 0,2683        |
| <b>M.O. ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,65)</b>   |         |         | <b>0,1657</b> | <b>0,2604</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,65)</b> | 61,5486 | 61,4175 | 0,1311        | 0,2130        |
|                                 | 62,9847 | 62,8297 | 0,1550        | 0,2461        |
|                                 | 61,9714 | 61,8295 | 0,1419        | 0,2290        |
|                                 | 63,0896 | 62,9511 | 0,1385        | 0,2195        |
| <b>M.O. ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,65)</b>  |         |         | <b>0,1416</b> | <b>0,2269</b> |
| <b>Ομάδα ΑΝΑΦ (0,65)</b>        | 62,0335 | 61,7876 | 0,2459        | 0,3964        |
|                                 | 63,0303 | 62,8092 | 0,2211        | 0,3508        |
|                                 | 60,8748 | 60,6432 | 0,2316        | 0,3805        |
|                                 | 61,1771 | 60,9245 | 0,2526        | 0,4129        |
| <b>M.O. ΑΝΑΦ (0,65)</b>         |         |         | <b>0,2378</b> | <b>0,3851</b> |

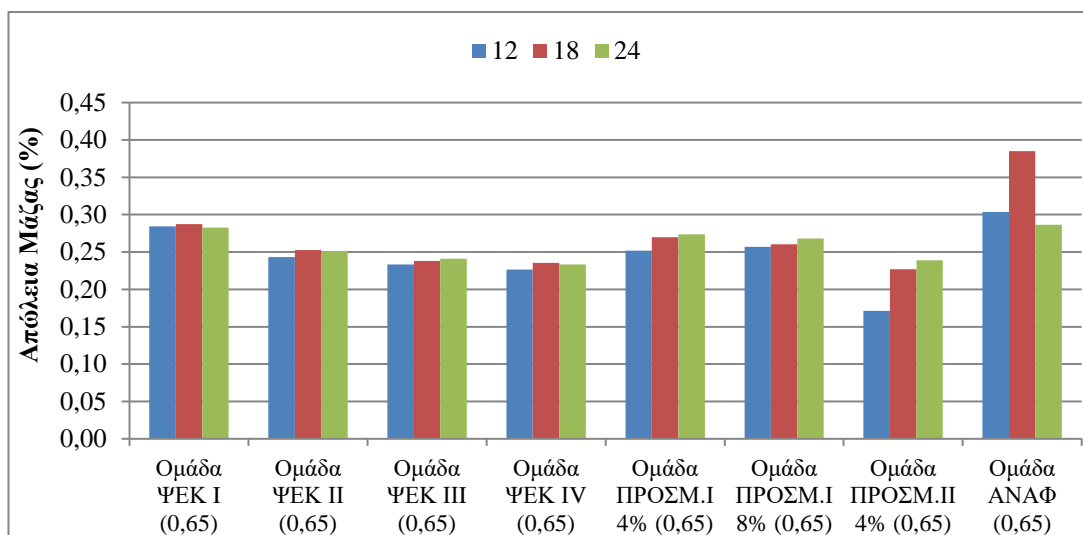
Πίνακας 10.35. Απώλεια μάζας σπλισμών δοκιμίων με αναλογία νερού 0,65 στους 24 μήνες

|                            | μαρχ (g) | πτελ (g) | Απώλεια Μάζας (g) | Απώλεια Μάζας (%) |
|----------------------------|----------|----------|-------------------|-------------------|
| <b>Ομάδα ΨΕΚ I (0,65)</b>  | 63,2537  | 63,0734  | 0,1803            | 0,2850            |
|                            | 63,0160  | 62,8374  | 0,1786            | 0,2834            |
|                            | 64,5491  | 64,3593  | 0,1898            | 0,2940            |
|                            | 66,0634  | 65,8864  | 0,1770            | 0,2679            |
| <b>M.O. ΨΕΚ I (0,65)</b>   |          |          | <b>0,1814</b>     | <b>0,2826</b>     |
| <b>Ομάδα ΨΕΚ II (0,65)</b> | 62,4690  | 62,3248  | 0,1442            | 0,2308            |
|                            | 62,6845  | 62,5253  | 0,1592            | 0,2540            |
|                            | 63,1548  | 63,0011  | 0,1537            | 0,2434            |
|                            | 64,1371  | 63,9588  | 0,1783            | 0,2780            |
| <b>M.O. ΨΕΚ II (0,65)</b>  |          |          | <b>0,1589</b>     | <b>0,2515</b>     |

|                                 |         |         |               |               |
|---------------------------------|---------|---------|---------------|---------------|
| <b>Ομάδα ΨΕΚ ΙΙΙ (0,65)</b>     | 63,3356 | 63,1798 | 0,1558        | 0,2460        |
|                                 | 63,3437 | 63,1994 | 0,1443        | 0,2278        |
|                                 | 62,9100 | 62,7546 | 0,1554        | 0,2470        |
|                                 | 61,7600 | 61,6101 | 0,1499        | 0,2427        |
| <b>Μ.Ο. ΨΕΚ ΙΙΙ (0,65)</b>      |         |         | <b>0,1514</b> | <b>0,2409</b> |
| <b>Ομάδα ΨΕΚ ΙV (0,65)</b>      | 61,3940 | 61,2344 | 0,1596        | 0,2600        |
|                                 | 67,3325 | 67,1802 | 0,1523        | 0,2262        |
|                                 | 65,9696 | 65,8169 | 0,1527        | 0,2315        |
|                                 | 65,3268 | 65,1862 | 0,1406        | 0,2152        |
| <b>Μ.Ο. ΨΕΚ ΙV (0,65)</b>       |         |         | <b>0,1513</b> | <b>0,2332</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,65)</b>  | 62,9410 | 62,7743 | 0,1667        | 0,2649        |
|                                 | 62,3392 | 62,1695 | 0,1697        | 0,2722        |
|                                 | 62,5273 | 62,3391 | 0,1882        | 0,3010        |
|                                 | 63,5467 | 63,3833 | 0,1634        | 0,2571        |
| <b>Μ.Ο. ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,65)</b>   |         |         | <b>0,1720</b> | <b>0,2738</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,65)</b>  | 66,7803 | 66,6008 | 0,1795        | 0,2688        |
|                                 | 61,4942 | 61,3621 | 0,1321        | 0,2148        |
|                                 | 61,3264 | 61,1177 | 0,2087        | 0,3403        |
|                                 | 61,6059 | 61,4531 | 0,1528        | 0,2480        |
| <b>Μ.Ο. ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,65)</b>   |         |         | <b>0,1683</b> | <b>0,2680</b> |
| <b>Ομάδα ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,65)</b> | 63,7548 | 63,6238 | 0,1310        | 0,2055        |
|                                 | 62,5964 | 62,4517 | 0,1447        | 0,2312        |
|                                 | 61,5127 | 61,3796 | 0,1331        | 0,2164        |
|                                 | 62,1869 | 61,9988 | 0,1881        | 0,3025        |
| <b>Μ.Ο. ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,65)</b>  |         |         | <b>0,1492</b> | <b>0,2389</b> |
| <b>Ομάδα ΑΝΑΦ (0,65)</b>        | 62,3140 | 62,0736 | 0,2404        | 0,3858        |
|                                 | 65,8980 | 65,6525 | 0,2455        | 0,3725        |
|                                 | 62,6682 | 62,4209 | 0,2473        | 0,3946        |
|                                 | 64,1391 | 63,9045 | 0,2346        | 0,3658        |
| <b>Μ.Ο. ΑΝΑΦ (0,65)</b>         |         |         | <b>0,2420</b> | <b>0,2865</b> |



**Σχήμα 10.29:** Απώλεια μάζας (g) των οπλισμών δοκιμίων με αναλογία 0,65 μετά από 12, 18 και 24 μήνες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον



**Σχήμα 10.30:** Απώλεια μάζας (%) οπλισμών δοκιμίων με αναλογία 0,65 μετά από 12, 18 και 24 μήνες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον

### Μερικό συμπέρασμα 18:

Από τα σχήματα 10.29 και 10.30 παρατηρείται ότι η απώλεια μάζας των οπλισμών αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Τα δοκίμια αναφοράς (Ομάδα ΑΝΑΦ 0,65) παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απώλεια μάζας του οπλισμού μετά από 12, 18 και 24 μήνες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον και ακολουθούν τα δοκίμια της ομάδας ΨΕΚ I (0,65) (ψεκαζόμενος αναστολέας 1). Τα δοκίμια στα με τη μικρότερη απώλεια

μάζας είναι αυτά στα οποία ο πρόσμικτος αναστολέας με αναλογία 4% βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) (Ομάδα ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,65)) και ακολουθούν τα δοκίμια στα οποία ο ψεκαζόμενος αναστολέας διάβρωσης βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) (Ομάδα ΨΕΚ IV).

### **10.3 Επίδραση οργανικής επικάλυψης και αναστολέα διάβρωσης στη διάβρωση οπλισμών σε κυβικά δοκίμια**

#### **10.3.1 Κατασκευή κυβικών δοκιμίων με εφαρμογή οργανικής επικάλυψης**

Κατασκευάστηκαν δύο ομάδες κυβικών δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος από τσιμέντο Portland (EN 197-1) τύπου CEM II/B-M(P-W-L) 42,5N, ασβεστολιθική άμμο (EN 12620), με αναλογία τσιμέντο:αδρανών:νερό 1:3:0,5, ενώ προστέθηκε ποσότητα διαλύματος  $\text{NaCl}$   $5\text{kg/m}^3$  και εφαρμόστηκε οργανική επικάλυψη στην επιφάνεια του οπλισμού (Ομάδα Ο.Ε.οπλ. (0,50)) και στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος (Ομάδα Ο.Ε.τσιμ. (0,50)). Η οργανική επικάλυψη που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από δύο επικαλυπτικά:

- Το πρώτο επικαλυπτικό (i) ήταν βερνίκι που περιείχε τον πτητικό αναστολέα διάβρωσης. Ο πτητικός αναστολέας διάβρωσης εξαχνώνεται και η αέρια φάση εισέρχεται στο κονίαμα (ή σκυρόδεμα) και σχηματίζει ένα στρώμα παθητικό στην επιφάνεια του οπλισμού.
- Το δεύτερο επικαλυπτικό (ii) ήταν επίσης βερνίκι υδατοδιαλυτό το οποίο έχει υψηλό PH και έχει δυνατότητα παρεμπόδισης της υγρασίας στο κονίαμα. Αυτό εφαρμόζεται πάνω στην πρώτη επικάλυψη.

##### **10.3.1.1. Χρονική εξέλιξη Δυναμικού Διάβρωσης**

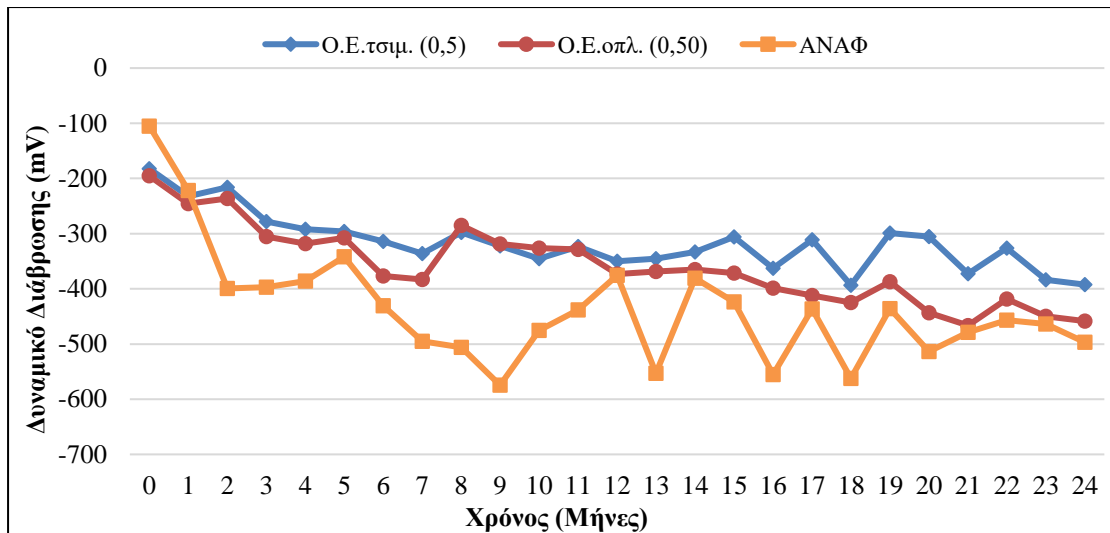
Στον Πίνακα 10.36 φαίνονται οι τιμές του μέσου όρου των δυναμικών διάβρωσης για τις ομάδες των κυβικών δοκιμίων με εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης που περιέχει αναστολέα διάβρωσης. Το δυναμικό διάβρωσης μετρήθηκε σε όλους τους

οπλισμούς ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl, κάθε 30 ημέρες για συνολικά 24 μήνες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

**Πίνακας 10.36. Τιμές του μέσου όρου των δυναμικών διάβρωσης για τις ομάδες κυβικών δοκιμίων με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50**

| Μήνες | Ομάδα Ο.Ε.τσιμ.<br>(0,5) | Ομάδα Ο.Ε.οπλ.<br>(0,50) | Ομάδα ΑΝΑΦ |
|-------|--------------------------|--------------------------|------------|
| 0     | -182,342                 | -195,346                 | -105,121   |
| 1     | -232,453                 | -245,874                 | -221,559   |
| 2     | -216,124                 | -236,432                 | -399,507   |
| 3     | -278,123                 | -305,542                 | -397,126   |
| 4     | -292,232                 | -318,234                 | -386,048   |
| 5     | -296,108                 | -307,46                  | -342,070   |
| 6     | -314,317                 | -376,808                 | -430,857   |
| 7     | -336,122                 | -382,891                 | -495,174   |
| 8     | -298,107                 | -285,342                 | -506,128   |
| 9     | -322,246                 | -318,896                 | -574,649   |
| 10    | -345,193                 | -326,144                 | -475,036   |
| 11    | -323,154                 | -328,832                 | -438,141   |
| 12    | -349,896                 | -373,065                 | -375,554   |
| 13    | -345,128                 | -368,392                 | -552,878   |
| 14    | -332,982                 | -365,294                 | -380,513   |
| 15    | -306,195                 | -371,616                 | -423,445   |
| 16    | -362,804                 | -398,991                 | -555,509   |
| 17    | -311,344                 | -412,342                 | -436,192   |
| 18    | -393,323                 | -425,118                 | -562,121   |
| 19    | -299,196                 | -387,127                 | -435,684   |
| 20    | -305,327                 | -443,173                 | -513,442   |
| 21    | -372,895                 | -466,342                 | -478,685   |
| 22    | -326,193                 | -418,45                  | -456,845   |
| 23    | -383,922                 | -449,546                 | -463,582   |
| 24    | -392,285                 | -458,504                 | -496,577   |

Στο σχήμα 10.31 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου



*Σχήμα.10.31: Μ.Ο. Δυναμικού διάβρωσης συναρτήσεως του χρόνου έκθεσης σε κυβικά δοκίμια με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50 μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl*

#### **Μερικό συμπέρασμα 19:**

Από το σχήμα 10.31 παρατηρείται ότι τα δυναμικό διάβρωσης των οπλισμών συναρτήσεως του χρόνου ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl, κατά το μεγαλύτερο διάστημα παραμονής στο διάλυμα 3,5% NaCl, κυμαίνονται μεταξύ -300mV και -550mV. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87 υπάρχει υψηλή πιθανότητα διάβρωσης.

Τα δοκίμια στα οποία έχει εφαρμοσθεί η οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος (Ομάδα O.E.τσιμ. (0,50)) φαίνεται να παρουσιάζουν πιο ηλεκτροθετικές τιμές σε σχέση με τα δοκίμια που έχει εφαρμοστεί η οργανική επικάλυψη στην επιφάνεια του οπλισμού (Ομάδα O.E.οπλ. (0,50)). Τα δοκίμια αναφορά παρουσιάζουν τις πιο ηλεκτροαρνητικές τιμές δυναμικού διάβρωσης.

#### **10.3.1.2. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας**

Για τον προσδιορισμό της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας έγιναν μετρήσεις γραμμικής πόλωσης ανά μήνα για συνολικό χρόνο έκθεσης 24 μηνών στο διαβρωτικό περιβάλλον μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl. Η πειραματική διάταξη για τη διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών μετρήσεων περιελάμβανε Ποτενσιοστάτη/

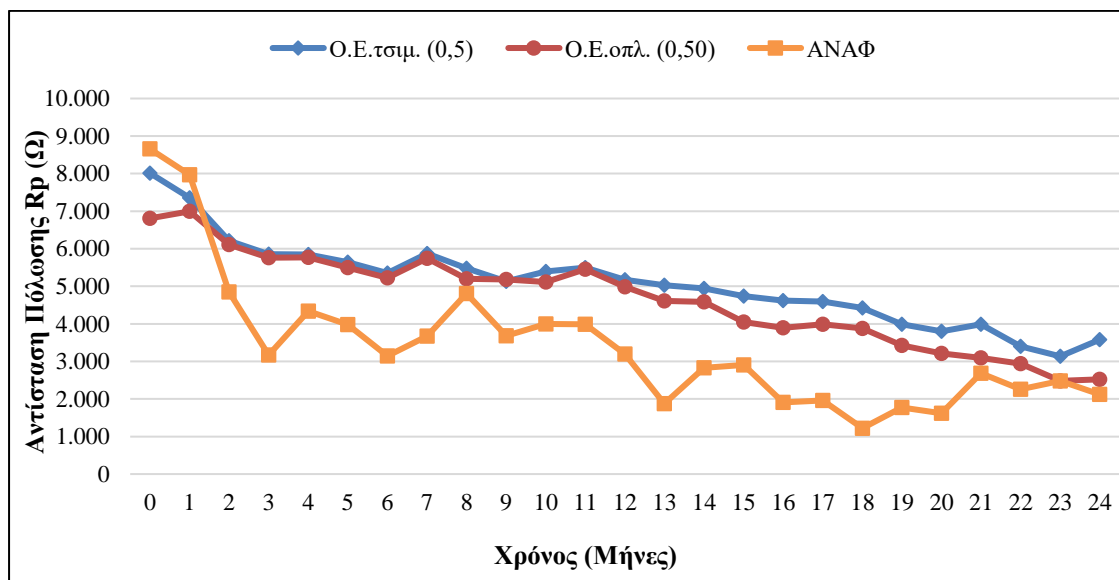
Γαλβανοστάτη της E.G. & Model 263 συνδεδεμένο με υπολογιστή για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων. Για την επεξεργασία των ηλεκτροχημικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε λογισμικό Power Suite της εταιρείας E.G. & G Princeton Research. Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο Ag/AgCl, ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκε ράβδος άνθρακα διαστάσεων 100mm μήκους και 10mm διάμετρο και ηλεκτρόδιο εργασίας ο υπό εξέταση χάλυβας. Η περιοχή πόλωσης του χάλυβα ήταν  $\pm 10\text{mV}$  από το δυναμικό διάβρωσης ( $E_{\text{corr}}$ ) του υπό εξέταση χάλυβα Ο.Σ και το βήμα σάρωσης (*Scan rate*) του δυναμικού ήταν  $0,1\text{mV}/\text{sec}$ .

Οι τιμές της αντίστασης πόλωσης  $R_p$  που υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.37, ενώ η γραφική παράσταση της αντίστασης πόλωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον φαίνεται στο Σχήμα 10.32.

**Πίνακας 10.37. Τιμές της αντίστασης πόλωσης ( $R_p$ ) για τις ομάδες κυβικών δοκιμίων με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50**

| Μήνες | Ομάδα Ο.Ε.τσιμ.<br>(0,5) | Ομάδα Ο.Ε.οπλ.<br>(0,50) | Ομάδα ΑΝΑΦ |
|-------|--------------------------|--------------------------|------------|
| 0     | 8.013,716                | 6.805,892                | 8.657,044  |
| 1     | 7.352,687                | 6.995,452                | 7.969,146  |
| 2     | 6.215,853                | 6.114,528                | 4.848,115  |
| 3     | 5.852,483                | 5.758,662                | 3.167,229  |
| 4     | 5.845,492                | 5.772,842                | 4.341,439  |
| 5     | 5.642,655                | 5.497,425                | 3.979,539  |
| 6     | 5.354,891                | 5.222,658                | 3.146,540  |
| 7     | 5.875,489                | 5.743,549                | 3.670,391  |
| 8     | 5.482,386                | 5.198,384                | 4.803,349  |
| 9     | 5.127,397                | 5.186,139                | 3.685,164  |
| 10    | 5.398,157                | 5.114,835                | 4.000,943  |
| 11    | 5.496,783                | 5.452,368                | 3.985,621  |
| 12    | 5.176,845                | 4.989,776                | 3.196,534  |
| 13    | 5.026,582                | 4.608,879                | 1.877,083  |
| 14    | 4.945,764                | 4.584,556                | 2.825,454  |
| 15    | 4.738,742                | 4.043,985                | 2.904,048  |
| 16    | 4.615,322                | 3.896,475                | 1.907,825  |
| 17    | 4.596,783                | 3.987,344                | 1.961,334  |
| 18    | 4.425,385                | 3.876,132                | 1.221,617  |

|    |           |           |           |
|----|-----------|-----------|-----------|
| 19 | 3.988,684 | 3.425,334 | 1.773,363 |
| 20 | 3.797,384 | 3.216,442 | 1.621,587 |
| 21 | 3.984,785 | 3.096,483 | 2.687,521 |
| 22 | 3402,354  | 2938,473  | 2255,239  |
| 23 | 3135,384  | 2482,641  | 2482,623  |
| 24 | 3576,354  | 2518,324  | 2118,656  |

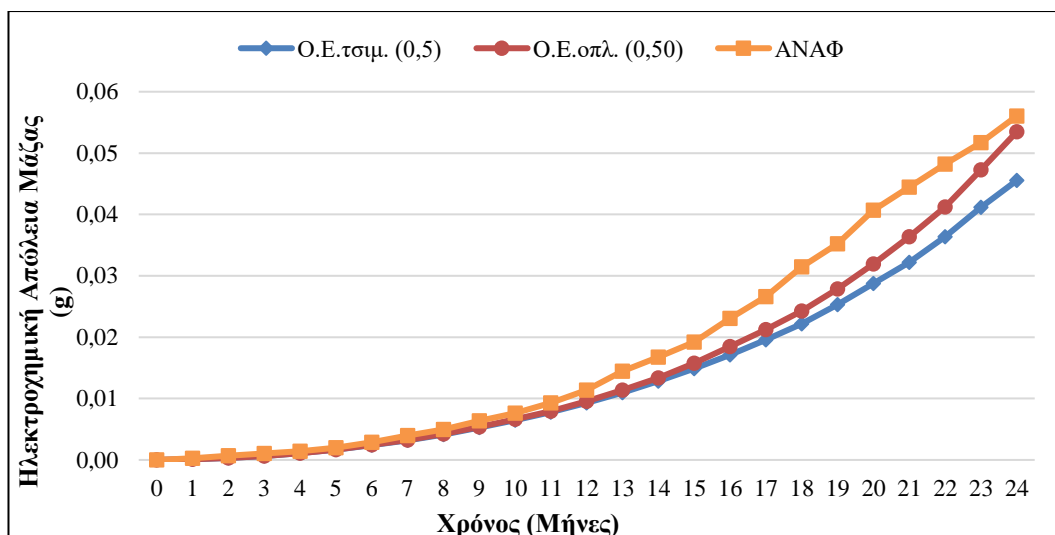


**Σχήμα.10.32: Μ.Ο. Αντίστασης Πόλωσης ( $R_p$ ) συναρτήσεως του χρόνου έκθεσης σε κυβικά δοκίμια με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50 μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl**

Στη συνέχεια με βάση τις τιμές του ρεύματος διάβρωσης του χάλυβα,  $I_{corr}$ , υπολογίστηκαν οι τιμές της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας (g), όπως φαίνονται στον Πίνακα 10.38, ενώ στο σχήμα 10.33 δίνεται η γραφική παράσταση της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας συναρτήσεως του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον.

**Πίνακας 10.38. Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας οπλισμών κυβικών δοκιμίων με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50**

| <b>Μήνες</b> | <b>Ομάδα Ο.Ε.τσιμ.<br/>(0,5)</b> | <b>Ομάδα Ο.Ε.οπλ.<br/>(0,50)</b> | <b>Ομάδα ΑΝΑΦ</b> |
|--------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| <b>0</b>     | 0,0000                           | 0,0000                           | 0,0000            |
| <b>1</b>     | 0,0001                           | 0,0001                           | 0,0003            |
| <b>2</b>     | 0,0003                           | 0,0003                           | 0,0007            |
| <b>3</b>     | 0,0006                           | 0,0006                           | 0,0010            |
| <b>4</b>     | 0,0011                           | 0,0011                           | 0,0014            |
| <b>5</b>     | 0,0017                           | 0,0017                           | 0,0020            |
| <b>6</b>     | 0,0024                           | 0,0024                           | 0,0029            |
| <b>7</b>     | 0,0032                           | 0,0032                           | 0,0040            |
| <b>8</b>     | 0,0041                           | 0,0042                           | 0,0049            |
| <b>9</b>     | 0,0053                           | 0,0054                           | 0,0064            |
| <b>10</b>    | 0,0065                           | 0,0066                           | 0,0076            |
| <b>11</b>    | 0,0078                           | 0,0080                           | 0,0093            |
| <b>12</b>    | 0,0093                           | 0,0095                           | 0,0114            |
| <b>13</b>    | 0,0110                           | 0,0114                           | 0,0145            |
| <b>14</b>    | 0,0128                           | 0,0134                           | 0,0168            |
| <b>15</b>    | 0,0149                           | 0,0158                           | 0,0192            |
| <b>16</b>    | 0,0171                           | 0,0185                           | 0,0230            |
| <b>17</b>    | 0,0195                           | 0,0212                           | 0,0266            |
| <b>18</b>    | 0,0222                           | 0,0243                           | 0,0315            |
| <b>19</b>    | 0,0253                           | 0,0279                           | 0,0352            |
| <b>20</b>    | 0,0287                           | 0,0319                           | 0,0407            |
| <b>21</b>    | 0,0322                           | 0,0363                           | 0,0445            |
| <b>22</b>    | 0,0364                           | 0,0412                           | 0,0482            |
| <b>23</b>    | 0,0412                           | 0,0473                           | 0,0517            |
| <b>24</b>    | 0,0455                           | 0,0535                           | 0,0560            |



*Σχήμα.10.33: Μ.Ο. Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας (g) συναρτήσεως του χρόνου έκθεσης σε κυβικά δοκίμια με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50 μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl*

### **Μερικό συμπέρασμα 20:**

Από το σχήμα 10.33 παρατηρείται ότι τα δοκίμια αναφοράς, καθώς και τα δοκίμια της ομάδας O.E.οπλ. (0,50) (εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης που περιέχει αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού) παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας μετά από 24 μήνες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

#### **10.3.1.3. Σταθμικός προσδιορισμός απώλειας μάζας**

Για τον υπολογισμό της απώλειας μάζας των οπλισμών σπάστηκαν τα δοκίμια στους 12, 18 και 24 μήνες από την ημερομηνία έκθεσης των δοκιμίων στο διαβρωτικό περιβάλλον. Στους Πίνακες 10.39, 10.40 και 10.41 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα απώλειας μάζας μετά από 12, 18 και 24 μήνες αντίστοιχα και στα σχήματα 10.34 και 10.35 απεικονίζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

**Πίνακας 10.39. Απώλεια μάζας σπλισμών δοκιμίων με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης με αναλογία νερού 0,50 στους 12 μήνες**

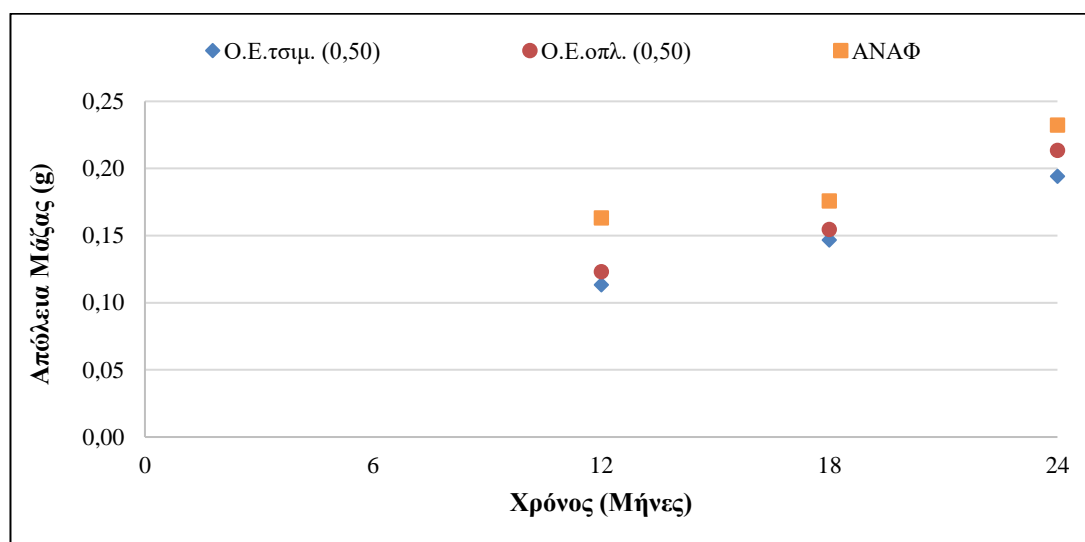
|                               | μαρχ (g) | πτελ (g) | Απώλεια Μάζας (g) | Απώλεια Μάζας (%) |
|-------------------------------|----------|----------|-------------------|-------------------|
| <b>Ομάδα Ο.Ε.οπλ. (0,50)</b>  | 61,5975  | 61,4894  | 0,1081            | 0,1755            |
|                               | 60,8638  | 60,7263  | 0,1375            | 0,2259            |
|                               | 61,1895  | 61,0858  | 0,1037            | 0,1695            |
|                               | 62,5414  | 62,3982  | 0,1432            | 0,2290            |
| <b>M.O. Ο.Ε.οπλ. (0,50)</b>   |          |          | <b>0,1231</b>     | <b>0,2000</b>     |
| <b>Ομάδα Ο.Ε.τσιμ. (0,50)</b> | 62,5478  | 62,4406  | 0,1072            | 0,1714            |
|                               | 63,1546  | 63,0497  | 0,1049            | 0,1661            |
|                               | 62,8931  | 62,7812  | 0,1119            | 0,1779            |
|                               | 61,5487  | 61,4198  | 0,1289            | 0,2094            |
| <b>M.O. Ο.Ε.τσιμ. (0,50)</b>  |          |          | <b>0,1132</b>     | <b>0,1812</b>     |
| <b>Ομάδα ΑΝΑΦ (0,50)</b>      | 64,1253  | 63,9785  | 0,1468            | 0,2289            |
|                               | 64,1239  | 64,001   | 0,1229            | 0,1917            |
|                               | 63,9575  | 63,7602  | 0,1973            | 0,3085            |
|                               | 62,7604  | 62,5751  | 0,1853            | 0,2952            |
| <b>M.O. ΑΝΑΦ (0,50)</b>       |          |          | <b>0,1631</b>     | <b>0,2561</b>     |

**Πίνακας 10.40. Απώλεια μάζας σπλισμών δοκιμίων με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης με αναλογία νερού 0,50 στους 18 μήνες**

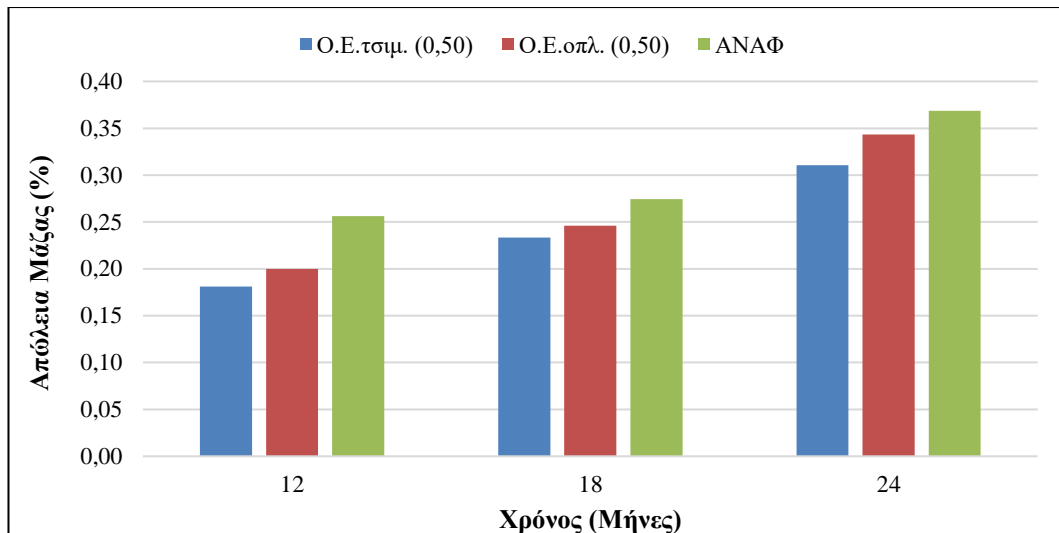
|                               | μαρχ (g) | πτελ (g) | Απώλεια Μάζας (g) | Απώλεια Μάζας (%) |
|-------------------------------|----------|----------|-------------------|-------------------|
| <b>Ομάδα Ο.Ε.οπλ. (0,50)</b>  | 62,4782  | 62,3294  | 0,1488            | 0,2382            |
|                               | 63,5984  | 63,4504  | 0,1480            | 0,2327            |
|                               | 62,0896  | 61,925   | 0,1646            | 0,2651            |
|                               | 63,1273  | 62,9704  | 0,1569            | 0,2485            |
| <b>M.O. Ο.Ε.οπλ. (0,50)</b>   |          |          | <b>0,1546</b>     | <b>0,2461</b>     |
| <b>Ομάδα Ο.Ε.τσιμ. (0,50)</b> | 63,4856  | 63,3295  | 0,1561            | 0,2459            |
|                               | 62,5942  | 62,4512  | 0,1430            | 0,2285            |
|                               | 63,5217  | 63,3813  | 0,1404            | 0,2210            |
|                               | 61,9543  | 61,8071  | 0,1472            | 0,2376            |
| <b>M.O. Ο.Ε.τσιμ. (0,50)</b>  |          |          | <b>0,1467</b>     | <b>0,2332</b>     |
| <b>Ομάδα ΑΝΑΦ (0,50)</b>      | 65,4959  | 65,3118  | 0,1841            | 0,2811            |
|                               | 63,4515  | 63,3108  | 0,1407            | 0,2217            |
|                               | 63,0564  | 62,8542  | 0,2022            | 0,3207            |
| <b>M.O. ΑΝΑΦ (0,50)</b>       |          |          | <b>0,1757</b>     | <b>0,2745</b>     |

**Πίνακας 10.41.** Απώλεια μάζας οπλισμών δοκιμίων δοκιμίων με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης με αναλογία νερού 0,50 στους 24 μήνες

|                               | παρχ (g) | πτελ (g) | Απώλεια Μάζας (g) | Απώλεια Μάζας (%) |
|-------------------------------|----------|----------|-------------------|-------------------|
| <b>Ομάδα Ο.Ε.οπλ. (0,50)</b>  | 61,8647  | 61,6393  | 0,2254            | 0,3643            |
|                               | 62,9822  | 62,7825  | 0,1997            | 0,3171            |
|                               | 61,3875  | 61,1594  | 0,2281            | 0,3716            |
|                               | 62,4513  | 62,2508  | 0,2005            | 0,3211            |
| <b>Μ.Ο. Ο.Ε.οπλ. (0,50)</b>   |          |          | <b>0,2134</b>     | <b>0,3435</b>     |
| <b>Ομάδα Ο.Ε.τσιμ. (0,50)</b> | 62,9548  | 62,7488  | 0,2060            | 0,3272            |
|                               | 63,0954  | 62,9159  | 0,1795            | 0,2845            |
|                               | 61,9662  | 61,7608  | 0,2054            | 0,3315            |
|                               | 62,1967  | 62,0106  | 0,1861            | 0,2992            |
| <b>Μ.Ο. Ο.Ε.τσιμ. (0,50)</b>  |          |          | <b>0,1942</b>     | <b>0,3106</b>     |
| <b>Ομάδα ΑΝΑΦ (0,50)</b>      | 62,2467  | 62,0117  | 0,235             | 0,3775            |
|                               | 62,2987  | 62,1165  | 0,1822            | 0,2925            |
|                               | 64,0217  | 63,7423  | 0,2794            | 0,4364            |
| <b>Μ.Ο. ΑΝΑΦ (0,50)</b>       |          |          | <b>0,2322</b>     | <b>0,3688</b>     |



**Σχήμα.10.34:** Απώλεια Μάζας (g) μετά από 12, 18 και 24 μήνες έκθεσης σε κυβικά δοκίμια με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50 μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl



*Σχήμα.10.35: Απώλεια Μάζας (%) μετά από 12, 18 και 24 μήνες έκθεσης σε κοβικά δοκίμια με οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης και αναλογία νερού 0,50 μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα 3,5% NaCl*

#### **Μερικό συμπέρασμα 21:**

Από το σχήμα 10.34 παρατηρείται ότι τα δοκίμια αναφοράς παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας μετά από 24 μήνες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον, ενώ τη μικρότερη απώλεια μάζας παρουσιάζουν τα δοκίμια της ομάδας Ο.Ε.τσιμ. (0,50) (εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης που περιέχει αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος).

## 11. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην παρούσα διατριβή εξετάστηκε η προστασία που μπορούν να προσφέρουν οι οργανικές επικαλύψεις, καθώς και οι αναστολείς διάβρωσης στο οπλισμένο σκυρόδεμα.

**Στην πρώτη κατεύθυνση** εξετάστηκε η προστασία του οπλισμού του σκυροδέματος με τη χρήση οργανικής επικάλυψης η οποία περιέχει αναστολέα διάβρωσης. Προκειμένου να επιτευχθεί επιτάχυνση των πειραμάτων σε μια ομάδα δοκιμίων έγινε έκθεση σε διάβρωση με μερική εμβάπτιση σε διάλυμα με 3,5% κ.β. NaCl και κατόπιν εξετάστηκε η συμπεριφορά των δοκιμίων σε διάβρωση με μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα και κατασκευή καμπυλών δυναμικού-χρόνου, καθώς και μέτρηση της αντίστασης πόλωσης και κατασκευή καμπυλών αντίστασης πόλωσης - χρόνου. Άλλη ομάδα δοκιμίων εκτέθηκε σε θάλαμο αλατονέφωσης και μετρήθηκε το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα συναρτήσει του χρόνου. Τέλος, μια ακόμα ομάδα κυλινδρικών δοκιμίων στα οποία έγινε χρήση οργανικής επικάλυψης η οποία περιέχει αναστολέα διάβρωσης, εκτέθηκε στην ατμόσφαιρα της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου (ατμοσφαιρική διάβρωση). Η χρήση της οργανικής επικάλυψης είναι ελκυστική καθώς μειώνει το χρόνο και το κόστος της επιδιόρθωσης κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αντί του συνήθους ψεκασμού με αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

**Στη δεύτερη κατεύθυνση** εξετάστηκε η προστατευτική ικανότητα του νιτρικού ασβεστίου που χρησιμοποιήθηκε είτε ως πρόσμικτο είτε ως ψεκαζόμενος αναστολέα διάβρωσης.

Κατασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια με αναλογία τσιμέντο:άμμος:νερό 1:3:0.5 και με αναλογία τσιμέντο:άμμος:νερό 1:3:0.65.

Σε μια ομάδα δοκιμίων έχει προστεθεί στη σύσταση του σκυροδέματος αναστολέας διάβρωσης ως πρόσμικτο σε δύο διαφορετικές περιεκτικότητες (4g/100g τσιμέντου και 8g/100g τσιμέντου, της ποσότητας του νερού που προστέθηκε).

Σε άλλες ομάδες δοκιμίων οπλισμών εγκιβωτισμένων στο σκυρόδεμα έχουν προστεθεί στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος ως ψεκαζόμενοι τέσσερις διαφορετικοί τύποι αναστολέων διάβρωσης, από τους οποίους οι δύο βασίζονται στο

Νιτρικό Ασβέστιο και οι άλλοι δύο στη Διμεθυλ-αιθανόλ-αμίνη και στο Νιτρώδες Ασβέστιο.

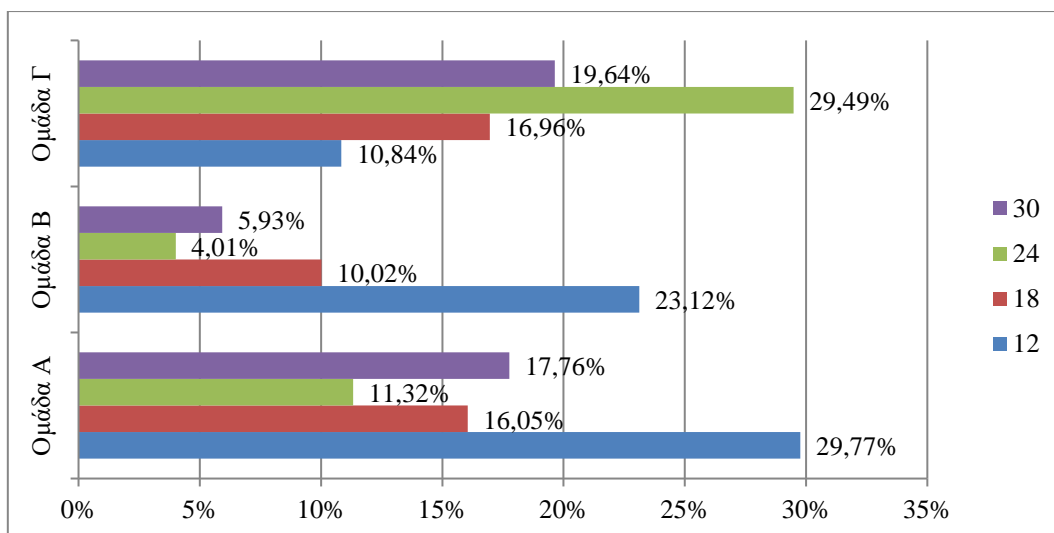
Η προστατευτική ικανότητα των παραπάνω μεθόδων προστασίας σε σύγκριση με τον χάλυβα χωρίς προστασία εκτιμήθηκε ηλεκτροχημικά με τον προσδιορισμό ηλεκτροχημικών παραμέτρων διάβρωσης. Συγκεκριμένα προσδιορίστηκε:

- Το Δυναμικό διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου (στον οπλισμό)
- Η πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης  $i_{corr}$
- Η αντίσταση γραμμικής πόλωσης  $R_p$
- Η ηλεκτροχημική απώλεια μάζας (στον οπλισμό)

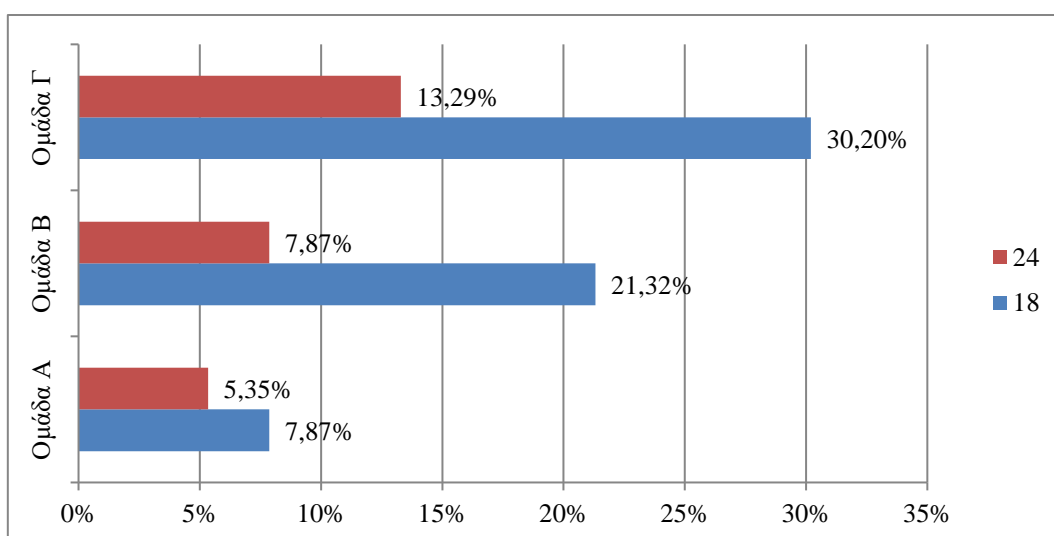
Επιπρόσθετα έγινε σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος. Τέλος, παραγματοποιήθηκε μακροσκοπική και μικροσκοπική παρατήρηση των διαβρωμένων τσιμεντοκονιαμάτων με τη χρησιμοποίηση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

### **11.1 Βαθμός προστασίας οργανικής επικάλυψης**

Υπολογίστηκαν οι βαθμοί προστασίας που προσέφερε η οργανική επικάλυψη η οποία περιείχε αναστολέα διάβρωσης και στα παρακάτω διαγράμματα δίνονται οι βαθμοί προστασίας (%) της οργανικής επικάλυψης τόσο κατά την έκθεση στην ατμόσφαιρα, όσο και κατά την έκθεση σε διάλυμα 3,5% NaCl.



**Σχήμα 11.1:** Βαθμοί προστασίας της οργανικής επικάλυψης στις 3 ομάδες δοκιμίων στις οποίες εφαρμόστηκε μετά από 12, 18, 24 και 32 μήνες παραμονής σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl



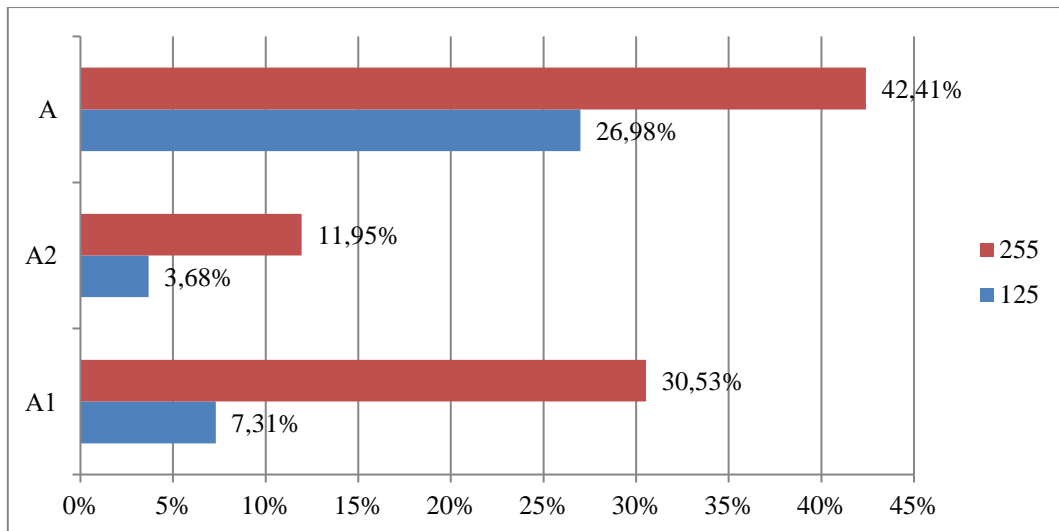
**Σχήμα 11.2:** Βαθμοί προστασίας της οργανικής επικάλυψης στις 3 ομάδες δοκιμίων στις οποίες εφαρμόστηκε μετά από 18 και 24 μήνες παραμονής στην ατμόσφαιρα

Από τα παραπάνω γραφήματα παρατηρείται ότι και τα τρία συστήματα προσέφεραν προστασία στα δοκίμια. Στην περίπτωση των δοκιμίων που το διαβρωτικό περιβάλλον ήταν το διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl, φαίνεται ότι ενώ τους πρώτους 12 μήνες τα δοκίμια με εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης με αναστολέα διάβρωσης επί του κονιάματος (Ομάδα Α) είχαν μεγαλύτερο βαθμό προστασίας, στη συνέχεια τα δοκίμια με εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης με αναστολέα διάβρωσης τόσο επί

του κονιάματος όσο και στον οπλισμό παρουσιάζουν (Ομάδα Γ), μετά από 30 μήνες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον, είχαν τον μεγαλύτερο βαθμό προστασίας σε σχέση με τα άλλα συστήματα προστασίας. Αντίθετα όταν τα δοκίμια και των τεσσάρων ομάδων εκτέθεικαν στην ατμόσφαιρα, τα δοκίμια με εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης τόσο επί του κονιάματος όσο και στον οπλισμό (Ομάδα Γ) παρουσιάζουν το μεγαλύτερο βαθμό προστασίας, οποίος μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Η μείωση του βαθμού προστασίας με την πάροδο του χρόνου οφείλεται στη φθορά των οργανικών επικαλύψεων. Στην περίπτωση της ατμόσφαιρας η φθορά οφείλεται στην επίδραση της UV ακτινοβολίας, η οποία μειώνει το πάχος της επικάλυψης. Στην περίπτωση της έκθεσης σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl η φθορά της οργανικής επικάλυψης οφείλεται στη διείσδυση ιόντων Cl<sup>-</sup> μέσα από τη μάζα της οργανικής επικάλυψης.

Προκειμένου να εξαχθεί συμπέρασμα για την προστασία που προσφέρει κάθε στρώση της οργανικής επικάλυψης η οποία περιέχει τον αναστολέα διάβρωσης εξετάστηκαν τέσσερις ομάδες δοκιμίων (μια ομάδα με εφαρμογή της πρώτης στρώσης στην επιφάνεια του κονιάματος (Ομάδα A1), μια ομάδα με εφαρμογή της δεύτερης στρώσης (Ομάδα A2), μια με εφαρμογή και των δύο στρώσεων της οργανικής επικάλυψης (Ομάδα A) και η ομάδα με τα δοκίμια αναφοράς (Ομάδα Δ), οι οποίες εκτέθεικαν σε επιταχυνόμενες συνθήκες διάβρωσης (θάλαμος αλατονέφωσης).

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψε το συγκριτικό διάγραμμα των ποσοτών προστασίας των τριών συστημάτων μετά από 19 ημέρες στο θάλαμο αλατονέφωσης και στη συνέχεια μετά από 125 και 255 ημέρες σε διαβρωτικό περιβάλλον μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl (σχήμα 11.3).



**Σχήμα 11.3: Βαθμοί προστασίας της οργανικής επικάλυψης στις 3 ομάδες δοκιμίων στις οποίες εφαρμόστηκε μετά από 19 ημέρες σε θάλαμο αλατονέφωσης ακι 125 και 255 μήνες παραμονής σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl**

Παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα ότι οι ομάδες δοκιμίων στις οποίες έγινε εφαρμογή και των δύο (i και ii) επικαλυπτικών της οργανικής επικάλυψης στην επιφάνεια του κονιάματος (Ομάδα A) είχαν μεγαλύτερο ποσοστό προστασίας, το οποίο φθάνει το 42,41%, έναντι των ομάδων δοκιμίων στα οποία έγινε εφαρμογή ενός επικαλυπτικού, είτε του i είτε του ii, της οργανικής επικάλυψης στην επιφάνεια του κονιάματος (Ομάδες A1 και A2).

Σε προηγούμενη εργασία (Batis G. et al, 2003 (a)) η προσθήκη οργανικών αναστολέων διάβρωσης σε κονίαμα που εκτέθηκαν σε περιβάλλον χλωριόντων, έδωσε ποσοστό προστασίας της τάξης των 25 %. Σε άλλη εργασία (Batis G. et al, 2003 (b)) πραγματοποιήθηκε η συνδυασμένη προστασία αναστολέα διάβρωσης με ανόργανη επικάλυψη σε περιβάλλον χλωριόντων. Τα ποσοστά προστασίας στην περίπτωση αυτή ήταν για τον αναστολέα διάβρωσης μόνο 21 % και για συνδυασμένη χρήση αναστολέα διάβρωσης και ανόργανου επικάλυψης 26 %. Η χρήση ακρυλικής διασποράς σαν επικάλυψη στο κονίαμα προσέφερε προστασία 39 %. Στην παρούσα εργασία η συνδυασμένη χρήση οργανικής επικάλυψης με πτητικούς αναστολείς διάβρωσης στον οπλισμό με οργανική επικάλυψη με πτητικούς αναστολείς διάβρωσης στην επιφάνεια του κονιάματος έδωσε το καλύτερο επίπεδο προστασίας 19 %.

Η ιδέα της χρήσης οργανικής επικάλυψης με πτητικό αναστολέα διάβρωσης που θα εφαρμοσθεί στην επιφάνεια του κονιάματος είναι ελκυστική διότι επιτυγχάνει σε μια εργασία την συγχώνευση των δύο εργασιών της εφαρμογής αναστολέα διάβρωσης και της οργανικής επικάλυψης σε μία. Τα ποσοστά προστασίας της τάξεως του 19 %, ακόμη και όταν έχουν εφαρμοσθεί τόσο στην επιφάνεια του οπλισμού όσο και της επιφάνειας του κονιάματος, ήσαν πτωχά. Επομένως όλη αρχιτεκτονική της οργανικής επικάλυψης με αναστολέα διάβρωσης πρέπει να επανεξετασθεί.

## 11.2 Βαθμός προστασίας αναστολέων διάβρωσης

Οι αναστολείς διάβρωσης που χρησιμοποιήθηκαν στη διατριβή αυτή είχαν ως βάση το Νιτρώδες Ασβέστιο, το Νιτρικό Ασβέστιο και τη Δυ-μεθ-αιθιλ-αμίνη (DMEA).

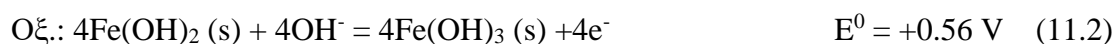
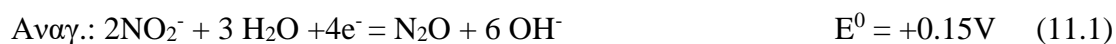
Το Νιτρώδες ασβέστιο, είναι ένας ανοδικός αναστολέας διάβρωσης και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως αναστολέας διάβρωσης το 1978, ενώ αργότερα εμφανίστηκαν οι οργανικοί αναστολείς διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα π.χ. DMEA (δυ-μεθ-αιθιλ-αμίνη).

Το νιτρώδες ασβέστιο, σύμφωνα με αποτελέσματα ερευνητών, παρέχει σημαντική προστασία έναντι της διάβρωσης του οπλισμού χωρίς να έχει αρνητικές επιπτώσεις στη θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων στις περισσότερες περιπτώσεις. (Σιδέρης, Κ. 2009)

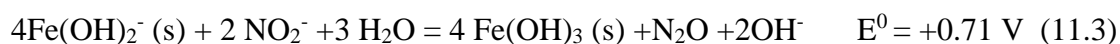
Ο οργανικός αναστολέας διάβρωσης είναι μικτός αναστολέας διάβρωσης και μειώνει τόσο την ανοδική όσο και την καθοδική ηλεκτροχημική αντίδραση της διάβρωσης.

Το Νιτρικό Ασβέστιο δεν είναι αναστολέας διάβρωσης, όμως κατά τις συνθήκες της ενυδάτωσης του σκυροδέματος (υψηλό pH) μέρος του Νιτρικού Ασβεστίου μετατρέπεται σε Νιτρώδες Ασβέστιο το οποίο είναι αναστολέας διάβρωσης. Γι' αυτό το λόγο στη βιβλιογραφία το Νιτρικό Ασβέστιο δεν αναφέρεται ως αναστολέας διάβρωσης (corrosion inhibitor) αλλά ως επιβραδυντής διάβρωσης (corrosion retarder).

Η μετατροπή του Νιτρικού Ασβεστίου σε Νιτρώδες Ασβέστιο πιθανά δημιουργείται με τον παρακάτω μηχανισμό (Justnes H. et al., 1999), ο οποίος αναλύεται με δύο ημιαντιδράσεις (σχέση 11.1) και δύο δυναμικά τα οποία κινούν την αντίδραση αυτή και η ισορροπία πηγαίνει προς τα δεξιά όπου έχει ένα θετικό δυναμικό:



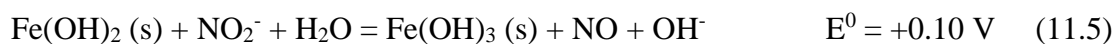
η συνολική αντίδραση είναι η εξής:



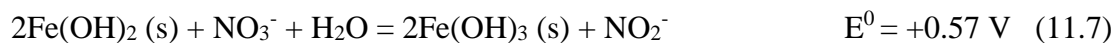
Η αναγωγή των νιτρικών πιθανά να οδηγήσει μέχρι το σχηματισμό αζώτου. Σύμφωνα με τον Berke, η αναγωγή σταματάει στο σχηματισμό του NO για λόγους κινητικούς (σχέση 11.5).



Από τις αντιδράσεις 11.4 και 11.2 προκύπτει:



Τα νιτρικά ιόντα,  $\text{NO}_3^-$ , ανάγονται εύκολα σε νιτρώδη,  $\text{NO}_2^-$ , παρουσία ιόντων υδροξειδίου, σε αλκαλικό περιβάλλον, όπως φαίνεται στη σχέση 11.7.



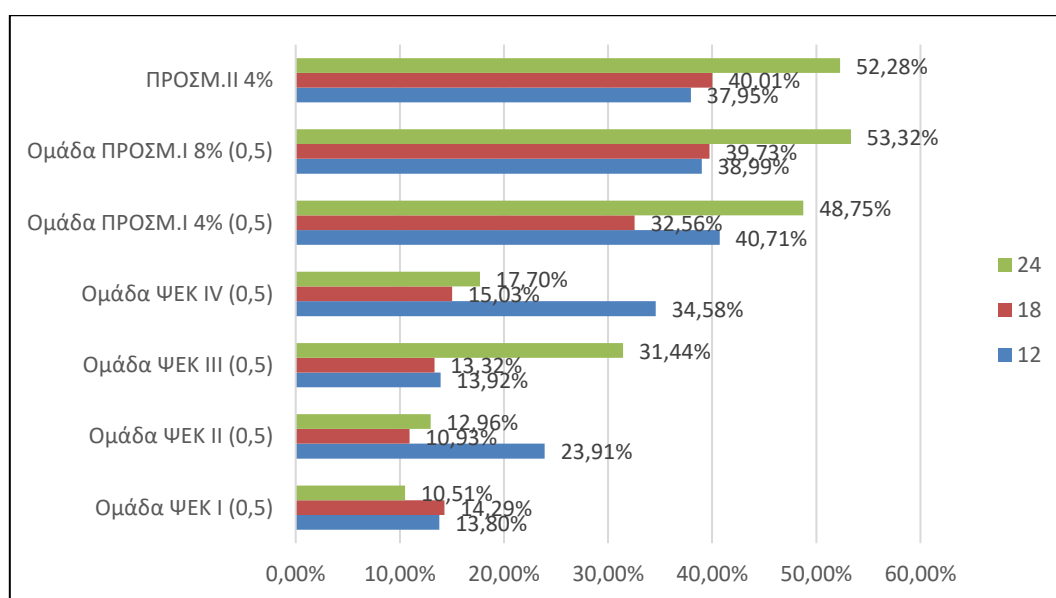
Αν ο ανωτέρω προτεινόμενος μηχανισμός για την αναχαίτηση της διάβρωσης οπλισμού μέσα στο σκυρόδεμα, μέσω των νιτρικών (σχέση 11.5), είναι σωστός, αυτό σημαίνει ότι τα νιτρικά ιόντα,  $\text{NO}_3^-$ , μπορεί να δημιουργούν ισχυρότερη αναχαίτηση της διάβρωσης, δεδομένου ότι σχηματίζονται νιτρώδη,  $\text{NO}_2^-$ , κατά την αναγωγή των νιτρικών, σύμφωνα με την σχέση 11.7.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το συνηθισμένο ποσοστό χρήσης του αναστολέα διάβρωσης είναι 4% κ.β. τσιμέντου. Το ανώτερο ποσοστό βάσει των κανονισμών είναι 5% κ.β. τσιμέντου. Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση του αναστολέα διάβρωσης σε ποσοστό 8% κ.β. τσιμέντου. Βέβαια όλη αυτή η ποσότητα δεν έχει μετατραπεί σε Νιτρώδες Ασβέστιο. Ακόμη, η προσθήκη σε ποσοστό 8% κ.β. τσιμέντου έγινε περισσότερο για τη διευκόλυνση της ερευνητικής διαδικασίας παρά για να προταθεί για χρησιμοποίηση στην πράξη.

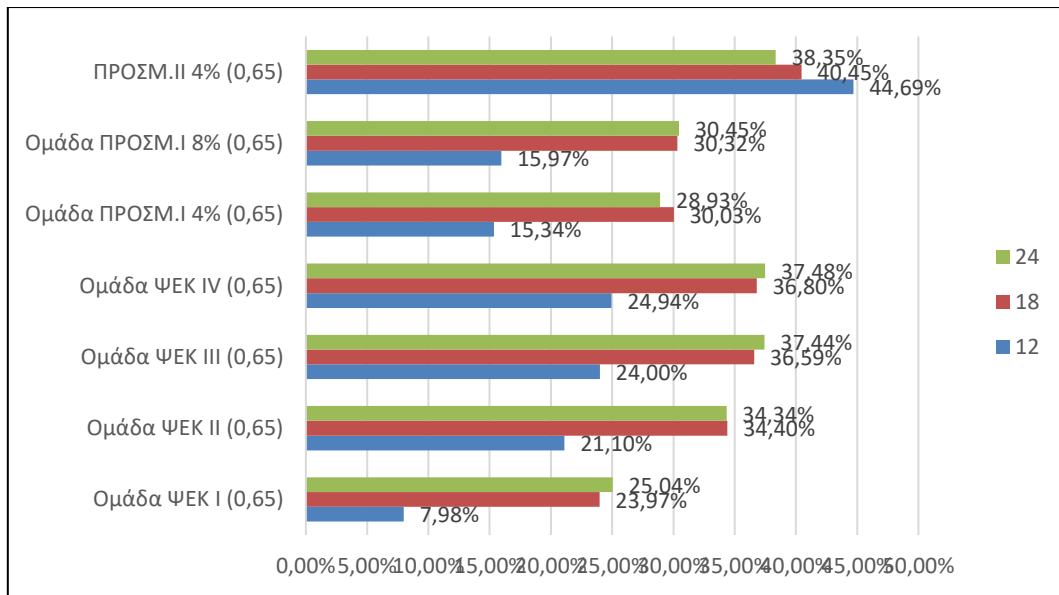
Οι αναστολείς στην διατριβή αυτή χρησιμοποιήθηκαν είτε ως πρόσμικτοι στη μάζα του κονιάματος, είτε ως ψεκαζόμενοι στην εξωτερική επιφάνεια του κονιάματος.

Κατασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια με σπλισμό σε αναλογία τσιμέντο: νερό: άμμος 1:0,5:3 και 1:0,65:3. Και στις δύο κατηγορίες δοκιμών ο πρόσμικτος αναστολέας χρησιμοποιήθηκε σε ποσοστό 4g /100g τσιμέντου και 8/100g τσιμέντου.

Υπολογίστηκαν τα ποσοστά προστασίας που παρείχαν οι αναστολείς διάβρωσης είτε ως ψεκαζόμενοι στην επιφάνεια του κονιάματος, είτε ως πρόσμικτοι στο κονίαμα και προέκυψαν τα ακόλουθα διαγράμματα των σχημάτων 11.4 και 11.5.



**Σχήμα 11.4: Ποσοστά προστασίας των αναστολέων διάβρωσης για αναλογία νερού 0,5**



**Σχήμα 11.5: Ποσοστά προστασίας των αναστολέων διάβρωσης για αναλογία νερού 0,65**

Για την πρώτη περίπτωση, με αναλογία νερού 0,5, βασιζόμενοι στην βαρομετρική απώλεια μάζας, τα ποσοστά προστασίας για τον αναστολέα που βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) με περιεκτικότητα 4g/100g τσιμέντου ήταν 48,75% και με περιεκτικότητα 8g/100g τσιμέντου ήταν 53,32% μετά την πάροδο 24 μηνών. Η σύγκριση έγινε με την ομάδα του μάρτυρα που δεν περιείχε καμία προσθήκη αναστολέα. Αντίστοιχα για τον αναστολέα διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) με περιεκτικότητα 4%, το ποσοστό προστασίας μετά τους 24 μήνες ήταν 52,28%.

Η προσθήκη του αναστολέα διάβρωσης σε ποσοστό 8% δίνει ποσοστό προστασίας 50 % που αντιστοιχεί στον διπλασιασμό ζωής του σκυροδέματος.

Από τα ποσοστά προστασίας βασιζόμενοι στην βαρομετρική απώλεια μάζας για τους αναστολείς που εφαρμόστηκαν ως ψεκαζόμενοι στην επιφάνεια του κονιάματος προκύπτει ότι η ομάδα ΨΕΚ ΙΙΙ (0,5) έχει το μεγαλύτερο ποσοστό προστασίας μετά την πάροδο των 24 μηνών, το οποίο φθάνει το 31,44%. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι ομάδες ΨΕΚ ΙΙ (0,5) και ΨΕΚ ΙV (0,5) για το διάστημα του πρώτου έτους έχουν την τάση να προστατέψουν τον οπλισμό. Όμως η δράση του αναστολέα με την πάροδο του χρόνου φαίνεται να εξασθενεί και το ποσοστό προστασίας μειώνεται.

Για τη δεύτερη περίπτωση, με αναλογία νερού 0,65, από τα ποσοστά προστασίας για τους αναστολείς που εφαρμόστηκαν ως ψεκαζόμενοι στην επιφάνεια του κονιάματος

προκύπτει ότι οι ομάδες ΨΕΚ III (0,65) και ΨΕΚ IV (0,65) έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό προστασίας μετά την πάροδο των 24 μηνών, το οποίο φθάνει σε 37%.

Στις ομάδες δοκιμίων όπου ο αναστολέας διάβρωσης προστέθηκε ως πρόσμικτος, το ποσοστό προστασίας μετά την πάροδο 24 μηνών ανέρχεται σε περίπου 30% και για την περιεκτικότητα 4g/100g τσιμέντου (Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 4% (0,65)) και για την περιεκτικότητα 8g/100g τσιμέντου (Ομάδα ΠΡΟΣΜ.Ι 8% (0,65)) για την περίπτωση που ο αναστολέας διάβρωσης βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ). Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει μια αναλογική σχέση με τον διπλασιασμό της ποσότητας του αναστολέα και του χρόνου προστασίας.

Το γεγονός ότι για την ομάδα δοκιμίων με αναλογία νερού 0,65 παρατηρείται ότι μετά από 24 μήνες έκθεσης στο περιβάλλον διάβρωσης, προσέφεραν μεγαλύτερο ποσοστό προστασίας οι ομάδες των ψεκαζόμενων αναστολέων διάβρωσης (ΨΕΚ III, ΨΕΚ IV και ΨΕΚ II) σε σχέση με τις ομάδες των πρόσμικτων αναστολέων διάβρωσης (ΠΡΟΣΜ.Ι 4% και ΠΡΟΣΜ.Ι 8%) μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι ενώ στην αρχή του χρόνου έκθεσης των δοκιμίων στο διαβρωτικό περιβάλλον η συγκέντρωση του αναστολέα διάβρωσης πάνω στην επιφάνεια του οπλισμού είναι 4% και 8% αντίστοιχα για τους πρόσμικτους αναστολείς, μετά την πάροδο του χρόνου και ακολουθώντας το νόμο του Fick (Crank, J., 1975) αυτό το ποσοστό μειώνεται. Αντίστοιχα, για τους ψεκαζόμενους αναστολείς την ημέρα εμβάπτισης των δοκιμίων στο διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl, η συγκέντρωση του αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του κονιάματος είναι η μέγιστη. Με την πάροδο του χρόνου ο αναστολέας διάβρωσης διαχέεται στο εσωτερικό του κονιάματος μέσω του πορώδους του κονιάματος, με αποτέλεσμα να δημιουργείται στην επιφάνεια του οπλισμού ένα προστατευτικό στρώμα το οποίο μετά από κάποιο χρονικό διάστημα θα αρχίσει να μειώνεται πάλι λόγω της διάχυσης του αναστολέα προς τα έξω.

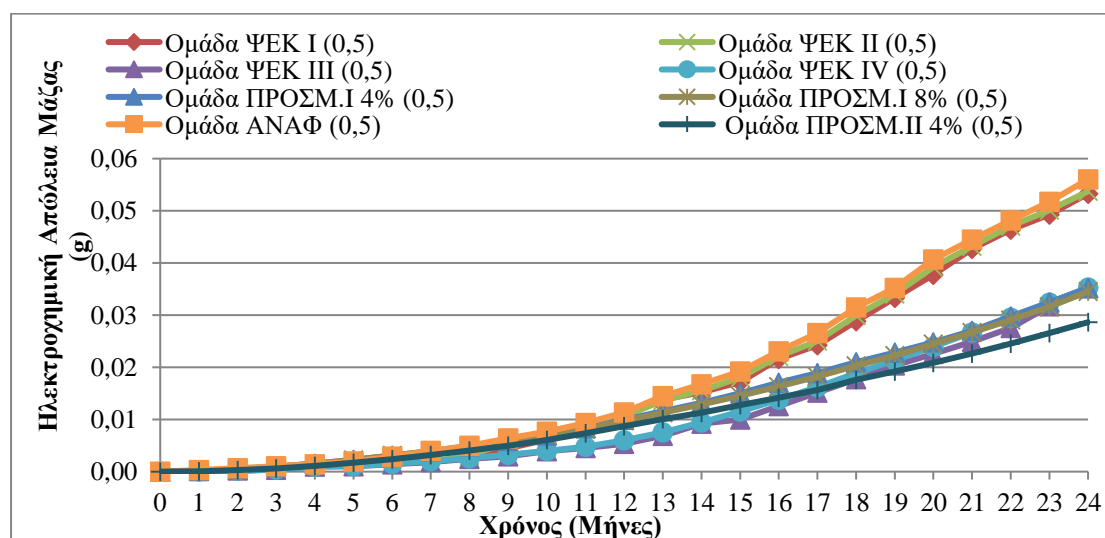
Η αναλογία νερού 0,65, που χρησιμοποιήθηκε στη δεύτερη ομάδα δοκιμίων, φαίνεται να ευνόησε τη μεταφορά μεγαλύτερης συγκέντρωσης αναστολέα προς το εσωτερικό του κονιάματος για τις περιπτώσεις των δοκιμίων με εφαρμογή του αναστολέα ως ψεκαζόμενου, λόγω του μεγαλύτερου πορώδους. Για τις ομάδες δοκιμίων με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης, το μεγαλύτερο πορώδες πιθανόν να είχε ως αποτέλεσμα τη γρηγορότερη μεταφορά του αναστολέα προς το εξωτερικό περιβάλλον. Τη χρονική περίοδο των 24 μηνών, που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία, φαίνεται ότι η συγκέντρωση του ψεκαζόμενου αναστολέα των ομάδων ΨΕΚ

III, ΨΕΚ IV και ΨΕΚ II στην επιφάνεια του οπλισμού είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη συγκέντρωση του πρόσμικτου αναστολέα των ομάδων ΠΡΟΣΜ.Ι 4% και ΠΡΟΣΜ.Ι 8% στην επιφάνεια του οπλισμού, κατά την ίδια χρονική περίοδο, με αποτέλεσμα οι παραπάνω ομάδες των ψεκαζόμενων αναστολέων διάβρωσης να παρέχουν μεγαλύτερη προστασία στον οπλισμό, έστω και προσωρινά.

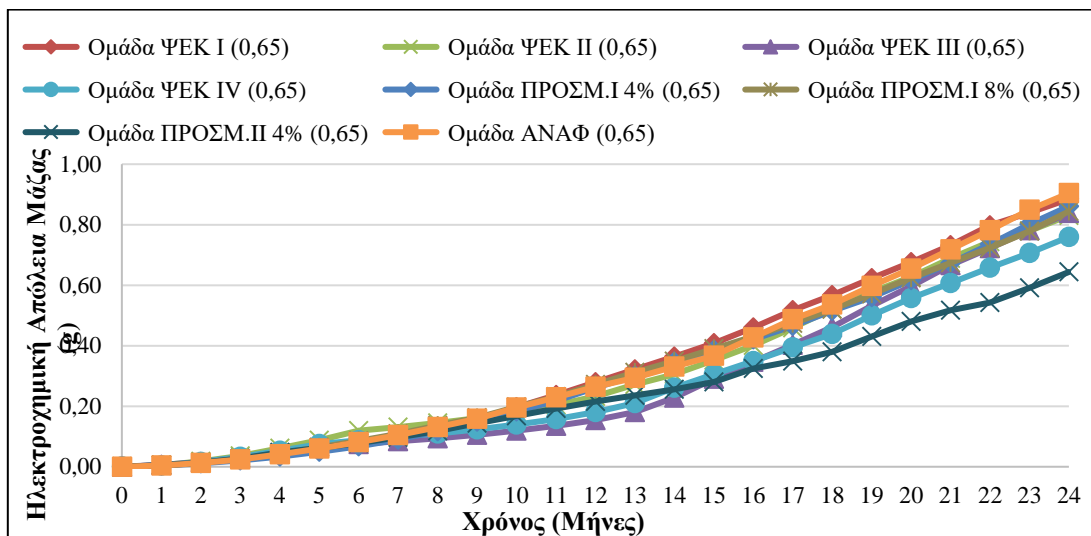
Και στις δύο περιπτώσεις (αναλογία νερού 0,50 και αναλογία νερού 0,65) η ομάδα ΨΕΚ I παρουσιάζει τα μικρότερα ποσοστά προστασίας.

Από τα διάγραμματα της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας των οπλισμών των δοκιμιών, καθώς και της απώλειας μάζας των οπλισμών, παρατηρείται ότι η σειρά της προστασίας τόσο στην απώλεια μάζας όσο και στην ηλεκτροχημική απώλεια μάζας είναι ίδια.

Είναι αξιοπρόσεκτο ότι η ηλεκτροχημική απώλεια μάζα σε σύγκριση με την πραγματική απώλεια μάζας είναι μεγαλύτερη. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο ότι στον υπολογισμό της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας των οπλισμών των δοκιμιών λαμβάνεται υπόψη το 100% της έντασης του ρεύματος διάβρωσης. Στην πραγματικότητα ένα μέρος του ρεύματος διάβρωσης δαπανάται σε παράπλευρες αντιδράσεις. Το ποσοστό του ρεύματος που δαπανάται για τις παράπλευρες αντιδράσεις δεν είναι γνωστό και δεν έχει ληφθεί υπόψη στην περίπτωση αυτή.



**Σχήμα 11.6: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας για τις ομάδες δοκιμιών με αναλογία νερού 0,5**



**Σχήμα 11.7: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας για τις ομάδες δοκιμίων με αναλογία νερού 0,65**

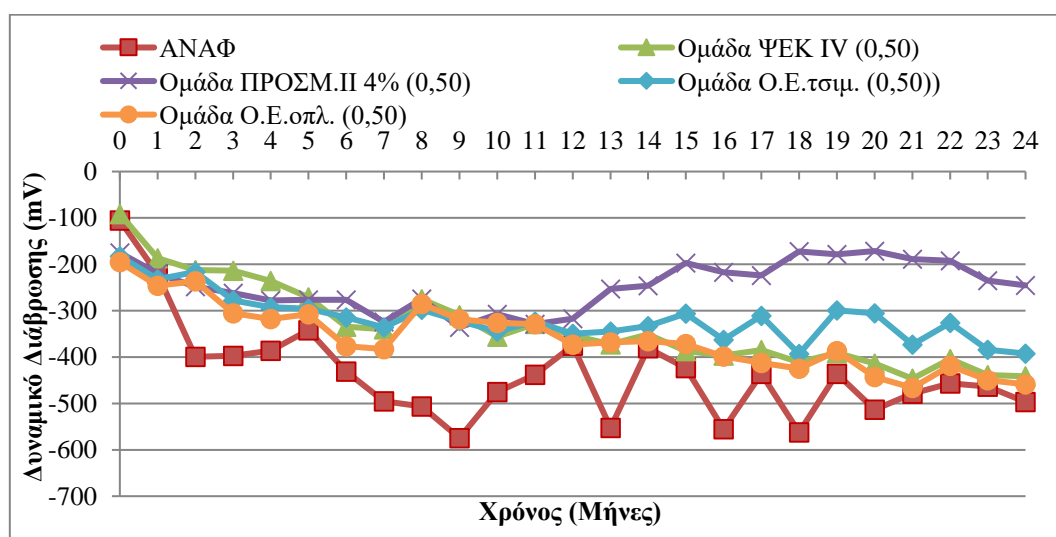
Από τα σχήματα 11.6 και 11.7 παρατηρείται ότι η ηλεκτροχημική απώλεια μάζας αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου για όλες τις ομάδες δοκιμίων. Και στις δύο ομάδες δοκιμίων, με αναλογία νερού 0,5 και 0,65, την καλύτερη προστασία παρουσιάζουν τα δοκίμια της ομάδας ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% , ενώ τη μικρότερη προστασία παρουσιάζουν τα δοκίμια των ομάδων αναφοράς και ΨΕΚ I.

Η ομάδα που περιέχει τον αναστολέα που βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) σαν πρόσμικτο σε ποσοστό 8g/100g έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα που περιέχει τον ίδιο αναστολέα σε ποσοστό 4g/100g και στα δοκίμια με αναλογία τσιμέντο/αδρανών/νερό: 1/3/0,5 και στα δοκίμια με αναλογία τσιμέντο/αδρανών/νερό: 1/3/0,65.

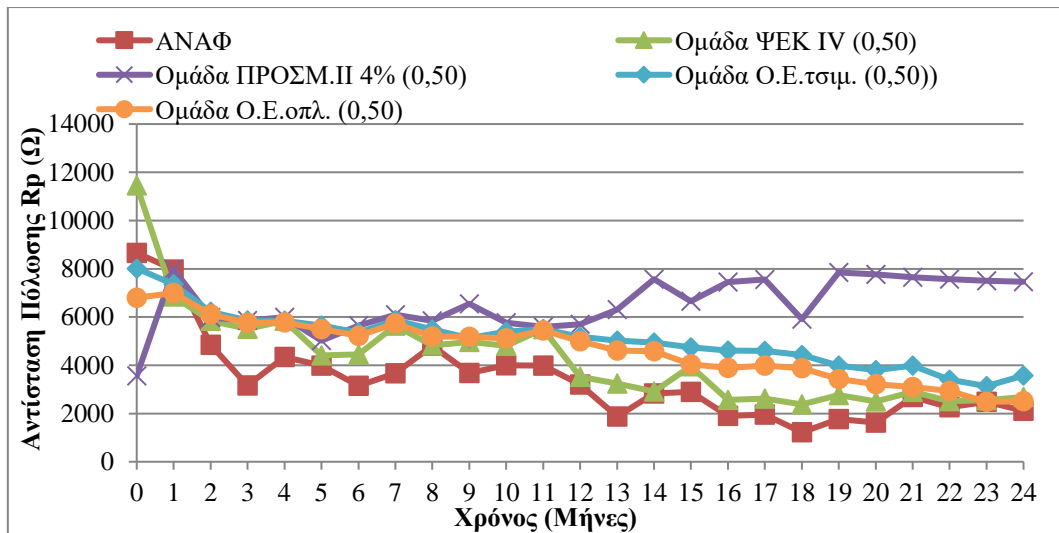
### 11.3 Σύγκριση εφαρμογής οργανικής επικάλυψης και αναστολέα διάβρωσης

Με δεδομένα τα πειραματικά αποτελέσματα από το Κεφάλαιο 10 της παρούσας εργασίας, απεικονίζονται στα παρακάτω διαγράμματα 11.8, 11.9 και 11.10 συγκριτικά διαγράμματα των τιμών δυναμικού διάβρωσης (mV), αντίστασης πόλωσης ( $\Omega$ ) και ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας (g) για τέσσερις κατηγορίες δοκιμίων:

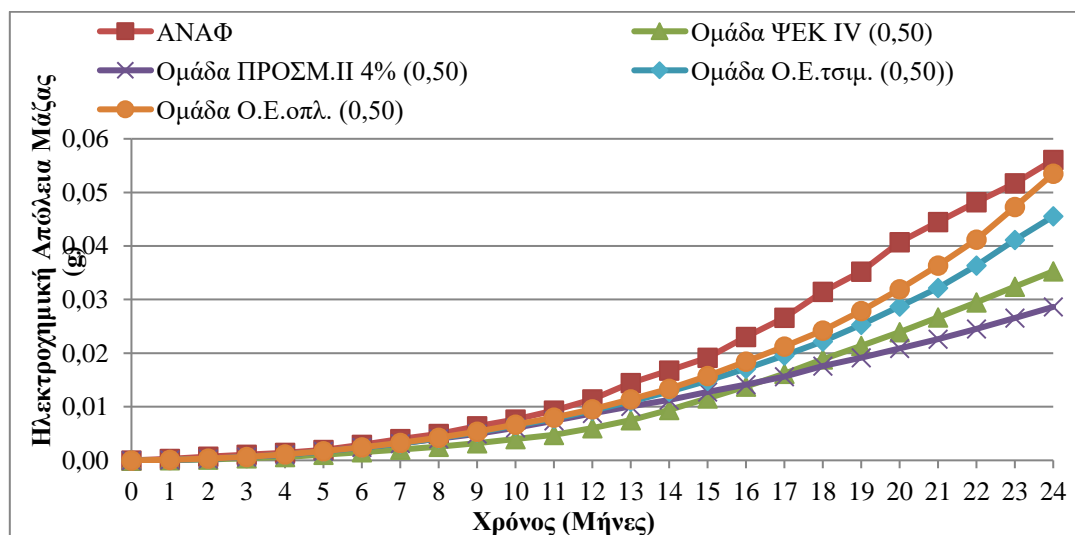
- Κυβικά δοκίμια με αναλογία τσιμέντο/αδρανών/νερό: 1/3/0,5 στα οποία εφαρμόστηκε οργανική επικάλυψη η οποία περιέχει αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του κονιάματος (Ομάδα Ο.Ε.τσιμ. (0,50))
- Κυβικά δοκίμια με αναλογία τσιμέντο/αδρανών/νερό: 1/3/0,5 στα οποία εφαρμόστηκε οργανική επικάλυψη η οποία περιέχει αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού (Ομάδα Ο.Ε.οπλ. (0,50))
- Κυβικά δοκίμια με αναλογία τσιμέντο/αδρανών/νερό: 1/3/0,5 στα οποία εφαρμόστηκε ο αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$  ως ψεκαζόμενος (Ομάδα ΨΕΚ.IV (0,50))
- Κυβικά δοκίμια με αναλογία τσιμέντο/αδρανών/νερό: 1/3/0,5 στα οποία εφαρμόστηκε ο αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  ως πρόσμικτος με αναλογία 8% (Ομάδα ΠΡΟΣΜ. II 8% (0,50)).



**Σχήμα 11.8: Διάγραμμα Δυναμικού Διάβρωσης για τις ομάδες δοκιμίων ΨΕΚ IV, ΠΡΟΣΜ. II 4%, Ο.Ε.τσιμ. και Ο.Ε.οπλ. με αναλογία νερού 0,5**



**Σχήμα 11.9:** Διάγραμμα Αντίστασης Πόλωσης για τις ομάδες δοκιμίων ΨΕΚ IV, ΠΡΟΣΜ.Π 4%, Ο.Ε.τσιμ. και Ο.Ε.οπλ. με αναλογία νερού 0,5



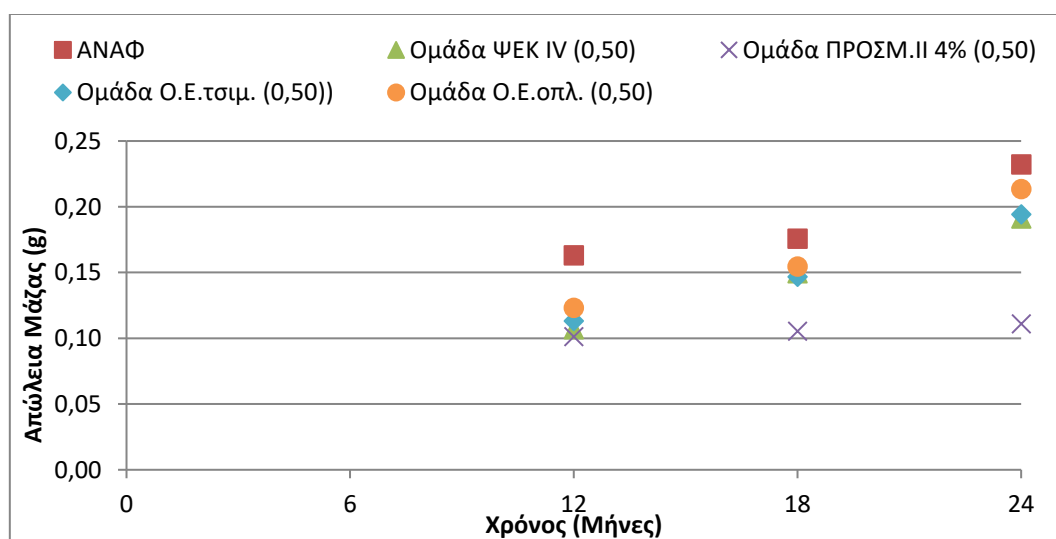
**Σχήμα 11.10:** Διάγραμμα Ηλεκτροχημικής απώλεια μάζας (g) για τις ομάδες δοκιμίων ΨΕΚ IV, ΠΡΟΣΜ.Π 4%, Ο.Ε.τσιμ. και Ο.Ε.οπλ. με αναλογία νερού 0,5

Από το διάγραμμα του σχήματος 11.8 παρατηρείται ότι ο αναστολέας διάβρωσης που χρησιμοποιήθηκε ως πρόσμικτο ενεργοποιήθηκε μετά από ένα χρονικό διάστημα. Ένας πιθανός λόγος για αυτό είναι ότι τα μόρια του πρόσμικτου αναστολέα διάβρωσης βρίσκονται σε κρυσταλλική δομή και απελευθερώνονται μετά από μια περίοδο έξι (6) μηνών. Από το σχήμα 11.9 παρατηρείται ότι τα δοκίμια με την εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο παρουσιάζουν καλύτερη

συμπεριφορά συγκρινόμενα με τα άλλα συστήματα προστασίας. Επιπλέον, τα δοκίμια αναφοράς και τα δοκίμια στα οποία εφαρμόστηκε ο αναστολέας διάβρωσης ως ψεκαζόμενος εμφανίζουν μικρότερες τιμές αντίστασης πόλωσης για το χρονικό διάστημα από 2 έως 20 μήνες, συγκριτικά με τα άλλα συστήματα προστασίας έναντι της διάβρωσης.

Από το σχήμα 11.10 παρατηρείται ότι η ηλεκτροχημική απώλεια όλων των ομάδων δοκιμίων αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Τα δοκίμια της ομάδας ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% εμφανίζουν μικρότερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας από ότι τα δοκίμια στα οποία ο αναστολέας διάβρωσης έχει προστεθεί ως ψεκαζόμενος. Επίσης, τα δοκίμια στα οποία εφαρμόστηκε η οργανική επικάλυψη που περιέχει αναστολέα διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας.

Στο παρακάτω σχήμα 11.11 απεικονίζεται η απώλεια μάζας των οπλισμών των δοκιμίων ΨΕΚ IV, ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4%, Ο.Ε.τσιμ. και Ο.Ε.οπλ. με αναλογία νερού 0,5, μετά από 12, 18 και 24 μήνες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.

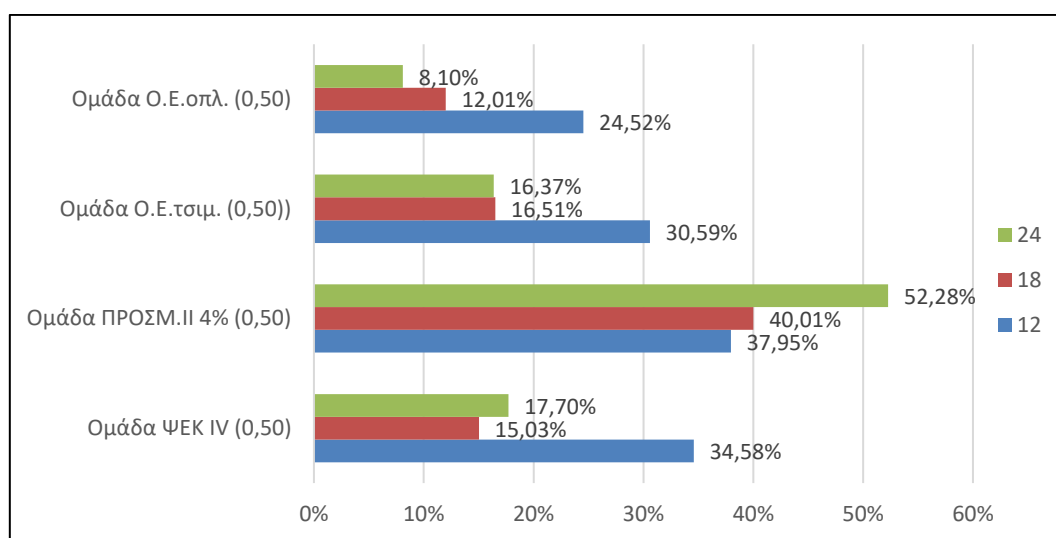


**Σχήμα 11.11: Διάγραμμα απώλειας μάζας (g) για τις ομάδες δοκιμίων ΨΕΚ IV, ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4%, Ο.Ε.τσιμ. και Ο.Ε.οπλ. με αναλογία νερού 0,5 μετά από 12, 18 και 24 μήνες**

Από το διάγραμμα 11.11 παρατηρείται ότι τα δοκίμια αναφοράς παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απώλεια μάζας μετά την πάροδο 24 μηνών παραμονής τους σε διαβρωτικό περιβάλλον. Επίσης, παρατηρείται ότι μικρότερη απώλεια μάζας παρουσιάζουν τα δοκίμια στα οποία προστέθηκε αναστολέας διάβρωσης ως πρόσμικτος σε αναλογία 4% (Ομάδα ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4% (0,50)).

Μεταξύ των δοκιμίων στα οποία εφαρμόστηκε οργανική επικάλυψη η οποία περιέχει αναστολέα διάβρωσης, παρατηρείται ότι μεγαλύτερη απώλεια μάζας παρουσιάζουν τα δοκίμια στα οποία η οργανική επικάλυψη εφαρμόστηκε στην επιφάνεια του οπλισμού.

Στο σχήμα 11.12 παρουσιάζονται τα ποσοστά προστασίας των δοκιμίων με βάση τη βαρομετρική απώλεια μάζας.



**Σχήμα 11.12: Ποσοστά προστασίας για τις ομάδες δοκιμίων ΨΕΚ ΙV, ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4%, Ο.Ε.τσιμ. και Ο.Ε.οπλ. με αναλογία νερού 0,5 μετά από 12, 18 και 24 μήνες**

Όπως παρατηρείται από το σχήμα 11.12 τα δοκίμια στα οποία έχει προστεθεί αναστολέας διάβρωσης ως πρόσμικτος σε αναλογία 4% παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό προστασίας μετά την πάροδο 24 μηνών παραμονής τους στο διαβρωτικό περιβάλλον (βαθμός προστασίας 52%), βασιζόμενοι στη βαρομετρική απώλεια μάζας των οπλισμών. Για τα δοκίμια στα οποία εφαρμόστηκε οργανική επικάλυψη η οποία περιέχει αναστολέα διάβρωσης, φαίνεται ότι μεγαλύτερη προστασία

προσέφεραν τα δοκίμια στα οποία η οργανική επικάλυψη εφαρμόστηκε στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος, συγκριτικά με τα δοκίμια στα οποία η οργανική επικάλυψη εφαρμόστηκε στην επιφάνεια του οπλισμού. Γενικά παρατηρείται ότι η εφαρμογή οργανικής επικάλυψης παρείχε μικρότερη προστασία έναντι της διάβρωσης (βαθμοί προστασίας 16% και 8%, μετά την πάροδο 24 μηνών), σε σύγκριση με την εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης, είτε ως ψεκαζόμενου, είτε ως πρόσμικτου.

Ο βαθμός προστασίας ενός καλού αναστολέα διάβρωσης γενικά εκτιμάται σε ποσοστό 50%. Ωστόσο η εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης που περιέχει αναστολέα διάβρωσης έδωσε πολύ μικρό ποσοστό προστασίας. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη διάχυση του πτητικού αναστολέα διάβρωσης όχι μόνο στο μέσα στο κονίαμα αλλά και στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων.

Όταν ο αναστολέας διάβρωσης εφαρμοστεί με ψεκασμό, η είσοδός του στη μάζα του κονιάματος πραγματοποιείται με την μεταφορά του νερού από την επιφάνεια του κονιάματος προς το εσωτερικό του. Αυτό όμως είναι αντιστρεπτό. Όταν η επιφάνεια του κονιάματος βρέχεται (π.χ. βροχή) ο αναστολέας διάβρωσης μεταφέρεται εκτός κονιάματος. Για να εμποδισθεί η μεταφορά αυτή βάφεται η επιφάνεια.

Στην εργασία αυτή δοκιμάστηκε η εφαρμογή χρώματος που περιέχει αναστολέα διάβρωσης. Με αυτό τον τρόπο οι δύο εργασίες:

- Ψεκασμός αναστολέα διάβρωσης
- Βαφή της επιφάνειας

πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη μείωση του κόστους της επιδιόρθωσης. Τα δοκίμια όμως που είχαν ψεκασμό αναστολέα διάβρωσης (Ομάδα ΠΡΟΣΜ.ΙΙ 4%, ΨΕΚ IV) συμπεριφέρθηκαν καλύτερα από τα δοκίμια με εφαρμογή χρώματος με αναστολέα διάβρωσης. Επομένως, η διάχυση περισσότερου αναστολέα διάβρωσης υπερισχύει της παρεμπόδισης που δημιουργεί η οργανική επικάλυψη.

## 12. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η προστατευτική δράση στο οπλισμένο σκυρόδεμα μιας οργανικής επικάλυψης η οποία περιείχε αναστολέα διάβρωσης, καθώς και διάφορων αναστολέων διάβρωσης οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν είτε ως πρόσμικτοι είτε ως ψεκαζόμενοι στο κονιάμα. Προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

(Α) Σχετικά με την εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης, η οποία περιέχει αναστολέα διάβρωσης, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι βαθμοί προστασίας που υπολογίστηκαν με βάση τη βαρυμετρική απώλεια μάζας:

| ΟΜΑΔΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ   | Βαθμός προστασίας                   |          |                        |
|---|-------------------------------------|----------|------------------------|
|   | Εμβάπτιση σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl |          | Έκθεση στην ατμόσφαιρα |
|   | 24 μήνες                            | 30 μήνες | 24 μήνες               |
| ΟΜΑΔΑ Γ (εφαρμογή οργανικής επικάλυψης (i και ii επικαλυπτικού) στην επιφάνεια του κονιάματος και στον οπλισμό) | 29,49%                              | 19,64%   | 13,29%                 |
| ΟΜΑΔΑ Β (εφαρμογή οργανικής επικάλυψης (i και ii επικαλυπτικού) στον οπλισμό)                                   | 4,01%                               | 5,93%    | 7,87%                  |
| ΟΜΑΔΑ Α (εφαρμογή οργανικής επικάλυψης (i και ii επικαλυπτικού) στην επιφάνεια του κονιάματος)                  | 11,32%                              | 17,76%   | 5,35%                  |

Από τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων προέκυψαν τα παρακάτω:

- Η οργανική επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις προσδίδει προστασία στον οπλισμό.
- Το σύστημα με εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης με αναστολέα διάβρωσης (i και ii επικαλυπτικού) τόσο στην επιφάνεια του κονιάματος όσο και στην επιφάνεια του οπλισμού προσέφερε καλύτερη προστασία από την εφαρμογή της οργανικής επικάλυψης με αναστολέα διάβρωσης (i

και ii επικαλυπτικού) είτε μόνο στην επιφάνεια του κονιάματος, είτε μόνο στην επιφάνεια του οπλισμού.

- Όσον αφορά την προστασία έναντι των ιόντων χλωρίου το μεγαλύτερο ποσοστό προστασίας από τη διάβρωση μετά από 32 μήνες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον ανέρχεται στο 19,64% για τα δοκίμια στα οποία η οργανική επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης (i και ii επικαλυπτικού) εφαρμόστηκε τόσο στην επιφάνεια του κονιάματος όσο και στην επιφάνεια του οπλισμού ενώ ακολουθεί η ομάδα των δοκιμίων στα οποία η οργανική επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης (i και ii επικαλυπτικού) εφαρμόστηκε μόνο στην επιφάνεια του κονιάματος, με ποσοστό προστασίας 17,76%.
- Το ποσοστό προστασίας της οργανικής επικάλυψης από την ατμοσφαιρική διάβρωση μετά από 24 μήνες έκθεσης στην ατμόσφαιρα ανέρχεται στο ποσοστό 13,29% για τα δοκίμια στα οποία η οργανική επικάλυψη με αναστολέα διάβρωσης (i και ii επικαλυπτικού) εφαρμόστηκε τόσο στην επιφάνεια του κονιάματος όσο και στην επιφάνεια του οπλισμού.

(B) Σχετικά με την εφαρμογή των διαφόρων τύπων αναστολέων διάβρωσης, είτε ως ψεκαζόμενων είτε ως πρόσμικτων στο κονίαμα, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι βαθμοί προστασίας που υπολογίστηκαν με βάση τη βαρυμετρική απώλεια μάζας μετά από 24 μήνες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον:

| ΟΜΑΔΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ  | Βαθμός προστασίας μετά την παρέλευση 24 μηνών έκθεσης σε διάλυμα 3,5% κ.β. NaCl |  |
|--|---|--|
|  | Δοκίμια με αναλογία τσιμέντου:άμμος: νερό 1:3:0,50                              | Δοκίμια με αναλογία τσιμέντου:άμμος: νερό 1:3:0,65 |
| ΟΜΑΔΑ ΠΡΟΣΜ I 4% (πρόσμικτος αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο)    | 48,75%  | 28,93%   |
| ΟΜΑΔΑ ΠΡΟΣΜ I 8% (πρόσμικτος αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο)    | 53,32%  | 30,45%   |
| ΟΜΑΔΑ ΠΡΟΣΜ II 4% (πρόσμικτος αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο)  | 52,28%  | 38,35%   |
| ΟΜΑΔΑ ΨΕΚ I (ψεκαζόμενος αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο)        | 10,51%  | 25,04%   |
| ΟΜΑΔΑ ΨΕΚ II (ψεκαζόμενος αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο)       | 12,96%  | 34,34%   |
| ΟΜΑΔΑ ΨΕΚ III (ψεκαζόμενος αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στη Διμεθυλ-αιθανόλ-αμίνη) | 31,44%  | 37,44%   |
| ΟΜΑΔΑ ΨΕΚ IV (ψεκαζόμενος αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο)      | 17,70%  | 37,48%   |

Από τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων προκύπτουν τα πιο κάτω συμπεράσματα:

- Στην ομάδα των πρόσμικτων αναστολέων διάβρωσης με αναλογία τσιμέντου/αδρανών/νερό: 1/3/0.5 ο πρόσμικτος αναστολέας που βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) με αναλογία 8% έχει καλύτερη προστατευτική δράση (βαθμός προστασίας μετά από 24 μήνες: 53,32%) από τον πρόσμικτο που βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) με αναλογία 4% (βαθμός προστασίας μετά από 24 μήνες: 48,75%)
- Στην ομάδα των ψεκαζόμενων αναστολέων διάβρωσης με αναλογία τσιμέντου/αδρανών/νερό:1/3/0.5 προκύπτει ότι την καλύτερη προστατευτική επίδραση την έχει ο αναστολέας της ομάδας ΨΕΚ III, την οποία ο

αναστολέας διάβρωσης βασίζεται στη Διμεθυλ-αιθανόλ-αμίνη με βαθμό προστασίας μετά από 24 μήνες 31,44%, ακολουθεί ο ψεκαζόμενος αναστολέας της Ομάδας ΨΕΚ IV, ο οποίος βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο (βαθμός προστασίας μετά από 24 μήνες: 17,70%) και στη συνέχεια ο ψεκαζόμενος της Ομάδας ΨΕΚ II, ο οποίος βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο (βαθμός προστασίας μετά από 24 μήνες: 12,96%).

Ο ψεκαζόμενος αναστολέας της Ομάδας ΨΕΚ I, ο οποίος βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο και διαφέρει από τον αναστολέα της ομάδας ΨΕΚ II ως προς τη συγκέντρωση και το είδος των οργανικών οξέων που συνοδεύουν τον αναστολέα διάβρωσης, έχει προστατευτική δράση (βαθμός προστασίας μετά από 24 μήνες: 10,51%), αλλά όχι τόσο καλή όσο οι προηγούμενοι.

- Στην ομάδα των πρόσμικτων αναστολέων διάβρωσης με αναλογία τσιμέντου/αδρανών/νερό: 1/3/0.65, ο αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ), εμφανίζει περίπου την ίδια προστατευτική δράση και στην προσθήκη του στο κονίαμα με αναλογία 4% και στην προσθήκη του με αναλογία 8% (βαθμός προστασίας μετά από 24 μήνες: 28,93% και 30,45% αντίστοιχα), ενώ λίγο μεγαλύτερη προστατευτική δράση, μετά την πάροδο 24 μηνών σε διαβρωτικό περιβάλλον, εμφανίζει ο αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) με περιεκτικότητα 4% (βαθμός προστασίας μετά από 24 μήνες: 38,35%).
- Στην ομάδα των ψεκαζόμενων αναστολέων διάβρωσης με αναλογία τσιμέντου/αδρανών/νερό: 1/3/0.65 προκύπτει ότι οι αναστολείς διάβρωσης της Ομάδας ΨΕΚ III στην οποία ο αναστολέας διάβρωσης βασίζεται στη Διμεθυλ-αιθανόλ-αμίνη και της ομάδας ΨΕΚ IV στην οποία ο αναστολέας διάβρωσης βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο, έχουν την καλύτερη προστατευτική επίδραση (βαθμοί προστασίας μετά από 24 μήνες: 37,44% και 37,48% αντίστοιχα) και ακολουθεί με μικρή διαφορά ο ψεκαζόμενος αναστολέας της Ομάδας ΨΕΚ II, ο οποίος βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο (βαθμός προστασίας μετά από 24 μήνες: 34,34%). Ο ψεκαζόμενος αναστολέας της Ομάδας ΨΕΚ I, ο οποίος βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο και διαφέρει από τον αναστολέα της ομάδας ΨΕΚ II ως προς τη συγκέντρωση και το είδος των οργανικών οξέων που συνοδεύουν τον

αναστολέα διάβρωσης, έχει προστατευτική δράση αλλά όχι τόσο καλή όσο οι προηγούμενοι (βαθμός προστασίας μετά από 24 μήνες: 25,04%).

Εν κατακλείδι, οι αναστολείς που χρησιμοποιήθηκαν ως πρόσμικτοι στα δοκίμια με αναλογία τσιμέντου/αδρανών/νερό:1/3/0.5 είχαν καλύτερη προστατευτική δράση απ' ό,τι οι αναστολείς που χρησιμοποιήθηκαν ως ψεκαζόμενοι, ενώ στα δοκίμια με αναλογία τσιμέντου/αδρανών/νερό: 1/3/0.65 καλύτερη προστατευτική δράση είχε ο αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο ( $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) και χρησιμοποιήθηκε ως πρόσμικτος με περιεκτικότητα 4%, καθώς και οι αναστολείς που χρησιμοποιήθηκαν ως ψεκαζόμενοι των Ομάδων ΨΕΚ III (αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στη Διμεθυλ-αιθανόλ-αμίνη), ΨΕΚ IV (αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρώδες Ασβέστιο) και ΨΕΚ II (αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο Νιτρικό Ασβέστιο).

Ο αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο νιτρικό ασβέστιο προσέφερε προστασία είτε ως πρόσμικτος είτε ως ψεκαζόμενος.

Εδικότερα, στα δοκίμια με αναλογία τσιμέντου/αδρανών/νερό:1/3/0.5 είχε την καλύτερη προστατευτική δράση ως πρόσμικτος με αναλογία 8% (βαθμός προστασίας 53,32%), ενώ και ως πρόσμικτος με αναλογία 4% (βαθμός προστασίας 48,755) είχε πολύ καλή προστατευτική δράση με μικρή διαφορά από τον αντίστοιχο με αναλογία 8%. Όταν χρησιμοποιήθηκε ως ψεκαζόμενος είχε βαθμό προστασίας μετά από 24 μήνες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον 10,51% για την ομάδα ΨΕΚ I και 12,96% για την ομάδα ΨΕΚ II, ενώ το ποσοστό προστασίας του ψεκαζόμενου αναστολέα που βασίζεται στο νιτρώδες ασβέστιο είναι 17,70%.

Στα δοκίμια με αναλογία τσιμέντου/αδρανών/νερό:1/3/0.65, ο αναστολέας διάβρωσης που βασίζεται στο νιτρικό ασβέστιο, είχε την καλύτερη προστατευτική δράση ως ψεκαζόμενος με βαθμό προστασίας 34,34% για την ομάδα ΨΕΚ II, με μικρή διαφορά σε σχέση με τους ψεκαζόμενους αναστολείς που βασίζονται στη Διμεθυλ-αιθανόλ-αμίνη και στο νιτρώδες ασβέστιο και εμφανίζουν μεγαλύτερο ποσοστό προστασίας (37,44% και 37,48%

αντίστοιχα). Ακόμα και για την ομάδα ΨΕΚ I, που παρουσίασε το μικρότερο ποσοστό προστασίας για την αναλογία 1/3/0.65, ο ψεκαζόμενος αναστολέας που βασίζεται στο νιτρικό ασβέστιο είχε βαθμό προστασίας μετά από 24 μήνες 25,04%.

Ως πρόσμικτος προσέφερε προστασία και στις δύο αναλογίες 4% και 8%, με βαθμό προστασίας μετά από 24 μήνες 28,93% και 30,45% αντίστοιχα, όταν την καλύτερη προστατευτική δράση παρουσίασε ο πρόσμικτος αναστολέας που βασίζεται στο νιτρώδες ασβέστιο με βαθμό προστασίας 38,35%.

### 13. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Με την παρούσα Διδακτορική διατριβή έγινε προσπάθεια μείωσης της διάβρωσης του οπλισμού με τη χρήση οργανικής επικάλυψης η οποία περιείχε αναστολέα διάβρωσης, καθώς και με την προσθήκη διάφορων τύπων αναστολέων διάβρωσης είτε ως ψεκαζόμενο, είτε ως πρόσμικτο συστατικό του σκυροδέματος.

Η παρούσα έρευνα θα μπορούσε να συνεχισθεί, προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια βελτιστοποίηση της σύστασης της οργανικής επικάλυψης στην προστασία από τη διάβρωση των οπλισμών του σκυροδέματος με πιθανή βελτίωση της δεύτερης στρώσης της οργανικής επικάλυψης (επικαλυπτικό ii) ώστε να μην διαχέεται προς τα έξω ο αναστολέας διάβρωσης που περιέχεται στην πρώτη στρώση (επικαλυπτικό i).

Επίσης, σχετικά με τους αναστολείς διάβρωσης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, η δυνατότητα αύξησης του ποσοστού μετατροπής του Νιτρικού Ασβεστίου σε Νιτρώδες Ασβέστιο θα μπορούσε να αποτελέσει ένα θέμα συνέχισης της διατριβής.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Αγναντιάρη, Γ., «Τα νέα Πρότυπα του ΕΛΟΤ για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος (ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-1, ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3)», Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος - Υλικό και Μόρφωση, ΤΕΕ, Αθήνα, 13 Ιουνίου 2006
2. Αποστολόπουλος Χ., Παπαδάκης Ε., Δέμης Σ., (2009) «Διερεύνηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα και της επακόλουθης υποβάθμισης λόγω διάβρωσης οπλισμού από τη δράση χλωριόντων», 16<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, Πάφος, Κύπρος
3. Βατάλης Α., 2009 «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών», Εκδόσεις ΖΗΤΗ
4. Βουδικλάρης Θ., 2004 «Από τον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων – 2000 στο σχέδιο Προτύπου prEN 100880». Ημερίδα : «Θέματα Τεχνολογίας Σκυροδέματος και Δομικών Χαλύβων με τα Νέα Ευρωπαϊκά Πρότυπα ΕΛΟΤ EN», ΕΝΩΣΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ & ΤΕΕ – ΤΜΗΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
5. Βούλγαρη Ε., Ζαχαροπούλου Α., Χουσιδής Ν., Μπατής Γ., (2018) «Προστατευτική επίδραση οργανικής επικάλυψης στη διάβρωση οπλισμού του σκυροδέματος» 18ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, Αθήνα
6. Γρηγοριάδης Γ., 2014. «Σχεδιασμός τσιμεντών υψηλής ανθεκτικότητας με χρήση παραπροϊόντων της τσιμεντοβιομηχανίας», Αθήνα, ΕΜΠ
7. Δέδε Μ., Δημόγλου Ε., «Ανοξειδωτος χάλυβας οπλισμένου σκυροδέματος», 13ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα, Φεβ. 2007
8. Δημάδη Κ., Κατσενίου Γ., «Διάβρωση χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος & τρόποι αποκατάστασης»,
9. Δρακάτος Δ., «Συστήματα επισκευής – μετρίασης της διάβρωσης κατασκευών Ο.Σ.», 15<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, 2009, Πάτρα
10. Ζαχαροπούλου, Α., (2014) «Επίδραση προσθέτων- πρόσμικτων στη διάβρωση του χάλυβα οπλισμού του σκυροδέματος» Διδακτορική Διατριβή (υπό την επίβλεψη του Καθ. Γ. Μπατή), Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα
11. Καραντώνης, Α., 2009. Ηλεκτροχημική εμπέδηση στη Χημική Μηχανική

12. Καραντώνης Α., Δραγατογιάννης Δ. , 2009. Επιταχυνόμενες μέθοδοι μελέτης της φθοράς: Μέθοδος Tafel και μέθοδος ηλεκτροχημικής εμπέδησης. Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «Φθορά και Προστασία Υλικών» 9ου εξαμήνου, ΕΜΠ, Αθήνα
13. Κορωναίος Α., Τεχνικά Υλικά, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006
14. Κουλουμπή Ν., «Διάβρωση και Προστασία», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2010
15. Κουρνέτας Δ., «Διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος – Μέτρα επέμβασης», 16<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο Επισκευές Κατασκευών, 2006, Πάτρα
16. Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (Κ.Τ.Χ.), (2000) Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., Αθήνα
17. Κουή Μ., «Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης με φασματομέτρο ενεργειακής διασποράς ακτίνων-Χ, Scanning Electron Microscope with energy dispersive X-ray spectrometer (SEMEDAX)», σημειώσεις εργαστηριακής άσκησης, ΕΜΠ, 2009
18. Κυριακίδης Γ. και Μπίνας Β., (2014). «Εισαγωγή στην Ηλεκτρονική Μικροσκοπία», Ηράκλειο
19. Μαυροειδής Π., (2005) «Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος: Νέες προδιαγραφές και απαιτήσεις / Παρατηρήσεις και σχόλια για τις αλλαγές που εισάγει το νέο σχέδιο Προτύπου ΕΛΟΤ1421»
20. Μαυροειδής Π., (2008) «Απαιτήσεις των νέων Προτύπων ΕΛΟΤ για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος», ΤΕΕ Τεχνική Ημερίδα «Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος-Νέα Πρότυπα, Αθήνα
21. Μαυροειδής Π., Ρακαντά Ε., Μπατής Γ, (2006) «Ανοξείδωτοι Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος: Μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορά απέναντι στην διάβρωση», 15<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη
22. Μπατής Γ., (1999) Φθορά και προστασία υλικών, ΑΘΗΝΑ, ΕΜΠ.
23. Μπατής Γ., (2006) Σημειώσεις Φθορά και Προστασία Υλικών, Αθήνα
24. Μπατής Γ., (2007) «Χρήση νέων υλικών για την αύξηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών», Ημερίδα ΤΕΕ «Ενίσχυση κτιρίων με σύγχρονα υλικά», Αθήνα
25. Μπατής Γ., Γρηγοριάδης Γ., (2003) «Η επίδραση οργανικών αναστολέων διάβρωσης στο οπλισμένο ελαφροβαρές σκυρόδεμα», Αθήνα
26. Μπατής Γ., Ρακαντά Ε., Τσάμπρας Λ., Μουγιάκος Σ., Αγναντιάρη Γ., «Διάβρωση χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος», Ημερίδα Κοινοτομίας Αντοχή & Ενέργεια

27. Μπατής Γ., Ρακαντά Ε., Θεοδωρίδης Β., Σίδερης Κ., (2003) «Επίδραση του αναστολέα διάβρωσης με βάση την Ν, Ν-διμεθυλαμινοαιθανόλη στη προστασία του οπλισμού σκυροδέματος λόγω ενανθράκωσης και ταυτόχρονης παρουσίας χλωριόντων», 14<sup>ο</sup> Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Κως
28. Μπατής Γ., Σιόβα Ε., (2009). «Ανθεκτικότητα Κονιαμάτων Αποκατάστασης με Λευκό Τσιμέντο – Δυνατότητες Προστασίας», 16<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, Πάφος, Κύπρος
29. Μοροπούλου Α., Σημειώσεις για τις εργαστηριακές ασκήσεις του μαθήματος «Υλικά», 7<sup>ο</sup> εξάμηνο Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., «Μη καταστρεπτικές μέθοδοι εξέτασης των υλικών – εφαρμογή στο εργαστήριο και επί τόπου», ΕΜΠ, Αθήνα 1996.
30. Ντάφλου Ε., Καραντώνης Α., Μπατής Γ., (2009) «Προστασία του δομικού χάλυβα με τη χρήση πτητικών αναστολέων διάβρωσης. Μελέτη της προσρόφησης του αναστολέα στη μεταλλική επιφάνεια», 16<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, Πάφος, Κύπρος
31. Ντάφλου Ε., Ρακαντά Ε., Μπατής Γ., (2006) «Αντιδιαβρωτικές μέθοδοι προστασίας του εκτεθειμένου στην ατμόσφαιρα δομικού χάλυβα με τη χρήση επιστρωμάτων που περιέχουν αναστολείς διάβρωσης», 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη
32. Παναγιωτίδης Θ., (2011) «Αναστολείς Διάβρωσης: Ένα αποτελεσματικό όπλο κατά της διάβρωσης», [www.e-archimedes.gr](http://www.e-archimedes.gr).
33. Ρακαντά Ε., Μπατής Γ., (2008) «Αναστολείς διάβρωσης για την προστασία κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος», 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, Αθήνα
34. Ρούτουλας Α., (2010) Σημειώσεις Μαθήματος «Έλεγχος Ποιότητας και Τεχνολογία Δομήσιμων Υλικών», Αθήνα
35. Ρούτουλας Α., Μπατής Γ., Μανίτα Π., Μαρουσάκη Α., (2006) «Επίδραση ορυκτών προσθέτων και αναστολέων διάβρωσης στην αντιδιαβρωτική προστασία οπλισμών σκυροδέματος», 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη
36. Σιδέρης Κ., Ζάρρας Σ., (2006) «Η σημασία της συντήρησης στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος λόγω ενανθράκωσης», 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη

37. Σιδέρης Κ., Μπατής Γ., Πανταζοπούλου Π., (2009) «Μελέτη της επίδρασης της προσθήκης νιτρώδους ασβεστίου σε τιμεντοκονιάματα εκτεθειμένα σε περιβάλλον χλωριόντων – θεικών», 16<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, Πάφος, Κύπρος
38. Σκουλικίδης Θ., (1990) «Εφαρμοσμένη Ηλεκτροχημεία, Α. Διάβρωση και Προστασία», Γ΄ Έκδοση, Αθήνα
39. Σκουλικίδης, Θ., (2000) «Διάβρωση και Συντήρηση των Δομικών Υλικών των Μνημείων», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, (ΠΕΚ)
40. Σωτηριάδης Κ., Μιτζήθρα Μ.Ε., Ρακαντά Ε., Μπατής Γ., Τσιβιλής Σ., (2009) «Διάβρωση οπλισμού κονιαμάτων με ασβεστολιθικά τιμέντα σε συνδυασμένο περιβάλλον χλωριόντων και θεικών ιόντων και χαμηλές θερμοκρασίες», 16<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, Πάφος, Κύπρος
41. Τάσιος Θ., Αλιγαζάκη Κ., (1992) «Ανθεκτικότητα Οπλισμένου Σκυροδέματος», Αθήνα
42. Τσακαλάκης Κ., (2010) «Τεχνολογία παραγωγής τιμέντου και σκυροδέματος», Αθήνα
43. Τσίκας Π. και Παπασπυριδάκος Χ. (2006) «Ανθεκτικότητα Οπλισμένου Σκυροδέματος σε διάρκεια», Πάτρα
44. Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., (2004) «Επιστήμη και Τεχνολογία Τιμέντου», Εκδόσεις Ε.Μ.Π. Αθήνα
45. Τσίμας Σ., (2001) «Δομικά Υλικά (Τιμέντο – Ασβέστης – Σκυρόδεμα – Κονιάματα)», Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα
46. Τσώνη Ν., (2006) «Η διάβρωση του χάλυβα στο σκυρόδεμα – Πρόληψη – Έλεγχοι και επεμβάσεις σε υφιστάμενες κατασκευές – Τρωτότητα των ενισχύσεων», 16<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα
47. Υφαντής Δ., (2008) «Υλικά – Διάβρωση και Προστασία», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα
48. Χουσιδής, Ν. (2015) «Επίδραση ορυκτών προσθέτων παραπροϊόντων βιομηχανίας στη διάβρωση του οπλισμού σκυροδέματος», Διδακτορική Διατριβή (υπό την επίβλεψη του Καθ. Γ. Μπατή), Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα
49. American Society for Testing and Materials G59-97(2009), “*Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*”, Vol. 3, No2.

50. ASTM C 494 “*Chemical Admixtures for Concrete*”, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
51. ASTM G 109, “*Test Method for Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments*”, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
52. Baghabra Al-Amoudi O.S., Maslehuddin M., Lashari A.N., Almusallam A.A., “*Effectiveness of Corrosion Inhibitors in Contaminated Concrete*”, *Cement & Concrete Composites* 25 (2003), 439-449
53. Batis, G., Aidini, A., Louvaris, G., Nicolaidis A. (1993). “*Reinforced Corrosion in Pumice Lightweight Concrete*”. Dhir, R.K. (ed), *Concrete 2000*, Dundee: 153-162
54. Batis, G. Grigoriadis, Gr. Meletiou, C. A. (1999). “*Protection of Steel Rebars in Lightweight Concrete with the Use of Corrosion Inhibitors*”. *Modern Concrete Materials: binders, additions and admixtures*, Editor Ravindra K. Dhir: pp 493-501.
55. Batis G., Kouloumbi N., Pantazopoulou P., (2004) “*Corrosion protection of steel in pumice lightweight mortar by coatings*”, *Cement & Concrete Composites*
56. Batis G., Kouloumbi N., Pantazopoulou P., “*Protection of reinforced concrete by coatings and corrosion inhibitors*”, *Pigment & Resin Technology*, Vol. 29, No. 3, 2000, p. 159-163
57. Batis G., Kouloumbi N., Pantazopoulou P., (1996) “*Durability of Reinforced Lightweight Mortars with Corrosion Inhibitors*”, *Cement, Concrete and Aggregates*, p. 118-125
58. Batis G., Routoulas A., Rakanta E., (2003) (a) “*Effects of migrating inhibitors on corrosion of reinforcing steel covered with repair mortar*”, *Cement & Concrete Composites* 25 (2003) 109-115
59. Batis G., Pantazopoulou P., Routoulas A., (2003) (b) “*Corrosion protection investigation of reinforcement by inorganic coating in the presence of alkanolamine-based inhibitor*”, *Cement & Concrete Composites* 25, 371-377
60. Batis, G., Rakanta, E., (2001). *Effects of Migrating corrosion inhibitors on reinforced lightweight and common mortars*. 2nd International Congress on Studies in Ancient Structures, Istanbul, Turkey, Vol.2 560-570.

61. Batis G., Sideris K., Pantazopoulou P., (2004) "*Influence of calcium nitrite inhibitor on the durability of mortars under contaminated chloride and sulphate environments*", *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 51 No. 2, 112-120
62. Broomfield, J. P. (2006). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, Second Edition, Taylor & Francis
63. Chousidis, N., E. Rakanta, I. Ioannou and G. Batis (2015). "*Anticorrosive Effect of Electrochemical Manganese Dioxide By-Products in Reinforced Concrete.*" *Journal of Materials Science and Chemical Engineering* Vol.03No.05: 12.
64. Chousidis, N., E. Rakanta, I. Ioannou and G. Batis (2016). "*Influence of iron mill scale additive on the physico-mechanical Eproperties and chloride penetration resistance of concrete.*" *Advances in Cement Research* 28(6): 389-402.
65. Chousidis, N., E. Rakanta, I. Ioannou and G. Batis (2015). "*Effect of Iron Oxides scrups on mechanical properties and hydration of concrete:*". 10<sup>th</sup> Conference of Chemical Engineering: Challenges and Prospects.
66. Chousidis, N., E. Rakanta, I. Ioannou and G. Batis (2015). "*Mechanical properties and durability performance of reinforced concrete containing fly ash.*" *Construction and Building Materials* 101, Part 1: 810-817.
67. Coburn, S.K., (1984) "*Corrosion*", American Society for Metals, National Association of corrosion Engineers
68. Crank, J. (1975) "*The Mathematics of Diffusion*", Clarendon Press, Oxford
69. ELOT 142-37, Hellenic Organization of Standardization, Athens.
70. Elsener, B. (2001). "Corrosion Inhibitors for steel in concrete" (European Federation of Corrosion Publications) Maney Pub.
71. Hamby, A.S., El-Shenawy, E. and El-Bitar, T. (2006). *Electrochemical impedance spectroscopy study of the corrosion behavior of some niobium bearing stainless steels in 3.5% NaCl*. *International Journal of Electrochemical Science*, 171-180
72. Hanson, C.M., Mammoliti, L. and Hope, B.B. (1998). *Corrosion inhibitors in concrete – Part I: The Principles*. *Cement and Concrete Research*, Vol 28, pp 1775-1781
73. Hanson, C.M., Poursaee, A. and Jaffer, S.J. (2012). *Corrosion of reinforcing bars in concrete*. *The Masterbuilder*, December 2012
74. ISO 9223:2012, "*Corrosion of metals and alloys-Corrosivity of atmospheres-Classification*"

75. Justnes, H., Nygaard, E.C. and Grostad, T. (1999). *Calcium Nitrate as a retarder of chloride initiated rebar corrosion*. Proceedings of International Conference, University of Sheffield
76. Kharshan, M. and Cracauer, C. (2011). *Application for biodegradable vapor phase corrosion inhibitors*, Materials Performance, NACE International, Vol 50, No 3
77. Khan, M.U., Ahmad, S. and Al-Gahtani, H.J. (2017). *Chloride-induced corrosion of steel in concrete: an overview on chloride diffusion and prediction of corrosion initiation time*, International Journal of Corrosion, vol. 2017, Article ID 5819202, 9 pages
78. Kim, C., Goldsberry, R., Karayan, A.I., Milla, J., Hassan, M. and Castaneda, H. (2019). *Preparation and Electrochemical Characterization of Concrete Containing Microencapsulated Calcium Nitrate Corrosion Inhibitor*, MATEC Web Of Conferences 271, 07009 Tran-SET 2019  
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201927107009>
79. Kouloumbi, N. and Batis, G. (1992). *Chloride Corrosion of Steel Rebars in Mortars with Fly Ash Admixtures*. Cement & Concrete Composites, 14 199-207.
80. Kruger, J., (2001) "*Electrochemistry of corrosion*" The Johns Hopkins University
81. Macdonald, D.D., El-Tantawy, Y.A., Rocha-Filho, R.C. and M. Urquidi-Macdonald M. (1994). "*Evaluation of Electrochemical Impedance Techniques for Detecting Corrosion on Rebar in Reinforced Concrete*". Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington
82. O'Reilly, M., Darwin, D., Browning, J., Xing, L., Lock Jr., C.E. and Virmani, Y.P. (2013). "*Effect of Corrosion Inhibitors on Concrete Pore Solution Composition and Corrosion Resistance*". ACI Materials Journal, no 110-M53, September-October 2013.
83. Rakanta, E., T. Zafeiropoulou and G. Batis (2013). "*Corrosion protection of steel with DMEA-based organic inhibitor*." Construction and Building Materials 44(0): 507-513.
84. Revie, R.W. and Uhlig, H.H. (2008) "*Corrosion and corrosion control: An Introduction to corrosion science and engineering*", John Wiley & Sons, Inc., 4th edition, N.Jersey

85. Roventi, G., Bellezze, T., Barbaresi, E. and Fratesi, R. (2013) “*Effect of carbonation process on the passivating products of zinc in Ca(OH)<sub>2</sub> saturated solution*”, *Materials and Corrosion* 2013, 63, No. 9999
86. Sastri, V.S. (2011) “*Green corrosion inhibitors, theory and practice*”, John Willey & Sons Inc.
87. Song, G-L. and Xu, Z. (2012) “*Crystal orientation and electrochemical corrosion of polycrystalline Mg*, *Corrosion Science*”, Volume 63, October 2012, pp. 100–112
88. Song H. and Saraswathy, V. (2007). *Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures – A review*. *International Journal Of Electrochemical Science*, Vol 2, 1-28
89. Talukdar, S., Banthia, N. (2013) *Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change: Development of a service lifespan model*, *Construction and Building Materials* 40, 775–782.
90. Temiz H., Kose M.M., Koksal S., “*Effects of portland composite and composite cements on durability of mortar and permeability of concrete*”, *Construction and Building Materials* 21, (2007), 1170-1176
91. Zafeiropoulou, T., Rakanta, E. and Batis, G. (2013). *Carbonation resistance and anticorrosive properties of organic coatings for concrete structures*. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 3, 67-74
92. Zafeiropoulou Th., Rakanta E., Batis G., (2011) “*Performance evaluation of organic coatings against corrosion in reinforced cement mortars*”, *Progress in Organic Coatings* 72, 2011, p. 175– 180
93. Zacharopoulou, A., Zacharopoulou, E. and Batis, G. (2010) “*Statistics analysis measures painting of cooling tower*”, *The European Contest for coating scientists, FATIPEC 2010*.
94. Zacharopoulou, A., Zacharopoulou, E. and Batis, G. (2013) “*Protection of reinforcement in concrete using corrosion inhibitors*”, *Innovations in Concrete Construction*, Jalandhar Punjab India
95. Zacharopoulou, A., Zacharopoulou, E., Batis, G. (2014). “*Protection systems for reinforced concrete with corrosion inhibitors*”. *Open Journal of Metal*, 4, 86-92

96. Zazharopoulou, E., Zacharopoulou, A., Seyedalhosseini, A., Batis, G. & Tsivilis, S. (2013). “*Effect of corrosion Inhibitors in Limestone cements*”. Materials sciences and Applications, vil.4,12A, pp.12-19.
97. Yeih, W. and Chang J.J., (2005) “*A study on the efficiency of electrochemical realkalisation of carbonated concrete*”, Construction and Building Materials 19, 516–524
98. Voulgari, E., Zacharopoulou, A., Chousidis, N. and Batis, G. (2019) *Effect of Organic Coating Corrosion Inhibitor on Protection of Reinforced Mortar*. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 7, 20-34.  
<https://doi.org/10.4236/msce.2019.71003>
99. Voulgari, E., Zacharopoulou, A., Chousidis, N. and Batis, G. (2019) *Corrosion Behavior of Reinforcement Steel Embedded in Cement Mortars Using Different Protection Systems*. Materials Sciences and Applications, 2019, 10, 461-474  
<http://www.scirp.org/journal/msa>
100. Wachira, J.M. (2019) *Effects of Chlorides on Corrosion of Simulated Reinforced Blended Cement Mortars*. International Journal of Corrosion, Vol. 2019, Article ID 2123547, 7 pages , <https://doi.org/10.1155/2019/2123547>
101. <http://www.efcweb.org>
102. [http://www.cement.org/tech/cct\\_dur\\_corrosion.asp](http://www.cement.org/tech/cct_dur_corrosion.asp)
103. <http://oikodomima.gr/index.php>
104. [www.e-archimedes.gr/latest/](http://www.e-archimedes.gr/latest/)