

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



ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΣΤΙΣ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ
ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΕΥΓΕΝΙΑ ΖΑΧΑΡΟΠΟΥΛΟΥ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ Ε.Μ.Π

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:
Γ. ΜΠΑΤΗΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ 2014

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

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Γ. Μπατής, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Επιβλέπων
Α. Μοροπούλου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
Κ. Σίδερης, Αναπληρωτής Καθηγητής Δ.Π.Θ

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Γ. Μπατής, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Επιβλέπων
Α. Μοροπούλου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
Κ. Σίδερης, Αναπληρωτής Καθηγητής Δ.Π.Θ
Σ. Τσιβιλής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Χ. Ζέρης, Επίκουρος Ε.Μ.Π.
Χ. Καραγιάννη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
Ε. Μπαδογιάννης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

*Στην αδερφή μου,
Αγγελική*

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

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε, στον Τομέα III Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. με επιβλέποντα τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Γεώργιο Μπατή. Στο Εργαστήριο Φυσικοχημείας και Εφαρμοσμένης Ηλεκτροχημείας του Τομέα III έχουν πραγματοποιηθεί επί σειρά ετών τόσο μελέτες ανθεκτικότητας έναντι της διάβρωσης κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, όσο και ανάπτυξη νέων σύνθετων δομικών υλικών και πρόσθετων σκυροδέματος. Επίσης, παρουσιάζει έντονη ερευνητική δραστηριότητα σε θέματα σχετικά με τη διάβρωση του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος, αλλά και στις μεθόδους εκτίμησης της διάβρωσης δομικών υλικών.

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η επίδραση προσθέτων στις επισκευές του οπλισμένου σκυροδέματος και 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.

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.

Τα **συμπεράσματα – προτάσεις προστασίας**, όπου αναλύονται τα δύο κυρίως στάδια του πειραματικού μέρους της διδακτορικής διατριβής και γίνεται 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 Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. κ. Γεώργιο Μπατή, επιβλέποντα της διδακτορικής διατριβής, για την εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλλε 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 διατριβής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα για την κατανόηση και την εμπιστοσύνη που μου έχει δείξει καθόλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Ευχαριστίες οφείλονται επίσης:

- Στην Αντιπρύτανη Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. κ. Αντωνία Μοροπούλου μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για την αμέριστη βοήθεια, την επιστημονική καθοδήγηση και την πολύτιμη και εποικοδομητική επιστημονική συνεργασία της σε όλα τα στάδια της έρευνας ώστε να προκύψει το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα για την επιστημονική επάρκεια και αρτιότητα της διδακτορικής διατριβής.

- Στον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης κ. Κ. Κ. Σίδηρη, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής για τη συζήτηση και τις διορθώσεις επί του κειμένου της διατριβής. Επίσης θα ήθελα εκ βαθέων να ευχαριστήσω την κατανόηση, ηθική συμπαράσταση και συνεχή παρότρυνση που απρόσκοπτα μου παρείχε καθόλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.
- Στα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής τον Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π κ. Σ. Τσιβιλή και τον Λέκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. οι οποίοι είχαν ασχοληθεί με τα ασβεστολιθικά τσιμέντα και μου παρείχαν την πρώτη ύλη και πολύτιμες οδηγίες και συμβουλές.
- Στο μέλος της επταμελούς επιτροπής Επίκουρο καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ κ. Χρ. Ζέρη για την άριστη συνεργασία του στα πλαίσια της αποτίμησης των δοκιμών εξόλκευσης χάλυβα Ο.Σ. και μηχανικών αντοχών σκυροδεμάτων με ειδικά πρόσθετα.
- Στο μέλος της επταμελούς επιτροπής Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ κα Καραγιάννη για τις εύστοχες παρατηρήσεις της.
- Στο Εργαστήριο «Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών» της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και στο Εργαστήριο «Φυσικοχημείας και Εφαρμοσμένης Ηλεκτροχημείας» του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και ειδικότερα τον Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π κ. Α. Καραντώνη, την Δρ. Χημικό Μηχανικό Ε. Ζαχαρίου – Ρακαντά, την Δρ. Χημικό Μηχανικό Ε. Ντάφλου για την άριστη και άρτια επιστημονική προσέγγιση καθώς και για την πολύτιμη συνεργασία στα πλαίσια τόσο της ηλεκτροχημικής όσο και της συνολικής αποτίμησης της διάβρωσης δομικού χάλυβα Ο.Σ. Επίσης στο Ειδικό Εκπαιδευτικό Διδακτικό Προσωπικό του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών και ιδιαίτερα τον κ. Π. Αστερίδη, για την άριστη συνεργασία του κατά την εκπόνηση του πειραματικού μέρους της παρούσας διατριβής.
- Το προσωπικό του Εργαστηρίου «Δομικών Υλικών» του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του ΔΠΘ και του Εργαστηρίου «Ωπλισμένου Σκυροδέματος» του Τομέα Δομοστατικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- Τη βιομηχανία SIDENOR Α.Ε για την υλικοτεχνική υποστήριξη της.
- Την αδελφή μου Χημικό Μηχανικό κ. Αγγελική Ζαχαροπούλου και την συνάδελφο μου κ. Θεοδοσία Ζαφειροπούλου για την προσωπική συμπαράσταση, υπομονή και ψυχολογική ώθηση και ενθάρρυνση καθώς επίσης και για τις πολύτιμες ιδέες και την επιστημονική υποστήριξη της.

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν την ανθεκτικότητα των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο.Σ) διότι επιδρούν στην κατασκευή εσωτερικά και εξωτερικά. Σε χώρες, όπως η Ελλάδα, που περιβάλλεται από θάλασσα και έχει ζεστό κλίμα, η επίδραση της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, των χλωριόντων, του διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αέριων ρύπων όπως το διοξείδιο του θείου και τα οξειδία του αζώτου, NO_x , είναι παράγοντες θεμελιώδους σημασίας για τη φθορά και κατά συνέπεια τη μείωση του χρόνου ζωής κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, η οποία προκαλείται κατά κύριο λόγο την διάβρωση του οπλισμού. Η διάβρωση του σκυροδέματος αποτελεί ένα από τα κυριότερα κατασκευαστικά και οικονομικά προβλήματα στις μέρες μας διεθνώς.

Στο παρελθόν, αστοχίες λόγω διάβρωσης έχουν δείξει το μέγεθος της καταστροφής που μπορούν να προκαλέσουν με τεράστιο οικονομικό και κοινωνικό κόστος. Ο σεισμός στην Καλαμάτα το 1986, ο σεισμός στο Αίγιο το 1995, ο σεισμός το 1999 στην Αττική και ο σεισμός στην Κεφαλονιά το 2014, αποκάλυψαν το πρόβλημα της διάβρωσης ως έναν από τους κυριότερους παράγοντες της μειωμένης συνάφειας που παρουσιάζεται μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος, και κατά συνέπεια της φθοράς των κατασκευών. Μελέτες ανθεκτικότητας που πραγματοποιήθηκαν στις πληγείσες από το σεισμό στις παραπάνω περιοχές, έδειξαν ζημιές οικοδομών λόγω της διάβρωσης του οπλισμού, οι οποίες δεν είχαν αποκαλυφθεί έως τότε. Τα προϊόντα διάβρωσης λόγω του μεγαλύτερου μοριακού τους όγκου από αυτόν του σιδήρου ασκούν εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών, καθώς επίσης μειώνουν τη συνάφεια οπλισμού /σκυροδέματος.

Στην Ελλάδα ο μέσος χρόνος ζωής των κατασκευών συμπεριλαμβανομένου του χρόνου αποκατάστασής τους είναι περίπου 60 με 70 χρόνια. Η βασική αποκατάσταση τους λαμβάνει χώρα όταν η κατασκευή έχει χρόνο ζωής περίπου 35 χρόνια. Σύμφωνα με τα νέα Ευρωπαϊκά Πρότυπα ο χρόνος ζωής στις συνήθεις κατασκευές από σκυρόδεμα είναι 50 χρόνια, ενώ για τις γέφυρες εκτείνεται στα 100 χρόνια. Στην Ελλάδα, λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών παρουσιάζεται έντονο το πρόβλημα της διάβρωσης του σιδηρού οπλισμού. Κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος που βρίσκονται σε παραθαλάσσιες περιοχές, όπου τα υψηλά ποσοστά υγρασίας που επικρατούν, σε συνδυασμό με τις υψηλές μέσες ετήσιες θερμοκρασίες και το χλωριούχο νάτριο από τα σταγονίδια της θάλασσας, δημιουργούν τις πλέον ευνοϊκές προϋποθέσεις για επιτάχυνση της διάβρωσης του σιδηρού οπλισμού.

Ένας άλλος επίσης σημαντικός παράγων αύξησης της ταχύτητας της διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα είναι η χρήση διαβρωμένου χάλυβα κατά τη σκυροδέτηση. Πολλές φορές ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος παραμένει στα εργοτάξια ή στις μάντρες δομικών υλικών για μεγάλο χρονικό διάστημα εκτεθειμένος στην ατμόσφαιρα συχνά ακόμη και σε παραθαλάσσιες περιοχές. Λόγω της μη προστασίας του ο χάλυβας οξειδώνεται επιφανειακά. Όταν αυτός ο χάλυβας χρησιμοποιηθεί ως οπλισμός σε κατασκευές σκυροδέματος τότε μέρος των οξειδίων παραμένει στην επιφάνεια του δημιουργώντας γαλβανικά στοιχεία τα οποία επιταχύνουν τη διάβρωση του.

Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια ανάπτυξης διαφόρων υλικών τα οποία αυξάνουν το χρόνο ζωής κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Ανάμεσα στις μεθόδους προστασίας είναι η χρήση αναστολέων διάβρωσης ως πρόσθετων του σκυροδέματος. Οι απόψεις των ερευνητών αναφορικά με την αποτελεσματικότητα αυτών σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος δίστανται. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις μέρες μας παρουσιάζει η ανάπτυξη νέων υλικών που δρουν ως αναστολείς διάβρωσης, είναι φιλικά προς το περιβάλλον και ταυτόχρονα προστατεύουν το Ο.Σ. τόσο σε υφιστάμενες όσο και σε νεόδμητες κατασκευές.

Αντικείμενο της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής είναι η επίδραση προσθέτων στις επισκευές του οπλισμένου σκυροδέματος. Διερευνήθηκε η θεωρητική και η πειραματική επίδραση των πρόσθετων αναστολέων διάβρωσης για την προστασία του χάλυβα του οπλισμένου σκυροδέματος (ΧΟΣ). Η δράση και η αποτελεσματικότητα των αναστολέων διάβρωσης εξετάζεται με τη βοήθεια εργαστηριακών δοκιμών διάβρωσης. Συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας περιλαμβάνει δύο κατηγορίες.

Στην πρώτη κατηγορία εξετάστηκε η επίδραση των αναστολέων διάβρωσης ως πρόσμικτοι σε διαφορετικά ποσοστά. Περιλαμβάνει δοκίμια οπλισμών εγκιβωτισμένα στο σκυρόδεμα όπου στην σύσταση του σκυροδέματος έχει προστεθεί αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο σε δύο διαφορετικές περιεκτικότητες (0,1 g/100 g τσιμέντου και 0,4 g/100 g τσιμέντου αντίστοιχα).

Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου B 500c και ο αναστολέας διάβρωσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Βενζοϊκό κυκλοεξυλαμμώνιο. Ο αναστολέας αυτός χρησιμοποιήθηκε σε δοκίμια τύπου CEM I προκειμένου να εξετασθεί η προστατευτική του ικανότητα και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε και σε δοκίμια με ασβεστολιθικά τσιμέντα.

Καταρχήν, κατασκευάστηκαν δοκίμια τύπου CEM I όπου περιείχαν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητες 0,1 g/100 g τσιμέντου και 0,4 g/100 g τσιμέντου και δοκίμια όπου το μισό δοκίμιο δεν περιείχε αναστολέα διάβρωσης και το άλλο μισό περιείχε αναστολέα διάβρωσης, με τις αντίστοιχες περιεκτικότητες.

Από την μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης, την ηλεκτροχημική απώλεια μάζας, την βαρυμετρική απώλεια μάζας και την μέτρηση των χλωριόντων καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η ομάδα που περιέχει αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,4 g/100 g τσιμέντου έχει καλύτερη συμπεριφορά από όλες τις άλλες ομάδες. Επίσης, στις ομάδες που περιέχουν αναστολέα διάβρωσης στο μισό δοκίμιο και στο άλλο μισό δοκίμιο δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης παρατηρείται το φαινόμενο της διάχυσης του αναστολέα διάβρωσης από το ένα τμήμα στο άλλο. Αυτό έχει εφαρμογή σε υφιστάμενες κατασκευές όπου δεν υπάρχει αναστολέας διάβρωσης στην αρχική κατασκευή. Συνεπώς κατά την επισκευή, συνδέοντας το παλιό τμήμα με καινούριο, μπορούμε να πετύχουμε προστασία με την χρήση αναστολέων διάβρωσης. Ιδιαίτερα μετά την εφαρμογή του ΚΑΝΕΠΕ (ΦΕΚ 2187 Β/ 5-9-2013), επιβάλλεται σε πολλές περιπτώσεις έλεγχος στατικής επάρκειας των υφιστάμενων κατασκευών, με αποτέλεσμα κατά την ενίσχυση, να επιβάλλεται, η εφαρμογή των αναστολέων διάβρωσης ώστε να επιμηκύνουν τη ζωή της κατασκευής.

Ο αναστολέας μπορεί να προστατέψει μέχρι έναν βαθμό τον οπλισμό που βρίσκεται εγκιβωτισμένος σε κονίαμα. Είναι γενικά δεκτό ότι η χρήση του αναστολέα διάβρωσης μπορεί να πετύχει έναν διπλασιασμό της ζωής του σκυροδέματος.

Συγκρίνοντας το ποσοστό των χλωριόντων στα δοκίμια σε όλες τις ομάδες με αναστολέα διάβρωσης και χωρίς αναστολέα διάβρωσης, διαπιστώθηκε ότι τα δοκίμια χωρίς αναστολέα διάβρωσης είχαν μεγαλύτερο ποσοστό συνολικών χλωριόντων. Μια πιθανή εξήγηση είναι η υδροφοβικότητα που δίνει ο αναστολέας διάβρωσης στους πόρους του σκυροδέματος. Το γενικό μας συμπέρασμα είναι ότι ο αναστολέας διάβρωσης προστατεύει τον οπλισμό, όμως αν και τετραπλασιάστηκε η ποσότητα του αναστολέα στην μια ομάδα (0,4 g/100 g τσιμέντου) δεν προέκυψε από κανένα αποτέλεσμα τετραπλασιασμός και του βαθμού προστασίας του οπλισμού. Δεν υπάρχει αναλογική σχέση με τον τετραπλασιασμό της ποσότητας του αναστολέα και του ποσοστού προστασίας.

Αφού μελετήσαμε την δράση του αναστολέα διάβρωσης σε τσιμέντα CEM I και διαπιστώθηκε η προστατευτική επίδραση προχωρήσαμε την έρευνα μας και στην διερεύνηση της δράσης του αναστολέα διάβρωσης στα ασβεστολιθικά τσιμέντα. Είναι γνωστό ότι οι αναστολείς διάβρωσης εκτός από την χρήση τους ως πρόσθετα στις κατασκευές έχουν χρήση και στις υφιστάμενες κατασκευές ως ψεκαζόμενοι.

Στην δεύτερη κατηγορία εξετάστηκε η επίδραση των αναστολέων διάβρωσης σε ασβεστολιθικά τσιμέντα ως πρόσμικτοι και ως ψεκαζόμενοι με περιεκτικότητα αναστολέα διάβρωσης 0,4 g/100 g τσιμέντου σε όλα τα δοκίμια. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι ασβεστολιθικών τσιμέντων με διαφορετική περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο (συνθέσεις LC1 και LC2). Είναι γνωστό ότι τα ασβεστολιθικά τσιμέντα είναι πιο οικονομικά αλλά έχουν το μειονέκτημα ότι υστερούν στην ανθεκτικότητα σε σχέση με το τσιμέντο CEM I. Επίσης, μελετήσαμε και την συμπεριφορά του τσιμέντου SR, τσιμέντο ανθεκτικό σε θειικά.

Από την μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης, την ηλεκτροχημική απώλεια μάζας, την βαρομετρική απώλεια μάζας και την μέτρηση των χλωριόντων καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι ο αναστολέας διάβρωσης επηρεάζει ευνοϊκά την συμπεριφορά των δοκιμίων και μάλιστα ο πρόσμικτος συμπεριφέρεται καλύτερα από τον ψεκαζόμενο σε όλες τις ομάδες. Η διαφορά αυτή είναι λογική, μιας και στην περίπτωση του πρόσμικτου αναστολέα διάβρωσης, έχουμε ομοιόμορφη διασπορά του αναστολέα στο σκυρόδεμα ενώ στον ψεκασμό η διασπορά είναι στην επιφανειακή ζώνη, με αποτέλεσμα να ξεπλένεται πιο εύκολα. Από τις μετρήσεις προκύπτει ότι η ομάδα SR, όπου έχει τσιμέντο ανθεκτικό σε θειικά έχει την χειρότερη συμπεριφορά από όλες τις ομάδες.

Είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί ότι οι ομάδες των ασβεστολιθικών βρίσκονται ανάμεσα στις άλλες ομάδες CEM I και SR ως προς την συμπεριφορά τους στη διάβρωση. Ο αναστολέας βελτιώνει την συμπεριφορά των ασβεστολιθικών ομάδων αλλά η ομάδα CEM I παραμένει να συμπεριφέρεται καλύτερα. Αποδεικνύεται ότι όταν η περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο είναι 35% έχει καλύτερη συμπεριφορά από όταν η περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο είναι 15% με ή χωρίς αναστολέα διάβρωση. Το ίδιο συμβαίνει και με τη χρήση του αναστολέα διάβρωσης σε πρόσμικτο ή ψεκαζόμενο.

Συγκρίνοντας το ποσοστό των χλωριόντων στα δοκίμια σε όλες τις ομάδες με αναστολέα διάβρωσης και χωρίς αναστολέα διάβρωσης, διαπιστώθηκε ότι τα δοκίμια χωρίς αναστολέα διάβρωσης είχαν μεγαλύτερο ποσοστό συνολικών χλωριόντων. Μια πιθανή εξήγηση είναι η υδροφοβικότητα που δίνει ο αναστολέας διάβρωσης στους πόρους του σκυροδέματος.

ABSTRACT

The environmental conditions influence the resistibility of manufactures from reinforced concrete because affect in the manufacture internal and externally. In countries, as Greece, that is surrounded by sea and has hot climate, the effect of temperature, relative humidity, chlorine, the dioxide of coal and other airy pollutants as dioxide of sulphur and oxides of nitrogen, NO_x, they are factors of fundamental importance for the deterioration and in consequence the reduction of time of life of manufactures of reinforced concrete, which is caused in the first place the corrosion of reinforcement. The corrosion of concrete constitutes one from the mainer constructional and economic problems in our days internationally.

In the past, failures due to corrosion have shown the extent of destruction that can cause with enormous economic and social cost. The earthquake in Kalamata in 1986, the earthquake in Aegio in 1995, the earthquake in 1999 in Athens and the earthquake in Cephalonia in 2014, revealed the problem of corrosion as one of the main factors of decreased affinity that are presented between reinforcement and concrete, and in consequence the deterioration of manufactures. Studies of resistibility that were realised in affected by the earthquake in the above areas, showed damage of buildings due to corrosion of the reinforcement, that had not been revealed until then. The products of corrosion because of their larger molecular volume by that of iron exert tensile stresses in the concrete with result the creation of cracks, as well as reduce the relevance reinforcement / concrete.

In Greece the average lifetime of structures including the recovery time is about 60 with 70 years. Major rehabilitation of the concrete structures takes place when the structure is about 35 years old. According to the European standards, the design life for buildings and other structures in Europe is 50 years, while bridges are expected to last 100 years. In Greece, due to the environmental conditions is presented intense the problem of corrosion of steel reinforcement. Manufactures of reinforced concrete that are located in coastal regions, where the high rates of humidity that prevail, in combination with high medium annual temperatures and chloride sodium from the droplets of sea, creating the most favorable conditions for accelerated corrosion of steel reinforcement.

Another important factor is also increasing the rate of corrosion of reinforcement in concrete is the use of corroded steel during casting. Many times concrete reinforcing steel remains at construction sites or in stockyards building materials for a long time exposed to the atmosphere often even in coastal areas. Due to the failure to protect the steel surface is oxidized. When this steel used as reinforcement in concrete structures then part of the oxide remains on the surface of creating galvanic cells which accelerate corrosion.

In recent years made efforts to develop various materials which increase the shelf life of reinforced concrete structures. Among the methods of protection is the use of corrosion inhibitors as additives in concrete. The views of researchers regarding their effectiveness in reinforced concrete structures differ. Of particular interest nowadays presents the development of new materials that act as corrosion inhibitors, is environmentally friendly and simultaneously protect reinforced concrete both existing and newly built structures.

Subject of this thesis is the effect of additives on repairs of reinforced concrete. We investigated the theoretical and experimental effects of additional corrosion inhibitors to protect the steel of reinforced concrete. The action and effectiveness of corrosion inhibitors is examined with the aid of laboratory corrosion test. Specifically, the design of the test procedure comprises two categories.

In the first category examined the effect of corrosion inhibitors as admixture at different rates. Includes essays reinforcements encased in concrete where the composition of the concrete has been added as a corrosion inhibitor admixture in two different strengths (0,1 g/100 g of cement and cement 0,4 g/100 g, respectively).

The steel used was type B 500c and the corrosion inhibitor used was cyclohexylammonium benzoate. The inhibitor was used in essays type CEM I to examine the protective ability and then used in essays limestone cements.

First constructed essays which type CEM I containing corrosion inhibitor at levels 0,1 g/100 g cement and 0,4 g/100 g cement and essays where half essay contained no corrosion inhibitor and the other half contained a corrosion inhibitor, with respective contents.

By measuring the corrosion potential, the electrochemical mass loss, the loss of mass and gravimetric measurement of chlorides we concluded that the group containing corrosion inhibitor content in 0,4 g/100 g cement has better performance than all other groups. Also groups containing corrosion inhibitor at half specimen and specimen on the other half do not contain a corrosion inhibitor, the phenomenon of diffusion of the corrosion inhibitor from one section to another. This applies to existing structures where no corrosion inhibitor in the original construction. Therefore during the repair, connecting the old part with new, can achieve protection using corrosion inhibitors. Especially after applying KANEPE (FEK 2187 B / 09.05.2013), it in many cases control static adequacy of existing structures, resulting in the aid, should the application of corrosion inhibitors to prolong the life of the structure.

The inhibitor can protect to some extent the armature is encased in plaster. It is generally accepted that the use of a corrosion inhibitor can achieve a doubling of the life of the concrete.

Comparing the percentage of chlorides in the samples in all groups with no corrosion inhibitor and corrosion inhibitor, it was found that the specimens without corrosion inhibitor had a greater percentage of total chlorine. One possible explanation is the hydrophobicity gives the corrosion inhibitor in the pores of the concrete. Our general conclusion is that the corrosion inhibitor protects the armature, but although quadrupled the amount of inhibitor in a group (0,4 g/100 g cement) there was no effect of quadrupling and the degree of protection of the reinforcement. There is proportionate to quadrupling the amount of inhibitor and the rate of protection.

Having studied the effect of corrosion inhibitor in cement CEM I and found the protective effect we moved our research and investigate the effects of corrosion inhibitor in limestone cements. It is known that the corrosion inhibitors in addition to their use as additives in construction and are used in existing constructions as sprayed .

In the second category examined the effect of corrosion inhibitors on limestone cements as admixture and sprayed containing corrosion inhibitor 0,4 g/100 g cement in all samples. Two types of limestone cements used with different content in limestone (compositions LC1 and LC2). It is known that the calcareous cements are more cost but have the disadvantage of lacking in

durability compared with cement CEM I. Also studied and the behavior of the cement SR, sulphate-resistant cement.

By measuring the corrosion potential, the electrochemical mass loss, the mass loss and gravimetric measurement of chlorides we concluded that the corrosion inhibitor favorably affects the behavior of essays and even the admixtures behave better than sprayed in all groups. This difference is reasonable, because in the case of a corrosion inhibitor additive, have uniform dispersion of the inhibitor into the concrete while the spray is dispersed in the surface area, thus more easily rinsed. These measurements show that the group SR, where sulphate-resistant cement having the worst behavior of all groups.

It is noteworthy to mention that groups of limestone are among the other groups CEM I and SR on the corrosion behavior. The inhibitor improves the behavior of calcareous groups but the group remains CEM I behave better. It turns out that when the content is 35 % limestone has better performance than when the content is 15% limestone with or without corrosion inhibitor. The same happens with the use of a corrosion inhibitor in admixture or sprayed.

Comparing the percentage of chlorides in the samples in all groups with no corrosion inhibitor and corrosion inhibitor, it was found that the specimens without corrosion inhibitor had a greater percentage of total chlorine. One possible explanation is the hydrophobicity gives the corrosion inhibitor in the pores of the concrete.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	8
ABSTRACT	12
1 ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	30
1.1 Γενικά για το σκυροδέμα	30
1.2 Πρώτες ύλες σκυροδέματος	33
1.2.1 Αδρανή υλικά	33
1.2.2 Το νερό ανάμειξης	39
1.2.3 Χημικά Πρόσθετα Σκυροδέματος	41
1.2.3.1 Επιταχυντικά - Επιβραδυντικά πρόσθετα	42
1.2.3.2 Αερακτικά πρόσθετα	44
1.2.3.3 Ρευστοποιητικά πρόσθετα	45
1.2.3.4 Υπερευστοποιητικά πρόσθετα	45
1.3 Ιδιότητες σκυροδέματος	45
1.3.1 Εργασιμότητα	46
1.3.2 Αντοχή	46
1.3.3 Πορώδες	47
1.3.4 Διαπερατότητα	47
1.3.5 Ανθεκτικότητα	48
1.4 Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυροδέμα	48
1.4.1 Βασικές Αρχές Σχεδιασμού Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος	50
1.4.2 Ιδιότητες νωπού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος	51
1.5 Χάλυβες οπλισμένου σκυροδέματος	53
1.5.1 Χάλυβας Ο.Σ. τύπου S220	57
1.5.2 Χάλυβας Ο.Σ. τύπου S400	58
1.5.3 Χάλυβας Ο.Σ. τύπου S500s TEMPCORE	58
1.5.4 Δομικό Πλέγμα S500	59
1.6 Διάβρωση οπλισμού	60
1.7 Γενικά περί κονιαμάτων	61
1.7.1 Κατηγορίες κονιαμάτων	62
1.7.2 Παρασκευή, δόμηση, ιδιότητες κονιαμάτων	63
2 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ	66
2.1 Γενικά	66
2.2 Διάταξη ενός διαβρωτικού συστήματος	67
2.3 Μορφές διάβρωσης	68
2.3.1 Ομοιόμορφη και εντοπισμένη διάβρωση	68
2.3.2 Διάβρωση κατά βελονισμό (pitting corrosion)	69
2.3.3 Μικρορρηγματώδης διάβρωση (crevice corrosion)	70

2.3.4	Περικρυσταλλική διάβρωση (intergranular corrosion).....	71
2.3.5	Γαλβανική ή διμεταλλική διάβρωση (galvanic corrosion).....	71
2.3.6	Χημική διάβρωση.....	72
2.3.7	Ηλεκτροχημική διάβρωση.....	72
2.3.8	Διάβρωση με μηχανισμό υδρογόνου.....	72
2.3.9	Διάβρωση με μηχανισμό οξυγόνου.....	73
2.3.10	Διάβρωση εξαιτίας διαφορικού αερισμού.....	73
2.3.11	Εκλεκτική διάβρωση.....	73
2.3.12	Διάβρωση υπό μηχανική τάση (stress-cracking corrosion).....	73
2.3.13	Διάβρωση μέσω ρευμάτων διαφυγής.....	74
2.3.14	Βιολογική διάβρωση.....	74
2.3.15	Θερμογαλβανική διάβρωση.....	75
2.4	Ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα.....	75
2.5	Ατμοσφαιρική διάβρωση μετάλλων.....	76
2.6	Διάβρωση μετάλλων στο νερό.....	77
2.7	Διάβρωση χάλυβα στο έδαφος.....	79
2.8	Προστασία των μεταλλικών κατασκευών.....	80
2.8.1	Καθοδική προστασία με εφαρμοζόμενο ρεύμα.....	80
2.8.2	Καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους.....	82
3	<u>ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ</u>	84
3.1	Γενικά.....	84
3.2	Διαβρωτικό περιβάλλον.....	86
3.3	Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση του σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα..	87
3.3.1	Το είδος και η δομή του σκυροδέματος.....	87
3.3.2	Το πάχος επικάλυψης.....	88
3.3.3	Η παρουσία νερού στο σκυρόδεμα.....	89
3.3.4	Η παρουσία ρωγμών.....	89
3.4	Αίτια και μηχανισμοί διάβρωσης.....	89
3.4.1	Ενανθράκωση.....	92
3.4.2	Επίδραση χλωριόντων.....	94
3.4.3	Ρωγμές.....	101
4	<u>ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ</u>	104
4.1	Γενικά.....	104
4.2	Μέθοδοι προστασίας από την διάβρωση.....	105
4.2.1	Χρήση Ορυκτών Πρόσθετων.....	107
4.2.1.1	Ιπτάμενη Τέφρα.....	108
4.2.1.2	Σκωρία υψικαμίνων.....	108
4.2.2	Καθοδική προστασία.....	109
4.2.3	Χημικά πρόσθετα – Αναστολείς διάβρωσης στο σκυρόδεμα.....	113
4.2.4	Χρήση οργανικών επικαλύψεων (χρωμάτων).....	118
4.2.5	Χρήση ειδικών χαλύβων.....	121

4.2.5.1	Επιψευδαργυρωμένος ή Γαλβανισμένος Χάλυβας	122
4.2.5.2	Χάλυβας Με Επικάλυψη Εποξειδικών Ρητινών ή PVC	124
4.2.6	Ανοξειδωτοι Χάλυβες	125
4.2.7	Επισκευή και αποκατάσταση δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα	126
5	<u>ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ</u>	128
5.1	Εισαγωγή	128
5.2	Συστατικά τσιμέντου	128
5.3	Ορυκτά Πρόσθετα Τσιμέντου	130
5.4	Τύποι τσιμέντου	135
5.5	Ασβεστολιθικά τσιμέντα	136
5.6	Τσιμέντο Portland	137
5.7	Πλεονεκτήματα παραγωγής	137
5.8	Ενυδάτωση	138
5.9	Μηχανικές ιδιότητες	141
5.10	Φυσικές ιδιότητες	143
5.11	Ιδιότητες σκυροδέματος	144
6	<u>ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ</u>	146
7	<u>ΥΛΙΚΑ</u>	148
7.1	Χάλυβας Οπλισμένου Σκυροδέματος (Χ.Ο.Σ.)	148
7.2	Τσιμέντο	149
7.3	Αδρανή	150
7.4	Νερό	151
7.5	Αναστολέας διάβρωσης	151
7.5.1	Αναστολέας διάβρωσης ως πρόσμικτο	151
7.5.2	Βενζοϊκό κυκλοεξαμμώνιο (για ψεκασμό)	152
8	<u>ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ</u>	
	154	
8.1	Εισαγωγή	154
8.2	Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης	154
8.3	Ηλεκτροχημικός προσδιορισμός της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης	157
8.3.1	Τεχνική της λήψης καμπυλών πόλωσης (Linear Polarization Technique)	159
8.3.2	Συσχέτιση των μετρήσεων γραμμικής πόλωσης με την κατάσταση του χάλυβα Ο.Σ	164
8.4	Μέτρηση της απώλειας μάζας	165
8.5	Μέθοδος προσδιορισμού χλωριόντων	166
8.5.1	Μέθοδος Mohr	166
8.5.2	Μέθοδος Volhard	167
9	<u>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ</u>	170
9.1	Εισαγωγή	170
9.2	Πειραματική διαδικασία	171

9.2.1	Καθαρισμός χαλύβων και καλουπιών	171
9.2.2	Κατασκευή δοκιμών τσιμεντοκονιάματος	172
9.2.3	Μόνωση οπλισμού	172
9.2.4	Εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης	173
9.2.4.1	Ψεκασμός με αναστολέα διάβρωσης	173
9.2.4.2	Πρόσμικτος αναστολέας διάβρωσης	173
9.2.5	Εμβάπτισμα δοκιμών	173
9.3	Χρησιμοποιούμενοι Μέθοδοι	174
9.3.1	Δυναμικό διάβρωσης	174
9.3.2	Μέθοδος γραμμικής πόλωσης	174
9.4	Μετρήσεις	176
9.4.1	Μετρήσεις Δυναμικού Διάβρωσης	177
9.4.1.1	Δοκίμια με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης - Δοκίμια πίνακα 9.1	177
9.4.1.2	Δοκίμια με ψεκαζόμενο και πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης στα ασβεστολιθικά τσιμέντα – Δοκίμια πίνακα 9.2	195
9.4.2	Μετρήσεις αντίστασης γραμμικής πόλωσης	224
9.4.2.1	Δοκίμια με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης – Δοκίμια πίνακα 9.1	224
9.4.2.2	Δοκίμια με ψεκαζόμενο και πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης στα ασβεστολιθικά τσιμέντα – Δοκίμια πίνακα 9.2	243
9.4.3	Υπολογισμός ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας	272
9.4.3.1	Δοκίμια με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης – Δοκίμια πίνακα 9.1	273
9.4.3.2	Δοκίμια με ψεκαζόμενο και πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης στα ασβεστολιθικά τσιμέντα – Δοκίμια πίνακα 9.2	277
9.4.4	Υπολογισμός βαρυμετρικής απώλειας μάζας	282
9.4.4.1	Δοκίμια με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης – Δοκίμια πίνακα 9.1	282
9.4.4.2	Δοκίμια με ψεκαζόμενο και πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης στα ασβεστολιθικά τσιμέντα – Δοκίμια πίνακα 9.2	287
9.4.5	Μετρήσεις χλωριόντων στο σκυρόδεμα	293
9.4.5.1	Δοκίμια με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης – Δοκίμια πίνακα 9.1	293
9.4.5.2	Δοκίμια με ψεκαζόμενο και πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης στα ασβεστολιθικά τσιμέντα – Δοκίμια πίνακα 9.2	296
10	<u>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ</u>	302
11	<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	314
12	<u>ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ</u>	330
13	<u>ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ - ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΕΔΡΙΑ</u>	332

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ-ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικό προϊόν στη διεργασία παραγωγής τσιμέντου. (Τσακαλάκης Κ., 2010).....	31
Εικόνα 1.2 Αλληλουχία φάσεων εξόρυξης και παραγωγής αδρανών υλικών.....	34
Σχήμα 1.1 Υποχρεωτικά όρια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος θραυστών αδρανών. ...	36
Σχήμα 1.2 Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.....	57
Σχήμα 2.1 Ένα ηλεκτρολυτικό στοιχείο.....	67
Σχήμα 2.2 Άνοδοι και κάθοδοι στη διαδικασία της υγρής διάβρωσης ενός δισθενούς μετάλλου.	68
Σχήμα 2.3 Τύποι διάβρωσης α) ομοιόμορφη, β) εντοπισμένη	69
Σχήμα 2.4 Διάβρωση με βελονισμό.....	69
Σχήμα 2.5 Διάβρωση με σχισμές	70
Σχήμα 2.6 Περικρυσταλλική διάβρωση	71
Σχήμα 2.7: Μεταβολή της ταχύτητας διάβρωσης σε σχέση με τη συγκέντρωση του Χλωριούχου Νατρίου.....	75
Εικόνα 2.1 Διάβρωση σιδήρου.....	77
Σχήμα 2.8 Απεικόνιση συστήματος καθοδικής προστασίας με χρήση ηλεκτρικής πηγής	81
Σχήμα 2.9 Απεικόνιση συστήματος καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενη άνοδο	82
Σχήμα 3.1 Μηχανισμοί έναρξης διάβρωσης οπλισμού σκυροδέματος	85
Σχήμα 3.2 Μηχανισμοί και αποτελέσματα διάβρωσης οπλισμού σκυροδέματος	91
Σχήμα 3.3 Διάβρωση οπλισμού σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα	93
Σχήμα 3.4 Βάθος ενανθρακώσεως και ηλικία των κατασκευών.....	94
Σχήμα 3.5 Διάβρωση του οπλισμού σε σκυρόδεμα με χλωριόντα.....	97
Σχήμα 3.6 Σχηματισμός γαλβανικού στοιχείου στον σιδηροπλισμό σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την διάβρωση του οπλισμού (κατά Evans).	98
Σχήμα 3.7 Σχηματισμός μακροστοιχείου σε σκυρόδεμα με χλωριόντα.....	100
Εικόνα 3.1 Εμφάνιση ρωγμής σε σκυρόδεμα	101
Σχήμα 3.8 Η δημιουργία μακροστοιχείου διάβρωσης του οπλισμού σε μακροστοιχείο με ρωγμές 102	
Σχήμα 4.1 Καθοδική προστασία μέσω εξωτερικού ρεύματος και μέσω θυσιαζόμενων ανόδων. 109	
Σχήμα 4.2 Αρχή της καθοδικής προστασίας του σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα	113
Σχήμα 4.3 Ενδεικτικά παραδείγματα θυσιαζόμενων ανόδων	113
Σχήμα 5.1 Ισοζύγιο πρώτων υλών και προϊόντων στην παραγωγή 1 kg τσιμέντου.	129
Πίνακας 5.2: Τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1.....	135
Σχήμα 5.3: Σχηματικό διάγραμμα παρασκευής του τσιμέντου Portland.	137
Σχήμα 5.2: Συνδεδεμένο νερό σε σχέση με τη συμμετοχή του ασβεστόλιθου	141
και το χρόνο ενυδάτωσης.....	141
Σχήμα 5.3: Αντοχή σε θλίψη ασβεστολιθικών τσιμέντων	142
συναρτήσει του περιεχόμενου ασβεστόλιθου.	142
Σχήμα 5.4. Συμβολισμός των διαφόρων τύπων τσιμέντου του ευρωπαϊκού προτύπου.	145

Σχήμα 7.1 Πλαινή όψη και εγκάρσια τομή ράβδου B500c	148
Σχήμα 8.1 Κατανομή δυναμικών διάβρωσης σε διαβρωμένο χάλυβα – δημιουργία μικρο-γαλβανικού στοιχείου	154
Σχήμα 8.2 Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα	156
Σχήμα 8-3: Χαρτογράφηση των δυναμικών διάβρωσης (mV) ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς SCE κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος.	157
Σχήμα 8.4 Καμπύλη ανοδικής πόλωσης σε χάλυβα σε αλκαλικό περιβάλλον.	160
Σχήμα 8.5 Καμπύλη ανοδικής πόλωσης για χάλυβα σε αλκαλικό περιβάλλον και σε αλκαλικό που περιέχει χλωριόντα.	161
Σχήμα 8-6: Ανοδική και καθοδική περιοχή των δυναμικών E συναρτήσει της πυκνότητας του ρεύματος.	163
Σχήμα 8.7 Καμπύλη συσχέτισης της έντασης του ρεύματος I προς το δυναμικό V.	164
Σχήμα 8.12 Σχηματισμός Ag_2CrO_4	166
Σχήμα 9.1: Διαστάσεις κυβικού δοκιμίου εμβαπτισμένο σε ύψος 2.5 cm, σε υδατικό διάλυμα NaCl 3.5% w/w. Διακρίνονται ο οπλισμός, η κόλλα ρητίνης & το χάλκινο σύρμα που είναι περιτυλιγμένο στον οπλισμό.	173
Εικόνα 9.2: Ποτενσιοστάτης γραμμικής πόλωσης	175

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Πίνακας 1.1 Κατηγορίες σκυροδέματος.....	32
Πίνακας 1.2 Κατάταξη αδρανών με βάση το μέγεθος του κόκκου.	35
Πίνακας 1.3 Επιβλαβείς χημικές ενώσεις και η επίδραση του στο σκυρόδεμα.	37
Πίνακας 1.4 Τιμές συστατικών νερού για την παρασκευή σκυροδέματος.....	40
Πίνακας 1.5 Κριτήρια αποδοχής των ιδιοτήτων νωπού αυτοσυμπυκνούμενου 52	52
Σκυροδέματος (CEB, 2005).	52
Πίνακας 1-6 Τεχνικά χαρακτηριστικά για τις διάφορες ποιότητες του χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος (ΚΤΧ-2008).	55
Πίνακας 5.1 Χημική Σύσταση και Ειδικό Βάρος Φυσικών Ποζολανών Διαφορετικής Προέλευσης.	
134	
Πίνακας 5.3: Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις τσιμεντών.	143
Πίνακας 7.1: Χημική σύσταση των χαλύβδινων ράβδων τύπου B500c Tempcore.	149
Πίνακας 7.2: Μηχανικά χαρακτηριστικά των χαλύβδινων ράβδων τύπου B500c Tempcore....	149
Πίνακας 7.3: Χημική και ορυκτολογική σύνθεση του κλίνκερ.	149
Πίνακας 7.4: Χημική ανάλυση ασβεστόλιθου και ποζολανικών υλικών.	150
Πίνακας 7.5: Χημική ανάλυση τσιμέντου ανθεκτικού σε θειικά.	150
Πίνακας 7.6: Χαρακτηριστικά εργαστηριακών τσιμεντών.	150
Πίνακας 7-7: Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου κατά EN 933-1.....	151
Πίνακας 7-8: Χημική σύσταση άμμου 151	151
Πίνακας 7.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά και φυσικές ιδιότητες του αναστολέα.	152
Πίνακας 9.1: Συνοπτικός Πίνακας Δοκιμών με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης (μισό-μισό).170	
Πίνακας 9.2: Συνοπτικός Πίνακας Δοκιμών με ψεκαζόμενο και πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης σε ασβεστολιθικά τσιμέντα.	171
Πίνακας 9.3: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας Α, (δοκίμια Α1, ..., Α8).	178
Πίνακας 9.4: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας Α, (δοκίμια Α9, ..., Α16)	179
Πίνακας 9.5: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας Β, (δοκίμια Β1, ..., Β8).	180
Πίνακας 9.6: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας Β, (δοκίμια Β9, ..., Β16).	181
Πίνακας 9.7: Δυναμικό Διάβρωσης της υποομάδας Γ1.	182
Πίνακας 9.8: Δυναμικό Διάβρωσης της υποομάδας Γ2.	183
Πίνακας 9.9: Δυναμικό Διάβρωσης της υποομάδας Δ1.	184
Πίνακας 9.10: Δυναμικό Διάβρωσης της υποομάδας Δ2.	185
Πίνακας 9.11: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας Ε, (δοκίμια Ε1, ..., Ε8).	186
Πίνακας 9.12: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας Ε, (δοκίμια Ε9, ..., Ε16).	187
Πίνακας 9.13: Μέσοι όροι δυναμικού διάβρωσης σε mV των ομάδων Α, Β και Ε.	188
Πίνακας 9.14: Μέσοι όροι δυναμικού διάβρωσης σε mV των ομάδων Γ και Δ.	189
Διάγραμμα 9.1: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου της ομάδας Α και της ομάδας Ε.	190
Διάγραμμα 9.2: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου της ομάδας Β και της ομάδας Ε.	191

Διάγραμμα 9.3: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Γ ₁ , Γ ₂ και της ομάδας Ε.....	191
Διάγραμμα 9.4: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Δ ₁ , Δ ₂ και της ομάδας Ε.....	192
Διάγραμμα 9.5: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Α, Β και της ομάδας Ε.....	193
Διάγραμμα 9.6: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Γ ₂ , Δ ₂ και της ομάδας Ε.....	194
Διάγραμμα 9.7: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Γ ₁ , Δ ₁ και της ομάδας Ε.....	195
Πίνακας 9.15: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας CEM I, (δοκίμια 1, ...,6).....	196
Πίνακας 9.16: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας CEM I, (δοκίμια 7, ...,12).....	197
Πίνακας 9.17: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC ₁ , (δοκίμια 13, ...,18).....	198
Πίνακας 9.18: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC ₁ , (δοκίμια 19, ...,24).....	199
Πίνακας 9.19: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC ₂ , (δοκίμια 25, ...,30).....	200
Πίνακας 9.20: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC ₂ , (δοκίμια 31, ...,36).....	201
Πίνακας 9.21: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας CEM I + C.I.(additive), (δοκίμια 37, ...,42).....	202
Πίνακας 9.22: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας CEM I + C.I.(additive), (δοκίμια 43, ...,48).....	203
Πίνακας 9.23: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 1 + C.I.(additive), (δοκίμια 49, ...,54).....	204
Πίνακας 9.24: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 1 + C.I.(additive), (δοκίμια 55, ...,60).....	205
Πίνακας 9.25: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 2 + C.I.(additive), (δοκίμια 61, ...,66).....	206
Πίνακας 9.26: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 2 + C.I.(additive), (δοκίμια 67, ...,72).....	207
Πίνακας 9.27: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας CEM I + C.I.(sprayed), (δοκίμια 73, ...,78).....	208
Πίνακας 9.28: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας CEM I + C.I.(sprayed), (δοκίμια 79, ...,84).....	209
Πίνακας 9.29: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 1 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 85, ...,90).....	210
Πίνακας 9.30: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 1 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 91, ...,96).....	211
Πίνακας 9.31: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 2 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 97, ...,102).....	212
Πίνακας 9.32: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 2 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 103, ...,108).....	213
Πίνακας 9.33: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας SR, (δοκίμια 109, ...,114).....	214
Πίνακας 9.34: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας SR, (δοκίμια 115, ...,120).....	215
Πίνακας 9.35: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας SR + C.I.(sprayed), (δοκίμια 121, ...,126).....	216
Πίνακας 9.36: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας SR + C.I.(sprayed), (δοκίμια 127, ...,132).....	217
Πίνακας 9.37: Μέσοι όροι δυναμικού διάβρωσης σε mV των ομάδων CEM I, LC 1, LC ₂ , CEM I + C.I.(additive), LC 1 + C.I.(additive) και LC ₂ + C.I.(additive).....	218
Πίνακας 9.38: Μέσοι όροι δυναμικού διάβρωσης σε mV των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC 1 + C.I.(sprayed), LC ₂ + C.I.(sprayed), SR και SR + C.I.(sprayed).....	219
Διάγραμμα 9.8: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου των ομάδων CEM I, LC ₁ , LC ₂ και SR.....	220
Διάγραμμα 9.9: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου των ομάδων CEM I, CEM I + C.I. (additive) και CEM I + C.I. (sprayed).....	221

Διάγραμμα 9.10: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων LC ₁ , LC ₁ + C.I. (additive) και LC ₁ + C.I. (sprayed).	222
Διάγραμμα 9.11: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων LC ₂ , LC ₂ + C.I. (additive) και LC ₂ + C.I. (sprayed).	223
Διάγραμμα 9.12: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων SR και SR + C.I. (sprayed).....	224
Πίνακας 9.39: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας A, (δοκίμια A ₁ , ..., A ₈).....	225
Πίνακας 9.40: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας A, (δοκίμια A ₉ , ..., A ₁₆).....	226
Πίνακας 9.41: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας B, (δοκίμια B ₁ , ..., B ₈).	227
Πίνακας 9.42: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας B, (δοκίμια B ₉ , ..., B ₁₆).	228
Πίνακας 9.43: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της υποομάδας Γ ₁	229
Πίνακας 9.44: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της υποομάδας Γ ₂	230
Πίνακας 9.45: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της υποομάδας Δ ₁	231
Πίνακας 9.46: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της υποομάδας Δ ₂	232
Πίνακας 9.47: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας E, (δοκίμια E ₁ , ..., E ₈).....	233
Πίνακας 9.48: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας E, (δοκίμια E ₉ , ..., E ₁₆).....	234
Πίνακας 9.49: Μέσοι όροι αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) των ομάδων A, B και E.	235
Πίνακας 9.50: Μέσοι όροι αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) των ομάδων Γ και Δ.	236
Διάγραμμα 9.12: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου της ομάδας A και E.....	237
Διάγραμμα 9.13: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου της ομάδας B και της ομάδας E.....	238
Διάγραμμα 9.14: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου της ομάδας Γ ₁ , Γ ₂ και της ομάδας E.	239
Διάγραμμα 9.15: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου της ομάδας Δ ₁ , Δ ₂ και της ομάδας E.	240
Διάγραμμα 9.16: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου της ομάδας A, B και της ομάδας E.	241

Διάγραμμα 9.17: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου της ομάδας Γ_1 , Δ_1 και της ομάδας E.	242
Διάγραμμα 9.18: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου της ομάδας Γ_2 , Δ_2 και της ομάδας E.....	243
Πίνακας 9.51: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας CEM I, (δοκίμια 1, ...,6).	244
Πίνακας 9.52: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας CEM I, (δοκίμια 7, ...,12).....	245
Πίνακας 9.53: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC1, (δοκίμια 13, ...,18).....	246
Πίνακας 9.54: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC1, (δοκίμια 19, ...,24).	247
Πίνακας 9.55: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC2, (δοκίμια 25, ...,30).	248
Πίνακας 9.56: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC2, (δοκίμια 31, ...,36).....	249
Πίνακας 9.57: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας CEM I + C.I.(additive), (δοκίμια 37, ...,42).	250
Πίνακας 9.58: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας CEM I + C.I.(additive), (δοκίμια 43, ...,48).	251
Πίνακας 9.59: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 1 + C.I.(additive), (δοκίμια 49, ...,54).	252
Πίνακας 9.60: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 1 + C.I.(additive), (δοκίμια 55, ...,60).	253
Πίνακας 9.61: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 2 + C.I.(additive), (δοκίμια 61, ...,66).	254
Πίνακας 9.62: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 2 + C.I.(additive), (δοκίμια 67, ...,72).....	255
Πίνακας 9.63: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας CEM I + C.I.(sprayed), (δοκίμια 73, ...,78).	256
Πίνακας 9.64: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας CEM I + C.I.(sprayed), (δοκίμια 79, ...,84).	257
Πίνακας 9.65: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 1 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 85, ...,90).	258
Πίνακας 9.66: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 1 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 91, ...,96).	259
Πίνακας 9.67: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 2 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 97, ...,102).	260
Πίνακας 9.68: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 2 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 103, ...,108).	261

Πίνακας 9.69: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας SR, (δοκίμια 109, ...,114).....	262
Πίνακας 9.70: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας SR, (δοκίμια 115, ...,120).	263
Πίνακας 9.71: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας SR + C.I.(sprayed), (δοκίμια 121, ...,126).	264
Πίνακας 9.72: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας SR + C.I.(sprayed), (δοκίμια 127, ...,132).....	265
Πίνακας 9.73: Μέσοι όροι αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) των ομάδων CEM I, LC 1, LC2, CEM I + C.I.(additive), LC 1 + C.I.(additive) και LC2 + C.I.(additive)	266
Πίνακας 9.74: Μέσοι όροι αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC 1 + C.I.(sprayed), LC2 + C.I.(sprayed), SR και SR + C.I.(sprayed)	267
Διάγραμμα 9.19: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων CEM I, LC1, LC2 και SR.....	268
Διάγραμμα 9.20: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων CEM I, CEM I + C.I. (additive) και CEM I + C.I. (sprayed).	269
Διάγραμμα 9.21: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων LC1,LC1 + C.I. (additive) καιLC1 + C.I. (sprayed).....	270
Διάγραμμα 9.22: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων LC2, LC2 + C.I. (additive) και LC2 + C.I. (sprayed).....	271
Διάγραμμα 9.23: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων SR και SR + C.I. (sprayed).....	272
Πίνακας: 9.75: Μέσοι όροι Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων A, B και E.	274
Πίνακας: 9.76: Μέσοι όροι Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων Γ και Δ.	275
Διάγραμμα 9.24: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων A και B.	276
Διάγραμμα 9.25: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων Γ και Δ.	277
Πίνακας: 9.77: Μέσοι όροι Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I, LC 1, LC2, CEM I + C.I.(additive), LC 1 + C.I.(additive) και LC 2 + C.I.(additive)	278
Πίνακας: 9.78: Μέσοι όροι Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC 1 + C.I.(sprayed), LC2 + C.I.(sprayed), SR και SR + C.I.(sprayed)	279
Διάγραμμα 9.26: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I, LC 1, LC2 και SR.	280
Διάγραμμα 9.27: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I + C.I.(additive), LC 1 + C.I.(additive) και LC 2 + C.I.(additive).	281
Διάγραμμα 9.28: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC 1 + C.I.(sprayed), LC2 + C.I.(sprayed) και SR + C.I.(sprayed)	282
Πίνακας: 9.79: Μέσοι όροι Βαρυμετρικής Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό της ομάδας E.	283
Πίνακας: 9.75: Μέσοι όροι Βαρυμετρικής Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων A και B.	284
Πίνακας: 9.76: Μέσοι όροι Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό της ομάδας Γ.	285

Πίνακας: 9.77: Μέσοι όροι Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό της ομάδας Δ.	285
Διάγραμμα 9.29: Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων Α, Β και Ε. ...	286
Διάγραμμα 9.30: Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων Γ και Δ.	287
Πίνακας: 9.78: Μέσοι όροι Απώλειας Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I, CEM I + C.I.(additive) και CEM I + C.I.(sprayed)	288
Πίνακας: 9.79: Μέσοι όροι Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων LC ₂ , LC ₂ + C.I.(additive).....	289
και LC ₂ + C.I.(sprayed).....	289
Πίνακας: 9.80: Μέσοι όροι Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων LC ₁ , LC ₁ + C.I.(additive), και LC ₁ + C.I.(sprayed)	290
Πίνακας: 9.81: Μέσοι όροι Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων SR και SR + C.I.(sprayed).	290
Διάγραμμα 9.31: Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I, LC ₁ , LC ₂ και SR.	291
Διάγραμμα 9.32: Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I + C.I.(additive), LC ₁ + C.I.(additive) και LC ₂ + C.I.(additive).	292
Διάγραμμα 9.33: Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC ₁ + C.I.(sprayed), LC ₂ + C.I.(sprayed) και SR + C.I. (sprayed).	293
Πίνακας 9.82: Ποσότητα χλωριόντων στο σκυρόδεμα ανά ομάδα.	294
Διάγραμμα 9.34: Απεικόνιση της ποσότητας των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από διάστημα 24 μηνών των ομάδων Α, Β και Ε.	295
Διάγραμμα 9.35: Απεικόνιση της ποσότητας των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από διάστημα 24 μηνών των ομάδων Γ και Δ.	295
Πίνακας 9.83: Ποσότητα χλωριόντων στο σκυρόδεμα για τις ομάδες CEM I, CEM I + C.I.(additive) και CEM I + C.I.(sprayed)	296
Πίνακας 9.84: Ποσότητα χλωριόντων στο σκυρόδεμα για τις ομάδες LC ₂ , LC ₂ + C.I.(additive), και LC ₂ + C.I.(sprayed).	297
Πίνακας 9.85: Ποσότητα χλωριόντων στο σκυρόδεμα για τις ομάδες LC ₁ , LC ₁ + C.I.(additive), και LC ₁ + C.I.(sprayed).	297
Πίνακας 9.86: Ποσότητα χλωριόντων στο σκυρόδεμα για τις ομάδες SR και SR + C.I.(sprayed) .	298
Διάγραμμα 9.36: Απεικόνιση της ποσότητας των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από διάστημα 24 μηνών, των ομάδων CEM I, LC ₁ , LC ₂ και SR.	298
Διάγραμμα 9.37: Απεικόνιση της ποσότητας των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από διάστημα 24 μηνών, των ομάδων CEM I + C.I.(additive), LC ₁ + C.I.(additive) και LC ₂ + C.I.(additive). ...	299
Διάγραμμα 9.38: Απεικόνιση της ποσότητας των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από διάστημα 24 μηνών, των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC ₁ + C.I.(sprayed), LC ₂ + C.I.(sprayed) και SR + C.I. (sprayed).....	300
Διάγραμμα 10.1: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου όλων των ομάδων.	303
Διάγραμμα 10.2: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό όλων των ομάδων.	304

Διάγραμμα 10.3: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων Α, Β, Γ και Δ.	
	305
Διάγραμμα 10.4: Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων Α, Β, Γ, Δ και Ε.	
	306
Διάγραμμα 10.5: Απεικόνιση της ποσότητας των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από διάστημα 24 μηνών, όλων των ομάδων.....	307
Διάγραμμα 10.6: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου όλων των ομάδων.....	309
Διάγραμμα 10.7: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό όλων των ομάδων.	310
Διάγραμμα 10.8: Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό όλων των ομάδων.....	311
Διάγραμμα 10.9: Απεικόνιση της ποσότητας των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από διάστημα 24 μηνών, όλων των ομάδων.....	312

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1 ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1 Γενικά για το σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα είναι τεχνητό δομικό υλικό, το οποίο παρασκευάζεται με την ανάμιξη τσιμέντου, νερού, αδρανών υλικών και προσθέτων. Το τσιμέντο και τα αδρανή, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του σκυροδέματος, πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των αντίστοιχων κανονισμών (Ε.Κ.Ω.Σ. 2000). Το νερό πρέπει να είναι καθαρό, δηλαδή να μην περιέχει επιβλαβείς ουσίες, οι οποίες θα προκαλούσαν προβλήματα στη σκλήρυνση, στην αντοχή, στην προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση ή θα επηρεάζουν δυσμενώς άλλες ιδιότητες του σκυροδέματος. Το κοινό σκυρόδεμα θεωρείται πρακτικά ως υλικό δύο φάσεων. Το τσιμέντο αποτελεί την πρώτη φάση που είναι κλειστή, τη μήτρα, στην οποία είναι διασκορπισμένα τα αδρανή υλικά που αποτελούν την άλλη φάση. Οι ιδιότητες του σκυροδέματος εξαρτώνται από τις ιδιότητες των δύο φάσεων, καθώς και από την αναλογία ανάμιξης των υλικών κατ' όγκο. Επηρεάζονται όμως και από διάφορους άλλους παράγοντες. Το σκυρόδεμα είναι σήμερα το συνηθέστερο δομικό υλικό για τις κατασκευές κτιρίων και έργων κοινής ωφέλειας. Το τσιμέντο σε ανάμιξη με το νερό (τσιμεντόπαστα) είναι το συνδετικό υλικό, που χρησιμοποιείται στην παραγωγή του σκυροδέματος. Υπάρχουν πολλών ειδών (τύποι) τσιμέντα, με συνηθέστερο αυτό που καλείται κοινό τσιμέντο Portland (OPC, Ordinary Portland Cement). Ο λόγος τιμή (αξία) προς βάρος είναι πολύ μικρός για το τσιμέντο γεγονός που το κάνει να είναι πολύ ακριβό για μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις. Επίσης, επειδή οι πρώτες ύλες (θραυσμένος ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα, χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομετάλλευμα, βωξίτης) για την παραγωγή του τσιμέντου είναι ακόμη χαμηλότερης αξίας, για την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς των πρώτων υλών οι μονάδες παραγωγής τσιμέντου χωροθετούνται πολύ κοντά στις πηγές πρώτων υλών (ιδιαίτερα κοντά στο λατομείο ασβεστολιθικού πετρώματος). Η μεγαλύτερη ποσότητα του παραγόμενου τσιμέντου, για τους παραπάνω λόγους, πρέπει να διατίθεται σε περιοχές και μονάδες παραγωγής σκυροδέματος σχετικώς κοντά στα εργοστάσια παραγωγής του (Κ.Κ.Σίδερης, 1984, Α.Μ. Neville, 1987, Γ.Παρισάκης, 1981, Ν.Οικονόμου, 1999, Δαπόντε Ι.,1991, Κανονισμός για την μελέτη και την Κατασκευή έργων από Σκυρόδεμα, 1991).



Εικόνα 1.1 Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικό προϊόν στη διεργασία παραγωγής τσιμέντου.
(Τσακαλάκης Κ., 2010)

Το σκυρόδεμα αποτελεί το πλέον διαδεδομένο δομικό υλικό παγκοσμίως. Αν και με την εξέλιξη της τεχνολογίας έχουν εφευρεθεί πολλά νέα υλικά, το σκυρόδεμα διατηρεί την πρώτη θέση στην κατανάλωση γιατί :

- Παρουσιάζει εξαιρετικά μεγάλη θλιπτική αντοχή (η μέγιστη τάση που μπορεί να δεχτεί το υλικό χωρίς να προκληθεί θραύση).
- Είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στο νερό και τις περιβαλλοντικές επιδράσεις ενώ στην πάροδο του χρόνου δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές στη μάζα του.
- Μπορεί με το κατάλληλο καλούπι να σχηματίσει οποιαδήποτε μορφή, ανεξαρτήτως μεγέθους, δίνοντας απεριόριστη ελευθερία ως προς το σχεδιασμό των όγκων.
- Περνά σε μικρό χρονικό διάστημα από την υγρή σε στερεά κατάσταση αποκτώντας υψηλές αντοχές.
- Έχει χαμηλό κόστος, τα συστατικά που το συνθέτουν βρίσκονται σε επάρκεια και η ενέργεια που δαπανάται για την παρασκευή του είναι ελάχιστη.

Το σκυρόδεμα παρασκευάζεται με μίξη σε κατάλληλες αναλογίες τσιμέντου, αδρανών, άμμου και νερού, ενώ τακτικά χρησιμοποιούνται και βιομηχανικά χημικά πρόσμικτα (admixtures) που βελτιώνουν τις παραμέτρους του (εργασιμότητα, ταχύτητα σκλήρυνσης κλπ.).

Όσον αφορά το ρυθμό σκλήρυνσης του σκυροδέματος: Σε γενικές γραμμές, σε 1 εβδομάδα αυτό έχει αποκτήσει περί το 70% της τελικής αντοχής του και σε 28 μέρες περί το 90%. Το 100% το αποκτά μετά παρέλευση πολλών ετών.

Η κλασική χρήση του σκυροδέματος είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα (reinforced concrete), όπου η μάζα του σκυροδέματος ενισχύεται με σιδηρό οπλισμό (χάλυβα), που του προσδίδει διατμητική αντοχή ενώ συνεισφέρει και στην παραλαβή των θλιπτικών τάσεων. Τα δύο υλικά συνεργάζονται άριστα (αμοιβαία πρόσφυση, ίδιες θερμοκρασιακές διαστολές, προστασία του οπλισμού από το σκυρόδεμα έναντι σκουριάς).

Μια ειδική μορφή οπλισμένου σκυροδέματος είναι το προεντεταμένο σκυρόδεμα (prestressed concrete), όπου ο οπλισμός εντείνεται προκαταβολικά δημιουργώντας μόνιμες εφελκυστικές

τάσεις σ' αυτόν και θλιπτικές στο σκυρόδεμα που παραμένουν με τη μορφή αυτή ακόμα και μετά την εφαρμογή των εξωτερικών φορτίων.

Μια άλλη διάκριση των σκυροδέτων φορέων είναι σε έγχυτους (cast-in-place) και πρόχυτους (precast). Στην πρώτη περίπτωση η σκυροδέτηση του φορέα γίνεται στην τελική του θέση, ενώ στη δεύτερη, η σκυροδέτηση γίνεται σε διαφορετικό σημείο από αυτό της τελικής θέσης του στερεού πλέον φορέα.

Παραλλαγές, αποτελούν το γαρμπιλόδεμα (με γαρμπίλι αντί για σκύρα, για λεπτότοιχες κατασκευές) και το αφρομπετόν (το οποίο προορίζεται για χρήσεις όπως μονωτικό υλικό ή προστασία θερμομόνωσης σε δώμα κλπ.). Μια τρίτη μορφή είναι το βαρέως τύπου σκυρόδεμα (για προστασία από ακτινοβολία-Χ ή -γ σε πυρηνικούς αντιδραστήρες κλπ.)

Ο όρος τσιμέντο ή τσιμεντοκονία αναφέρεται στη συνδυαστική σκόνη, συνήθως προ της ανάμιξης με νερό, χωρίς άλλα αδρανή πρόσθετα όπως άμμος και χαλίκι. Ενώ το σκυρόδεμα αναφέρεται είτε στο μείγμα τσιμέντου με ποσότητα από άλλα αδρανή υλικά, είτε συνήθως στο στερεό κατασκευαστικό υλικό που προκύπτει μετά την ανάμιξη αυτού του μίγματος με νερό, πήξη και σκλήρυνση. Το σιδηροπαγές ή οπλισμένο σκυρόδεμα ονομάζεται και, εκ του γαλλικού όρου, μπετόν αρμέ (béton armé).

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.

Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα στις κατασκευές γιατί είναι εύκολο να κατασκευασθεί, να σχηματοποιηθεί, έχει χαμηλό κόστος και υψηλή αντοχή στη θλίψη. Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται σε ένα αρκετά εκτεταμένο εύρος διαφορετικών ποιοτήτων για το σύνολο σχεδόν των κατασκευαστικών έργων. 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.

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 1.1 Κατηγορίες σκυροδέματος

Κατηγορία σκυροδέματος	f_{ck} , κυλ. (MPa)	f_{ck} , κύβου (MPa)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30

C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

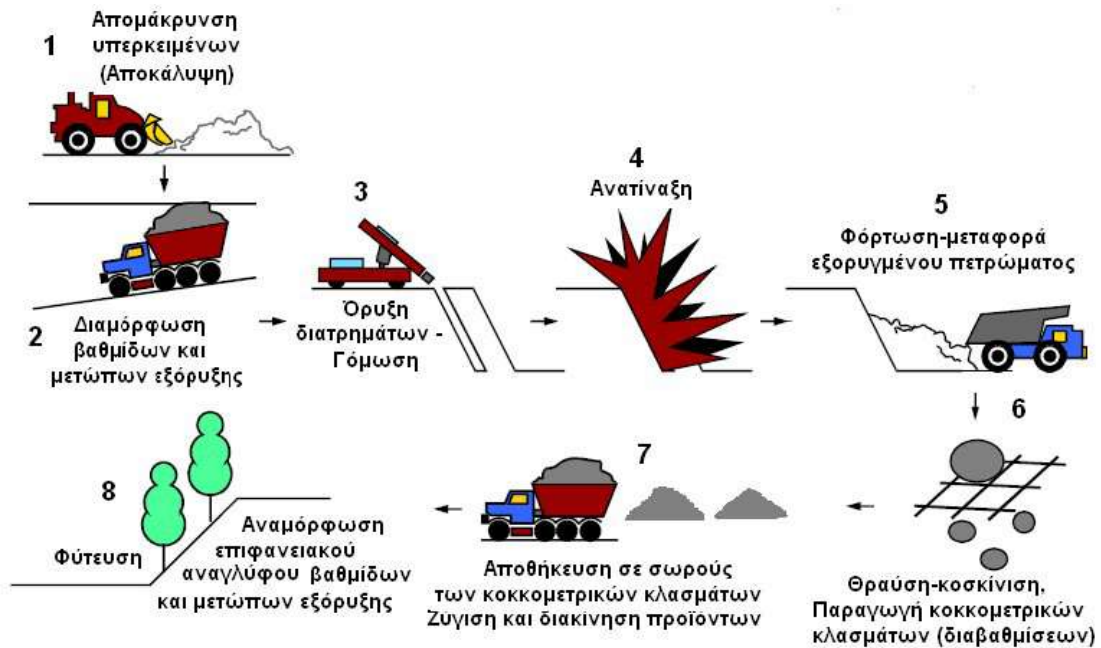
όπου ο πρώτος αριθμός κάθε κατηγορίας ορίζει την χαρακτηριστική αντοχή κυλίνδρου (f_{ck}), ενώ ο δεύτερος την χαρακτηριστική αντοχή κύβου ($f_{ck,cube}$) σε MPa, στις 28 ημέρες.

Σύμφωνα με τον **Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος** του 1997 ορίζονται οι παρακάτω κατηγορίες σκυροδέματος ανάλογα με τις χαρακτηριστικές τιμές της συμβατικής αντοχής κυλίνδρου 150x300mm και κύβου 150mm: C8/10, C12/15, C16/20, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C45/50, C45/55 και C50/60 (π.χ. το C16/20 έχει χαρακτηριστική τιμή συμβατικής αντοχής κυλίνδρου $f_{ck}=16\text{MPa}$ και κύβου 20MPa). Ανάλογα με τη χαρακτηριστική τιμή της συμβατικής αντοχής κύβου 200mm, ο **Γερμανικός Κανονισμός DIN 1045** ορίζει τις εξής κατηγορίες: B15, B25, B35, B45 και B55 ενώ τέλος σύμφωνα με το Αμερικάνικο Ινστιτούτο σκυροδέματος, το πρότυπο **ACI 318** ορίζει ως χαρακτηριστική αντοχή τη συμβατική αντοχή κυλίνδρου 150x300mm με ποσοστό υποαντοχής 10% αντί 5%, f'_c (που μπορεί να πάρει συνεχείς τιμές), (Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος, 1997, DIN 1045-1 Plain, 2005-06, DIN 1045-2, 2001-07, ACI 318-05, 2005)

1.2 Πρώτες ύλες σκυροδέματος

1.2.1 Αδρανή υλικά

Αδρανή υλικά ονομάζονται τα λίθινα υλικά που δεν επιφέρουν χημικές μεταβολές στις σύνθετες τεχνητές ύλες του μίγματος. Σαν αδρανή, στην περίπτωση του σκυροδέματος, χαρακτηρίζονται τα προστιθέμενα υλικά διαφόρου μεγέθους που δεν αντιδρούν με την άσβεστο και το μίγμα τσιμέντου-νερού. Τα αδρανή αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του όγκου του σκυροδέματος (60-70 %) και επηρεάζουν τόσο την αντοχή του όσο και τις φυσικές του ιδιότητες (Leonhard F., 1977). Τα αδρανή στην Ελλάδα είναι κατά κανόνα, χημικώς αδρανή τεμάχια ασβεστολιθικών κυρίως πετρωμάτων τα οποία χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σκυροδέματος και ως υλικά οδοστρωσίας, ενώ τα μεγάλου μεγέθους τεμαχίων ως σκύρα σιδηροδρομικών γραμμών. Η ολοκληρωμένη διαδοχή φάσεων παραγωγής αδρανών υλικών δίνεται στο Σχήμα 1.2.



Εικόνα 1.2 Αλληλουχία φάσεων εξόρυξης και παραγωγής αδρανών υλικών.

Η κύρια χρήση των αδρανών είναι στην παραγωγή σκυροδέματος. Αυτά, λόγω γωνιώδους και ακανόνιστου σχήματος συνδέονται μεταξύ τους και συγκρατούνται στο σκυρόδεμα με τη βοήθεια της τσιμεντόπαστας (μείγμα τσιμέντου και νερού). Όμως, επειδή το τσιμέντο είναι πολύ ακριβό ως υλικό (μεγάλο κόστος παραγωγής), η περιεχόμενη ποσότητά του στο σκυρόδεμα πρέπει να ελαχιστοποιείται υπό την προϋπόθεση βέβαια διατήρησης ικανοποιητικής της αντοχής του. Το 70-80% κατά βάρος του σκυροδέματος αποτελείται από αδρανή, γεγονός που συμβάλλει στο να διατηρείται χαμηλό το κόστος του σκυροδέματος, επειδή τα αδρανή είναι σχετικά φθηνά υλικά, τόσο ως πρώτη ύλη όσο και ως διαδικασία παραγωγής. Δρουν δηλαδή ως «πληρωτικά» στο σκυρόδεμα. Αυτό δεν είναι το μοναδικό πλεονέκτημα από τη χρήση αδρανών. Τα αδρανή, εκτός των άλλων, προσφέρουν αξιόλογα πλεονεκτήματα και από τεχνικής άποψης στο σκυρόδεμα. Επηρεάζουν θετικά τη στατική συμπεριφορά των κατασκευών από σκυρόδεμα, εξασφαλίζουν μεγάλη «σταθερότητα όγκου» και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των κατασκευών σε σχέση με την περίπτωση χρήσης μόνο τσιμεντοκονιάματος. Τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά (προδιαγραφές αντοχής και χρήσης) του σκυροδέματος καθορίζουν τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των αδρανών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Είναι γνωστό ότι, χαμηλής πυκνότητας αδρανή με μεγάλο πορώδες παράγουν ασθενές (χαμηλής αντοχής) σκυρόδεμα με μικρή αντίσταση σε φθορά, ενώ μεγάλης πυκνότητας και σκληρά αδρανή συμβάλλουν στην παραγωγή σκυροδέματος μεγάλης αντοχής (σε θλίψη και εκτριβή). Τα αδρανή του σκυροδέματος πρέπει να είναι καθαρά, χωρίς επιφανειακή σκόνη, άργιλο και οργανικές ύλες (συνήθως πλυμένα), σκληρά και μεγάλης αντοχής. Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή σκυροδέματος έχουν διάφορα μεγέθη και ακανόνιστο σχήμα.

Τα αδρανή υλικά ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

Πίνακας 1.2 Κατάταξη αδρανών με βάση το μέγεθος του κόκκου.

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

Οι κόκκοι μπορεί να είναι στρογγυλοί, κυβόμορφοι, γωνιώδεις, πλακόμορφοι ή επιμήκεις με τον περιορισμό το πλάτος προς το μήκος να είναι 1/3. 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.

Το κυριότερο χαρακτηριστικό των αδρανών που 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.

Ανάλογα με τη χρήση του σκυροδέματος και κυρίως σε ειδικές περιπτώσεις κατασκευών που διατρέχουν μεγάλο κίνδυνο χημικής προσβολής, η επιλογή των αδρανών πρέπει να πληρεί τις διεθνείς προδιαγραφές DIN EN 12620/A1, EN 12620:2002 (DIN EN 12620/A1, 2002). Η καταλληλότητα των αδρανών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του σκυροδέματος στην Ελλάδα προδιαγράφεται από τις απαιτήσεις του ΕΛΟΤ 408, ΕΛΟΤ EN 12620 «Αδρανή για σκυρόδεμα» και του ΚΤΣ-97. Οι ιδιότητες που πρέπει να πληρούν ελέγχονται ως προς τα εξής χαρακτηριστικά (Reinhard W., 1981, ΕΛΟΤ EN 12620, 2002):

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη σύνθεση και την αντλησιμότητα του σκυροδέματος (συνολική επιφάνεια αδρανών-μέγεθος των κόκκων και το σχήμα αυτών). Το μέγεθος του κόκκου d είναι ανάλογο με την μικρότερη διάσταση D του στοιχείου της κατασκευής που θα σκυροδετηθεί. Πρέπει $D/5 < d_{\text{κόκκου}} < D/3$. Ανάλογα με το σχήμα τους οι κόκκοι διακρίνονται σε σφαιρικούς, γωνιώδεις, πλακοειδείς επιμήκεις, ή κυβικούς. Τα γωνιώδη αδρανή χρειάζονται μεγαλύτερη ποσότητα τσιμεντοπολτού από ότι τα σφαιρικά, για την ίδια εργασιμότητα του σκυροδέματος αλλά παρουσιάζουν καλύτερη συνοχή μεταξύ τους και καλύτερη πρόσφυση με το κονίαμα. Το πρότυπο ΕΛΟΤ 408 απαιτεί το ποσοστό των κόκκων με λόγο μεγαλύτερης προς μικρότερη διάσταση 3:1 να μην υπερβαίνει το 50% για χρήση στο σκυρόδεμα.

-Φυσικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

Α) Αντοχή Μητρικού Πετρώματος. Το μητρικό πέτρωμα βάση του κανονισμού πρέπει να έχει θλιπτική αντοχή τουλάχιστον 65 MPa (ΕΛΟΤ 408), αλλά ο ΚΤΣ προβλέπει δυνατότητα χρήσης και χαμηλότερης αντοχής εφόσον από τη μελέτη σύνθεσης αποδειχθεί ότι επιτυγχάνεται η απαιτούμενη αντοχή και ανθεκτικότητα του σκυροδέματος για το έργο που προορίζεται.

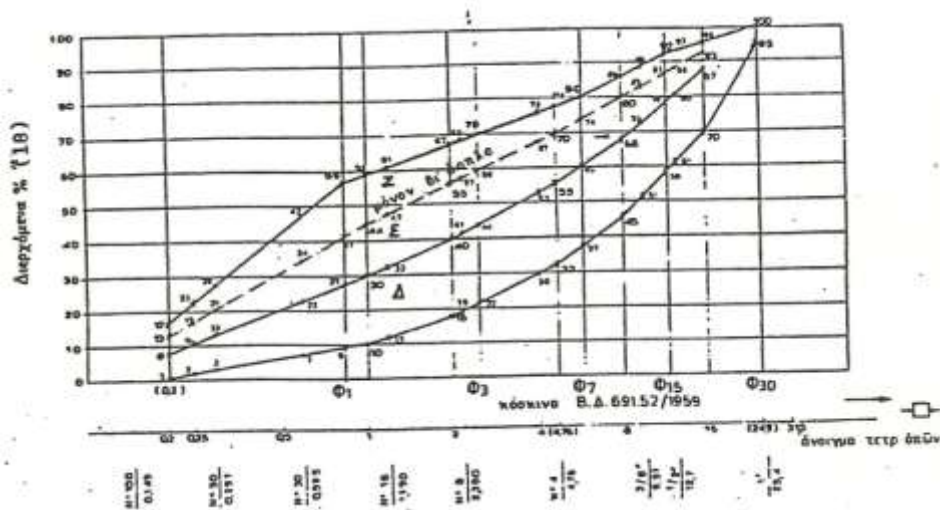
Β) Αντοχή σε επιφανειακή φθορά και κρούση. Για φυσικά αδρανή, στα οποία ο προσδιορισμός της αντοχής μητρικού πετρώματος είναι αδύνατος, η δοκιμή αυτή προσδιορίζει την καταλληλότητα τους στο σκυρόδεμα εφόσον το αποτέλεσμα ελέγχου με τη μέθοδο LOS ANGELES δεν υπερβαίνει το 40%.

Γ) Ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση (υγεία). Η σταθερότητα του όγκου και η μη απώλεια υλικού λόγω ύγρανσης, ξήρανσης, ψύξης- απόψυξης είναι προϋποθέσεις για τα αδρανή στο σκυρόδεμα. Η ανθεκτικότητα προσδιορίζεται είτε με την αντίδραση διαλυτών θειικών αλάτων είτε με εναλλαγή σε κύκλους ψύξης – απόψυξης. Η άμμος πρέπει να παρουσιάζει απώλεια μικρότερη από 10% και τα σκύρα μικρότερη του 12%.

Δ) Ειδικό βάρος διακρίνονται σε απόλυτο, φαινόμενο και μικτό με στόχο τη μέτρηση των κενών. Οι τιμές του ειδικού βάρους για τα αδρανή του σκυροδέματος πρέπει να βρίσκονται μεταξύ 2,40 και 3,00.

Ε) Πορώδες, σημαντική ιδιότητα που είναι σε αντίστροφη αναλογία με την αντοχή και την ανθεκτικότητα τους. Η τιμή του προσδιορίζεται με τη μέτρηση της υδατοαπορροφητικότητας τους.

Στ) Κοκκομετρική διαβάθμιση δηλαδή την επί της % σύνθεση του αδρανούς σε κόκκους διαφόρων μεγεθών. Τα αδρανή ανάλογα με το μέγεθος τους κατατάσσονται σε 4 βασικές κατηγορίες α) Άμμος (0-4mm), β) Ρυζάκι (4-8mm), γ) Γαρμπίλι (8-16mm) και δ) Χαλίκι (16-31,5mm). Καλής διαβάθμισης αδρανή με διαστάσεις κόκκων που καλύπτουν όλο το φάσμα παρουσιάζουν λίγα κενά, απαιτούν μικρότερη ποσότητα συνδετικού ιστού και παρουσιάζουν καλύτερη συνεκτικότητα και εργασιμότητα.



Σχήμα 1.1 Υποχρεωτικά όρια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος θραυστών αδρανών.

Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά (καθαρότητα). Δεν πρέπει να επηρεάζουν δυσμενώς την πήξη, τη σκλήρυνση, την αντοχή, τη σταθερότητα του όγκου και την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση. Στον Πίνακα 1.6 συνοψίζονται οι ενώσεις που θεωρούνται επιβλαβείς και η επίδραση τους στο σκυρόδεμα (Μπατής Γ., 1999).

Πίνακας 1.3 Επιβλαβείς χημικές ενώσεις και η επίδραση του στο σκυρόδεμα.

Επιβλαβείς ενώσεις	Μέγιστη περιεκτικότητα	Επίδραση στο σκυρόδεμα
Ενώσεις θείου (ανυδρίτης γύψος)	SO ₃ <1%	Δημιουργούν θειικά άλατα κατά την πήξη του τσιμέντου, είτε οξειδούμενες δημιουργούν θεικές ενώσεις επιβλαβείς για το σκυρόδεμα οι οποίες προκαλούν διόγκωση του σκυροδέματος
Ενώσεις Σιδήρου		Διόγκωση και κηλίδες
Νιτρικά άλατα και αλογόνα	Cl<0,2%	Προκαλούν διάβρωση
Ενώσεις μολύβδου ή ψευδαργύρου		Επιτάχυνση ή επιβράδυνση με μείωση της αντοχής.
Χλωριούχες ή φωσφορικές ενώσεις		Επιδρούν στο χρόνο πήξης
Πυριτικοί άργιλοι (ασβεστίου, νατρίου, καλίου)		
Αποσαθρώσιμα συστατικά (αργιλικόι σχιστόλιθοι)		Προκαλούν μείωση της αντοχής
Οργανικά		Εμποδίζουν τη σκλήρυνση του σκυροδέματος και κατά συνέπεια την ανάπτυξη των αντοχών (ζάχαρη) ή προκαλούν τη διόγκωση του δια μέσω της κατακράτησης νερού (σκόνη ξύλου).
Γαιάνθρακες ή λιγνίτες	<1%	Προκαλούν μείωση της αντοχής
Κερατόλιθοι (ε.β<2,35)	<5%	

Στα φυσικά αδρανή από θάλασσα η περιεκτικότητα σε άνυδρο χλωριούχο ασβέστιο πρέπει να είναι <1% του βάρους του τσιμέντου. Επίσης, πριν τη χρήση των αδρανών θα πρέπει να εξετάζεται η δυνατότητα των αδρανών για αλκαλοπυριτική αντίδραση. Θα πρέπει να αποφεύγονται πετρώματα με συστατικά που περιέχουν Οπάλιο, ανδεδίτη, ρυόλιθο και

δολομίτες, λόγω της διόγκωσης που προκαλούν και ζεόλιθους λόγω της αντίδρασης τους με τα αλκάλια του τσιμέντου (αλκαλοπυριτική αντίδραση).

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 χρησιμοποιούνται όπως έχουν συλλεχθεί από τη φύση, ενώ τεχνητά θεωρούνται εκείνα τα οποία λαμβάνονται από πετρώματα μετά από θραύση σε κατάλληλα μηχανήματα. Υπάρχουν και κατηγορίες αδρανών όπου κατασκευάζονται από βιομηχανίες για ειδική χρήση.

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.

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.

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. Επίσης θα πρέπει να ελέγχεται κατά πόσο τα αδρανή περιέχουν ποσότητες πυριτίου επιδεκτές σε προσβολή από τα αλκάλια (Na_2O και K_2O) 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, η ορθή χρήση των αδρανών επιβάλλει να 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 αδειάζεται 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.)

1.2.2 Το νερό ανάμειξης

Ένα από τα κυριότερα 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. 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 σπλισμού. Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ανθρακούχα νερά., καθώς και τα νερά με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα και χαμηλό pH (Μπατής Γ., 2006).

Τα όρια αναλογίας νερού προς τσιμέντο κυμαίνονται γενικά μεταξύ 0.6/1 και 0.4/1, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η εργασιμότητα (βλέπε σελ.40) του παραγόμενου υλικού προκειμένου να είναι κατάλληλο για κατασκευές αλλά και η αντοχή του στη διάβρωση. Όταν η αναλογία νερού προς τσιμέντο ξεπεράσει το 0.6/1, η διαπερατότητα του σκυροδέματος, άρα και η πιθανότητα χημικής προσβολής, αυξάνεται δυσανάλογα, εξαιτίας της μεγάλης αύξησης του μεγέθους, του αριθμού και της κατανομής των τριχοειδών πόρων. Όταν η αναλογία νερού προς τσιμέντο κυμαίνεται μεταξύ 0.40/1 και 0.45/1, εξασφαλίζεται τόσο η μείωση του πορώδους όσο και η αύξηση της μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος (F. Massazza, 1985).

Σχετικά με τη σύσταση του χρησιμοποιούμενου νερού, όταν μεν πρόκειται για πόσιμο, οπότε οι διαφορές στη χημική του σύσταση είναι σχετικά μικρές, δεν προκύπτουν σημαντικές διαφορές στην ποιότητα του σκυροδέματος. Όταν όμως πρόκειται για νερό ποταμών ή θάλασσας, η σύσταση του γίνεται ιδιαίτερα σημαντική, με κυριότερο παράγοντα τη περιεκτικότητα του σε χλωριόντα, της οποίας η τιμή δεν πρέπει να ξεπερνά 0.05% κ.β. τσιμέντου (RILEM 12-CRC, 1976, ACI 222 R-15, 1985). Νερό με περιεκτικότητα σε χλωριόντα μεγαλύτερη από 0.15% κ.β. τσιμέντου μπορεί να προκαλέσει έναρξη της διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού (S. Mindess, 1975).

Τέλος, το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή σκυροδέματος, πρέπει να έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένες και αιωρούμενες οργανικές ουσίες καθώς και πλήρη έλλειψη σε λίπη και έλαια. Στον Πίνακα 1.6 δίνονται οι τιμές των συστατικών νερού για την παρασκευή σκυροδέματος σύμφωνα με το σχέδιο προτύπου ΕΛΟΤ 345 και DIN EN 1008 (ΕΛΟΤ 345, 1979, DIN EN1008, 2002).

Πίνακας 1.4 Τιμές συστατικών νερού για την παρασκευή σκυροδέματος.

Ιδιότητες - Συστατικά	Όρια «α»	Όρια «β»
	(ppm)	(ppm)
Ολική οξύτητα εκπεφρασμένη σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO ₃)	100	500
Ολική αλκαλικότητα εκπεφρασμένη σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO ₃)	500	--
Ανόργανα στερεά (άοπλο και οπλισμένο σκυρόδεμα)	3000	15000
Ανόργανα στερεά (προεντεταμένο σκυρόδεμα)	800	800
Οργανικά στερεά	200	500
Θειικά άλατα εκπεφρασμένα σε Θειικό νάτριο (Na ₂ SO ₄) (άοπλο και οπλισμένο σκυρόδεμα)	1500	3000
Θειικά άλατα εκπεφρασμένα σε Θειικό νάτριο (Na ₂ SO ₄) (προεντεταμένο σκυρόδεμα)	400	400
Χλωριούχα άλατα εκπεφρασμένα σε χλωριούχο νάτριο (άοπλο και οπλισμένο σκυρόδεμα)	2000	15000
Χλωριούχα άλατα εκπεφρασμένα σε χλωριούχο νάτριο NaCl (προεντεταμένο σκυρόδεμα)	400	400
Υπερμαγγανικό κάλιο (μόνο για οπλισμένο σκυρόδεμα)	50	100
Λιπαρέ και σακχαρώδεις ουσίες	0	0

Ως όριο «α» ορίζεται η μέγιστη επιτρεπτή τιμή συγκέντρωσης συστατικών νερού για την αποδοχή του ως υλικό παρασκευής του σκυροδέματος. Εάν η συγκέντρωση των συστατικών του νερού ξεπεράσει το όριο «α» χωρίς να υπερβαίνει τη τιμή του ορίου «β» τότε το νερό είναι αποδεκτό υπό την προϋπόθεση να μην έχει αρνητική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Στην περίπτωση αυτή γίνεται έλεγχος της καταλληλότητας του νερού με παρασκευή δοκιμών σκυροδέματος και εκτίμηση των μηχανικών αντοχών του. Νερό με συγκέντρωση συστατικών μεγαλύτερη των τιμών του ορίου «β» κρίνεται ακατάλληλο για παρασκευή σκυροδέματος. Γενικά, το νερό ανάμιξης κρίνεται κατάλληλο εάν πληροί τις προϋποθέσεις του Ευρωπαϊκού προτύπου EN 1008.

Γενικά, το νερό ανάμιξης κρίνεται κατάλληλο εάν πληροί τις προϋποθέσεις του Ευρωπαϊκού προτύπου EN 1008.

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 Ν.Κ.Τ.Σ. επιτρέπει την χρήση θαλασσινού νερού μίξης σε άοπλο φέρων σκυροδέμα, αν η απαιτούμενη αντοχή αυξηθεί κατά 15%.

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.

1.2.3 Χημικά Πρόσθετα Σκυροδέματος

Τα χημικά πρόσθετα προστίθενται στο σκυροδέμα σε ποσοστό όχι μεγαλύτερο από το 5% της συνολικής μάζας του τσιμέντου κατά τη διάρκεια της ανάμιξης του και πριν τη χύτευση αυτού. Έχουν ως σκοπό τη βελτίωση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Χημικά χαρακτηρίζονται σε οργανικά και ανόργανα πρόσθετα αλλά κατηγοριοποιούνται με βάση τις ιδιότητες που προσδίδουν στο σκυροδέμα. Γενικά αποτελούνται από μόρια που περιλαμβάνουν οργανικές αλυσίδες των οποίων το ένα άκρο είναι υδρόφιλο και περιέχει μία ή περισσότερες πολικές ομάδες ($-COO^-$, $--SO_3^-$, $--NH_4^+$). Η ταξινόμηση των πρόσθετων υλικών ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν είναι αρκετά δύσκολη, διότι πολλά από αυτά επιτελούν πάνω από μια λειτουργίες. Ωστόσο διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει τα χημικά πρόσθετα που δρουν αμέσως στην επιφάνεια των κόκκων του τσιμέντου, ενώ η δεύτερη

κατηγορία περιλαμβάνει αυτά που επηρεάζουν τις αντιδράσεις μεταξύ τσιμέντου και νερού από λίγες ώρες έως αρκετές ώρες μετά την προσθήκη τους. Σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C 494-92** κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες (ASTM C494/C494-M-05a):

Type A: Ρευστοποιητές (Water – reducing)

Type B: Επιβραδυντές (Retarding)

Type C: Επιταχυντές (Accelerating)

Type D: Ρευστοποιητές – Επιβραδυντές (Water – reducing and Retarding)

Type E: Ρευστοποιητές – Επιταχυντές (Water – reducing and accelerating)

Type F: Υπερευστοποιητές (High – range water reducing or superplasticizing)

Type G: Υπερευστοποιητές νέας γενιάς (High – range water – reducing and retarding, or superplasticizing and retarding).

Σύμφωνα με το Βρετανικό πρότυπο **BS 5075: Part 1: 1982**, τα χημικά πρόσθετα κατηγοριοποιούνται σε επιταχυντές, επιβραδυντές, ρευστοποιητές και **BS 5075: Part 3: 1985**, σε υπερευστοποιητές (BS 5075 P1,2000, BS 5075 P3,2000). Τα παραπάνω βρετανικά πρότυπα συνοψίζονται στον ευρωκώδικα European Standard **EN 934.02** (ELOT EN 934.02, 2002). Η Ελλάδα όπως και τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής ένωσης οφείλει να ακολουθήσει το ευρωπαϊκό πρότυπο **EN 934.02** το οποίο περιγράφει τη χρήση και τις απαιτήσεις που πρέπει να καλύπτουν τα πρόσθετα, τα οποία φέρουν τη σήμανση CE (Comformiting Marking and Labeling).

1.2.3.1 Επιταχυντικά - Επιβραδυντικά πρόσθετα

Η προσθήκη των επιταχυντών στο σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της ανάπτυξης των πρωίμων αντοχών του σκυροδέματος (βελτίωση των πρωίμων αντοχών), ενώ παράλληλα επιταχύνουν την πήξη του τσιμέντου. Συνήθως οι επιταχυντές χρησιμοποιούνται όταν το σκυρόδεμα πρόκειται να χυτευτεί υπό συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας 2 έως 4°C (35 έως 40°F). Πλεονεκτήματα από τη χρήση των επιταχυντών είναι ότι επιτρέπουν τη γρήγορη διεκπεραίωση της κατασκευής. Αντίθετα, σε υψηλές θερμοκρασίες, η προσθήκη των επιταχυντών έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολύ υψηλών ρυθμών θερμότητας ενυδάτωσης με αποτέλεσμα τη ρηγμάτωση του λόγω συρρίκνωσης. Παρόλο που οι επιταχυντές χρησιμοποιούνται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες δεν λειτουργούν ως αντί παγωτικά πρόσθετα. Χαμηλώνουν το σημείο πήξης του σκυροδέματος όχι περισσότερο από 2°C (3,5°F), οπότε θα πρέπει να λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα προφύλαξης για την αντιπαγωτική προστασία του σκυροδέματος υπό συνθήκες πολύ χαμηλής θερμοκρασίας όπου και όποτε χρειάζεται.

Ο μηχανισμός δράσης των χημικών πρόσθετων πήξης είναι αρκετά πολύπλοκος και σχετίζεται κυρίως με τη διάλυση άνυδρων συστατικών του τσιμέντου και σε πολύ μικρότερο βαθμό με την κρυστάλλωση των ένυδρων. Το τσιμέντο αποτελείται από ανιόντα (πυριτικά, αργιλικά) και κατιόντα (ασβεστίου), η διαλυτότητα των οποίων εξαρτάται από τον τύπο και τη συγκέντρωση των όξινων και βασικών ιόντων του διαλύματος τσιμέντου-νερού. Η προσθήκη κατάλληλων χημικών πρόσθετων στο διάλυμα επιδρά στον τύπο και στη συγκέντρωση των ιόντων, επηρεάζοντας έτσι τη διαλυτότητα των συστατικών του τσιμέντου σύμφωνα με τους παρακάτω κανόνες:

- Τα επιταχυντικά πρόσθετα θα πρέπει να ευνοούν τη διάλυση των κατιόντων και ανιόντων του τσιμέντου, ιδιαίτερα αυτών με τους χαμηλότερους ρυθμούς διάλυσης κατά τα πρώτα στάδια της ενυδάτωσης (π.χ. πυριτικά ιόντα).
- Τα επιβραδυντικά πρόσθετα εμποδίζουν τη διάλυση κατιόντων και ανιόντων του τσιμέντου, ιδιαίτερα αυτών με τους υψηλότερους ρυθμούς διάλυσης κατά τα πρώτα στάδια της ενυδάτωσης (π.χ. αργιλικά ιόντα).
- Η παρουσία μονοσθενών κατιόντων (π.χ. K^+ , Na^+) μειώνει τη διαλυτότητα των ιόντων ασβεστίου (φαινόμενο που επικρατεί για μικρές συγκεντρώσεις), αλλά ευνοεί τη διαλυτότητα των ιόντων πυριτίου και αργιλίου (φαινόμενο που επικρατεί για μεγάλες συγκεντρώσεις).
- Παρουσία ορισμένων ανιόντων (π.χ. Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) μειώνει τη διαλυτότητα των ιόντων πυριτίου και αργιλίου (φαινόμενο που επικρατεί για μικρές συγκεντρώσεις), αλλά ευνοεί τη διαλυτότητα των ιόντων ασβεστίου (φαινόμενο που επικρατεί για μεγάλες συγκεντρώσεις). Έτσι, μικρές συγκεντρώσεις, όπως 0,1%-0,3% κ.β. τσιμέντου, αλάτων ασθενών βάσεων και ισχυρών οξέων ($CaCl_2$) ή ισχυρών βάσεων και ασθενών οξέων (π.χ. K_2CO_3) έχουν επιβραδυντικό χαρακτήρα, ενώ μεγαλύτερες συγκεντρώσεις (πάνω από 1%) έχουν επιβραδυντικό χαρακτήρα.

Ο γύψος δρα πάντα ως επιβραδυντικό ψύξης ακόμα και σε μεγάλες ποσότητες, αποτελώντας εξαίρεση της αναστρεψιμότητας του παραπάνω φαινομένου λόγω της μικρής διαλυτότητας στο νερό. Αντίθετα η χρήση ευδιάλυτων θειικών (π.χ. ημιυδρίτης) σε μεγάλες ποσότητες επιταχύνει την πήξη και ευνοεί την ανάπτυξη αντοχής σε μικρές ηλικίες.

Οι πιο συνήθεις επιταχυντές είναι το χλωριούχο ασβέστιο *calcium chloride*. Το χλωριούχο ασβέστιο δρα αποτελεσματικά στην επιτάχυνση της αντίδρασης ενυδάτωσης του πυριτικού ασβεστίου *calcium silicates* κυρίως του C_3S . Η δράση αυτή οφείλεται κυρίως στην ελαφρά μεταβολή της αλκαλικότητας του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος ή ως καταλύτης (δρα καταλυτικά) στην αντίδραση ενυδάτωσης. Παρόλο που ο μηχανισμός δράσης των επιταχυντών δεν έχει αποσαφηνιστεί ως σήμερα, το χλωριούχο ασβέστιο είναι αναμφίβολα αποτελεσματικό και σχετικά χαμηλού κόστους, ωστόσο βασικό μειονέκτημα αυτών είναι η περιεκτικότητά τους σε χλωριόντα, παρουσία αυτών στην επιφάνεια των οπλισμών έχει ως συνέπεια τη διάβρωση του οπλισμού. Παρόλο που η προσθήκη του $CaCl_2$ μειώνει τον κίνδυνο της ψύξης του σκυροδέματος τις πρώτες ημέρες μετά τη σκυροδέτηση του/ χύτευσή του, μειώνει την ανθεκτικότητα αυτού ως προς τη διάβρωση. Ποιο συγκεκριμένα η προσθήκη του $CaCl_2$ μειώνει την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος ανθεκτικό σε θειικά (προσβολή σε θείο) και αυξάνει τον κίνδυνο της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης, όταν τα αδρανή είναι ενεργά. Ωστόσο η επίδραση του $CaCl_2$ ελαχιστοποιείται όταν προστίθεται σε σκυρόδεμα χαμηλής αλκαλικότητας σε συνδυασμό με την προσθήκη και ποζολανικών στοιχείων. Επίσης η προσθήκη του $CaCl_2$ έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συρρίκνωσης του σκυροδέματος σε ποσοστό 10 έως 15% ή και περισσότερο, με συνέπεια την αύξηση του κινδύνου των ρηγματώσεων.

Ορισμένες ενώσεις δρουν ως ισχυρά επιβραδυντικά της πήξης του σκυροδέματος με μηχανισμούς που διαφέρουν από αυτούς που περιγράφονται παραπάνω και σχετίζονται με την καθυστέρηση του σχηματισμού δεσμών μεταξύ των προϊόντων της ενυδάτωσης (πρόσθετα

επιφανειακής δράσης, όπως είναι οι ενώσεις λιγνίνης), και με τον σχηματισμό αδιάλυτων προϊόντων γύρω από τους κόκκους τσιμέντου.

Τα **επιταχυντικά πρόσθετα** χρησιμοποιούνται κυρίως όταν η σκυροδέτηση πραγματοποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες, οπότε η πήξη και σκλήρυνση του τσιμεντοπολτού γίνεται με αργούς ρυθμούς. Επίσης χρησιμοποιούνται όταν επιδιώκεται γρήγορη απομάκρυνση των ξυλότυπων (π.χ. προκατασκευασμένα στοιχεία), όταν είναι αναγκαία η ταχεία περάτωση του έργου ή όταν το στοιχείο πρόκειται να αναλάβει σύντομα εξωτερικά φορτία. Μειονέκτημα από τη δράση των επιταχυντικών πήξης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας λίγο μετά τη σκυροδέτηση, με αποτέλεσμα την αύξηση της συρρίκνωσης του (συστολή ξήρανσης) το οποίο οδηγεί σε ρηγμάτωση και τελική μείωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος.

Τα **επιβραδυντικά πρόσθετα** χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις σκυροδέτησης σε υψηλές θερμοκρασίες, για τον έλεγχο της πήξης ώστε να αποφεύγονται αρμοί διακοπής όταν η σκυροδέτηση απαιτεί περισσότερο χρόνο περισσότερο από ότι συνήθως (περίπτωση τσιμεντενέσεων ή πασσάλων) και γενικότερα όπου απαιτείται επιβράδυνση του ρυθμού ενυδάτωσης, σε ποσοστά της τάξης του 0,2-0,3% κ.β. τσιμέντου. Η χρήση των επιβραδυντικών πρόσθετων είναι και η αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος, ιδιαίτερα κατά τις πρώτες ημέρες. Αυτό οφείλεται αφενός στη μείωση του νερού ανάμιξης, αφού τα επιβραδυντικά συχνά εμφανίζουν και ρευστοποιητικό χαρακτήρα, αφενός στην αναστολή της ενυδάτωσης των χαμηλής αντοχής αργιλικών ενώσεων τσιμέντου, με αποτέλεσμα την ενίσχυση της παρουσίας των πυριτικών.

1.2.3.2 Αερακτικά πρόσθετα

Τα αερακτικά πρόσθετα δημιουργούν μέσα στη μάζα του νωπού σκυροδέματος μικροσκοπικές (0,02-0,2 mm) φυσαλίδες με σκοπό την αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε κύκλους ζέστης - παγετού και με αποτέλεσμα να αυξηθεί το πορώδες του. Συνεπώς, αυξάνεται η αντοχή του στον παγετό και βελτιώνεται σημαντικά το εργάσιμό του. Όταν, όμως, η περιεκτικότητα σε αέρα ξεπεράσει τα καθορισμένα όρια είναι δυνατόν να μειωθεί η τελική αντοχή του σκυροδέματος. Ο μηχανισμός δράσης των αερακτικών οφείλεται στις πολικές ομάδες, οι οποίες δρουν στη διεπιφάνεια αέρα – νερού με προσανατολισμό προς την κατεύθυνση του νερού, μειώνοντας την επιφανειακή τάση και προκαλώντας τη δημιουργία φυσαλίδων. Ταυτόχρονα οι πολικές ομάδες στη διεπιφάνεια νερού – τσιμέντου ενώνονται με τους στερεούς κόκκους του τσιμέντου, ενώ οι ομάδες χωρίς πολικότητα προσανατολίζονται προς την κατεύθυνση του νερού κάνοντας την επιφάνεια του τσιμέντου υδρόφοβη (μεγάλη ποσότητα αερακτικού επιβραδύνει σημαντικά την ενυδάτωση), έτσι ώστε οι σχηματιζόμενες φυσαλίδες αέρα να μπορούν να εκτοπίσουν το νερό και να παραμείνουν προσκολλημένες στους κόκκους. Τα πρόσθετα τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως ως αερακτικά προέρχονται συνήθως από άλατα ρητινών του ξύλου, από πετρελαϊκά οξέα και από ορισμένα συνθετικά απορρυπαντικά.

1.2.3.3 Ρευστοποιητικά πρόσθετα

Τα ρευστοποιητικά πρόσθετα αυξάνουν τη ρευστότητα και την ομοιομορφία του σκυροδέματος και επιτρέπουν τη μείωση του νερού ανάμιξης με αποτέλεσμα την αύξηση του εργάσιμου και της αντοχής του σκυροδέματος. Επίσης, βελτιώνουν την υδατοπερατότητα και την αντοχή του στον παγετό. Είναι δυνατόν όμως, να εμφανιστεί αύξηση της συστολής ξήρανσης, καθώς και ανεπιθύμητη αύξηση των πόρων με συνέπεια καθυστέρηση της πήξης και μείωση της αντοχής. 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 ανάμιξης, 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. Σε αντίθεση με τα αερακτικά, οι πολικές ομάδες στα ρευστοποιητικά είναι ενωμένες με πολικές ή υδρόφιλες αλυσίδες. Κατά την ανάμιξη με το νερό και το τσιμέντο, οι πολικές αλυσίδες παραμορφώνονται στους κόκκους του τσιμέντου μειώνοντας την επιφανειακή τάση και κάνοντας τους κόκκους υδρόφιλους, με αποτέλεσμα την παρουσία δίπολων νερού ομοιόμορφα γύρω από κάθε κόκκο τσιμέντου και την αποφυγή συσσωματώσεων.

1.2.3.4 Υπερρευστοποιητικά πρόσθετα

Τα υπερρευστοποιητικά αποτελούν ειδική κατηγορία χημικών πρόσθετων επιφανειακής δράσης και αυξάνουν τη ρευστότητα του σκυροδέματος 3 - 4 φορές περισσότερο από τα συνήθη ρευστοποιητικά, επιτρέποντας τη μείωση του νερού ανάμιξης στα 20-25% χωρίς απώλεια εργασιμότητας. Τα υπερρευστοποιητικά προστίθενται στο σκυρόδεμα σε ποσότητα συνήθως 0,5-0,8% έως 1,2% κ.β. τσιμέντου. Επίσης δεν προκαλούν επιβράδυνση της πήξης του σκυροδέματος αλλά αντίθετα η δράση τους επιφέρει εξαιρετική διασπορά των κόκκων τσιμέντου με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της ενυδάτωσης του (ταχεία πήξη και σκλήρυνση του σκυροδέματος). Το φαινόμενο της ταχείας πήξης και σκλήρυνσης του σκυροδέματος παρεμποδίζεται με προσθήκη επιβραδυντικών (όπως λιγνίνης) όπου αυτό βέβαια κρίνεται αναγκαίο. Πλεονέκτημα της ομοιόμορφης διασποράς των κόκκων του τσιμέντου είναι η αύξηση της αντοχής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλότερων αντοχών στα σκυροδέματα με προσθήκη υπερρευστοποιητικών σε σχέση με τα αντίστοιχα σκυροδέματα χωρίς υπερρευστοποιητές για τον ίδιο λόγο W/C. Ενώσεις που συνήθως χρησιμοποιούνται ως υπερρευστοποιητικά σκυροδέματος είναι άλατα μελαμίνης, ενώσεις φορμαλδεΰδης και χρησιμοποιούνται κυρίως για την επίτευξη υψηλών αντοχών.

1.3 Ιδιότητες σκυροδέματος

Οι αναλογίες των συστατικών του σκυροδέματος προσδιορίζονται και «επιβάλλονται» κάθε φορά από το έργο το οποίο θα κατασκευαστεί, δηλαδή εξαρτώνται από τις απαιτήσεις σε εργασιμότητα (workability), αντοχή, ανθεκτικότητα στη διάρκεια του χρόνου (durability), πυκνότητα και τελική επιφανειακή εμφάνιση, που επιβάλλονται από τις προδιαγραφές του έργου. Σημαντική επίδραση στο σχεδιασμό παίζουν οι καιρικές-περιβαλλοντικές συνθήκες, που αναμένεται να επικρατούν κατά την εποχή της διάστρωσης όπως επίσης και καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής από σκυρόδεμα.

1.3.1 Εργασιμότητα

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 ωσώτου 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.

1.3.2 Αντοχή

Ο όρος αντοχή στο σκυρόδεμα, 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 σκυρόδεμα 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 συμπύκνωση 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.

1.3.3 Πορώδες

Το σκυρόδεμα δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές, αλλά περιέχει πλήθος από εσωτερικές κοιλότητες. Το σύνολο των κοιλότητων 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 συμπύκνωση,
- τριχοειδή κενά που δημιουργούνται μετά τις μικρορηγματώσεις από τις συστολές του τσιμεντοκονιάματος ή και τις εξωτερικές καταπονήσεις.

Το πορώδες του σκυροδέματος επηρεάζει κατά πολλούς τρόπους τις ιδιότητές του, 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.

1.3.4 Διαπερατότητα

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/m³, 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 συμπύκνωση. Με τη συμπύκνωση 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.

1.3.5 Ανθεκτικότητα

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.

1.4 Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα

Με τον όρο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα εννοούμε ένα τύπο σκυροδέματος που δύναται να ρέει υπό την επίδραση του ιδίου βάρους του, να πληρώνει τους ξυλοτύπους διερχόμενο μέσα από πυκνό οπλισμό και τελικά να σχηματίζει κατά τη σκλήρυνσή του ένα πυκνό και ικανοποιητικά ομοιογενές υλικό χωρίς την ανάγκη συμπύκνωσης με μηχανικά μέσα.

Είναι σημαντικό να εντοπίσουμε τη διαφορά ανάμεσα σε ένα σωστά σχεδιασμένο μείγμα ΑΣΣ και ένα παραδοσιακό σκυρόδεμα με υψηλή ρευστότητα, γνωστό ως υπέρρευστο σκυρόδεμα. Το ΑΣΣ χαρακτηρίζεται από υψηλή εργασιμότητα, δεν απαιτεί καθόλου συμπύκνωση, παρουσιάζει ικανοποιητικότερη αντίσταση στην απόμειξη και διατηρεί τη σταθερή του σύνθεση τόσο κατά τη μεταφορά του όσο και κατά τη χύτευσή του, χαρακτηριστικά τα οποία το υπέρρευστο δεν παρουσιάζει στον ίδιο βαθμό. Ένα σωστά σχεδιασμένο μείγμα ΑΣΣ πρέπει να είναι ταυτόχρονα ρευστό αλλά και συνεκτικό κατά τη νωπή του κατάσταση, στο βαθμό μάλιστα που αυτό απαιτείται από τις ιδιαιτερότητες της εκάστοτε εφαρμογής. Μία άλλη σημαντική ιδιότητα του ΑΣΣ είναι η σθεναρότητά του (robustness), η ικανότητά του δηλαδή στη νωπή κατάσταση να διατηρεί τις αρχικά σχεδιασμένες ρεολογικές του ιδιότητες με ελάχιστες αποκλίσεις, όταν οι αναλογίες των συστατικών του – και κυρίως η κοκκομετρία της άμμου και η υγρασία των αδρανών - παρουσιάζουν υπολογίσιμες διακυμάνσεις. Η συγκεκριμένη ιδιότητα δεν έχει ιδιαίτερα βαρύνοντα ρόλο στην περίπτωση των συμβατικά δονούμενων σκυροδεμάτων, στην περίπτωση όμως του ΑΣΣ αποτελεί καθοριστικό παράγοντα μιας επιτυχημένης σχεδίασης.

Το ΑΣΣ αρχικά αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 στην Ιαπωνία. Η κατασκευαστική έκρηξη που ακολούθησε τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο οδήγησε σε επιτάχυνση της κατασκευαστικής διαδικασίας κατά τις δεκαετίες του 1950 και 1960 χωρίς την απαραίτητη προσοχή στο θέμα της ποιότητας. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η ταχεία διάβρωση των κατασκευών πολλές από τις οποίες παρουσίασαν σοβαρά προβλήματα τις πρώτες δύο δεκαετίες της ζωής τους. Η σοβαρότητα του προβλήματος ανάγκασε την Ιαπωνική κυβέρνηση να ξεκινήσει έρευνα σχετικά με τις αιτίες της απαράδεκτα γρήγορης και έντονης υποβάθμισης της ποιότητας των κατασκευών. Έτσι, ένα μεγάλο ερευνητικό πρόγραμμα θεσπίστηκε με σκοπό τη διαλεύκανση των βασικών αιτιών αλλά και την εύρεση λύσης για την αύξηση της ανθεκτικότητας των νέων κατασκευών.

Παράλληλα όμως με την Ιαπωνική προσπάθεια ξεκίνησε ανεξάρτητη έρευνα με την άφιξη των τελευταίας γενιάς υπέρρευστοποιητών. Η έρευνα αυτή επικεντρώθηκε στην παραγωγή «ρευστών» σκυροδεμάτων καταλλήλων για ειδικές σκυροδετήσεις όπου η συμπύκνωση ήταν πρακτικά αδύνατη (π.χ. υποβρύχιες εφαρμογές, διαφραγματικοί τοίχοι κλπ). Επιπλέον η πρόοδος στην εξέλιξη των χημικών προσμείκτων περιελάμβανε και την εμφάνιση των «προσμείκτων ρύθμισης του ιξώδους» επιτρέποντας έτσι την παραγωγή συνεκτικού σκυροδέματος κατάλληλου για υποβρύχιες εφαρμογές. Αποτέλεσμα των ερευνών αυτών ήταν η παραγωγή ιδιαίτερα ρευστών μειγμάτων με αυξημένη αντίσταση στην απόμειξη και κυρίως, με χαμηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο, γεγονός που επέτρεπε τη χρήση τους και σε «κοινές» εφαρμογές.

Δοκιμές πεδίου και περιορισμένες εφαρμογές στα τέλη της δεκαετίας του 1980, οδήγησαν σε αυτό που αργότερα ονομάστηκε αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Το διεθνές ενδιαφέρον για τον νέο τύπο αυτού του σκυροδέματος και για τα πολλαπλά οφέλη που επιφέρει στον κατασκευαστικό κλάδο άρχισε να αυξάνεται, με αποτέλεσμα τη χρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση ενός ερευνητικού προγράμματος με οκτώ εταίρους (Grauers et al, 2000). Σε ελληνικό επίπεδο η πρώτη εργαστηριακή παρασκευή μειγμάτων ΑΣΣ με ελληνικά υλικά παρουσιάστηκε στο 14ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος στην Κω το 2003 (Σίδερης κ.α., 2003).

Στο ίδιο συνέδριο παρουσιάστηκαν επίσης άλλες δύο εισηγήσεις σχετικά με την τεχνολογία του ΑΣΣ. Τρία χρόνια αργότερα στο 15ο ΕΣΣ στην Αλεξανδρούπολη παρουσιάστηκαν ακόμη τρεις εισηγήσεις σχετικά με το ΑΣΣ, ενώ τον Μάιο του 2008 το Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος του ΤΕΕ οργάνωσε στην Αθήνα την πρώτη ημερίδα σχετικά με το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα. Στο χρονικό αυτό διάστημα η έρευνα σχετικά με το ΑΣΣ έχει παρουσιάσει τάση ανάπτυξης σε διάφορα ερευνητικά ιδρύματα της Ελλάδας και της Κύπρου.

Η αυξανόμενη όμως ζήτηση και το ενδιαφέρον για χρήση του νέου τύπου σκυροδέματος κατέστησε επιτακτική τη σύσταση οδηγιών σε πανευρωπαϊκό επίπεδο. Έτσι η EFNARC κυκλοφόρησε το 2002 τις πρώτες συστάσεις για το ΑΣΣ (EFNARC, 2002), οι οποίες λίγα χρόνια αργότερα εξελίχθηκαν στις πρώτες Ευρωπαϊκές Οδηγίες για ΑΣΣ (European Guidelines for SCC, 2005). Σε ελληνικό επίπεδο υπάρχουν διαθέσιμες οι Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ) για το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα που κυκλοφόρησαν από το ΥΠΕΧΩΔΕ (ΥΠΕΧΩΔΕ 2004), (Κ.Κ.Σίδερης, 2009)

1.4.1 Βασικές Αρχές Σχεδιασμού Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος

Οι βασικές λειτουργικές ιδιότητες του νωπού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι η ικανότητα πλήρωσης (filling ability), η αντίσταση στο διαχωρισμό των υλικών - απόμειξη (segregation resistance) καθώς και η ικανότητα εισχώρησης μεταξύ των οπλισμών (passing ability). Προκειμένου να ικανοποιηθούν και οι τρεις ανωτέρω απαιτήσεις, δίνεται ιδιαίτερη σημασία στη ρεολογία της τσιμεντόπαστας κατά το σχεδιασμό του μείγματος. Διεθνώς έχουν αναπτυχθεί αρκετές μεθοδολογίες για τον κατ' αρχήν σχεδιασμό ενός μείγματος αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (Okamura and Ozawa, 1995, Hwang, C.L. et al 1994, Peterson et al 1996, Domone and Chai 1997, Ouchi M. et al 1997, Ouchi M. t al, 1998, Pelova G. et al 1998, Domone P. et al. 1999, Edamatsu Y., et al 1999, F. de Larrard, 1999 Shaak et al 2001), τα όποια αποτελέσματα όμως πρέπει πάντα να επαληθεύονται με δοκιμαστικά μείγματα πριν τεθούν σε παραγωγή. Εν συνεχεία, παρουσιάσθηκε (2006) μία βελτιωμένη μέθοδος σχεδιασμού μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (μέθοδος Σχ.Ε.Δι.Π.Υ.) που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Δ.Π.Θ. και αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο που επιτρέπει το σχεδιασμό μειγμάτων διαφορετικών κατηγοριών αντοχής. Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για το σχεδιασμό μειγμάτων ΑΣΣ διαφορετικών κατηγοριών αντοχής (C20/25 έως C50/60) στην παρασκευή των οποίων χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά τσιμέντα και αδρανή υλικά του Ελλαδικού χώρου (Sideris et al, 2008). Η μέθοδος είναι απλή στη χρήση της, επιτρέπει τον συνυπολογισμό στο σχεδιασμό του μείγματος διαφορετικών λεπτών υλικών πέραν του τσιμέντου, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν μέθοδος ποιοτικού ελέγχου προκειμένου να ελεγχθεί η διακύμανση της ποιότητας των πρώτων υλών (αδρανών υλικών, τσιμέντου και λεπτών προσθέτων). Βασικό στοιχείο για τη βελτιστοποίηση των ρεολογικών ιδιοτήτων του νωπού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι η περιεκτικότητά του σε πολύ λεπτά υλικά τα οποία ορίζονται ως το άθροισμα της μάζας του τσιμέντου, της μάζας των ποζολανικών προσθέτων (πυριτική παιπάλη, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υφικαμίνων) και της παιπάλης που προέρχεται από την άμμο (ασβεστολιθικό ή πυριτικό φύλλερ). Με τον όρο φύλλερ

χαρακτηρίζονται τα διερχόμενα από το κόσκινο των 0,075 mm (ή των 0,125 mm) στην Ευρώπη, ενώ στην Ιαπωνία για τον αντίστοιχο προσδιορισμό χρησιμοποιείται το κόσκινο των 0,090 mm. Οι βασικές αρχές που διέπουν το σχεδιασμό ενός αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος σύμφωνα με τις συστάσεις της EFNARC παρουσιάζονται παρακάτω:

Ενδεικτικές αναλογίες υλικών αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος:

- Λόγος νερού/λεπτόκοκκο υλικό: 0.85 – 1.10 κατ' όγκον
- Συνολική ποσότητα λεπτού υλικού: 160-240 lt (380-600 Kg) ανά κυβικό μέτρο
- Περιεκτικότητα χονδρόκοκκων αδρανών: 27-36% του συνολικού όγκου του μείγματος
- Ποσότητα νερού: Δεν υπερβαίνει τα 210 lt/m³ (τηρούνται οι περιορισμοί του EN-206)
- Περιεκτικότητα άμμου: Ισορροπεί τον όγκο των υπολοίπων συστατικών

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, η ποσότητα του λεπτού υλικού πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 400-600 κιλών στο κυβικό μέτρο, προκειμένου το νωπό σκυρόδεμα να έχει τις απαιτούμενες ιδιότητες που θα του προσδώσουν χαρακτηριστικά αυτοσυμπύκνωσης. Το μείγμα που παρασκευάζεται κατ' αυτό τον τρόπο ονομάζεται ΑΣΣ τύπου κονιάς (powder type SCC). Όταν παρά την προσθήκη των πολύ λεπτών υλικών εξακολουθεί να υπάρχει κίνδυνος απόμειξης, προστίθεται και μία μικρή ποσότητα προσθέτου ρυθμιστικού του ιξώδους (viscosity modifying agent, VMA) προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη αντίσταση του μείγματος σε απόμειξη. Τα μείγματα αυτά ονομάζονται μεικτά μείγματα ΑΣΣ (mixed type SCC). Η ποσότητα του απαιτούμενου προσθέτου για τη ρύθμιση του ιξώδους αυξάνεται, όσο μειώνεται η ποσότητα των λεπτών υλικών. Μάλιστα είναι δυνατή η παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος αποκλειστικά με προσθήκη VMA, χωρίς ανάλογη αύξηση των λεπτών υλικών (VMA type SCC), τα μείγματα αυτά όμως χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη ανθεκτικότητα στο χρόνο συγκρινόμενα με τα υπόλοιπα αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα (Σίδερης κ.α., 2003).

Η σύνθεση του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος πρέπει να ελέγχεται όχι μόνο κάθε φορά που αλλάζει ο τύπος του τσιμέντου ή η πηγή των αδρανών υλικών όπως συμβαίνει με τα συμβατικά μείγματα, αλλά και κάθε φορά που αλλάζει η παρτίδα της χρησιμοποιούμενης άμμου, ακόμη και αν αυτή προέρχεται από το ίδιο λατομείο. Αυτό συμβαίνει διότι το ΑΣΣ είναι πολύ ευαίσθητο στην περιεκτικότητα του μείγματος σε λεπτά υλικά (φίλλερ) και οποιαδήποτε αλλαγή στο λεπτόκοκκο κλάσμα της άμμου (διερχόμενα από το κόσκινο των 0.125 mm) θα επιφέρει αξιοσημείωτες αλλαγές στη συμπεριφορά του ΑΣΣ (Κ.Κ. Σίδερης, 2009).

1.4.2 Ιδιότητες νωπού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα διαφοροποιείται από τα αντίστοιχα συμβατικά σκυροδέματα λόγω των ιδιοτήτων του σε νωπή κατάσταση. Τα βασικά χαρακτηριστικά του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ικανότητα πλήρωσης (filling ability), η αντίσταση στο διαχωρισμό των υλικών-απόμειξη (segregation resistance) καθώς και η ικανότητα εισχώρησης μεταξύ των οπλισμών (passing ability). Λόγω της απουσίας διεθνώς αναγνωρισμένων κανονισμών για το ΑΣΣ δεν υπάρχουν θεσμοθετημένες μέθοδοι ελέγχου των παραπάνω ιδιοτήτων. Είναι μάλιστα πολλές φορές συνηθισμένο μία από

τις ανωτέρω ιδιότητες να μπορεί να μετρηθεί με περισσότερες από μία διαφορετικές συσκευές και μεθοδολογίες, γεγονός που επιφέρει σύγχυση. Στον πίνακα 1.5 παρουσιάζονται οι εναλλακτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των βασικών ιδιοτήτων του ΑΣΣ καθώς και οι οριακές τιμές αποδοχής.

Πίνακας 1.5 Κριτήρια αποδοχής των ιδιοτήτων νωπού αυτοσυμπυκνούμενου

Σκυροδέματος (CEB, 2005).

Ιδιότητα	Δοκιμή	Μονάδες μέτρησης	Εύρος μονάδων	
			ελάχιστο	μέγιστο
Ικανότητα πλήρωσης (filling ability)	Μέτρο εξάπλωσης	mm	550	850
	Χρόνος T_{30} στο μέτρο εξάπλωσης	sec	2	5
	Συσκευή V-funnel	sec	6	27
	Orimet	sec	0	5
	Συσκευή L-box	(h2/h1)	0.75	1.0
Αντίσταση στο διαχωρισμό (segregation resistance)	Συσκευή U-box	(h2-h1)mm	0	30
	Συσκευή Fill-box	%	90	100
	Συσκευή J-ring	mm	0	10
		%	0	15
	Συσκευή GTM test			
	Χρόνος T_{5min} στη συσκευή V-funnel	sec	0	+3
Δοκιμή κόσκινου	%	<20	>20	

Προκειμένου να χαρακτηριστεί ένα μείγμα ως αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα πρέπει να ικανοποιούνται και οι τρεις ανωτέρω ιδιότητες, ανεξαρτήτως του τρόπου (μεθόδου) με τον οποίο θα μετρηθούν. Πρέπει πάντως να τονιστεί ότι το ΑΣΣ είναι ένα ειδικό σκυρόδεμα, και ως εκ τούτου οι νωπές ιδιότητές του θα πρέπει να σχεδιάζονται με βάση τις απαιτήσεις του εκάστοτε έργου (Κ.Κ. Σίδηρης, 2009).

Σε ελληνικό επίπεδο η χρήση του ΑΣΣ είναι πολύ περιορισμένη. Οι εταιρείες INTERMPETON, LAFARGE και ET ΜΠΕΤΟΝ έχουν παρασκευάσει ΑΣΣ διαφορετικών κατηγοριών αντοχής, τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί σε αρκετά ειδικά τεχνικά έργα ανά τον ελλαδικό χώρο (καταστρώματα γεφυρών, κοιτοστρώσεις, επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος κλπ). Η εταιρία έτοιμου σκυροδέματος ΤΕΚΤΩΝ ΑΕ που δραστηριοποιείται στην περιοχή της Θράκης επίσης διαθέτει στην αγορά ΑΣΣ κατηγοριών αντοχής C25/30 και C30/37, ενώ μέχρι το 2009 μόνο μία εταιρεία προκατασκευής έχει εισάγει το ΑΣΣ στη γραμμή παραγωγής της. Πάντως διαφαίνεται μία ελαφριά αυξητική τάση για το ενδιαφέρον παραγωγής και διάθεσης του ΑΣΣ, κυρίως από εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο χώρο της προκατασκευής (Κ.Κ. Σίδηρης, 2009).

1.5 Χάλυβες οπλισμένου σκυροδέματος

Σε μια χώρα με έντονη σεισμική δραστηριότητα, όπως η Ελλάδα, είναι μεγάλο το ενδιαφέρον των τεχνικών επιστημόνων και γενικότερα του τεχνικού κόσμου για την ποιότητα των βασικών δομικών υλικών. Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και περισσότερο αντιληπτή η ξεχωριστή σημασία, που έχουν, μεταξύ άλλων, οι λειτουργικές ιδιότητες και η ποιότητα των χαλύβων οπλισμού.

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. Τα Πρότυπα αυτά έχουν αντικαταστήσει τα Πρότυπα ΕΛΟΤ 971 και ΕΛΟΤ 959.

Στα πλαίσια αυτά, ο ΕΛΟΤ για να ικανοποιήσει τις ανάγκες των επιχειρήσεων και των καταναλωτών προσαρμόστηκε στις απαιτήσεις της σχετικής νομοθεσίας και πιστοποιεί σύμφωνα με τα πρότυπα ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3.

Ο χάλυβας του οπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιείται σε μορφή ράβδων κυκλικής διατομής με συνήθεις διαμέτρους από $\varnothing 8$ έως $\varnothing 32$. Στην αγορά προσφέρεται σε μορφή ευθύγραμμων ράβδων μήκους 12 ή 14 m και σε μορφή κουλούρας συνηθισμένου βάρους 1.5 έως 3.0 τόνων.

Ο χάλυβας σε ευθύγραμμη μορφή, ή σε μορφή κουλούρας, είναι καθαρά βιομηχανικό προϊόν και επομένως είναι σε μεγάλο βαθμό σταθερής ποιότητας. Αυτός είναι και ο λόγος που ο συντελεστής ασφαλείας του είναι 1.15, σε σχέση με το σκυρόδεμα που είναι 1.50. Το σκυρόδεμα είναι και αυτό πλέον κυρίως βιομηχανικής παραγωγής, έχει όμως μεγάλο κύκλο αβεβαιοτήτων, τόσο στην παραγωγή, όσο κυρίως από τη μεταφορά ως τη διάστρωση.

Σε πρακτικό επίπεδο, ο μόνος χάλυβας που επιτρέπεται να χρησιμοποιείται για τον οπλισμό έργων από σκυρόδεμα, στην Ελλάδα, είναι η κατηγορία B500c και για δομικά πλέγματα, ο χάλυβας B500A. Ο χάλυβας B500c είναι η βελτίωση του χάλυβα S500c, όχι τόσο σε αντοχή, η οποία παραμένει ίδια (500MPa), όσο σε αυξημένη ολκιμότητα και συγκολλησιμότητα.

Άλλο, όμως, χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος και άλλο οπλισμός, ο οποίος τοποθετείται μέσα στα καλούπια. Ο οπλισμός είναι μία πολύπλοκη σύνθεση τεμαχίων χάλυβα, που πρέπει να κοπεί κατάλληλα, να διαμορφωθεί ανάλογα και να τοποθετηθεί με επιμέλεια, για να μπορέσει να εργαστεί, όπως έχει σχεδιαστεί και να κρατήσει το κτίριο σε όλη τη διάρκεια της ζωής του, κυρίως όμως εκείνα τα λίγα δευτερόλεπτα του ισχυρού σεισμού.

Ενώ η παραγγελία του σκυροδέματος είναι μία απλή διαδικασία που απαιτεί μία ποσότητα, π.χ. 52m³, η παραγγελία του οπλισμού απαιτεί συγκεκριμένες ποσότητες μερικών εκατοντάδων τεμαχίων χάλυβα για μικρά κτίρια, ή μερικών χιλιάδων τεμαχίων χάλυβα για μεγάλα κτίρια. Η παραγγελία του οπλισμού απαιτεί επομένως ένα κατάλογο οπλισμών, στον οποίο αποτυπώνονται το σχήμα και οι ακριβείς διαστάσεις κάθε τεμαχίου.

Ένα σχέδιο ξυλοτύπου κατά κανόνα δεν είναι επαρκές, επειδή μπορεί ο κάθε τεχνίτης σιδεράς να το ερμηνεύσει με το δικό του τρόπο, ο οποίος να είναι διαφορετικός από την πραγματική ανάγκη που υπάρχει, όπως τη γνωρίζει ο μελετητής μηχανικός ή/και ο επιβλέπων μηχανικός. Βέβαια, η εργασία σύνταξης καταλόγων οπλισμών με ακρίβεια, είναι μία πολύπλοκη και κοπιαστική

εργασία και αποτελεί υποχρέωση εκ του νόμου μόνο για τα δημόσια έργα, με αμοιβή ίση με αυτήν της οριστικής μελέτης (της μελέτης που εγκρίνεται από την πολεοδομία). Η νομική αυτή υποχρέωση έχει παραμείνει μόνο για δημόσια κτίρια από παλιές εποχές, τότε που τα ιδιωτικά κτίρια ήταν απλές κατασκευές. Σήμερα και τα ιδιωτικά κτίρια είναι το ίδιο σύνθετα, όπως τα δημόσια και γι' αυτό η υποχρέωση για μελέτη εφαρμογής, στη σημερινή εποχή είναι επιβεβλημένη. Αυτό εξάλλου συμβαίνει σε όλη την προηγμένη αγορά του υπόλοιπου κόσμου. Η μελέτη εφαρμογής του οπλισμού κτιρίων είναι επιβεβλημένη, ακόμη και σε χώρες που δεν έχουν σεισμούς, γιατί η τέχνη στη μελέτη, εξασφαλίζει την εφικτότητα και την επιμέλεια στην κατασκευή, εξασφαλίζει την αντοχή του σκελετού.

Για ένα τόσο σύνθετο και κρίσιμο αντικείμενο, όπως είναι ο οπλισμός, δεν φτάνει όμως ούτε η άριστη μελέτη εφαρμογής, ούτε η σχολαστική επίβλεψη. Απαιτείται παράλληλα και η κατάλληλη βιομηχανία, ή βιοτεχνία που θα αναλάβει την εκτέλεση του έργου του οπλισμού. Η βιομηχανία / βιοτεχνία αυτή πρέπει να έχει όλες τις προδιαγραφές, που απαιτεί ο εκάστοτε Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος που για την Ελλάδα είναι ο ΚΤΧ-2008, ο οποίος αναφέρεται κυρίως στη διαμόρφωση, διακίνηση και εφαρμογή του χάλυβα και όχι στην παραγωγή του. Οι κυριότερες από αυτές τις προδιαγραφές είναι οι στεγασμένες εγκαταστάσεις, η γνώση και η κατοχή όλων των πιστοποιητικών ποιότητας των υλικών, τα κατάλληλα μηχανήματα κοπής - κάμψης - συγκόλλησης και κυρίως, η στελέχωση με τουλάχιστον έναν έμπειρο τεχνικό πανεπιστημιακής ή τεχνολογικής εκπαίδευσης. Παλαιότερα, οι κανονισμοί για την διαμόρφωση του χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος ήταν ανεκτικοί, μετά τον ΚΤΧ-2008, ορίζονται συγκεκριμένες προϋποθέσεις.

Βέβαια, όπως το σκυρόδεμα μπορεί να παράγεται και στο εργοτάξιο, έτσι και η κοπή - διαμόρφωση - συναρμολόγηση οπλισμού, μπορούν να γίνονται και στο εργοτάξιο. Και στις δύο περιπτώσεις απαιτείται υψηλού επιπέδου τεχνική οργάνωση και εξοπλισμός και κυρίως η ύπαρξη εξειδικευμένων τεχνιτών.

Ενώ ο χάλυβας στη βιομηχανική παραγωγή του έχει ποιότητα σε υψηλό βαθμό εξασφαλισμένη, στην κοπή - διαμόρφωση του και κυρίως στην τοποθέτησή του στο εσωτερικό των καλουπιών, η ποιότητά του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ανθρώπινο παράγοντα της καθημερινότητας με τις γνωστές αντιξοότητες.

Ιδιαίτερα στις αντισεισμικές κατασκευές, όπου τοποθετείται πολύς οπλισμός, η τέχνη τόσο της μελέτης, όσο και της κατασκευής, είναι εξαιρετικής σημασίας για την αντοχή του κτιρίου.

Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό με υψηλή αντοχή σε θλίψη αλλά με μικρή εφελκυστική αντοχή, γι' αυτό και η ανάληψη των εφελκυστικών δυνάμεων στις κατασκευές σκυροδέματος γίνεται από τον χάλυβα οπλισμού, που είναι σε μορφή ράβδων κυκλικής διατομής. Οι ράβδοι φέρουν συνήθως επιφανειακές νευρώσεις, που βελτιώνουν τη συνάφεια με το σκυρόδεμα μέσω μηχανικής αλληλεμπλοκής. Οι χάλυβες για τον οπλισμό του σκυροδέματος κατατάσσονται σύμφωνα με τις κοινοτικές και ελληνικές διατάξεις στα υλικά ασφαλείας. Λόγο της έντονης σεισμικής δραστηριότητας που παρουσιάζει η Ελλάδα η ανάγκη έλεγχου της ποιότητας του χάλυβα είναι ύψιστης σημασίας.

Σύμφωνα με τα πρότυπα του ΕΛΟΤ και τον Κ.Τ.Χ., οι χάλυβες οπλισμένου σκυροδέματος διακρίνονται (Κ.Τ.Χ., 2000, ΕΛΟΤ 959, 1996, ΕΛΟΤ 971, 1996):

- Σύμφωνα με τη **μορφή επιφάνειας** σε λείες ράβδους κυκλικής διατομής και σε ράβδους με ανάγλυφες νευρώσεις (υψηλής συνάφειας).
- Σύμφωνα με τη **μέθοδο παραγωγής**, που μπορεί να είναι θερμή έλαση χωρίς περαιτέρω κατεργασία (ΘΕ-Χ), θερμή έλαση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία (ΘΕ-Θ), και ψυχρή κατεργασία με στρέψη ή έλαση ή διέγκυση (ή συνδυασμό αυτών) του προϊόντος της θερμής έλασης (ΨΚ-Ο).
- Σύμφωνα με τη **συγκολλησιμότητα** σε χάλυβες συγκολλησίσιμους υπό προϋποθέσεις και σε χάλυβες συγκολλησίσιμους "s".
- Σύμφωνα με την πλαστιμότητα (στον Κ.Τ.Χ. χρησιμοποιείται ο όρος «ολκιμότητα», αντί του όρου «πλαστιμότητα», ο οποίος υπονοεί τον «δείκτη πλαστιμότητας υλικού, μ_e », που ισούται με το λόγο της παραμόρφωσης στη μέγιστη τάση προς την παραμόρφωση διαρροής), σε χάλυβες υψηλής πλαστιμότητας (H) και σε χάλυβες συνήθους πλαστιμότητας (N).
- Σύμφωνα με την **αντοχή σε διάβρωση** σε κοινούς χάλυβες (κράματα σιδήρου- άνθρακα) και σε μικρές περιεκτικότητες σε άλλα στοιχεία και ανοξειδωτους χάλυβες (με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο 12%).

Τα **μηχανικά χαρακτηριστικά** όλων των ποιοτήτων χαλύβων οπλισμένου σκυροδέματος αναφέρονται στον πίνακα 1.10. Ειδικότερα δίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές του ορίου διαρροής, f_y , του ορίου θραύσης, f_{st} και της επιμήκυνσης μετά τη θραύση, ϵ_s , και αναφέρονται σε χάλυβες με διάμετρο μέχρι και 32 mm. Ως χαρακτηριστική τιμή νοείται η τιμή εκείνη στην οποία βρίσκεται το 95% όλων των τιμών με πιθανότητα 90%. Ο λόγος του ορίου θραύσης ενός δοκιμίου ως προς τον φανερό ή συμβατικό (0,2%) όριο διαρροής πρέπει να είναι τουλάχιστον 1,05.

Ο πίνακας παρουσιάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά του Χάλυβα κατηγορίας C, σε σχέση με τα κυριότερα ισχύοντα πρότυπα και κανονισμούς για τους χάλυβες.

Πίνακας 1-6 Τεχνικά χαρακτηριστικά για τις διάφορες ποιότητες του χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος (ΚΤΧ-2008).

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ C		
Μηχανικά Χαρακτηριστικά	ΕΚΩΣ 2000	ΠΡΟΤΥΠΟ ΕΛΟΤ 1421 - B500C
$f_y(N/mm^2)$	≥ 500	≥ 500
$f_t(N/mm^2)$	≥ 550	≥ 550
Agt(%)	≥ 7	$\geq 7,5$
f_t/f_y	$\geq 1,10$	$\geq 1,15$
$f_y \text{ act}/ f_y \text{ nom}$	$\leq 1,30$	$\leq 1,25$

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
ΕΙΔΟΣ:	Χάλυβας Οπλισμού Σκυροδέματος Κατηγορίας C (B500C - ΕΛΟΤ 1421)

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΧΑΛΥΒΑ:	Συγκολλησιμος χάλυβας υψηλής αντοχής με νευρώσεις (B500C)
	Παράγεται σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 1421 - B500C
ΜΟΡΦΗ - ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ:	Ευθύγραμμες ράβδοι από Φ8 έως Φ32mm και συμπαγείς κουλούρες από Φ8 έως Φ14mm
ΜΗΚΟΣ - ΑΝΟΧΗ:	Μήκος ευθυγράμμων ράβδων: 12 ή 14m με ανοχή -0/+100mm
ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ - ΒΑΡΟΣ:	Δέματα ευθυγράμμων ράβδων βάρους 2,00 τόνων και κουλούρες βάρους 1,8 τόνων

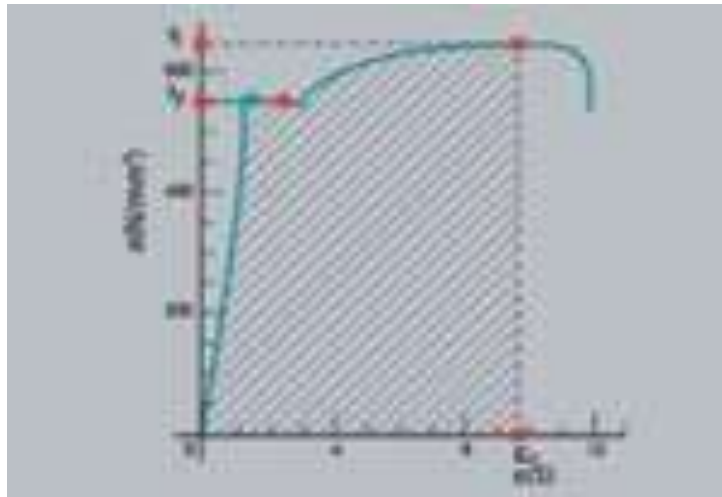
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ, ΒΑΡΗ & ΑΝΟΧΕΣ			
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ (mm²)	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΒΑΡΟΣ (kg/m)	ΑΝΟΧΗ ΒΑΡΟΥΣ (%)
6	28,3	0,222	± 6,0
8	50,3	0,395	± 6,0
10	78,5	0,617	± 4,5
12	113	0,888	± 4,5
14	154	1,21	± 4,5
16	201	1,58	± 4,5
18	254	2	± 4,5
20	314	2,47	± 4,5
22	380	2,98	± 4,5
25	491	3,85	± 4,5
28	616	4,83	± 4,5
32	804	6,31	± 4,5

Οι χάλυβες Ο.Σ. παράγονται στη βιομηχανία από τη τήξη, κατά κύριο λόγο παλιοσιδηρικών (scrap) και δευτερευόντως από διάφορα σιδηροκράματα όπως Fe-Si, Fe-Mn, Si-Mn, Fe-V, σε Ηλεκτρικούς Κλιβάνους Βολταϊκού Τόξου. Στη διαδικασία μεθόδου παραγωγής τους απαγορεύεται η επανέλαση έτοιμων προϊόντων όπως παραγωγή από επανέλαση σιδηροτροχιών, χαλυβδόφυλλων. Τη φάση της τήξης ακολουθούν οι διαδικασίες της κάθαρσης, της αποξειδωσης και της κραμάτωσης του ρευστού χάλυβα σε σύγχρονο κάδο κλίβανο. Ακολουθεί η χύτευση του ρευστού χάλυβα σε μηχανές Συνεχούς Χύτευσης και η παραγωγή μπιγέτων τετραγωνικής διατομής. Η τελική διαμόρφωση πραγματοποιείται στα Έλαστρα, όπου οι μπιγέτες θερμαίνονται σε ειδικούς κλιβάνους μέχρι τους 1200°C περίπου, και σε αυτή τη θερμοκρασία παράγονται τα τελικά προϊόντα. Στη περίπτωση του χάλυβα θερμικής

κατεργασίας, τη Θερμή Έλαση ακολουθεί μια άμεση εν σειρά διαδικασία Θερμικής Κατεργασίας για την επίτευξη των μηχανικών χαρακτηριστικών του τελικού προϊόντος.

Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για αντισεισμικότητα των κατασκευών απαιτούν τη χρήση χαλύβων υψηλής ολκιμότητας. Το γεγονός αυτό οδήγησε τον ΟΑΣΠ (Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας) να προτείνει για πρώτη φορά χάλυβες οι οποίοι διακρίνονται όχι μόνο για την αντοχή τους αλλά και για την ολκιμότητά τους σε κατηγορίες ολκιμότητας A και C (όπου C ο πιο όλκιμος χάλυβας). Η κατηγορία C υιοθετήθηκε στο νέο εθνικό πρότυπο ΕΛΟΤ 1421.

Η ολκιμότητα του χάλυβα (η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας) είναι η βασικότερη προϋπόθεση για να αναπτύξει πλαστιμότητα μια κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα. Στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (σ - ϵ), που προκύπτει από τη δοκιμή εφελκυσμού, η πλαστική ενέργεια που απορροφάται από το χάλυβα εκφράζεται από το εμβαδόν του σκιασμένου τμήματος του διαγράμματος.



Σχήμα 1.2 Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης

Η αύξηση της ολκιμότητας απαιτεί μεγιστοποίηση του εμβαδού αυτού και επιτυγχάνεται με υψηλές τιμές για την παραμόρφωση ϵ_u και την κράτυνση f_t/f_y . Στα σύγχρονα πρότυπα η ολκιμότητα εκφράζεται με μια δέσμη παραμέτρων όπως:

η παραμόρφωση υπό το μέγιστο φορτίο (A_{gt})

ο λόγος της τάσης θραύσης προς την τάση διαρροής – κράτυνση (f_t/f_y)

ο λόγος της πραγματικής προς την ονομαστική τάση διαρροής ($f_{y act}/f_{y nom}$).

1.5.1 Χάλυβας Ο.Σ. τύπου S220

Ονομάζεται και κοινός ή μαλακός χάλυβας και είναι αντίστοιχος της κατηγορίας St I σύμφωνα με τον Γερμανικό Κανονισμό. Χάλυβες με λεία παράπλευρη επιφάνεια και χαμηλή αντοχή, δηλαδή η χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής είναι 220 N/mm^2 παράγεται με θερμή έλαση, και οφείλει τις μηχανικές του ιδιότητες στη χημική του σύσταση. Στο εμπόριο διατίθεται συνήθως

σε διαμέτρους 6-14mm (Φ6-Φ14, αυξανόμενης κατά 2), σε μορφή ρολών (κουλούρες), ενώ μεγαλύτερες διαμέτροι Φ16-Φ26 κυκλοφορούν σπάνια σε δέσμες ράβδων μήκους 12-14 m. Ο νευροχάλυβας έχει σχεδόν εκτοπίσει σήμερα τον ελάχιστα φθηνότερο κοινό χάλυβα λόγω της διπλάσιας σχεδόν αντοχής του, παρόλο που η παραπέρα μηχανική κατεργασία (όπως κοπή και κάμψη) είναι δυσκολότερη και οι απώλειες κατά τη τοποθέτηση μεγαλύτερες.

1.5.2 Χάλυβας Ο.Σ. τύπου S400

Ο νευροχάλυβας S400 είναι αντίστοιχος του παλαιού χάλυβα St III σύμφωνα με τον Γερμανικό Κανονισμό και έχει χαρακτηριστική τιμή ορίου διαρροής 400MPa. Στην παράπλευρη του επιφάνεια φέρει νευρώσεις για βελτίωση της ικανότητας πρόσφυσης με το σκυρόδεμα, παράγεται με θερμή έλαση και οφείλει τις μηχανικές ιδιότητες του στη χημική σύσταση του κράματος (αυξημένα ποσοστά μαγγανίου και βαναδίου στο κράμα). Στο εμπόριο διατίθεται σε ευθύγραμμες ράβδους διαμέτρου Φ6-Φ32 (6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32) και μήκους 12-14m συνήθως. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο χάλυβας S400, σε αντίθεση με τον S400s (ο οποίος δεν παράγεται στη χώρα μας) είναι συγκολλησίμος υπό προϋποθέσεις, που σημαίνει ότι χάνει ένα ποσοστό της αντοχής και άλλων μηχανικών ιδιοτήτων όταν συγκολλείται.

1.5.3 Χάλυβας Ο.Σ. τύπου S500s TEMP CORE

Αντιστοιχεί στον παλαιό χάλυβα St IV ή IVs. Είναι παρόμοιος με τον χάλυβα της παραπάνω κατηγορίας ως προς τις νευρώσεις, τα διαθέσιμα μήκη και τις διαμέτρους, και διαφέρει μόνο ως προς τη χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής (500MPa) και μερικά άλλα χαρακτηριστικά. Στην Ελλάδα παράγεται και χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα ο χάλυβας S500s, ο οποίος είναι συγκολλησίμος και είναι τύπου Tempcore, ενώ παράγεται και ο χάλυβας S500 θερμής έλασης και συγκολλησίμος υπό προϋποθέσεις, με βελτιωμένη αντοχή μόνο λόγω χημικής σύνθεσης. Ο χάλυβας S500s λόγω της συγκολλησιμότητας και του παραπλήσιου σχεδόν κόστους σε σχέση με τον χάλυβα S400 έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται σχεδόν κατά αποκλειστικότητα στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες, ενώ ο S400 δεν παράγεται πλέον. Στην Ελλάδα η τάση αυτή αναμένεται να υιοθετηθεί.

Γενικά οι χάλυβες S500 Tempcore είναι προϊόν μιας ιδιαίτερης θερμικής κατεργασίας που γίνεται με τη θερμότητα της ίδιας διαδικασίας έλασης.

Μειονεκτήματα των χαλύβων Temporal είναι (Π. Μαυροειδής, 2005):

- Η μεγάλη τυπική απόκλιση στις τιμές του ορίου διαρροής και εφελκυστικής αντοχής.
- Η απώλεια σημαντικού μέρους των αντοχών σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Συγκεκριμένα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 500°C και χρόνους έκθεσης άνω των 2h, οι κατηγορίες S400s και S500s της μεθόδου tempcore (ΘΕ-Θ), λόγω του μεταλλουργικού μετασχηματισμού (είδος ανόπτησης) που υφίσταται ο μαρτενσίτης, παρουσιάζουν μείωση της αντοχής τους έως και 50%, σε αντίθεση με τους S220, S400, S500 και τους βαναδιούχους S500s που δεν παρουσιάζουν αξιοσημείωτες μεταβολές μηχανικών ιδιοτήτων.

- Η σημαντική δυσκολία διαμόρφωσης, λόγω της υψηλής σκληρότητας του εξωτερικού φλοιού, που επηρεάζει σημαντικά τη διεργασία κάμψης και
- Η μεγαλύτερη τάση για διάβρωση σε σχέση με τους χάλυβες θερμής έλασης χωρίς άλλη διεργασία. Εδώ αξίζει να σημειωθεί και ένα μειονέκτημα του χάλυβα Tempcore, ότι δηλαδή σε περίπτωση διάβρωσης καταστρέφεται πρώτα το ισχυρότερο τμήμα της διατομής των ράβδων.

Σύμφωνα με την εισήγηση του ΟΑΣΠ (Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας) το 2002 και τις νέες απαιτήσεις για αντισεισμικές κατασκευές, δηλαδή για κατασκευές αυξημένης πλαστιμότητας (μεταξύ μέσης, **M** και υψηλής, **Y**), που θέτει ο ευροκώδικας **EN 10080** και οι κατασκευαστικοί κανονισμοί **ΕΚΩΣ 2000** και **ΕΑΚ-2000**, οι χάλυβες διακρίνονται όχι μόνο για την αντοχή τους αλλά και για την ολκιμότητα τους σε κατηγορίες A, B και C (όπου C χάλυβας υψηλής ολκιμότητας). Η κατηγορία C διαμορφώνεται σήμερα σε νέο πρότυπο του **ΕΛΟΤ 1421** ως **B500C** με υψηλή τιμή κράτυνσης $\geq 1,5$ (λόγος εφελκυστικής αντοχής προς όριο διαρροής f_t/f_y), και ομοιόμορφης παραμόρφωσης ($\epsilon_{u,k}$), (ENV 10080,1996, ΕΚΩΣ 2000, 2001, ΕΑΚ 2000, 2001).

Η ολκιμότητα του χάλυβα είναι μια από τις προϋποθέσεις για να αναπτύξει πλαστιμότητα ένα στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ο όρος ολκιμότητα χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη σχέση της περιοχής των πλαστικών παραμορφώσεων ως προς την περιοχή των ελαστικών παραμορφώσεων μιας ράβδου οπλισμού που δοκιμάζεται σε εφελκυσμό, ενώ πλαστιμότητα είναι η ικανότητα ενός φορέα ή μιας περιοχής από οπλισμένο σκυρόδεμα να αποκρίνεται σε μεγάλες μετελαστικές παραμορφώσεις, χωρίς σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητας. Η ολκιμότητα δηλαδή, είναι ιδιότητα του υλικού, ενώ η πλαστιμότητα είναι η ιδιότητα ενός φορέα από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Οι χάλυβες αυξημένης ολκιμότητας διαχωρίζονται σε θερμής έλασης με άμεση εν σειρά θερμική κατεργασία και σε θερμής έλασης Βαναδιούχος, οι οποίοι έχουν ακόμα μεγαλύτερη ολκιμότητα και επιπλέον πλεονεκτήματα όπως καλύτερη συμπεριφορά στις συγκολλήσεις, μηχανικά χαρακτηριστικά που οφείλονται στη χημική του σύνθεση και δεν επηρεάζονται μετά από πυρκαγιά και παρουσιάζει υψηλότερη ανθεκτικότητα στη διάβρωση σε σχέση με το χάλυβα θερμικής κατεργασίας (ΕΛΟΤ 1421, 2004, ΕΛΟΤ 971, 1996).

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος **κατηγορίας S500s** έχουν δύο σειρές παράλληλων πλάγιων νευρώσεων ομοιόμορφα κατανεμημένων στην περιφέρεια του προϊόντος και σε ίσες αποστάσεις καθ' όλο το μήκος κάθε σειράς. Μέσω των νευρώσεων αυτών επιτυγχάνεται η συνάφεια του χάλυβα με το σκυρόδεμα. Μπορούν να υπάρχουν και διαμήκεις νευρώσεις, χωρίς όμως να είναι υποχρεωτικό.

1.5.4 Δομικό Πλέγμα S500

Αντιστοιχεί στον παλαιό χάλυβα St1b και έχει χαρακτηριστική τιμή ορίου διαρροής 500MPa. Η επιφάνεια του είναι λεία ή με νευρώσεις και οφείλει την αντοχή του σε ψυχρή κατεργασία. Κυκλοφορεί σε μορφή εσχάρας (πλέγματος) ράβδων μικρής συνήθους διαμέτρου Φ4-Φ12 (αυξανόμενες διαμέτροι ανά 0,5mm), σε διαστάσεις 2,15x5,00m, ορθογωνικής ή τετραγωνικής

διατομής. Τα πλέγματα συνηθίζονται να χρησιμοποιούνται σε επιφανειακά στοιχεία όπως τοιχία, πλάκες, προκατασκευασμένοι σωλήνες, δάπεδα, δεξαμενές, μανδύες ενίσχυσης κ.λ.π. Παρά το μεγαλύτερο κόστος υλικού, τα πλέγματα επιτρέπουν οικονομία λόγω της μείωσης των εργατικών τοποθέτησης.

1.6 Διάβρωση οπλισμού

Ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος πρέπει να προστατεύεται από τη διάβρωση, τόσο πριν από την ενσωμάτωσή του στο σκυρόδεμα όσο και μετά από αυτήν.

Κατά την αποθήκευσή τους, πριν την ενσωμάτωσή τους στο σκυρόδεμα, οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος θα ταξινομούνται ανάλογα με την κατηγορία ποιότητας και την προέλευση (προμηθευτής, χώρα). Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να είναι δυνατή η ευχερής επιτόπου επαλήθευση της ταυτότητας των προϊόντων. Κατά την αποθήκευσή τους οι χάλυβες πρέπει να προστατεύονται από διάβρωση, μηχανικές φθορές, βλάβες ή πληγές και από οτιδήποτε θα μπορούσε να επηρεάσει τη συνάφειά τους με το σκυρόδεμα και γενικότερα να αλλοιώσει τα χαρακτηριστικά τους.

Για την αποφυγή διάβρωσης κατά την αποθήκευση των χάλυβων, θα λαμβάνονται τουλάχιστον τα εξής προστατευτικά μέτρα:

- Τοποθέτηση πάνω σε κατάλληλα υποστηρίγματα ή υποθέματα.
- Εξασφάλιση αποστράγγισης του χώρου.
- Αποφυγή επαφής με νερό και χώμα.
- Κατάλληλος προγραμματισμός προμήθειας, διάθεσης, διαμόρφωσης και τοποθέτησης του χάλυβα, έτσι ώστε, να παραμένει, τόσο στον αποθηκευτικό χώρο όσο και στο εργοτάξιο, το ελάχιστο δυνατό χρονικό διάστημα.

Εν συνεχεία, κατά την τοποθέτηση στην τελική θέση, ο χάλυβας πρέπει να είναι απαλλαγμένος από εμφανείς απολεπίσεις, αλλοιώσεις ή αθέλητες παραμορφώσεις και πληγές, οι οποίες εκτός των άλλων επιταχύνουν το φαινόμενο της διάβρωσης. Όσον αφορά την προστασία του χάλυβα από τη διάβρωση μετά την ενσωμάτωσή του στο σκυρόδεμα, αυτή γενικώς καλύπτεται από την παθητική προστασία που του προσδίδει το αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος (όσο το pH είναι μεγαλύτερο από 9,5) και από την επικάλυψη στεγανότητας του σκυροδέματος.

Σε ειδικές περιπτώσεις, για τις οποίες απαιτείται μεγαλύτερη προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση μέσα στο σκυρόδεμα, είτε επειδή υπάρχει έντονα διαβρωτικό περιβάλλον, είτε διότι απαιτείται μεγαλύτερη από τη συνήθη διάρκεια ζωής του έργου, μπορεί να λαμβάνονται κατά περίπτωση πρόσθετα μέτρα όπως:

- Αύξηση της περιεκτικότητας του σκυροδέματος σε τσιμέντο ή χρήση ειδικών τσιμέντων.
- Χρήση σκυροδέματος μειωμένου πορώδους ή υδατοπερατότητας.
- Αύξηση του πάχους της επικάλυψης των οπλισμών με σκυρόδεμα.
- Χρήση χάλυβων ανθεκτικότερων στη διάβρωση όπως, οι επιψευδαργυρωμένοι (γαλβανισμένοι), οι καλυμμένοι με εποξικό επίστρωμα, οι καλυμμένοι με επίστρωμα ανοξειδωτού χαρακτήρα και οι ανοξειδωτοί χάλυβες.
- Χρήση επιχρισμάτων καταλλήλου πάχους.

Η ύπαρξη οξειδίων του σιδήρου στην επιφάνεια του χάλυβα, σε μικρές μεν ποσότητες βελτιώνει τη συνάφεια μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος, αλλά από μια ποσότητα και επάνω τη μειώνει. Θεωρείται βλαπτική εκείνη η ποσότητα οξειδίων του σιδήρου η οποία δεν μπορεί να αφομοιωθεί από το νωπό σκυρόδεμα μέσω της μετατροπής των οξειδίων σε φερριτική φάση (C₄AF). Η ποσότητα αυτή εξαρτάται από την σύσταση του τσιμέντου, και ιδίως από την περιεκτικότητα σε C₃A, καθώς και από το πορώδες του σκυροδέματος. Με βάση θεωρητικούς υπολογισμούς, η ποσότητα οξειδίων του σιδήρου που μπορούν να αντιδρούν με αμιγές τσιμέντο πόρτλαντ, κατά την παραπάνω διαδικασία, ανέρχονται σε 350g/m² (ή πάχος οξειδίων σιδήρου της τάξης των 150μm). Για τα συνήθη τσιμέντα (CEM II) οι τιμές είναι μικρότερες, της τάξης των 300g/m² (KTX-2008).

Το σκυρόδεμα προστατεύει το σιδηρό οπλισμό από τη διάβρωση μέσω της αλκαλικότητάς του. Εξαιτίας των υψηλών τιμών του pH, σχηματίζεται πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα ένα λεπτό προστατευτικό στρώμα από σταθερά οξείδια του σιδήρου, τα οποία εμποδίζουν την ανάπτυξη της σκουριάς. Όταν αυτό το προστατευτικό στρώμα των σταθερών ενώσεων του σιδήρου καταστραφεί, υπό την επίδραση ισχυρού διαβρωτικού περιβάλλοντος, εμφανίζεται το φαινόμενο της διάβρωσης (σκουριά).

Η διάβρωση του οπλισμού προκαλεί αύξηση του όγκου του με αποτέλεσμα τη δημιουργία εσωτερικών τάσεων και ρηγματώσεων στο σκυρόδεμα, που οδηγούν τελικά στην αποφλοίωσή του.

Η βλάβη που δημιουργείται:

- Θέτει σε κίνδυνο τη στατική επάρκεια του δομικού στοιχείου.
- Δημιουργεί κατάλληλες συνθήκες για την περαιτέρω διάβρωση και του υπόλοιπου οπλισμού.
- Μειώνει την πυραντίσταση του δομικού στοιχείου.
- Δημιουργεί πρόβλημα στην αισθητική εμφάνιση του στοιχείου.

Η ύπαρξη προϊόντων διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού επηρεάζει την ταχύτητα της περαιτέρω διάβρωσης και τη συνάφεια μεταξύ του οπλισμού και του σκυροδέματος.

1.7 Γενικά περί κονιαμάτων

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 κονιάς, που συνίσταται στη μεταβολή του ιξώδους της και στη μετάπτωση από μια ημίρρευστη 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 SiO_2 , Fe_2O_3 και Al_2O_3 , τα οποία ονομάζονται υδραυλικοί συντελεστές, στη χημική σύσταση των υδραυλικών κονιών (Κορωναίος Α., 2006).

1.7.1 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 Kg/cm^2 περίπου (ασβεστο-τσιμεντοκονίαμα κ.λ.π.)

γ) υψηλής αντοχής, δηλαδή κονιάματα με αντοχή 100 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.

1.7.2 Παρασκευή, δόμηση, 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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

2.1 Γενικά

Η αλληλεπίδραση των υλικών με το περιβάλλον σταδιακά φθείρει τα υλικά και μειώνει την χρησιμότητά τους. Η αυξητική τάση στη χρήση των μετάλλων/κραμάτων σε πολλούς τομείς της τεχνολογίας, ακόμα και για ειδικές εφαρμογές, απαιτεί τον ιδιαίτερο σχεδιασμό τους ώστε να παρέχουν συγκεκριμένες ιδιότητες, με έμφαση στη προστασία τους από τη φθορά. Στα μέταλλα υπάρχει πραγματική απώλεια υλικού είτε από διάλυση (διάβρωση) είτε με το σχηματισμό φλοιού ή υμενίου από αμέταλλο (οξειδωση). Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των μετάλλων είναι πολλοί γι' αυτό και το φαινόμενο της διάβρωσης είναι πολύπλοκο και συχνά μη προβλέψιμο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συστηματική, επιστημονική έρευνα δεν έχει μακρά ιστορία, η δε κάλυψη από Κανονισμούς και Προδιαγραφές είναι από ελάχιστη έως ανύπαρκτη.

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., 2008).

Ένας άλλος ορισμός της διάβρωσης, όπως δίνεται από το ISO 8044 – 86 είναι:

«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» (ISO 8044 – 86, 1999).

Ένας άλλος πληρέστερος ορισμός της διάβρωσης όπως δίνεται από την «Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Διάβρωσης» της «Διεθνούς Επιτροπής Θαλάσσιας Διάβρωσης και Ρύπανσης των Υφάλων» είναι ο παρακάτω:

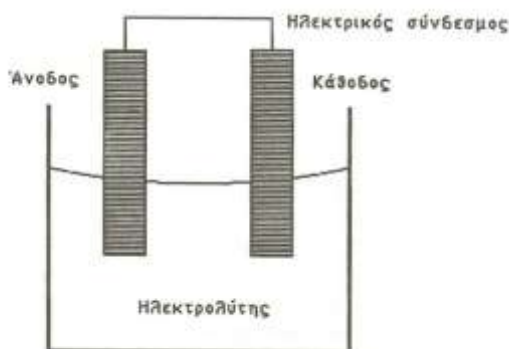
«Διάβρωση λέγεται η αυθόρμητη, κατά επέκταση εκβιασμένη, ηλεκτροχημικής κατά επέκταση χημικής, κατά επέκταση μηχανικής κατά επέκταση βιολογικής φύσης, αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων και των κραμάτων, που οδηγεί σε απώλεια υλικού» (Θ.Ν. Σκουλικίδης, 2000).

Με την γνώση των τύπων και την κατανόηση των μηχανισμών και των αιτιών της διάβρωσης, είναι δυνατόν να ληφθούν μέτρα πρόληψης. Για παράδειγμα μπορούμε να αλλάξουμε τη φύση του περιβάλλοντος, να επιλέξουμε ένα σχετικά μη δραστικό υλικό ή να προστατέψουμε το υλικό με εφαρμογή προστατευτικού αντιδιαβρωτικού φιλμ.

Θα πρέπει επίσης να διευκρινιστεί ότι ως απώλεια υλικού συνέπεια της διάβρωσης δεν σημαίνει πάντα ότι το βάρος του σώματος μικραίνει. Αντίθετα υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο σχηματισμός στην επιφάνεια ενώσεων με έντονη πρόσφυση σε αυτή, έχει ως συνέπεια την αύξηση του βάρους του υλικού. Ως απώλεια υλικού εννοείται η απώλεια ως προς την αρχική του μορφή. Στην περίπτωση του σιδήρου, όταν ποσό αυτού μετατρέπεται εξαιτίας της διάβρωσης, σε οξείδιο, η μορφή, που σε αυτή βρίσκεται ο σίδηρος στο οξείδιο, δεν είναι η αρχική μεταλλική μορφή του και θεωρείται το ποσό αυτό του σιδήρου ως απώλεια υλικού (Θ.Ν. Σκουλικίδης, 2000).

2.2 Διάταξη ενός διαβρωτικού συστήματος

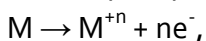
Οι αντιδράσεις που εμφανίζονται κατά τη διάβρωση είναι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις γιατί εμπεριέχουν μεταφορά φορτίου στη διεπιφάνεια μεταξύ ηλεκτρονικού αγωγού (μέταλλο) και ενός ιοντικού αγωγού (ηλεκτρολύτης), που συνεπάγεται την οξείδωση του μετάλλου (M) και την αναγωγή του οξειδωτικού O_x . Το φαινόμενο της διάβρωσης σε υγρό περιβάλλον μπορεί να παρασταθεί από μια διάταξη ενός υγρού ηλεκτροχημικού στοιχείου που αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη: την άνοδο, την κάθοδο, τον ηλεκτρολύτη και τον ηλεκτρικό σύνδεσμο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Ένα ηλεκτρολυτικό στοιχείο

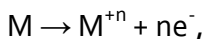
Στην άνοδο έχουμε την οξείδωση του μετάλλου, όπου τα αρχικώς ηλεκτροουδέτερα άτομα του μετάλλου χάνουν ηλεκτρόνια μετατρέπονται σε μεταλλικά ιόντα. Τα ιόντα αυτά μπορεί είτε να παραμένουν εν διαλύσει εντός της ανόδου του ηλεκτροχημικού στοιχείου ή να αντιδρούν και να σχηματίζουν αδιάλυτα προϊόντα.

Η αντίδραση οξείδωσης του μετάλλου έχει την μορφή:



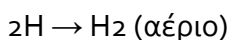
όπου n ο αριθμός των ηλεκτρονίων που χάνει κάθε άτομο και εξαρτάται από την κατάσταση της οξείδωσης του μετάλλου.

Στην κάθοδο πραγματοποιείται είτε η αναγωγή των ιόντων του μετάλλου, σύμφωνα με την αντίδραση:



είτε η αναγωγή του περιβάλλοντος. Στο σύνηθες διαβρωτικό περιβάλλον των υδατικών ηλεκτρολυτικών διαλυμάτων, 2 διαφορετικές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μπορούν να συμβούν στην κάθοδο, ανάλογα με το pH του διαλύματος.

Για $pH < 7$: $H^{+} + e \rightarrow H$ (άτομο)

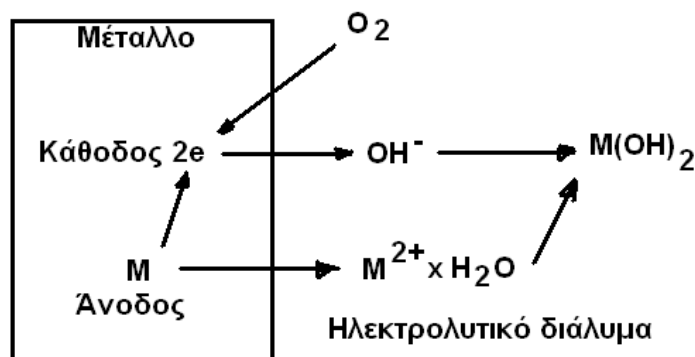


Για $pH > 7$, παρουσία διαλυμένου O_2 : $2H_2O + O_2 \rightarrow 4OH^{-}$

Οι ηλεκτρολύτες είναι τα διάφορα διαλύματα ή τήγματα που παρουσιάζουν την ικανότητα να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δύο δράσεις, αυτή της ανοδικής

οξειδωσης που παράγει ηλεκτρόνια μέσα στο μέταλλο και της αναγωγής που καταναλώνει αυτά τα ηλεκτρόνια έχουν σαν αποτέλεσμα την διάβρωση.

Στο σχήμα 2.2 φαίνονται οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην άνοδο και στην κάθοδο κατά την διαδικασία της υγρής διάβρωσης ενός δισθενούς μετάλλου.



Σχήμα 2.2 Άνοδοι και κάθοδοι στη διαδικασία της υγρής διάβρωσης ενός δισθενούς μετάλλου.

2.3 Μορφές διάβρωσης

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 (P. R. Roserge, 1992).

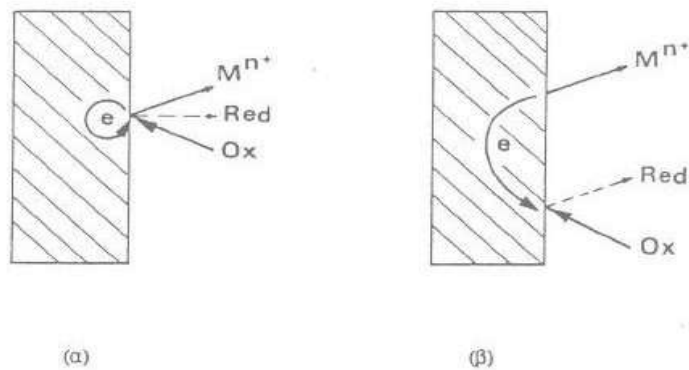
2.3.1 Ομοιόμορφη και εντοπισμένη διάβρωση

Στην πράξη οι ταυτόχρονα εμφανιζόμενες ανοδικές και καθοδικές δράσεις κατά τη διάβρωση είναι δυνατό να κατανέμονται στο σύνολο της επιφάνειας της υπό εξέταση κατασκευής κατά τρόπο τυχαίο και όχι μεταξύ τους σαφώς διαφοροποιούμενο, οπότε οι ανοδικές και οι καθοδικές επιφάνειες θα είναι ίσες. Επομένως σε συνθήκες ισορροπίας το συνολικό ρεύμα θα είναι μηδενικό. Αυτό το είδος διάβρωσης ονομάζεται ομοιόμορφη διάβρωση και είναι τυπικό για καθαρά μέταλλα. Είναι το πιο κοινό είδος διάβρωσης. Και όπως ήδη αναφέραμε παραπάνω χαρακτηρίζεται από χημική ή ηλεκτροχημική δράση που προχωράει ομοιόμορφα στο σύνολο ή στο μεγαλύτερο μέρος της εκτεθειμένης επιφάνειας με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός ομοιόμορφου και περίπου ισοπαχούς στρώματος ή στην ομοιόμορφη διάλυση της επιφάνειας. Εμφανίζεται συνήθως όταν το μέταλλο είναι σε επαφή με οξύ ή διάλυμα, οπότε είτε με τη μία είτε με την άλλη μορφή προκαλεί απώλεια μετάλλου που σε ορισμένες περιπτώσεις οδηγεί μέχρι την τελική καταστροφή του. Εμφανίζεται όμως και σε ξηρή ατμόσφαιρα οπότε το προϊόν της διάβρωσης μπορεί να είναι είτε προστατευτικό είτε όχι.

Από τεχνικής πλευράς το είδος αυτό της διάβρωσης είναι μάλλον από τα απλούστερα γιατί ο χρόνος ζωής των εγκαταστάσεων μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια με σχετικά απλές δοκιμές.

Αντιμετωπίζεται με (1) κατάλληλη επιλογή υλικών (2) προστατευτικά επιστρώματα, (3) χρήση αναστολέων ή αλλαγή περιβάλλοντος (4) ανοδική προστασία (5) καθοδική προστασία (N. Κουλουμπή, 2000, M. G. Fontana, 1986).

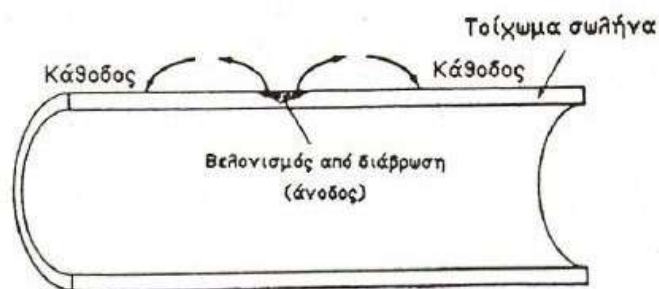
Αν οι αντιδράσεις οξείδωσης και αναγωγής είναι διαχωρισμένες τοπικά, δηλαδή είναι ευδιάκριτες οι ανοδικές και οι καθοδικές περιοχές, τότε πρόκειται για εντοπισμένη διάβρωση και το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρει ηλεκτρόνια από τις ανοδικές περιοχές (οξείδωση) στις καθοδικές (αναγωγή), σχήμα 2.3. Το είδος αυτό είναι τυπικό για μέταλλα τεχνικής καθαρότητας τα οποία εμφανίζουν χαμηλή σταθερότητα σε σύγκριση με άλλα μέταλλα, λόγω των προσμίξεων, ακαθαρσιών ή ετερογενειών που εμπεριέχουν (N. Κουλουμπή, 1999).



Σχήμα 2.3 Τύποι διάβρωσης α) ομοιόμορφη, β) εντοπισμένη

2.3.2 Διάβρωση κατά βελονισμό (pitting corrosion)

Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται εκλεκτικός τοπικός σχηματισμός προϊόντος διάβρωσης ακόμα και όταν το μέταλλο ή κράμα έχει καλυφθεί με προστατευτικό επίστρωμα ή εκλεκτική τοπική διάλυση της επιφάνειας. Έστω και αν η διάβρωση έχει σαν αρχικό στάδιο τον εκλεκτικό τοπικό σχηματισμό προϊόντος διάβρωσης, εξελίσσεται σε τοπική εκλεκτική διάλυση δηλαδή τελικά οδηγεί στον σχηματισμό εσοχών και κρατήρων. Το είδος αυτό της διάβρωσης είναι ένα από τα πιο καταστρεπτικά είδη γιατί προκαλεί καταστροφή των υλικών λόγω διάρτησης ακόμα και για πολύ μικρό ποσοστό απώλειας βάρους. Είναι δύσκολο να διακρίνουμε τους βελονισμούς είτε λόγω του μικρού τους μεγέθους είτε γιατί συχνά καλύπτονται από προϊόντα διάβρωσης.



Σχήμα 2.4 Διάβρωση με βελονισμό.

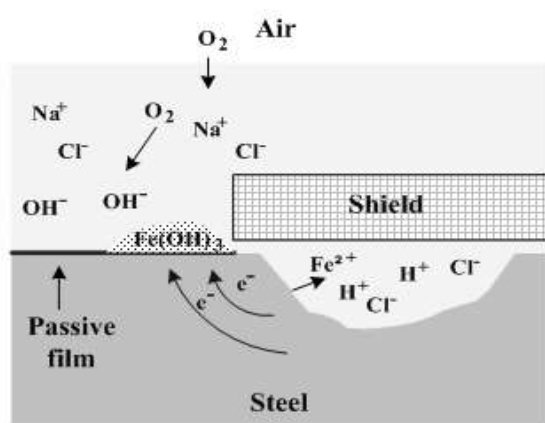
Επιπρόσθετα είναι δύσκολο να μετρηθεί ποσοτικά η έκταση της διάβρωσης με βελονισμό και να συγκριθεί με ανάλογες περιπτώσεις λόγω του μεταβαλλόμενου βάθους και αριθμού βελονισμών που εμφανίζονται σε πανομοιότυπες συνθήκες. Συνήθως, οι βελονισμοί εμφανίζονται πρώτα στις οριζόντιες επιφάνειες, απαιτούν μεγάλο χρόνο επώασης πριν γίνουν ορατοί, αλλά αφού ξεκινήσουν διεισδύουν στο μέταλλο με μεγάλη ταχύτητα υποσκάπτοντας το.

Τα περισσότερα ευπαθή μέταλλα ή κράματα σε αυτό το είδος της διάβρωσης είναι αυτά που σχηματίζουν προστατευτικό οξειδίο στην επιφάνεια τους όπως ο χαλκός, ο ανοξείδωτος χάλυβας, το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το μαγνήσιο. Μπορεί όμως να εμφανιστεί και στον κοινό χάλυβα, το σίδηρο, το μόλυβδο και πολλά άλλα μέταλλα. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι παρόλο που η γενική διάβρωση του κοινού χάλυβα είναι πολύ μεγαλύτερη από του ανοξείδωτου, οι κοινοί χάλυβες είναι πιο ανθεκτικοί σε διάβρωση με βελονισμούς από τους ανοξείδωτους. Η αντοχή όμως των τελευταίων μπορεί να βελτιωθεί ανάλογα με το συγκεκριμένο σύστημα με διάφορες μηχανικές και μεταλλουργικές διεργασίες. Το ίδιο επιτυγχάνεται με κραματοποίηση (D.A. Jones, 1992).

2.3.3 Μικρορρηγματώδης διάβρωση (crevice corrosion)

Είναι ανάλογη με τη διάβρωση κατά βελονισμό. Η διαφορά είναι ότι αρχίζει σε μικρορρηγμές και μικροκοιλότητες στην επιφάνεια του χάλυβα και όχι σε «υγιή» επιφάνεια.

Το φαινόμενο της διάβρωσης είναι πολύ έντονο λόγω του ότι οι ανοδικές και καθοδικές ζώνες βρίσκονται σε περιορισμένα τμήματα της μεταλλικής επιφάνειας. Αυτό μπορεί να προκύψει στην περίπτωση που γεωμετρικοί παράγοντες ελέγχουν την ευκινησία ενός ή περισσοτέρων από τα συστατικά του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Μία σχισμή ή μια προφυλαγμένη περιοχή μεταλλικής επιφάνειας μπορεί να προκαλέσει συχνά έντονη εντοπισμένη διάβρωση εξαιτίας εμφάνισης διαφορετικής συγκέντρωσης μέσα και έξω από αυτή. Εμφανίζεται όταν υπάρχουν μικροί όγκοι στάσιμων διαλυμάτων ή στερεών σε οπές, κάτω από φλάντζες ή παρεμβύσματα, από συγκολλήσεις με υπέρθεση, επιφανειακές αποθέσεις, σε σχισμές κάτω από μπουλόνια και πριτσίνια και κάτω από επιφανειακά χρώματα που έχουν υποστεί μερική αποκόλληση κ.α., σχήμα 2.5.

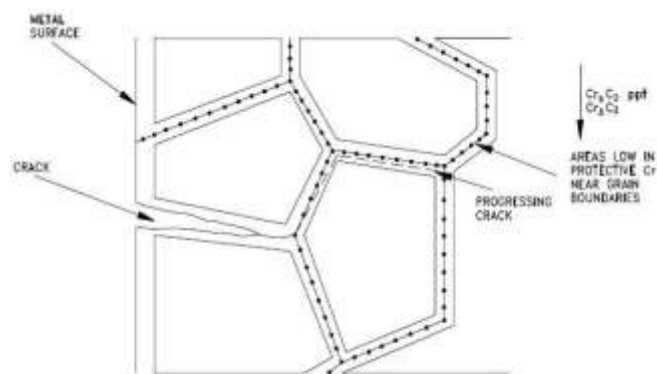


Σχήμα 2.5 Διάβρωση με σχισμές

Επειδή η διάχυση του οξυγόνου σε μια χαραγή είναι περιορισμένη υπάρχει τάση να δημιουργηθεί ένα κελί διαφορικού αερισμού μεταξύ του μικροπεριβάλλοντος της χαραγής και της εξωτερικής επιφάνειας. Αυτή η ανοδική ανισορροπία μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία έντονα διαβρωτικών συνθηκών στην περιοχή της σχισμής, συντελώντας σε περαιτέρω διάλυση του μετάλλου (Δ. Κ. Υφαντής, 2000).

2.3.4 Περικρυσταλλική διάβρωση (intergranular corrosion)

Εμφανίζεται μέσα στο μέταλλο και όχι στην επιφάνεια του. Συμβαίνει κυρίως σε κράματα και υπάρχει διαφορά δυναμικού. Με μικρές ποσότητες άνθρακα (μικρότερη από 0.05%) η διάβρωση αυτή αποφεύγεται. Η περικρυσταλλική διάβρωση είναι μία εντοπισμένη προσβολή κατά μήκος των ορίων των κόκκων ενώ το κύριο μέρος των κόκκων παραμένει ανέπαφο. Κατά τη χύτευση των μετάλλων η στερεοποίηση ξεκινά από τυχαία κατανεμημένες περιοχές με συνέπεια όταν δύο κόκκοι συναντώνται να δημιουργείται ένα ακανόνιστο περατωτικό όριο κόκκων που είναι αναβαθμισμένο ενεργειακά από τον υπόλοιπο κρύσταλλο και συχνά διαβρώνεται κατά προτίμηση. Συγχρόνως όμως ο διαχωρισμός και η συγκέντρωση ακαθαρσιών ή στοιχείων κραματοποίησης στα όρια των κόκκων είναι ένα κοινό φαινόμενο στη μεταλλουργία. Διάφορες κατακρημνίσεις που λαμβάνουν χώρα εξαιτίας διαφορετικής σύνθεσης στο σώμα του μετάλλου λόγω συγκέντρωσης ακαθαρσιών ή στοιχείων κραματοποίησης οδηγούν σε διαφορετικά δυναμικά γειτονικών κόκκων και την εμφάνιση τοπικών γαλβανικών στοιχείων και ακολούθως στην επιτάχυνση τοπικής διάβρωσης στα όρια των κόκκων. Με πρόσθετη εφαρμογή μηχανικής τάσης μπορεί να προκληθούν περικρυσταλλικές ρηγματώσεις ακόμη και σε απομακρυσμένες περιοχές από το σημείο εφαρμογής του φορτίου, σχήμα 2.6 (J. T. N. Atkinson, 1985).



Σχήμα 2.6 Περικρυσταλλική διάβρωση

2.3.5 Γαλβανική ή διμεταλλική διάβρωση (galvanic corrosion)

Είναι ηλεκτροχημική δράση η οποία εμφανίζεται μεταξύ δύο ανόμοιων μετάλλων που έρχονται σε επαφή παρουσία ενός ηλεκτρολύτη (διαβρωτικό ή αγώγιμο περιβάλλον), τότε διαβρώνεται σχεδόν αποκλειστικά το αγενέστερο μέταλλο. Κάθε μέταλλο έχει το δικό του κανονικό

δυναμικό. Όταν δύο μέταλλα έρχονται σε επαφή μεταξύ τους παρουσία μικρής ποσότητας υγρασίας σχηματίζουν ένα μικρό ηλεκτροστοιχείο διάβρωσης. Μεταξύ των δύο υλικών δημιουργείται διαφορά δυναμικού που προκαλεί ροή ηλεκτρονίων στο σύστημά τους. Αυτό προκαλεί αύξηση της ταχύτητας διάβρωσης του λιγότερου ανθεκτικού στη διάβρωση μετάλλου και την ελάττωση της ταχύτητας διάβρωσης του περισσότερο ανθεκτικού μετάλλου. Το λιγότερο ανθεκτικό (λιγότερο ευγενές) μέταλλο γίνεται άνοδος και το περισσότερο ανθεκτικό (περισσότερο ευγενές) κάθοδος. Ως βάση σύγκρισης της ανθεκτικότητας των υλικών δεν λαμβάνεται η σειρά των ηλεκτροδιακών δυναμικών αλλά σειρές που προκύπτουν από μετρήσεις δυναμικού και γαλβανικής διάβρωσης. Κίνδυνος διάβρωσης υπάρχει όταν η διαφορά δυναμικού των δύο μετάλλων είναι μεγαλύτερη από 50 mV. Η διάβρωση γίνεται ιδιαίτερα επικίνδυνη με την παρουσία χλωριούχων ή θειικών αλάτων (H.H. Uhlig, 1985).

Η φύση και το διαβρωτικό περιβάλλον προσδιορίζει σε μεγάλο βαθμό το ρυθμό διάβρωσης του συστήματος των μετάλλων. Αν και συνήθως το μέταλλο με την μικρότερη αντίσταση στο συγκεκριμένο περιβάλλον λειτουργεί ως άνοδος, ορισμένες φορές μπορεί να παρατηρηθεί αντιστροφή του φαινομένου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το σύστημα Zn-χάλυβα, όπου σε νερό πόλης και θερμοκρασία πάνω από 65 ° C το ζεύγος του διαβρωτικού συστήματος αντιστρέφεται.

2.3.6 Χημική διάβρωση

Μέταλλα τα οποία στην ηλεκτροχημική σειρά χαρακτηρίζονται με αρνητικό δυναμικό διαλύονται στα οξέα με έκλυση υδρογόνου. Το μέταλλο διαλύεται υπό μορφή ιόντων που μεταβαίνουν στο διάλυμα. Τα αποτελέσματα της χημικής διάβρωσης είναι συνήθως μια ομοιόμορφη διάλυση της επιφάνειας του μετάλλου.

2.3.7 Ηλεκτροχημική διάβρωση

Συμβαίνει όταν ένα εξωτερικά τουλάχιστον ομογενές μέταλλο ή κράμα βρίσκεται σε επαφή με το διαβρωτικό περιβάλλον. Το είδος αυτό της διάβρωσης είναι σύνηθες στην υγρή ατμόσφαιρα, στο νερό, στη θάλασσα και διαλύματα ηλεκτρολυτών.

2.3.8 Διάβρωση με μηχανισμό υδρογόνου

Στη διάβρωση του τύπου αυτού εξετάζεται με λεπτομέρεια η εξέλιξη της καθοδικής δράσης $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$.

Η βλάβη από υδρογόνο είναι η ρηγματώση του υλικού από τη ρόφηση υδρογόνου από το μέταλλο χωρίς να υπάρχει δράση διάβρωσης στην επιφάνεια. Σε αντίθεση με την κλασική διάβρωση όπου η αποσάθρωση του υλικού συμβαίνει στην άνοδο, στη βλάβη από υδρογόνο η αποσάθρωση συμβαίνει στην κάθοδο όπου εκλύεται το υδρογόνο. Διακρίνεται σε ευθραυστοποίηση από υδρογόνο και σε δημιουργία φλукταινών από υδρογόνο. Η ευθραυστοποίηση προκαλείται από διείσδυση ατομικού υδρογόνου μέσα στο μέταλλο που είτε

ροφάτε στις διαταραχές ελαττώνοντας τη δυνατότητα πλαστικής παραμόρφωσης είτε σχηματίζει εύθραυστα υδρίδια. Εάν το μέταλλο έχει κοιλότητες ή κενά ορισμένα άτομα υδρογόνου μπορούν να διαχυθούν μέσα στις ατέλειες αυτές του μετάλλου και να δημιουργήσουν μοριακό υδρογόνο. Επειδή το μοριακό υδρογόνο δεν μπορεί να διαχυθεί αυξάνεται η συγκέντρωση και η πίεση του μέσα στις κοιλότητες προκαλώντας τη δημιουργία φλукταινών από υδρογόνο και τελικά θραύση (N. Κουλουμπή, 2000).

2.3.9 Διάβρωση με μηχανισμό οξυγόνου

Η διάβρωση με μηχανισμό οξυγόνου είναι δυνατόν να παρατηρηθεί σε επιφάνεια Fe με ανίχνευση των Fe^{2+} και OH. Ερμηνεύει σε σημαντικό βαθμό την ατμοσφαιρική διάβρωση του σιδήρου.

2.3.10 Διάβρωση εξαιτίας διαφορικού αερισμού

Οι θέσεις της μεταλλικής επιφάνειας στο σύστημα διάβρωσης όπου η προσφορά οξυγόνου σε σχέση με άλλες είναι περιορισμένη, καθίστανται άνοδοι και διαβρώνονται.

2.3.11 Εκλεκτική διάβρωση

Επιτυγχάνεται σε ορισμένα πολυφασικά κράματα, όπως τα κράματα του χαλκού, όπου παρατηρείται εκλεκτική διάλυση επιμέρους συστατικών συνήθως των αγενέστερων οπότε τα ευγενέστερα συστατικά παραμένουν ως πορώδης σκελετός. Η εκλεκτική διάβρωση είναι η απομάκρυνση ενός μόνου στοιχείου από ένα κράμα. Κατά τη διαβρωτική διαδικασία διαλύεται μόνο το λιγότερο ευγενές μέταλλο ενώ το υπόλοιπο διατηρεί τη μεταλλική του μορφή αλλά με μείωση της μηχανικής αντοχής του. Η αντίσταση στη διάβρωση των κραμάτων εξαρτάται από τη σύνθεση τους και αυξάνει με αύξηση της συγκέντρωσης του ευγενέστερου συστατικού.

2.3.12 Διάβρωση υπό μηχανική τάση (stress-cracking corrosion)

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 συνδυασμένη δράση μιας τοπικής διαβρωτικής προσβολής και εσωτερικών ή εξωτερικών εφελκυστικών τάσεων αποτελεί τη διάβρωση με μηχανική καταπόνηση. Εμφανίζεται σε χάλυβες υψηλής αντοχής υπό τάσεις μεγαλύτερες από 0.8fpy. Δε δημιουργείται σκουριά και δεν παρατηρείται απώλεια της διατομής λόγω διάβρωσης. Ο μηχανισμός είναι πολύπλοκος και δεν έχει αποσαφηνισθεί πλήρως. Οφείλεται στον συνδυασμό διαβρωτικού περιβάλλοντος και στην

ανάπτυξη πρόσθετης διαφοράς δυναμικού. Η διάβρωση του χάλυβα υπό μηχανική τάση μπορεί να συνοδεύεται από ψαθυροποίηση του χάλυβα λόγω εκλύσεως υδρογόνου. Τα χλωριόντα επιταχύνουν πολύ τη διάβρωση όλων σχεδόν των χαλύβων εκτός από τους χάλυβες οι οποίοι περιέχουν μεγάλες ποσότητες νικελίου. Η ομοιόμορφη και η τοπική διάβρωση είναι οι πιο συνηθισμένες μορφές που συναντά ο πολιτικός μηχανικός στην πράξη. Επιπλέον εντοπίζονται εύκολα, καθώς είναι εύκολα ορατές. Η βασική διαφορά τους είναι πως η ομοιόμορφη διάβρωση παρουσιάζεται ομοιόμορφα κατά μήκος της ράβδου οπλισμού. Αντίθετα, η τοπική διάβρωση παρουσιάζεται σε συγκεκριμένες θέσεις.

Στην επιφάνεια τμήματος μηχανής ή εγκατάστασης μπορεί να δημιουργηθεί εσοχή από διάβρωση με βελονισμούς ή από μηχανική κάκωση. Είναι δυνατόν να επέλθει ψαθυρή θραύση ολόκληρου του τμήματος αν αυτό βρίσκεται μέσα σε διαβρωτικό περιβάλλον και καταπονείται με φορτίο έστω και μικρότερο από το 10% του ορίου θραύσης του υλικού. Τα αποτελέσματα της διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση είναι πολύ σοβαρά και επικίνδυνα γιατί ενώ το μέταλλο είναι σχεδόν απρόσβλητο στο μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειάς του, λεπτές ρωγμές προχωρούν στο εσωτερικό του. Η ρωγμή που προκαλεί τη θραύση προωθείται συνήθως κάθετα στη διεύθυνση της μηχανικής τάσης ακολουθώντας περικρυσταλλικό ή ενδοκρυσταλλικό δρόμο (N. Κουλουμπή, 2000).

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 τάση, με αποτέλεσμα να υπάρξει τελικά αστοχία.

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

Τα κυριότερα είδη διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση, είναι:

- Ρευστομηχανική διάβρωση
- Μηχανική σπηλαιώδης διάβρωση

2.3.13 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.

2.3.14 Βιολογική διάβρωση

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. Η βιολογική διάβρωση αρχίζει ή επιταχύνεται από την παρουσία μικροοργανισμών ή μακροοργανισμών. Οι οργανισμοί αναπτύσσονται στο νερό, στο έδαφος, στα φυσικά προϊόντα πετρελαίου και στα διαλύματα πλύσης μεταλλευμάτων (N. Κουλουμπή, 2000).

2.3.15 Θερμογαλβανική διάβρωση

Είναι παρόμοια προς τη γαλβανική διάβρωση. Το γαλβανικό στοιχείο δημιουργείται από θερμοκρασιακή διαφορά εξαιτίας ανομοιόμορφης θέρμανσης ή ψύξης μεταλλικών επιφανειών. Οι διαφορές προκαλούνται συνήθως από ανομοιόμορφη θέρμανση ή διασκορπισμό της θερμότητας ή απευθείας σύνδεση θαμμένων σωλήνων θερμού και ψυχρού νερού του συστήματος οικιακής ύδρευσης. Η θερμογαλβανική διάβρωση όπως και στη γαλβανική διάβρωση, προκαλεί διαφορετική πόλωση στο μέταλλο, οπότε δημιουργούνται ανοδικές και καθοδικές περιοχές που προκαλούν τοπική προσβολή (N. Κουλουμπή, 2000).

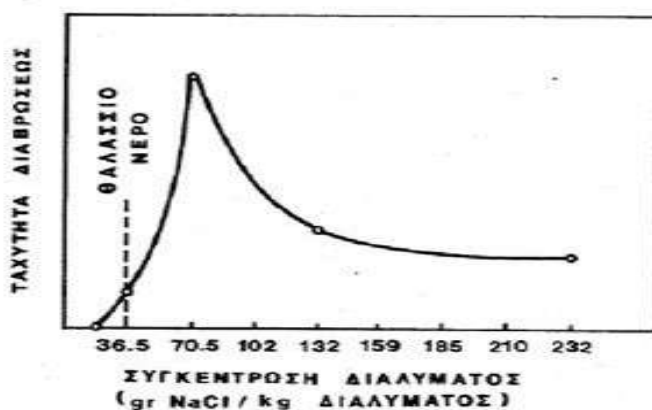
2.4 Ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα

Η ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα αυξάνεται, τόσο εντός όσο και εκτός σκυροδέματος, με:

- Την αύξηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας.
- Την μείωση του pH.
- Την αύξηση της παρουσίας αλάτων.
- Την επαφή του χάλυβα με το έδαφος ή το νερό.
- Την επαφή του χάλυβα με διαφορετικά υλικά ή περιβάλλοντα.

Οι συχνές μεταβολές των πιο πάνω παραγόντων επηρεάζουν περαιτέρω την ταχύτητα της διάβρωσης. Άλλοι παράγοντες που την επηρεάζουν όμως είναι και οι εξής:

- Η ύπαρξη ενεργών "κέντρων" στην επιφάνεια του χάλυβα (όπως για παράδειγμα οξείες αιχμές ή πληγές, κάμψεις με μικρή ακτίνα καμπυλότητας).
- Η επαφή χαλύβων διαφορετικού είδους και διαφορετικού ηλεκτροχημικού δυναμικού.
- Η επαφή χαλύβων διαφορετικού βαθμού διάβρωσης.
- Η ψυχρή κατεργασία (ολκή, έλαση).
- Το αυξημένο πορώδες του σκυροδέματος (ΚΤΧ 2008)



Σχήμα 2.7: Μεταβολή της ταχύτητας διάβρωσης σε σχέση με τη συγκέντρωση του Χλωριούχου Νατρίου

2.5 Ατμοσφαιρική διάβρωση μετάλλων

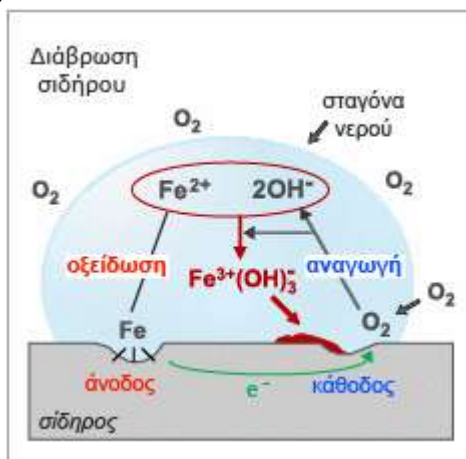
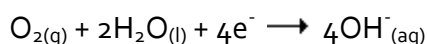
Η ατμόσφαιρα περιέχει πάντοτε ένα ποσοστό υγρασίας που συμπυκνώνεται, ιδιαίτερα όταν ο καιρός είναι υγρός, πάνω στην επιφάνεια των αντικειμένων. Κατ' αρχάς, λόγω προέλευσης το στρώμα αυτό περιέχει διαλυμένα διάφορα ατμοσφαιρικά αέρια, ανάμεσα στα οποία και οξυγόνο. Το ποσοστό του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα είναι περίπου 20% άρα η παρουσία της υγρασίας είναι αυτή που καθορίζει την έναρξη της διάβρωσης. Επιπρόσθετα η σχετική υγρασία στον ατμοσφαιρικό αέρα, χωρίς να είναι ορατή στην επιφάνεια του χάλυβα μπορεί επίσης να προκαλέσει σχηματισμό οξειδίων στον χάλυβα. Σύμφωνα με εργασίες που έχουν δημοσιευτεί, σε καθαρό αέρα με σχετική υγρασία <100% ο ρυθμός διάβρωσης του χάλυβα είναι μικρότερος από αυτόν σε ατμόσφαιρα στην οποία περιέχονται ρύποι όπως διοξείδιο του θείου. Επίσης μεγάλοι ρυθμοί διάβρωσης παρατηρούνται για σχετική υγρασία 70% η οποία ορίζεται ως κρίσιμη σχετική υγρασία (D. A. Bayliss, 2002).

Η επίδραση της υγρασίας στο ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα εξαρτάται από το χρόνο επαφής της με τη μεταλλική επιφάνεια. Γενικά η επίδραση της σχετικής υγρασίας στο ρυθμό διάβρωσης είναι πολύ πιο σημαντική από την επίδραση της βροχής, λόγω του ότι το ποσοστό της σχετικής υγρασίας 70% το οποίο χαρακτηρίζεται ως κρίσιμο για την ταχεία εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης μπορεί να διατηρείται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (K. R. Trethewey, 1995). Παρόλο που το SO₂ διαλύεται στην υγρασία προς σχηματισμό οξέων, η δράση του δεν είναι άμεση προσβολή της επιφάνειας του χάλυβα, αλλά στον σχηματισμό αλάτων όπως άλατα θειικού σιδήρου (FeSO₄). Τα θειικά άλατα χαρακτηρίζονται ως διαβρωτικά άλατα τα οποία δια μέσω μιας σειράς αντιδράσεων δημιουργούν σκουριά. Επιπρόσθετα τα θειικά άλατα έχουν υδρόφιλο χαρακτήρα (hygroscopic) έτσι μπορούν και παγιδεύουν την υγρασία στην επιφάνεια του χάλυβα. Τα θειικά άλατα παρουσιάζουν μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον στην περίπτωση των οργανικών επιστρωμάτων προστασίας σε επιφάνειες είδη οξειδωμένες (Chandler, 1968). Στην περίπτωση αυτή τα θειικά άλατα είναι ο κυριότερος παράγοντας διάρρηξης και αστοχίας των οργανικών επιστρωμάτων. Η παρουσία των ιόντων χλωρίου στην επιφάνεια του χάλυβα τυπικά συναντάται σε παραθαλάσσιες περιοχές, παρόλα αυτά έχει διαπιστωθεί ότι η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου παρουσιάζεται σχετικά υψηλή ακόμα και στην ενδοχώρα λόγω του ότι τα χλωριόντα μεταφέρονται δια μέσω του ανέμου. Η έναρξη της διάβρωσης του χάλυβα παρουσία ιόντων χλωρίου στην επιφάνεια του συμβαίνει για τιμές σχετικής υγρασίας και κάτω της κρίσιμης < 70%. Έχει βρεθεί ότι παρουσία χλωριόντων στην ατμόσφαιρα η διάβρωση του χάλυβα μπορεί να ξεκινήσει για σχετική υγρασία μικρότερη από 40% (Chandler, 1985). Γενικά όταν η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου στην ατμόσφαιρα μειώνεται συναρτήσει της απόστασης από την ακτογραμμή παρατηρείται και μείωση του ρυθμού διάβρωσης του χάλυβα. Συνθήκες έκθεσης όπου το σπρέι της θάλασσας διαβρέχει συνεχώς χαλύβδινη επιφάνεια, οδηγεί σε έντονη διάβρωση (Chandler, 1984).

Ερχόμενος σε επαφή με το διαλυμένο οξυγόνο, ο σίδηρος οξειδώνεται προς κατιόντα Fe²⁺:

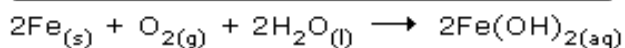
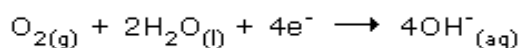
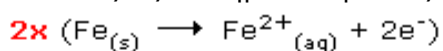


Η οξείδωση του σιδήρου γίνεται σε σημεία όπου η μεταλλική επιφάνεια παρουσιάζει ανωμαλίες και τα ηλεκτρόνια που παράγονται ανάγουν το οξυγόνο σύμφωνα με την ημιαντίδραση:

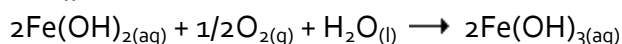


Εικόνα 2.1 Διάβρωση σιδήρου

Προσθέτοντας τις δύο ημιαντιδράσεις έχουμε το πρώτο στάδιο σχηματισμού της σκουριάς:



Στη συνέχεια, το υδροξείδιο του σιδήρου (II) οξειδώνεται από το οξυγόνο προς υδροξείδιο του σιδήρου (III):



Το τελικό προϊόν, όταν ξεραθεί, δίνει τη σκουριά. Η σκουριά είναι ένυδρο οξείδιο του σιδήρου (III): $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$. Το ποσό του νερού που περιέχει ποικίλλει, όπως υποδηλώνει το γράμμα x , και είναι αυτό που καθορίζει το χρώμα της. Η σκουριά έχει λεπιοειδή υφή και θρυμματίζεται εύκολα φέρνοντας συνεχώς στην επιφάνεια νέο μέταλλο για αντίδραση.

Η σκουριά δε σχηματίζεται συνήθως στα σημεία που οξειδώνεται ο σίδηρος, αλλά σε πολύ μικρή απόσταση από αυτά. Αυτό συμβαίνει επειδή τα ηλεκτρόνια και τα κατιόντα σιδήρου που παράγονται κατά την οξείδωση, μπορούν να μεταφερθούν, μέσω του μετάλλου και της υγρής φάσης αντίστοιχα, σε περιοχές με μεγαλύτερη συγκέντρωση οξυγόνου. Έτσι δημιουργούνται τοπικά «γαλβανικά» στοιχεία όπου ο σίδηρος αποτελεί την άνοδο, οι περιοχές με σχετικά μεγάλη συγκέντρωση οξυγόνου την κάθοδο και το υδατικό διάλυμα των ιόντων σιδήρου χρησιμεύει σαν γέφυρα άλατος.

2.6 Διάβρωση μετάλλων στο νερό

Στο νερό η διαθεσιμότητα του οξυγόνου είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, σε αντίθεση με την ατμόσφαιρα όπου η επάρκεια του είναι δεδομένη άρα σημαντικός παράγων έναρξης της διάβρωσης θεωρείται η ύπαρξη της υγρασίας. Συνεπώς η διάβρωση του χάλυβα στο νερό προϋποθέτει για την έναρξή της την επάρκεια σε διαθέσιμο οξυγόνο. Σε συνθήκες πλήρους εμβάπτισης υπάρχουν πολύ παράγοντες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, και αυτό λόγω της πολυπλοκότητας του περιβάλλοντος αλλά και των προϊόντων διάβρωσης ιόντων σιδήρου Fe και

υδροξυλίου OH που δεν παραμένουν απαραίτητα στην επιφάνεια του μετάλλου αλλά μπορούν να διαχυθούν και να αντιδράσουν με το διάλυμα.

Ο χημικός τύπος του νερού είναι H_2O , ωστόσο όμως στο νερό βρίσκονται και άλλα συστατικά όπως άλατα, στερεά και αέρια η σύσταση αυτών διαφέρει και εξαρτάται από την πηγή προέλευσης του νερού (ποταμίσιο, θαλασσινό, λιμνίσιο νερό, κλ.π.). Ακόμα και ένα καθαρά πόσιμο νερό έχει ουσιαστικά πολύπλοκη σύνθεση. Το pH του νερού συνήθως είναι ουδέτερο και κυμαίνεται στην περιοχή των 4,5 – 8,5. Ωστόσο όμως, μερικές φορές μπορεί να είναι και ελαφρώς όξινο και συνεπώς να προκαλέσει διάβρωση του χάλυβα. Γενικά, οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα και τον βαθμό διαβρωτικότητάς του είναι τα περιεχόμενα διαλυμένα στερεά (επηρεάζουν την αγωγιμότητα, σκληρότητα και το pH του νερού), τα διαλυμένα αέρια (κυρίως οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα) και τα οργανικά. Η αγωγιμότητα είναι πολύ σημαντική φυσικοχημική ιδιότητα και η παρουσία των αλάτων στο νερό όπως χλωριούχο νάτριο (NaCl) έχει την τάση να κάνει το θαλασσινό νερό πολύ πιο διαβρωτικό από ότι το γλυκό νερό (Σκουλικίδης Θ., 2000).

Η σκληρότητα είναι επίσης μια σημαντική ιδιότητα του νερού και καθορίζει την ικανότητα απόθεσης ιζημάτων στη χαλύβδινη/ μεταλλική επιφάνεια. Η σκληρότητα επηρεάζεται από το ποσοστό του διαλυμένου διοξειδίου του άνθρακα αλλά και από την παρουσία των αλάτων κυρίως του ανθρακικού ασβεστίου και όξινων ανθρακικών. Τα «σκληρά νερά» έχουν τάση για μείωση του ρυθμού διάβρωσης, ενώ τα «μαλακά νερά» μπορούν να επεξεργαστούν με ασβέστη (*lime*) έτσι ώστε να γίνουν λιγότερο διαβρωτικά. Παρόλο όμως που η δημιουργία επικαθίσεων στην επιφάνεια του μετάλλου μειώνει τον ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα, αυτό μπορεί να έχει και μειονεκτήματα ως προς τη χρήση του στην όλη κατασκευή. Για παράδειγμα οι επικαθίσεις στους μεταλλικούς αυλούς ενός εναλλάκτη θερμότητας έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της αποδοτικότητας του στην εναλλαγή της θερμότητας ενώ τελική συνέπεια των επικαθίσεων είναι η μείωση της διατομής και τελικά φραγή των αυλών.

Σε θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό η δημιουργία προστατευτικού ασβεστολιθικού φιλμ επιφανειακά του μετάλλου έχει σημαντική επίδραση στη διάβρωση. Ο σχηματισμός των ασβεστολιθικών στρωμάτων στα υποθαλάσσια τμήματα μιας μεταλλικής κατασκευής είναι ένας από τους λόγους όπου τέτοιου είδους κατασκευές προστατεύονται καθοδικά χωρίς να προαπαιτείται η εφαρμογή προστατευτικού χρώματος.

Η παρουσία οργανικών ουσιών κυρίως στο θαλασσινό και υφάλμυρο νερό έχει άμεση αλλά και έμμεση επίδραση στη διάβρωση. Η επικαθίση και προσκόλληση οργανικών ουσιών στη μεταλλική επιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή των προστατευτικών χρωμάτων στον χάλυβα. Αυτή η περίπτωση συναντάται κυρίως στα ύφαλα πλοίων και στις πλωτές κατασκευές.

Η διάβρωση του χάλυβα σε λιμνάζον νερό είναι πολύ διαφορετική από αυτήν που συναντάμε στην πράξη. Πολύ παράγοντες επιδρούν στον τύπο αλλά και στον ρυθμό της διάβρωσης, όπως η ταχύτητα ροής και η θερμοκρασία του νερού. Η ταχύτητα ροής του νερού σε συνδυασμό με τη γεωμετρία της μεταλλικής κατασκευής μπορεί να προκαλέσει πλήθος προβλημάτων διάβρωσης. Όλα τα παραπάνω είδη διάβρωσης επιδρούν στη λειτουργία της διεργασίας. Εκτός των παραπάνω μηχανικών καταπονήσεων, η ταχύτητα ροής μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα

σε μια βαμμένη μεταλλική επιφάνεια ή ακόμα και σε μια γυμνή μεταλλική επιφάνεια (τοπικά γδαρσίματα, τοπικές ανομοιογένειες) ιδίως εάν στο νερό περιέχονται στερεά σωματίδια. Επίσης επιδρά στη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου. Παρόλο που στο γλυκό νερό, μεγάλη ταχύτητα ροής παρέχει επαρκής ποσότητα οξυγόνου για τη δημιουργία ενός παθητικού στρώματος προστασίας της μεταλλικής επιφάνειας, γενικά όμως ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας ροής του νερού.

Κατά κανόνα η μορφή διάβρωσης του χάλυβα σε νερό συνήθως είναι ομοιόμορφη, παρόλα αυτά έχει παρατηρηθεί και διάβρωση με βελονισμούς η οποία είναι αποτέλεσμα της γεωμετρίας του μετάλλου, ταχύτητα ροής νερού και των επικαθίσεων στη μεταλλική επιφάνεια. Συγκεκριμένα, χάλυβες με επιφανειακή επεξεργασία όπως επιψευδαργυρωμένοι ή γαλβανιζέ χάλυβες έχουν εμφανίσει σοβαρά προβλήματα βελονισμών κυρίως σε θαλασσινό αλλά και σε υφάλμυρο νερό. Η εμφάνιση των βελονισμών στην επιφάνεια τους οφείλεται στην ανομοιογένεια της δηλαδή υπάρχουν σημεία στην επιφάνεια όπου ο χάλυβας δεν είναι επιψευδαργυρωμένος αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων που οδηγούν σε σοβαρά προβλήματα διάβρωσης.

2.7 Διάβρωση χάλυβα στο έδαφος

Διάφορα μέταλλα διαβρώνονται με διαφορετικούς τρόπους που καθορίζονται από τις ιδιότητές τους. Η διάβρωση του χάλυβα στο έδαφος είναι πολύ πιο πολύπλοκη από αυτή στο νερό, πάλι όμως είναι μια ηλεκτροχημική διεργασία και εξαρτάται από την παρουσία του ηλεκτρολύτη όπως της υγρασίας στο χώμα. Ειδικότερα ο σίδηρος και κάθε μορφή αυτού (καθαρός, σκληρός ή μαλακός χάλυβας) συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο κάτω από το έδαφος υπό παρόμοιες συνθήκες. Ακόμα, έχει παρατηρηθεί ότι ένας σιδερένιος σωλήνας θαμμένος σ' ένα στεγνό έδαφος υπόκειται σε μερική ή καθόλου διάβρωση. Το έδαφος διαφέρει ως τη διαβρωτικότητα. Γενικά υψηλής αντίστασης εδάφη δηλαδή χαμηλής αγωγιμότητας είναι ελάχιστα διαβρωτικά. Τέτοια εδάφη είναι τα ξηρά, αμμώδη και πετρώδη. Άλλωστε, εξαιτίας της βροχής, των ποταμών, κλπ. τα εδάφη είναι σπάνια στεγνά, ειδικά στα επιφανειακά στρώματα. Χαμηλής αντίστασης εδάφη όπως τα αργιλώδη, εδάφη προσχώσεων και όλα τα εδάφη που περιέχουν χλωριόντα (saline soil) είναι περισσότερο διαβρωτικά. Όλα τα εδάφη, λοιπόν, περιέχουν μια ποικιλία υλικών μερικά απ' τα οποία είναι ευδιάλυτα (στο έδαφος) σε μεγαλύτερο ή σε μικρότερο βαθμό. Ακόμα, βασικό ρόλο για τη διάβρωση στο έδαφος έχουν και τα συστατικά που περιλαμβάνει η βροχή. Για παράδειγμα, ο σίδηρος στο καθαρό νερό διαβρώνεται. Όταν όμως οξυγόνο και άλλες ουσίες υπάρχουν σε αυτό, η κατάσταση μετατρέπεται σε πιο πολύπλοκη. Ωστόσο, ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα που περιβάλλει το μέταλλο που διαβρώνεται. Το βάθος της υπόγεια στάθμης του νερού έχει καθοριστική επίδραση στη διάβρωση και στον ρυθμό της. Από το βάθος της υπόγεια στάθμης του νερού εξαρτάται εάν ο χάλυβας είναι πάνω η κάτω από αυτήν. Πιθανότητα εναλλαγές στις συνθήκες ύγρανσης και ξήρανσης του χάλυβα στο έδαφος είναι οι πλέον διαβρωτικές συνθήκες έκθεσης. Χάλυβες θαμμένοι στο έδαφος συναντώνται κυρίως στους αγωγούς μεταφοράς ρευστών και στους μεταλλικούς πυλώνες. Και στις δύο περιπτώσεις ο χάλυβας μπορεί να έρχεται σε επαφή με

διαφορετικά στρώματα τύπων χρώματος. Στην περίπτωση αυτή, η επίδραση της διαφορετικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, της περιεκτικότητας σε νερό και διαθέσιμο οξυγόνο που μπορεί να έχουν τα διαφορετικά στρώματα χρώματος οδηγούν στον σχηματισμό ηλεκτροχημικών κελιών (γαλβανικών στοιχείων) και σε σοβαρά προβλήματα διάβρωσης. Μέθοδοι υπολογισμού της διαβρωτικότητας εδάφους δίνονται σύμφωνα με το Γερμανικό κανονισμό DIN 30676 (Romanoff, 1997, Hudson, 1955).

2.8 Προστασία των μεταλλικών κατασκευών

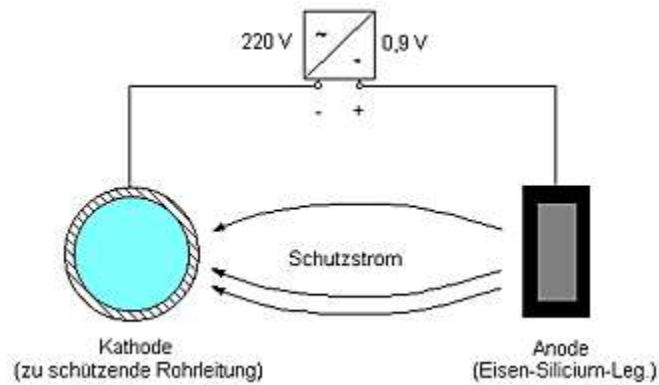
2.8.1 Καθοδική προστασία με εφαρμοζόμενο ρεύμα

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής ο θετικός πόλος μιας πηγής συνεχούς ρεύματος συνδέεται με την επιφάνεια του σκυροδέματος, και ο αρνητικός με τους οπλισμούς. Έτσι, η επιφάνεια γίνεται άνοδος και οι οπλισμοί κάθοδος. Τα ανιόντα υδροξυλίου (OH⁻) που σχηματίζονται στην κάθοδο (χάλυβας) με την αντίδραση του νερού των πόρων με το οξυγόνο και με ελεύθερα ηλεκτρόνια από την κάθοδο κινούνται προς την επιφάνεια αντί, να κατευθύνονται κατά μήκος των ράβδων.

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

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 αγωγιμής 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 2.8 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)
- Μειώνει την ολκιμότητα σε χάλυβες υψηλής αντοχής λόγω εκλύσεως υδρογόνου {για να γίνει πρέπει να έχεις αστοχία}
- Υψηλό κόστος (χρησιμοποίηση δαπανηρότερων δυναμοστατών σε διαβρωτικό περιβάλλον με μεγάλες διακυμάνσεις των ιδιοτήτων του)
- 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 άνοδου, που θα μπορεί να καταναίμει το ρεύμα καθοδικής προστασίας σε μεγάλες επιφάνειες.

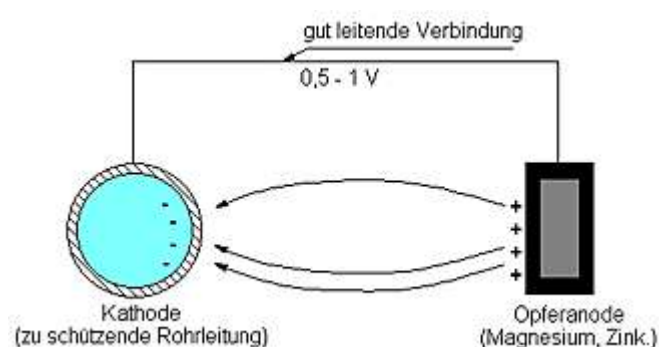
Η καθοδική προστασία με εφαρμοζόμενο ρεύμα χρησιμοποιείται πολύ περισσότερο σε σχέση με την μέθοδο θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων, ιδιαίτερα στις παρακάτω περιπτώσεις:

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

2.8.2 Καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους

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. 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.



Σχήμα 2.9 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 αγώγιμο 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).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

3.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται το φαινόμενο, έργα από οπλισμένο σκυρόδεμα κατασκευασμένα πριν από αρκετές δεκαετίες να φθάνουν στο τέλος της χρήσιμης ζωής τους, όχι επειδή κρίνονται ως λειτουργικά ανεπαρκή, ούτε γιατί κάποια εξωτερική μηχανική δράση όπως ο σεισμός ή τα φορτία χρήσης, προκάλεσε την αστοχία, αλλά εξαιτίας της φυσικής γήρανσής τους. Το πρόβλημα επομένως που καλείται ένας σύγχρονος μηχανικός να λύσει, είναι αυτό της ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος σε διάρκεια, το οποίο οφείλεται κυρίως στους μηχανισμούς διάβρωσης.

Η ανθεκτικότητα κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο.Σ) 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 επίδραση της θερμοκρασίας, η σχετική υγρασία τα χλωριόντα και άλλοι αέριοι ρύποι όπως το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 , διοξείδιο του θείου SO_2 και τα οξείδια του αζώτου 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 διάβρωση του χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα, αποτελεί ένα παγκόσμιο πρόβλημα των κατασκευών στις οποίες τα κύριο δομικό υλικό είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. Το πρόβλημα αυτό είναι δυνατόν να προκαλέσει καταστροφές οι οποίες κυμαίνονται από απλές παραμορφώσεις μέχρι ολοκληρωτικές δομικές καταστροφές.

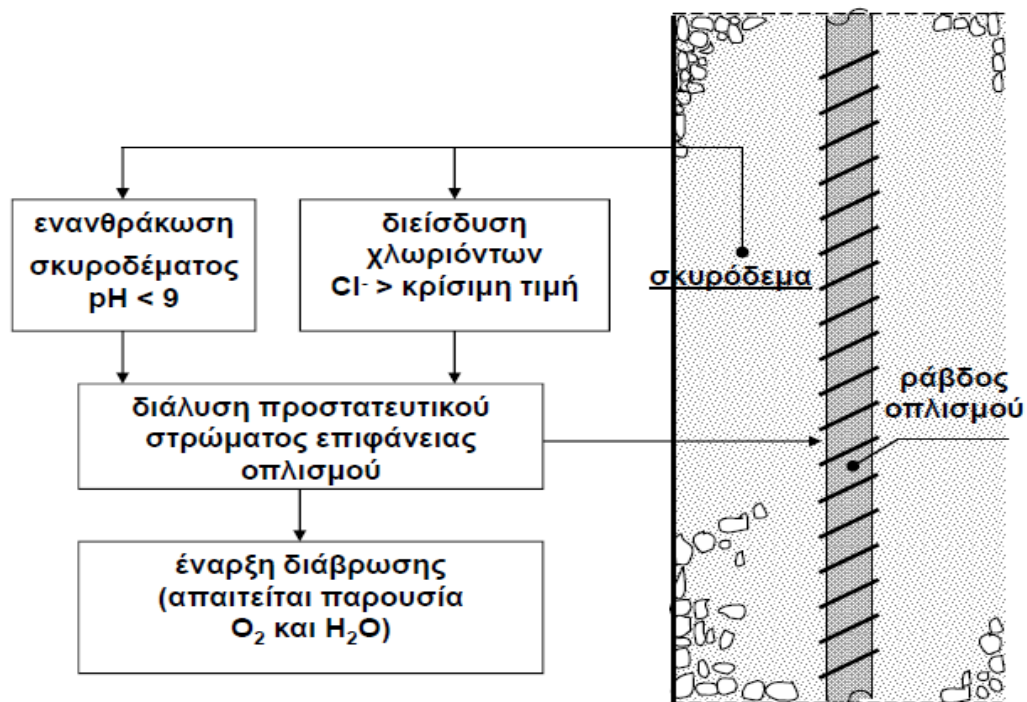
Η διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα είναι μια ηλεκτροχημική δράση που λαμβάνει χώρα όταν το σκυρόδεμα έχει μια ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω της παρουσίας υγρασίας και ηλεκτρολυτών στους πόρους του. Ιδιαίτερα στις παραθαλάσσιες περιοχές, τα υψηλά ποσοστά υγρασίας που επικρατούν, σε συνδυασμό με τις υψηλές μέσες ετήσιες θερμοκρασίες και το χλωριούχο νάτριο της θάλασσας, δημιουργούν τις δυσμενείς προϋποθέσεις για επιτάχυνση της διάβρωσης του σιδηρού οπλισμού των κατασκευών από σκυρόδεμα.

Για να πραγματοποιηθεί διάβρωση του σιδηροοπλισμού 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 σιδηροοπλισμού 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 3.1 Μηχανισμοί έναρξης διάβρωσης οπλισμού σκυροδέματος

Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το θαλασσινό νερό επηρεάζει τη διάβρωση του σκυροδέματος. Κατασκευές από σκυρόδεμα οι οποίες έρχονται σε άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό είναι γέφυρες, αποβάθρες, λιμενοβραχίονες, κριπιδότοιχοι κ.λ.π., ο μηχανισμός φθοράς λόγω θαλασσινού νερού είναι σύνθετος, συνδυάζοντας τόσο φυσικές όσο και χημικές δράσεις. Οι φθορές του σκυροδέματος που εκτίθεται σε θαλασσινό νερό μπορεί να οφείλονται σε (Μ.Δ. Κωτσοβός, 2001, Θ.Π. Τάσιος, 1992):

- Επίδραση των αλάτων (θειικών, χλωριούχων και μαγνησίου) μέσα στο θαλασσινό νερό με συνέπεια την αντίδραση αυτών με τα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου. Σε ενυδατωμένα μη οπλισμένα και χωρίς αδρανή τσιμέντα Portland τα πιο επικίνδυνα συστατικά του θαλασσινού νερού, από άποψης χημικής προσβολής των συστατικών του σκυροδέματος, είναι τα θειικά άλατα και το μαγνήσιο εφόσον η συγκέντρωσή τους υπερβαίνει τα 1500 mg/ml και 500 mg/ml, αντίστοιχα.
- Επίδραση αλκαλίων (νατρίου, καλίου) με τα αδρανή με συνέπεια την αντίδραση διόγκωσης αλκαλίων-αδρανών (αλκαλοπυριτική αντίδραση)
- Επίδραση Παγετού – Τήξεως εξαιτίας της κρυστάλλωσης αλάτων στο σκυρόδεμα λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών αλλά και διαφορών στα διάφορα μέρη της κατασκευής
- Βιολογική επίδραση με συνέπεια τον σχηματισμό βιολογικής μεμβράνης στην επιφάνεια του σκυροδέματος
- Υδροφθορά, εξαιτίας της βίαιης πρόσκρουσης του θαλασσινού νερού με την επιφάνεια του σκυροδέματος.

3.2 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⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NH₄⁺),
- 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 CO₂. 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 O₂, η δομή και η ηλεκτρική

αγωγιμότητα. Τα βακτήρια που επίσης περιέχονται στο έδαφος βοηθούν στην αναγωγή των θειικών 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.

3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση του σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα είναι ένα πορώδες υλικό με αρκετά υψηλή αλκαλικότητα. Η αλκαλικότητα του οφείλεται στο διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος το οποίο αποτελείται κυρίως από οξείδια του ασβεστίου, νατρίου και καλίου. Τα οξείδια αυτά διαλυόμενα σε νερό σχηματίζουν ενώσεις υδροξειδίων, οι οποίες είναι αλκαλικές. Είναι γνωστό ότι γενικά τα μέταλλα (εκτός του αλουμινίου) παθητικοποιούνται σε αλκαλικά διαλύματα ενώ αντίθετα διαβρώνονται/ οξειδώνονται/ διαλύονται σε όξινα διαλύματα. Κατά συνέπεια η αλκαλικότητα του σκυροδέματος οδηγεί στη δημιουργία ενός παθητικού στρώματος στην επιφάνεια του οπλισμού/ χάλυβα. Η παθητικοποίηση του χάλυβα μέσα στο σκυρόδεμα οφείλεται στη δημιουργία επιφανειακού επιστρώματος μαγνητίτη (Fe_3O_4) ή γ - Fe_2O_3 , το οποίο είναι αρκετά συνεκτικό, λεπτό με το υπόστρωμα και προστατεύει από τη διάβρωση τον χάλυβα. Η έναρξη της αποπαθητικοποίησης του χάλυβα προκαλείται από τη διάχυση ή την τριχοειδή όδευση αερίων διαβρωτικών όπως CO_2 , (ενανθράκωση) από ατμοσφαιρικά οξέα, ή υγρών που περιέχουν HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} .

Ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης εξαρτάται από εξωτερικούς παράγοντες όπως η συγκέντρωση των χλωριόντων του περιβάλλοντος, ρωγμές που παρουσιάζει η κατασκευή, πάχος επικάλυψης οπλισμών, αλλά και από άλλους παράγοντες όπως η ταχύτητα μεταφοράς των ιόντων, η δέσμευση τους ή όχι στα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου κ.α. Την αποπαθητικοποίηση του χάλυβα στο σκυρόδεμα και κατά συνέπεια την αρχή της διάβρωσης του, προκαλούν η μείωση του pH, η οποία προέρχεται από την αντίδραση του CO_2 με το $Ca(OH)_2$ στους πόρους του σκυροδέματος και προκαλεί γενικά ομοιόμορφη διάβρωση, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου προκαλεί διάβρωση με βελονισμούς.

3.3.1 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 συμπύκνωση 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 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.

3.3.2 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.

3.3.3 Η παρουσία νερού στο σκυρόδεμα

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

3.3.4 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.

3.4 Αίτια και μηχανισμοί διάβρωσης

Στη χώρα μας είναι εξαιρετικά σπάνιο το ενδεχόμενο σταδιακής αποσύνθεσης του σκυροδέματος λόγω εναλλαγών πήξεως-τήξεως του νερού των πόρων, ή λόγω προσβολής αδρανών από την αλκαλικότητα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Συνεπώς το κύριο πρόβλημα από άποψη ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος είναι η διάβρωση των οπλισμών. Οι ράβδοι οπλισμού προστατεύονται από τη διάβρωση μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου, που δημιουργείται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Το σκληρυμένο σκυρόδεμα περιέχει μεγάλο ποσοστό οξειδίου του ασβεστίου, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, στο νερό των πόρων έτσι ώστε να δημιουργείται αλκαλικό περιβάλλον με τιμή pH γύρω στο 12.5. Με αυτόν τον τρόπο προστατεύεται ο χάλυβας από τη διάβρωση εφόσον το οξείδιο παραμένει ανέπαφο. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως παθητικοποίηση του χάλυβα (Μ. Φαρδής, 2004).

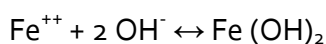
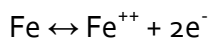
Διάβρωση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις, οι οποίες αλλάζουν τη χημική σύσταση του οπλισμού του σκυροδέματος. Παρατηρείται σημαντική μείωση της αντοχής καθώς και της λειτουργικότητάς της κατασκευής. Επιπλέον και από αισθητικής απόψεως έχουμε αρνητικές επιπτώσεις. Όλα αυτά καθιστούν απαραίτητη την προσοχή του πολιτικού μηχανικού. Οι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι πολλοί, είτε

φυσικοί (κλιματολογικές συνθήκες περιβάλλοντος, τοπογραφία), είτε εξωγενείς (κακός σχεδιασμός).

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:

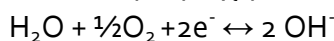
Ανοδική περιοχή



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

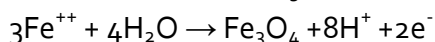
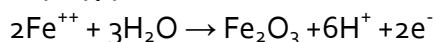


Ως κάθοδος συμπεριφέρεται εκείνη η περιοχή του χάλυβα όπου υπάρχει νερό και οξυγόνο, χωρίς να είναι απαραίτητο να έχει καταστραφεί το λεπτό στρώμα των οξειδίων. Ο ρυθμός της παραπάνω δράσης καθορίζεται από το ρυθμό διάχυσης του οξυγόνου.

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 (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) σχηματίζουν ένα συμπαγές και αδιαπέραστο στρώμα που παθητικοποιεί τον οπλισμό και τον απομονώνει από το διαβρωτικό περιβάλλον.

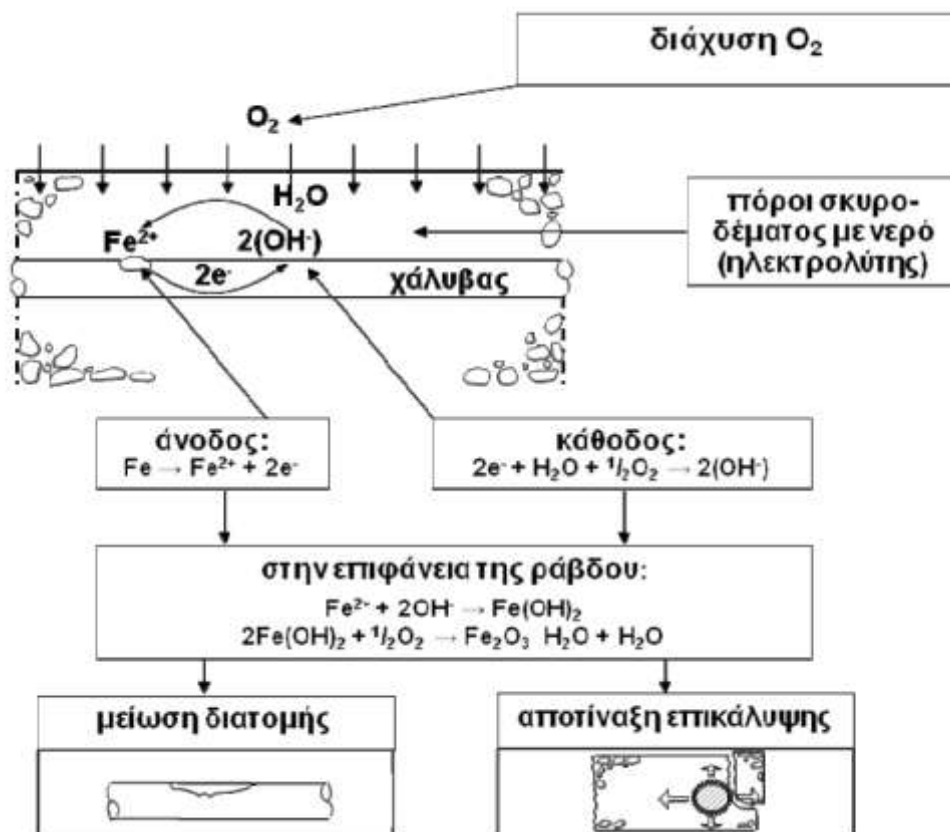
Έχει ήδη αναφερθεί ότι η τιμή του pH του υγρού των πόρων του σκυροδέματος βρίσκεται συνήθως μεταξύ 12,5 και 13,5 με αποτέλεσμα ο εγκιβωτισμένος οπλισμός να παραμένει σε παθητικοποιημένη κατάσταση. Αν το σκυρόδεμα περιέχει ρωγμές, το νερό μπορεί να εισχωρήσει, να φθάσει στην περιοχή του οπλισμού και να απομακρύνει τα 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 OH^- όμως εμποδίζεται από τις αντιδράσεις μεταξύ των ιόντων του θαλασσινού νερού και του ενυδατωμένου τσιμέντου, 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 3.2 Μηχανισμοί και αποτελέσματα διάβρωσης οπλισμού σκυροδέματος

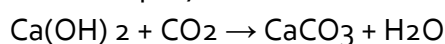
Οι τρεις βασικοί λόγοι διάβρωσης του χάλυβα είναι:

- Ενανθράκωση του σκυροδέματος
- Επίδραση χλωριόντων
- Ρωγμές

Διαδικασίες που δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, καθώς η πρώτη προκαλεί ραγδαία επιτάχυνση στη δεύτερη. Μεγάλες επιπτώσεις συναντώνται στα λιμενικά έργα, αλλά και σε κατοικίες σε παραθαλάσσιες περιοχές, αφού η παρουσία του άλατος οξύνει το πρόβλημα. Πρακτικά είναι αδύνατο να παράγουμε σκυρόδεμα που να αποτρέπει πλήρως τη διάβρωση του οπλισμού, συνεπώς είναι μία πραγματικότητα με την οποία μαθαίνουμε να ζούμε και να αντιμετωπίζουμε (Μ.ΦΑΡΔΗΣ, 2010).

3.4.1 Ενανθράκωση

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



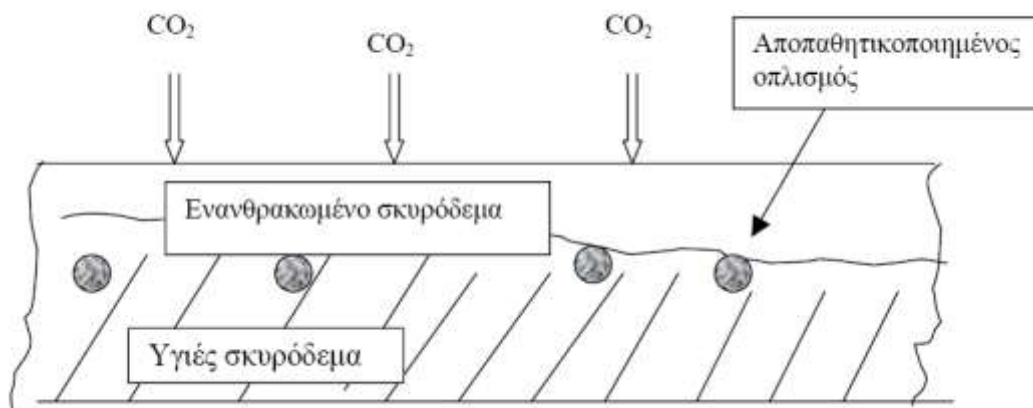
Το δημιουργημένο ανθρακικό ασβέστιο δίνει και το όνομα της ενανθράκωσης στο φαινόμενο αυτό. Η ενανθράκωση επιταχύνεται δραστικά από πόρους, φωλιές, κακοτεχνίες, ανομοιογενή κακή δόνηση κ.λ.π.. Αξιοσημείωτο είναι ότι η ενανθράκωση μένει απαρατήρητη για πολλά χρόνια. Μόνον όταν οξείδωθεί ο οπλισμός παρατηρούνται,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

Παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα ενανθράκωσης:

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

Η αντίδραση που πραγματοποιείται εξαρτάται από την σχετική υγρασία που επικρατεί στους πόρους του σκυροδέματος. Το νερό που δημιουργείται μετά την αντίδραση διαχέεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος όπως επίσης και το CO₂ μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Αποτέλεσμα είναι το pH του σκυροδέματος να μειώνεται σε τιμές κάτω του 9.5 (περίπου 8.3). Με την διαδικασία της ενανθράκωσης, ο χάλυβας αποπαθητικοποιείται οπότε πλέον η διάβρωση είναι βέβαιη.

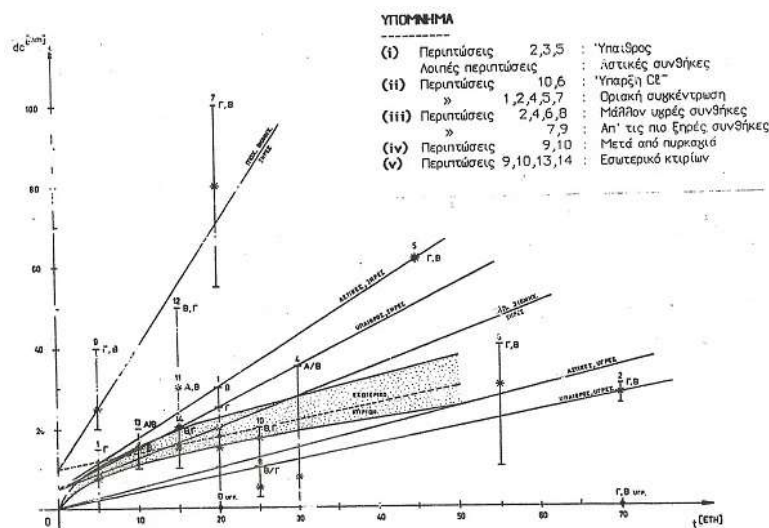
Η όλη διαδικασία γίνεται καλύτερα κατανοητή στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 Διάβρωση οπλισμού σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα

Η μείωση του pH του σκυροδέματος σε τιμές κάτω του 9.5 οφείλεται στην αντίδραση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ του νερού των πόρων (και γενικότερα του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού) με το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) της ατμόσφαιρας, που σταδιακά διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Η ύπαρξη του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ μαζί με αυτή άλλων υδροξειδίων που υπάρχουν σε μικρότερες ποσότητες εξασφαλίζουν στους οπλισμούς ένα προστατευτικό, έντονα αλκαλικό περιβάλλον ($\text{pH} \approx 12,5$). Όπως αναφέραμε παραπάνω, σ' αυτό το περιβάλλον ένα λεπτό στρώμα οξειδίων και υπεροξειδίων προστατεύει το χάλυβα από τη διάβρωση. Το στρώμα αυτό δε σταματά τη διάβρωση, αλλά περιορίζει σημαντικά τους ρυθμούς εξέλιξής της. Η μετατροπή όμως του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ σε ασβεστόλιθο με τη βοήθεια του ανθρακικού οξέος, που προκύπτει από την ένωση του CaO με H_2O , μειώνει σταδιακά την αλκαλικότητα στο περιβάλλον του οπλισμού, μέχρι να τη ρίξει σε επίπεδα που η παθητική προστασία που παρέχει το επικαλυπτικό στρώμα αναιρείται. Το pH που σηματοδοτεί αυτή τη μετάβαση είναι γύρω στο 9.5 ενώ ένα πλήρως ενανθρακωμένο σκυρόδεμα έχει $\text{pH} \approx 8$. Η ενανθράκωση δεν αποτελεί πρόβλημα για το σκυρόδεμα καθαυτό. Απεναντίας, η μετατροπή του υδροξειδίου του ασβεστίου σε ασβεστόλιθο δίνει ένα πιο πυκνό υλικό (χαμηλό πορώδες) με μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή. Τη διάβρωση του οπλισμού μπορούμε να την κατατάξουμε στις χημικές διεργασίες φθοράς και απαξίωσης του οπλισμού σκυροδέματος σε αντιδιαστολή με άλλες π.χ. μηχανικές, φυσικές, βιολογικές. Σε περιοχές μάλιστα όπου υπάρχουν και χλωριούχες ενώσεις όπως σε παραθαλάσσιες περιοχές, η συνεργιστική δράση ενανθράκωσης και χλωριόντων μπορεί να είναι καταγιστική. Η ενανθράκωση είναι το φαινόμενο εκείνο που περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο μας έκανε να συνειδητοποιήσουμε ότι το οπλισμένο σκυρόδεμα γερνάει και απαξιώνεται. Τα ποσά που ήδη δαπανώνται για τη δομική αποκατάσταση μεγάλων τεχνικών έργων – όπως γέφυρες – προκαλούν δέος. Στο άμεσο μέλλον θα εκτοξευτούν σε δυσθεώρητα ύψη για πολλά χρόνια. Η τάση αυτή θα κοπάσει όταν αρχίζουν να αποδίδουν τα μέτρα που μόλις τώρα αρχίζουν να λαμβάνονται για την καλύτερη προστασία των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (Στρογγύλης Χ., 2009).

Η ενανθράκωση εξαρτάται από την ηλικία των κατασκευών και από το περιβάλλον, ή σε κακής ποιότητας κατασκευές, αναπαλαιωμένα πέτρινα κτίρια με επεμβάσεις από οπλισμένο σκυρόδεμα χαμηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο. Σπάνια συναντώνται φαινόμενα ενανθράκωσης σε καινούργιες κατασκευές σκυροδέματος όπου η αναλογία λόγου τσιμέντο προς νερό είναι μικρή, περιεκτικότητα σκυροδέματος σε τσιμέντο όχι μικρότερη από 300 Kg τσιμέντο/m³ σκυροδέματος, καλής αναμιξιμότητας και με μεγάλο χρόνο συντήρησης του. Σε τέτοιου είδους κτίρια όπου πληρούνται οι προδιαγραφές κατασκευή σύμφωνα με τα διεθνή και ελληνικά πρότυπα τεχνολογίας σκυροδέματος η διάβρωση από ενανθράκωση ξεκινά πολύ αργότερα από τη διάβρωση από χλωριόντα για κατασκευές παραθαλάσσιες. Οι συνεχείς κύκλοι ύγρανσης/ ξήρανσης του σκυροδέματος επιταχύνουν το φαινόμενο της ενανθράκωσης, επιτρέποντας τη διόδο του διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διάρκεια του κύκλου ξήρανσης. Αυτό είναι ένα πρόβλημα όπου συχνά συναντάται σε τροπικές και ημί – τροπικές χώρες π.χ Hong – Kong, Pacific Rim (S.M.Trepanier, 2001)



Σχήμα 3.4 Βάθος ενανθρακώσεως και ηλικία των κατασκευών.

Τα τελευταία χρόνια αυξάνεται σταθερά ο αριθμός των κατασκευών από Ω.Σ. στην Ελλάδα που παρουσιάζουν φθορές και βλάβες όχι λόγω μηχανικών αλλά λόγω περιβαλλοντικών δράσεων. Έτσι, είναι πολλές οι περιπτώσεις 'αναμενόμενης' γήρανσης των παλαιών κατασκευών αλλά και πρόωρης αστοχίας νέων κατασκευών. Σε πολλές από αυτές τις περιπτώσεις απαιτούνται δομητικές (πλέον) επεμβάσεις (επισκευές και ενισχύσεις), ενώ για αρκετές άλλες κατασκευές (γέφυρες αλλά και κτήρια) επιβάλλεται η λήψη άμεσων και ριζικών μέτρων. Για την χώρα μας το κύριο, αν όχι το μόνο, πρόβλημα του Ω.Σ. από άποψη ανθεκτικότητας είναι η προσβολή του σκυροδέματος (διείσδυση CO₂ και CL⁻) και η αποπαθητικοποίηση και διάβρωση των ράβδων οπλισμού (εντοπισμένη ή και γενικευμένη) (Μ. Χρονόπουλος, Χ. Σπανός, 1991).

3.4.2 Επίδραση χλωριόντων

Τα χλωριόντα δεν έχουν αξιόλογη δυνατότητα διάβρωσης του σκυροδέματος, αλλά έχουν μεγάλη διαβρωτική ικανότητα στον οπλισμό. Η διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος από

τα χλωριόντα αποτελεί ένα φαινόμενο, που παρατηρείται πολύ συχνά στις κατασκευές. Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι, 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). Η φθορά στο σκυρόδεμα από τη διάβρωση του σιδηροπλισμού εκδηλώνεται με τη μορφή διόγκωσης, ρηγμάτωσης και θρυμματισμού της επικάλυψης του οπλισμού. Επιπροσθέτως, λόγω της απώλειας της επικάλυψης, το στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να υποστεί δομικές φθορές, λόγω απώλειας της συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος και μείωσης της διατομής του οπλισμού.

Τα χλωριόντα, που βρίσκονται στη μάζα του σκυροδέματος, μπορεί να προέρχονται είτε από τα υλικά κατασκευής του (π.χ. ανεπαρκώς κατεργασμένα αδρανή, άμμος θαλάσσης, γλυφό νερό), στα οποία βρίσκονται με τη μορφή αλάτων τους, είτε μπορεί να μεταφέρονται από το περιβάλλον στο εσωτερικό του (διείσδυση θαλασσινού νερού και διαλυμάτων αλάτων από διάλυση του πάγου). Τα χλωριόντα μπορούν, επίσης, να βρεθούν σε παραθαλάσσιες κατασκευές και στη μάζα του οδοστρώματος, όταν κατά τους χειμερινούς μήνες χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες αλατιού, για να απομακρυνθεί ο πάγος. Στην πρώτη περίπτωση τα χλωριόντα είναι σχεδόν ομοιόμορφα κατανομημένα στη μάζα του σκυροδέματος, ενώ στη δεύτερη η συγκέντρωση παρουσιάζει μια μέγιστη τιμή κοντά στην επιφάνεια και ελαττώνεται όσο το βάθος από την επιφάνεια του σκυροδέματος αυξάνει. Η μεταφορά των χλωριόντων από το περιβάλλον στο εσωτερικό του σκυροδέματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, είτε με διάχυση είτε με μεταφορά τους μέσω του νερού (J.M. Gaidis, 2001). Όταν η μεταφορά τους γίνεται με το δεύτερο τρόπο, τότε τα ποσά των μεταφερόμενων χλωριόντων είναι μεγαλύτερα συγκριτικά με εκείνα του πρώτου τρόπου. Η μεταφορά των αλάτων μέσω του νερού των πόρων ακολουθεί το δεύτερο νόμο του Fick. Σε αντίθεση με την ενανθράκωση, όπου παρατηρείται μέτωπο μεταφοράς, τα χλωριόντα παρουσιάζουν συνεχή κατανομή στη μάζα του σκυροδέματος. Η διείσδυση των χλωριόντων στη μάζα του σκυροδέματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, οι σπουδαιότεροι από τους οποίους είναι:

- Το πορώδες και η κατανομή του μεγέθους των πόρων του σκυροδέματος.
- Το είδος του χρησιμοποιηθέντος τσιμέντου.
- Η ποσότητα του νερού των πόρων του σκυροδέματος.
- Οι περιβαλλοντικές συνθήκες.

Από το σύνολο των χλωριόντων, που υπάρχουν μέσα στο σκυρόδεμα, εκείνα που συμμετέχουν ενεργά στη διάβρωση του οπλισμού του είναι αυτά που είναι δυνατόν να διαλυθούν στο νερό των πόρων του σκυροδέματος (διαλυτά ή ελεύθερα χλωριόντα) και τα οποία μπορούν να φτάσουν στην επιφάνεια του οπλισμού, όπου προκαλούν την αποπαθητικοποίησή του. Στα συνολικά χλωριόντα περιλαμβάνονται, εκτός από τα ελεύθερα (διαλυτά), κι εκείνα που συμμετέχουν στο σχηματισμό κρυσταλλικών ενώσεων στο σκυρόδεμα. Τα συνολικά χλωριόντα προσδιορίζονται με διάλυση του κονιοποιημένου σκυροδέματος σε διάλυμα HNO_3 1M. Τα ελεύθερα (διαλυτά) χλωριόντα μπορούν να προσδιοριστούν με εκχύλιση του κονιοποιημένου σκυροδέματος με διάλυμα καυστικού καλίου, αιθυλικής αλκοόλης ή με συμπίεση του σκυροδέματος, σε κατάλληλη συσκευή, για την απομάκρυνση του υγρού των

πόρων. Οι διάφοροι τρόποι και μέθοδοι μέτρησης των διαλυτών χλωριόντων, για το ίδιο δείγμα σκυροδέματος, δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα. Φαίνεται να επικρατεί η αντίληψη ότι η συμπίεση του σκυροδέματος για την απομάκρυνση του υγρού των πόρων δίνει τα πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Τα χλωριόντα, που είναι διαλυμένα στο υγρό των πόρων του σκυροδέματος, είναι δυνατόν να δεσμευθούν με φυσικό ή χημικό τρόπο. Ο φυσικός τρόπος συνίσταται στη ρόφηση τους στην επιφάνεια των πόρων του σκυροδέματος, ενώ ο χημικός στο σχηματισμό διαφόρων ενώσεων η συνηθέστερη από τις οποίες είναι το άλας του Friedel (Friedel's salt:

$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό του άλατος του Friedel διαδραματίζει η περιεκτικότητα του τσιμέντου σε C_3A . Βέβαια, η δέσμευση των χλωριόντων δεν εξαντλείται μόνο με το εν λόγω άλας, ούτε ο σχηματισμός του άλατος αυτού είναι δυνατόν να γίνει μόνο με το C_3A .

Το τσιμέντο Portland έχει τη δυνατότητα να συγκρατήσει δεσμευμένα 0.4 g Cl-/100 g τσιμέντου. Γενικά, στην πράξη έχει επικρατήσει το κριτήριο Ritzard, σύμφωνα με το οποίο ποσότητες χλωριόντων μεγαλύτερες από 0.4 g Cl-/100 g τσιμέντου μπορούν να μετατρέψουν την παθητική κατάσταση του χάλυβα στο σκυρόδεμα σε ενεργή (έστω και με υψηλή τιμή pH). Ποσότητες χλωριόντων μεγαλύτερες από 1 g Cl-/100 g τσιμέντου απαιτούν άμεση λήψη μέτρων προστασίας της κατασκευής. Άλλοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι είναι ορθότερο να εξετάζεται η τιμή του λόγου των χλωριόντων προς το pH. Βάσει αυτής της θεώρησης, κατά την παρουσία χλωριόντων και ανάλογα της αριθμητικής τιμής του λόγου $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$, το προστατευτικό στρώμα του χάλυβα μπορεί να καταστραφεί (έναρξη αποπαθητικοποίησης) ακόμη και αν οι τιμές του pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος είναι σημαντικά υψηλότερες από τις κανονικές (>12.5). Έτσι, όταν ο λόγος $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 0.6, ο χάλυβας δεν προστατεύεται επί μακρόν έναντι της διάβρωσης, πιθανώς επειδή το στρώμα οξειδίου του σιδήρου είτε γίνεται διαπερατό, είτε γίνεται ασταθές υπό αυτές τις συνθήκες (J. P. Broomfield, 1997). Για τα τυπικά μίγματα σκυροδέματος, που χρησιμοποιούνται στην πράξη, αναφέρεται ότι η περιεκτικότητα σε χλωριόντα για έναρξη της διάβρωσης πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0.6-0.9 kg Cl-/m³ σκυροδέματος.

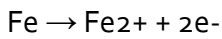
Τα τσιμέντα, που περιέχουν ποζολανικά πρόσθετα, έχουν τη δυνατότητα δέσμευσης μεγαλύτερης ποσότητας χλωριόντων σε σχέση με τα απλά τσιμέντα, ενώ, επειδή η χρησιμοποίησή τους επιφέρει μείωση του πορώδους, παρεμποδίζουν τη διείσδυση των χλωριόντων στη μάζα του σκυροδέματος. Επιπλέον, τα συγκεκριμένα τσιμέντα μπορούν να περιέχουν σημαντικά μεγαλύτερα ποσοστά χλωριόντων σε σχέση με το αμιγές τσιμέντο Portland, χωρίς τον κίνδυνο διάβρωσης του οπλισμού.

Όταν τα χλωριόντα εισέρχονται στο εσωτερικό του σκυροδέματος, τότε αυτά μπορούν να οδηγήσουν σε δυο περιπτώσεις διάβρωσης:

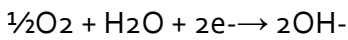
- Διάβρωση με δημιουργία τοπικού γαλβανικού στοιχείου.
- Διάβρωση με δημιουργία γαλβανικού μακροστοιχείου.

Όταν η συγκέντρωση των χλωριόντων αποκτήσει μια ορισμένη τιμή, τότε υπάρχουν αρκετά ελεύθερα χλωριόντα, τα οποία φθάνουν, λόγω διάχυσης, στην επιφάνεια του οπλισμού και προκαλούν την αποπαθητικοποίησή του. Η διάβρωση του οπλισμού παρουσία χλωριόντων

απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5 και λαμβάνει χώρα με τη λειτουργία ενός τοπικού γαλβανικού στοιχείου. Στην άνοδο πραγματοποιείται διάλυση του σιδήρου κατά την αντίδραση:

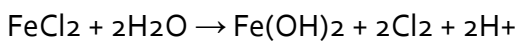
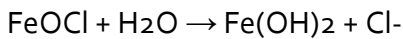


και στην κάθοδο η αντίδραση:

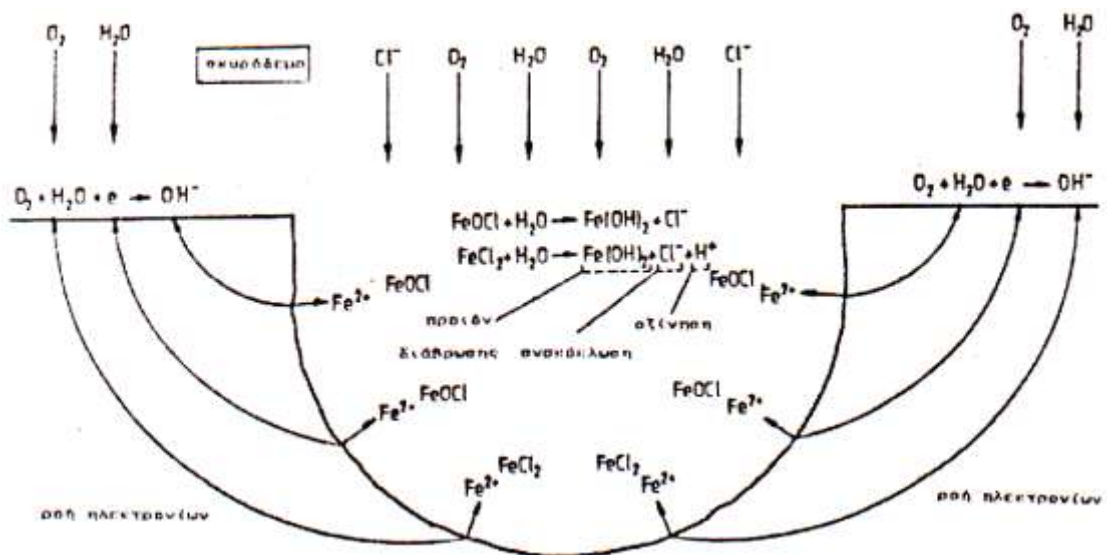


Τα ιόντα σιδήρου, που παράγονται κατά την ανοδική δράση, αντιδρούν αρχικά με τα χλωριόντα, που έχουν φθάσει στην επιφάνεια του οπλισμού, σχηματίζοντας (δι)χλωριούχο σίδηρο (FeCl_2). Στη συνέχεια ο χλωριούχος σίδηρος, παρουσία του οξυγόνου, μετατρέπεται σε χλωρίδιο του τρισθενούς σιδήρου (FeOCl – οξείδωση του σιδήρου σε τρισθενή σίδηρο).

Κατόπιν, λόγω της παρουσίας νερού, λαμβάνει χώρα υδρόλυση των προϊόντων της διάβρωσης σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Από τις παραπάνω αντιδράσεις προκύπτει ότι τα χλωριόντα, που είχαν δεσμευθεί στα προϊόντα της διάβρωσης, επιστρέφουν στο διάλυμα των πόρων, λόγω της υδρόλυσης, ενώ ταυτόχρονα γίνεται και τοπική οξίνιση του διαλύματος αυτού. Συνεπώς, είναι προφανές, ότι η δράση των χλωριόντων αποτελεί ένα αυτοκαταλυόμενο σύστημα αντιδράσεων, όταν η συγκέντρωσή τους φθάσει σε ένα ορισμένο επίπεδο. Έτσι, ακόμη και αν σταματήσει η περαιτέρω είσοδος χλωριόντων, η διάβρωση του οπλισμού δεν παρεμποδίζεται και συνεχίζεται, επειδή η συγκέντρωση των χλωριόντων στην επιφάνεια του οπλισμού παραμένει σταθερή. Η αναγκαία ροή ηλεκτρονίων πραγματοποιείται μέσω του χάλυβα, ενώ η μετακίνηση των ιόντων γίνεται μέσα στους πόρους του σκυροδέματος. Μια τέτοια περίπτωση διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως ιδιοδιάβρωση, σε αντίθεση με τη δημιουργία ενός μακροσκοπικού γαλβανικού στοιχείου, που μπορεί να δημιουργηθεί στο οπλισμένο σκυρόδεμα κατά τη διεύδυση των χλωριόντων.

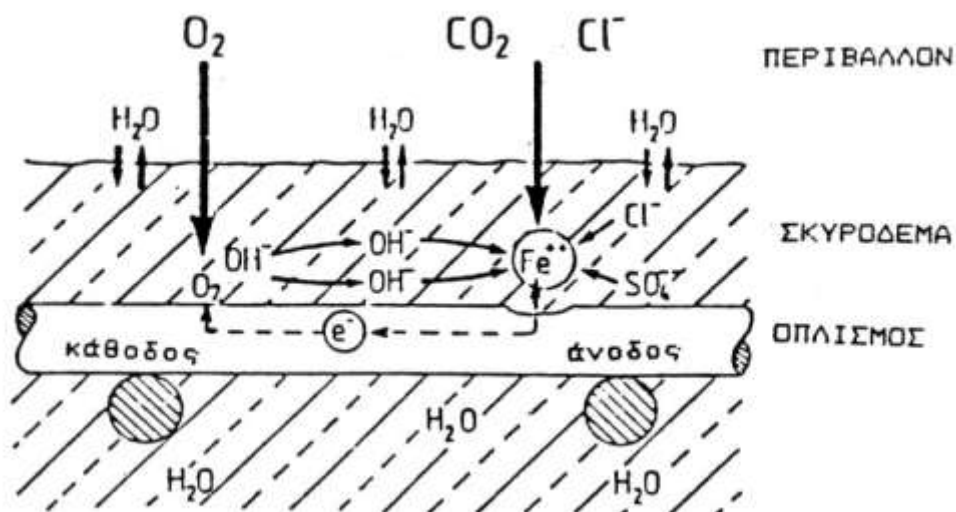


Σχήμα 3.5 Διάβρωση του οπλισμού σε σκυρόδεμα με χλωριόντα.

Στην περίπτωση του οπλισμένου σκυροδέματος, η δημιουργία μακροστοιχείων οφείλεται σε επιδράσεις του περιβάλλοντος (C.L. Page, 1991).

Η γραμμική πόλωση χρησιμοποιείται κύριος ως μέθοδος αποτίμησης της διάβρωσης από χλωριόντα. Ωστόσο η μόνη μέθοδος (καταστρεπτική) αποτίμησης του βάθους ενανθράκωσης του σκυροδέματος γίνεται δια μέσο της διάτρησης του και της συλλογής πηρύνων /καρότων από το κτίριο ή δια μέσω των δυναμικών διάβρωσης. Οι ρυθμοί διάβρωσης ενός ενανθρακωμένου σκυροδέματος σπάνια υπερβαίνουν την τιμή των $0,5\mu\text{A cm}^{-2}$, ενώ σε σκυρόδεμα διαβρωμένο από χλωριόντα οι ρυθμοί διάβρωσης υπερβαίνουν το $1\mu\text{A cm}^{-2}$ ισοδύναμο με $12,5\mu\text{m}/\text{έτος}$ απώλεια διατομής (σχήμα 2.12). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα ενανθρακωμένο σκυρόδεμα στεγνώνει και ξηραίνεται πολύ πιο εύκολα από ότι ένα μολυσμένο με χλωριόντα σκυρόδεμα. Επιπρόσθετα θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ενανθράκωση μειώνει τη μέση διάμετρο των πόρων του σκυροδέματος (Broomfield, 1994).

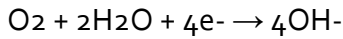
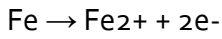
Η διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος είναι μία ηλεκτροχημική δράση, που λαμβάνει χώρα κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Η ηλεκτροχημική δράση απαιτεί την ύπαρξη ανόδου, καθόδου και ηλεκτρολύτου μέσω του οποίου διακινούνται τα ιόντα. Η διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών δράσεων πραγματοποιείται στην διεπιφάνεια μετάλλου-ηλεκτρολύτη και ακολουθεί η μετακίνηση των ιόντων μέσω του ηλεκτρολύτη. Η ανοδική και η καθοδική δράση όπως και οι συνθήκες για την πραγματοποίησή τους εμφανίζονται στο Σχήμα 3.6.



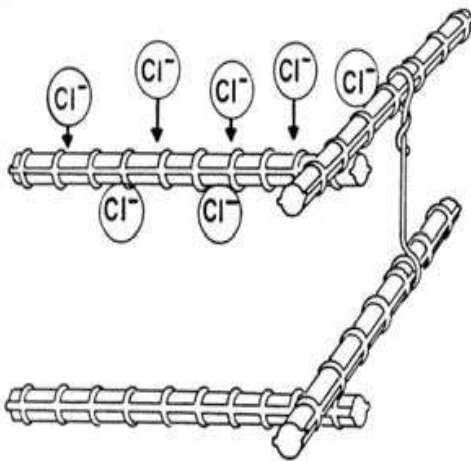
Σχήμα 3.6 Σχηματισμός γαλβανικού στοιχείου στον σιδηροοπλισμό σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την διάβρωση του οπλισμού (κατά Evans).

Στην πράξη (π.χ. σε θαλάσσιο περιβάλλον) συχνά παρουσιάζεται η περίπτωση της διείσδυσης των χλωριόντων από τη μία μόνο πλευρά της κατασκευής. Τότε είναι δυνατή η περίπτωση, που περιγράφεται στο Σχήμα 3-7. Τα χλωριόντα φτάνουν, μετά από ένα χρονικό διάστημα, στις πρώτες ράβδους του οπλισμού, ενώ αυτές που βρίσκονται προς το εσωτερικό τμήμα της κατασκευής δεν έχουν γύρω τους χλωριόντα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-7 (α). Μεταξύ των

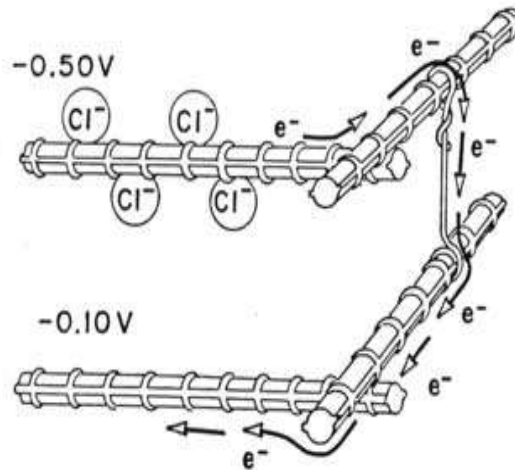
εσωτερικών και των εξωτερικών ράβδων αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού (δημιουργία μακροστοιχείου μέσω των συνδετήρων), όπως εικονίζεται στο Σχήμα 3-7 (β). Οι ράβδοι, με τη μεγάλη συγκέντρωση χλωριόντων αποτελούν την άνοδο, ενώ οι ράβδοι χωρίς χλωριόντα (ή με μικρή συγκέντρωση χλωριόντων) αποτελούν την κάθοδο του γαλβανικού στοιχείου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-7 (γ). Στο ίδιο σχήμα περιγράφονται και οι ηλεκτροχημικές δράσεις του γαλβανικού μακροστοιχείου:



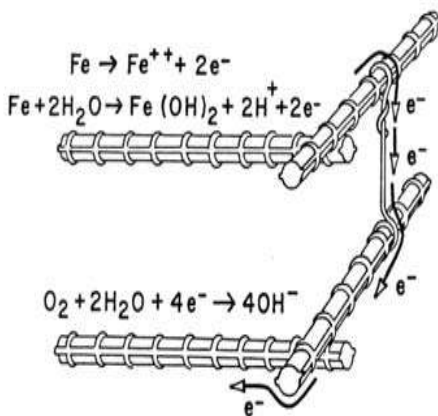
Στη συνέχεια, σχηματίζεται υδροξείδιο του σιδήρου. Μέσω των πόρων του σκυροδέματος αρχίζει η μεταφορά των ιόντων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-7 (δ). Η ταχύτητα της διάβρωσης εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος του γαλβανικού μακροστοιχείου. Η ένταση του ρεύματος, με τη σειρά της, εξαρτάται από το δυναμικό του μακροστοιχείου (δυναμικό μεταξύ ανόδου - καθόδου), από το λόγο της ανοδικής προς την καθοδική επιφάνεια και από την ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος. Η ταχύτητα διάβρωσης στην περίπτωση σχηματισμού γαλβανικού μακροστοιχείου είναι, κατά κανόνα, πολύ μεγαλύτερη από αυτήν της ιδιοδιάβρωσης (Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., 2004, Μπατής Γ., 1999, Hladky K., 1980, Κουλουμπή Ν., 1994, Read P., 1990).



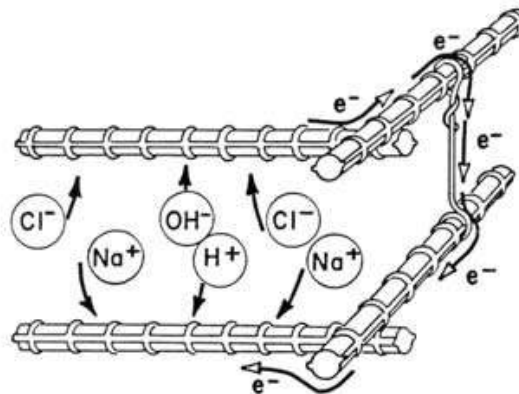
(α) Διείσδυση των χλωριόντων μέχρι τους πρώτους σπλισμούς



(β) Δημιουργία γαλβανικού μακροστοιχείου



(γ) Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις του



(δ) Μεταφορά ιόντων γαλβανικού μακροστοιχείου.

Σχήμα 3.7 Σχηματισμός μακροστοιχείου σε σκυρόδεμα με χλωριόντα

Γαλβανικά μακροστοιχεία επίσης εμφανίζονται όταν υπάρχουν:

- Περιοχές οπλισμένου σκυροδέματος αεριζόμενες δίπλα σε μη αεριζόμενες.
- Περιοχές οπλισμένου σκυροδέματος υγρές δίπλα σε στεγνές.
- Περιοχές οπλισμένου σκυροδέματος με χαμηλό pH (λόγω ενανθράκωσης) δίπλα σε περιοχές με υψηλό pH.

Η ύπαρξη και λειτουργία γαλβανικών μακροστοιχείων οδηγεί σε διάβρωση μεγάλης έκτασης και ταχύτητας που οδηγεί σε:

- Μείωση της διατομής του οπλισμού, με συνέπειες την μείωση της συνάφειας οπλισμού και σκυροδέματος και τέλος στην μείωση της στατική ικανότητα της κατασκευής.
- Δημιουργία ρωγμών λόγω του σχηματισμού οξειδίων στην επιφάνεια του οπλισμού, τα οποία με τον μεγαλύτερο του χάλυβα όγκο τους ασκούν εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα.

Όταν τα γαλβανικά μακροστοιχεία έχουν σχηματιστεί θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για την εξαφάνισή τους.

Τα χλωριόντα που μπορεί να διατρήσουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίου όταν φτάσουν μέσω του νερού των πόρων μέχρι τον οπλισμό, μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος, αν έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτά αδρανή από παραλίες ή θαλασσινό νερό μείξης (νησιωτική Ελλάδα), ή πρόσμικτα βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα, είτε από το φυσικό περιβάλλον. Η δεύτερη περίπτωση είναι πολύ συνηθισμένη σε παραθαλάσσιες περιοχές της Ελλάδας, όπου μέχρι σε μεγάλη απόσταση από την ακτή ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει χλωριούχα άλατα, ιδίως αν οι επικρατούντες άνεμοι κατευθύνονται από τη θάλασσα προς την ξηρά (Μ. Φαρδής, 2000).

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

- Μείωση της διατομής του οπλισμού, με συνέπειες στη στατική ικανότητα της κατασκευής.
- Δημιουργία ρωγμών λόγω του σχηματισμού οξειδίων στην επιφάνεια του οπλισμού, τα οποία με τον μεγαλύτερο του χάλυβα όγκο τους ασκούν εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα.

Η ταχύτητα διάβρωσης εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος του γαλβανικών μακροστοιχείου. Η ένταση του ρεύματος εξαρτάται από το δυναμικό του μακροστοιχείου, την

ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος και τον λόγο μεταξύ της ανοδικής προς την καθοδική επιφάνεια (Islam, 2006, G. Batis, 2003).

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



Εικόνα 3.1 Εμφάνιση ρωγμής σε σκυρόδεμα

Η παρουσία ρωγμών στο σκυρόδεμα γενικά επιταχύνει τη διάχυση των διαβρωτικών ουσιών του περιβάλλοντος στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα διευκολύνει τη μεταφορά του οξυγόνου, του διοξειδίου του άνθρακα και των χλωριόντων και άλλων βλαβερών ουσιών στην επιφάνεια του οπλισμού. Η δημιουργία αυτών των ρωγμών μπορεί να οφείλονται σε διάφορες αιτίες όπως:

- Φυσικές: Συστελλόμενα αδρανή, συστολή ξήρανσης
- Χημικές: Διάβρωση οπλισμού (με εμφάνιση διαμήκων ρωγμών), αντίδραση αδρανών – αλκαλίων (άτακτη ρηγμάτωση)
- Θερμικές: Εναλλαγή παγετού – τήξεως, εποχιακές μεταβολές της θερμοκρασίας, πρόωρη θερμική συστολή.
- Κατασκευαστικές: Υπερφόρτιση, ερπυσμός.

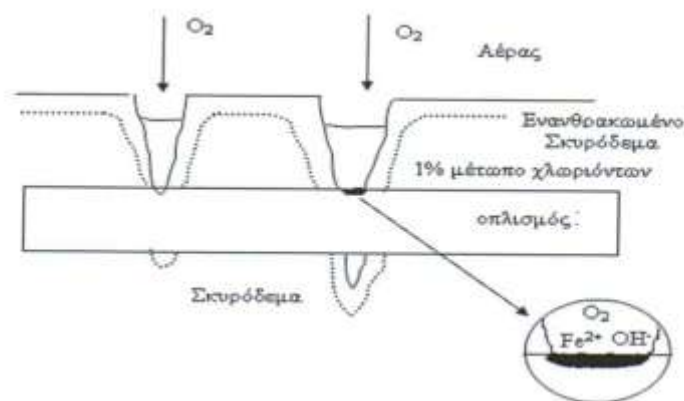
Γενικά στο μπετόν υπάρχουν ρωγμές πλάτους μικρότερο από 2-3mm. Η διείσδυση των διαβρωτικών συστατικών του περιβάλλοντος θα είναι τόσο μεγαλύτερη όσο το πλάτος και το βάθος των ρωγμών θα είναι μεγαλύτερο. Εάν οι ρωγμές φθάσουν στην επιφάνεια του οπλισμού, τότε υπάρχουν όλες οι προϋποθέσεις για τη διάβρωσή του. Σε γενικές γραμμές είναι δυνατόν να διακρίνουμε, όπως και στη περίπτωση των χλωριόντων, δύο περιπτώσεις διάβρωσης:

- Τη διάβρωση του οπλισμού στη ρωγμή

- Τη διάβρωση του οπλισμού με σχηματισμό γαλβανικού στοιχείου μεταξύ του τμήματος του οπλισμού στη ρωγμή και του τμήματος του οπλισμού στο σκυρόδεμα.

Για να είναι δυνατή η ύπαρξη της διάβρωσης πρέπει το πλάτος της ρωγμής να είναι μεγάλο και η κάλυψη του οπλισμού να έχει αρκετό πάχος. Η δημιουργία της ρωγμής συνεπάγεται τη ταχύτερη προώθηση του διοξειδίου του άνθρακα ή των χλωριόντων στη περιοχή γύρω από τη ρωγμή, αλλά αυτό το γεγονός είναι δευτερεύον στη διάβρωση του οπλισμού. 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^- .

Με την πάροδο του χρόνου δημιουργείται εσοχή στο κέντρο του αποκαλυφθέντος οπλισμού, ενώ ταυτόχρονα δημιουργείται οξείδιο σιδήρου, που γεμίζει το βάθος της ρωγμής. Εάν το προϊόν αυτό της διάβρωσης είναι συμπαγές τότε μπορεί να καθυστερήσει την προώθηση της διάβρωσης. Στην εξέλιξη αυτή βοηθούν η μικρή σχετικά τάση του τοπικού γαλβανικού στοιχείου και η χαμηλή σχετική υγρασία. Εάν η τάση του τοπικού γαλβανικού στοιχείου είναι σχετικά μεγάλη και η υγρασία υψηλή το στρώμα των προϊόντων της διάβρωσης είναι πορώδες και η διάβρωση συνεχίζεται κάτω από το στρώμα των οξειδίων.



Σχήμα 3.8 Η δημιουργία μακροστοιχείου διάβρωσης του οπλισμού σε μακροστοιχείο με ρωγμές

Αν το πλάτος της ρωγμής και το πάχος της επικάλυψης είναι μικρά, τότε δημιουργείται ένα γαλβανικό μακροστοιχείο. Και πάλι η περιοχή που είναι κοντά στη ρωγμή θα ενανθρακωθεί ή θα έχει χλωριόντα. Η άνοδος του γαλβανικού μακροστοιχείου είναι η περιοχή του οπλισμού που βρίσκεται ακάλυπτος στη ρωγμή. Κάθοδος του γαλβανικού στοιχείου είναι η περιοχή του οπλισμού που είναι καλυμμένη από σκυρόδεμα γύρω από τη ρωγμή. Στην περίπτωση αυτή δημιουργούνται προϊόντα διάβρωσης στον πυθμένα της ρωγμής που σιγά σιγά γεμίζουν.

Η ταχύτητα της διάβρωσης εξαρτάται από:

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

Σε περίπτωση ύπαρξης διαφορετικού πλάτους ρωγμών σε ένα σκυρόδεμα μπορεί να συνυπάρχουν και οι δύο τύποι διάβρωσης του οπλισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

4.1 Γενικά

Η διάβρωση του σιδηροπλισμού οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί ένα από τα κυριότερα κατασκευαστικά και οικονομικά προβλήματα στις μέρες μας. Το ίδιο το σκυρόδεμα αρχικά αποτελεί ένα προστατευτικό αλκαλικό περιβάλλον γύρω από τον οπλισμό (με PH 10-13).

Η μείωση όμως της αλκαλικότητας λόγω ενανθράκωσης του σκυροδέματος ή η λόγω διείσδυσης των χλωριόντων οδηγούν στην καταστροφή του προστατευτικού στρώματος οξειδίων του οπλισμού και στην ανάπτυξη διαβρωτικής δράσης. Έτσι, ιδίως όταν το περιβάλλον της κατασκευής είναι έντονα διαβρωτικό πρέπει να εξετάζεται η λήψη κατάλληλων προστατευτικών μέτρων. Η προστασία αυτή μπορεί να είναι εξωτερικά επιβαλλόμενη (π.χ. καθοδική προστασία) ή να παρέχεται από τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου υλικού (π.χ. ράβδοι ανοξειδωτού χάλυβα). Στις περισσότερες περιπτώσεις η προστασία που παρέχεται από τις εφαρμοζόμενες μεθόδους (επικαλύψεις, εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση) είτε παύει να υφίσταται είτε περιορίζεται αν διακοπεί με οποιονδήποτε τρόπο η επιβολή της (π.χ. απομάκρυνση ή αποκόλληση επικάλυψης, διαφοροποίηση της επιβαλλόμενης τάσης καθοδικής προστασίας).

Επί του παρόντος, ένας μεγάλος αριθμός από εμπορικά κτίρια, κατοικίες, θαλάσσιες κατασκευές, γέφυρες, κλπ., έχουν αρχίσει να δείχνουν σοβαρά σημάδια επιδείνωσης, ιδιαίτερα όσα είναι πάνω από 30 ετών. Η επιδείνωση αυτή προκαλείται κυρίως από τη διάβρωση του οπλισμού. Το ετήσιο κόστος των εργασιών επισκευής του σκυροδέματος είναι σήμερα άνω των 5 δις δολαρίων ΗΠΑ στη Δυτική Ευρώπη και μόνο. Προϊόντα από ανοξειδωτο χάλυβα έχουν αναπτυχθεί σημαντικά και ένα ευρύ φάσμα κραμάτων προσφέρουν σήμερα μια συνολική λύση στην προστασία των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η ευφυής χρήση του ανοξειδωτού χάλυβα για την επισκευή του φθαρμένου σκυροδέματος είναι μια οικονομικά αποδοτική επιλογή. Η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της έξυπνης χρήσης του ανοξειδωτού χάλυβα για νέες δομές έχει αποδειχθεί στο παρελθόν, (Life-cycle Cost Case Study, 1997). Η χρήση του ανοξειδωτού χάλυβα κατά την επισκευή των κατασκευών είναι επωφελής από πλευράς κόστους (Knudsen, A., 1998).

Με τη χρήση ανοξειδωτων χαλύβων επιτυγχάνεται προστασία των οπλισμών από τη διάβρωση:

- σε έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα όπως παραθαλάσσιες περιοχές και λιμενικά έργα.
- σε κατασκευές σε χημικές βιομηχανίες και βιομηχανίες τροφίμων.
- σε περιπτώσεις στήριξης και ενίσχυσης κατασκευών ή ανακατασκευής μνημείων και αγαλμάτων (από μάρμαρο ή πέτρα), ιδιαίτερα όταν οι δυσκολίες προσπελάσεως ή η αδυναμία κλεισίματος (π.χ. σε αυτοκινητόδρομους γεφυρών) αποτρέπουν τη συχνή επέμβαση αποκατάστασης και συντήρησης.
- σε περιπτώσεις όπου η χρήση ελαφροσκυροδέματος απαιτείται για μείωση του ιδίου βάρους κατασκευής ή για θερμική μόνωση.

- σε κατασκευές όπου απαιτείται μεγάλη διάρκεια ζωής, π.χ. 75 έως 100 χρόνια (π.χ. γέφυρες).
- σε κατασκευές σε υγρό περιβάλλον (σύραγγες μετρό ή τρένων, υπόγειες διαβάσεις, οχετοί, οπλισμός θεμελίων σε υπόγεια νερά) ή και σε ειδικές κατασκευές (π.χ. πισίνες) λόγω χρήσης NaCl κατά τη διάρκεια του χειμώνα σε γέφυρες αυτοκινητοδρόμων (π.χ. Βόρεια Ευρώπη).

Σύμφωνα με τα νέα Ευρωπαϊκά πρότυπα ο χρόνος ζωής στις συνήθεις κατασκευές από σκυρόδεμα είναι 50 χρόνια, ενώ για τις γέφυρες εκτείνεται στα 120 χρόνια. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η πρόβλεψη του χρόνου ζωής κατασκευών από σκυρόδεμα με τις μέχρι τώρα γνώσεις για τη φθορά του σκυροδέματος είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα. Η πραγματοποίηση ενός συστήματος καταγραφής και διαχείρισης των φθορών και ανάπτυξης μεθόδων προστασίας των κατασκευών από Ο.Σ, με σκοπό να αποφεύγονται τυχόν αστοχίες, οι οποίες έχουν δείξει το μέγεθος της καταστροφής που μπορούν να επιφέρουν, έχει τεράστιο οικονομικό και κοινωνικό κόστος.

Η σημερινή τεχνολογία προσφέρει διάφορες λύσεις, προκειμένου να αντιμετωπισθεί η διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα η οποία οφείλεται είτε στην ενανθράκωση είτε στην είσοδο χλωριόντων στο σκυρόδεμα είτε στο σχετικό σχηματισμό μακροστοιχείων.

Οι λύσεις αυτές έχουν διαφορετικό κόστος εφαρμογής αλλά και διαφορετικούς χρόνους επέκτασης της διάρκειας ζωής της κατασκευής. Πριν όμως από κάθε εφαρμογή λύσης προστασίας του οπλισμού θα πρέπει να αναφερθούν ορισμένα σχετικά, με την ποιότητα του σκυροδέματος η οποία ασκεί σημαντικό ρόλο στην όλη αντίσταση κατά της διάβρωσης.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι τρόποι αποκατάστασης και προστασίας κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

4.2 Μέθοδοι προστασίας από την διάβρωση

Για να μειωθεί σημαντικά η φθορά του οπλισμένου σκυροδέματος, στις καινούριες κατασκευές, μπορούν να ληφθούν τα παρακάτω μέτρα:

- Η κατάλληλη επιλογή του είδους του τσιμέντου και των αδρανών
- Η μείωση του λόγου τσιμέντου / νερό
- Η σωστή δόνηση του σκυροδέματος κατά τη χύτευση του
- Η σωστή συντήρηση του σκυροδέματος και
- Η σωστή επιλογή του πάχους επικάλυψης,

Όταν όμως λόγω του περιβάλλοντος έκθεσης της κατασκευής Ο.Σ. τα μέτρα αυτά δεν είναι αρκετά για τον απαιτούμενο χρόνο ζωής της κατασκευής τότε θα πρέπει να λαμβάνονται επιπρόσθετα μέτρα προστασίας όπως:

- Μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος με κατάλληλα πρόσθετα
- Μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος με επικαλύψεις όπως μονωτικά χρώματα
- Χρήση ειδικών χαλύβων
- Καθοδική προστασία σε νεόδητες κατασκευές

- Χρήση χημικών αναστολέων διάβρωσης ως πρόσθετα σκυροδέματος.

Οι μέθοδοι αποκατάστασης και συντήρησης από τη διάβρωση υφιστάμενων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα περιλαμβάνουν:

- Καθαίρεση και αποκατάσταση των σαθρών δομικών στοιχείων σκυροδέματος
- Επικαλύψεις με μονωτικά χρώματα
- Καθοδική προστασία
- Ηλεκτροχημική αφαλάτωση του σκυροδέματος
- Ηλεκτροχημική επαναλκαλοποίηση του σκυροδέματος
- Χρήση αναστολέων διάβρωσης.

Η τεχνική που επιλέγεται κάθε φορά εξαρτάται από τον βαθμό της φθοράς το περιβάλλον διάβρωσης (έκθεσης της κατασκευής). Σε πολλές περιπτώσεις συνδυασμός περισσοτέρων από δύο τεχνικών μπορεί να εφαρμοστεί για την αποκατάσταση των φθορών όπως καθαίρεση και αποκατάσταση των σαθρών σκυροδεμάτων και προστασία της κατασκευής με σύστημα καθοδικής προστασίας, ή εφαρμογή καθοδικής προστασίας με ταυτόχρονη χρήση αναστολέων διάβρωσης. Σε κάθε περίπτωση όμως ο στόχος και ο σκοπός είναι η παρεμπόδιση, η μείωση ως και η εξάλειψη του προβλήματος της διάβρωσης (αύξηση του χρόνου ζωής της κατασκευής) σε συνδυασμό πάντα με την αισθητική του κτιρίου και το κόστος αποκατάστασης.

Η διάρκεια ζωής μιας κατασκευής εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν κατά τον σχεδιασμό του έργου. Μία από τις βασικότερες παραμέτρους σχεδιασμού σε συνάρτηση με το χρόνο ζωής της κατασκευής είναι το πάχος σκυροδέματος επικάλυψης των οπλισμών. Τα διαβρωτικά συστατικά από το περιβάλλον μπορούν να διαπεράσουν την επικάλυψη του σκυροδέματος και να φθάσουν στην επιφάνεια του οπλισμού. Έτσι όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του σκυροδέματος, τόσο περισσότερο χρόνο χρειάζεται (εφόσον τα άλλα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος παραμείνουν τα ίδια) για να φθάσουν τα διαβρωτικά συστατικά στον οπλισμό. Η ωθούσα δύναμη για τη μετακίνηση των συστατικών εντός του σκυροδέματος είναι η διάχυση. Συνεπώς όσο το πορώδες του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερο, τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι και το πάχος επικάλυψης του οπλισμού ώστε να έχουμε τον ίδιο βαθμό προστασίας του οπλισμού (Γ. Μπατής, 1999).

Σύμφωνα με τον **ΕΚΩΣ 2000** "Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος 2000", ορίζονται τέσσερις κατηγορίες συνθηκών περιβάλλοντος ως εξής:

Κατηγορία 1: Ελάχιστα διαβρωτικό περιβάλλον.

Κατηγορία 2: Μετρίως διαβρωτικό περιβάλλον.

Κατηγορία 3: Παραθαλάσσιο περιβάλλον. Παραθαλάσσιες περιοχές (απόσταση από την ακτή \leq 1km).

Κατηγορία 4: Πολύ διαβρωτικό περιβάλλον. Βιομηχανικές ζώνες, χώροι με υψηλή περιεκτικότητα σε χημικά προϊόντα (αέρια, υγρά, στερεά).

Η τελική τιμή της ελάχιστης επικάλυψης δεν επιτρέπεται να είναι μικρότερη από 15mm ή από ($\emptyset+10\text{mm}$ ή 20mm) για κατηγορίες συνθηκών περιβάλλοντος 1-2 ή 3-4 αντιστοίχως. Όπου \emptyset (ή \emptyset/\sqrt{n}) η διάμετρος ράβδου οπλισμού (ή η ισοδύναμη διάμετρος δέσμης ράβδων).

Για σκυροδετήσεις σε επαφή με συνήθη εδάφη η ελάχιστη επικάλυψη είναι:

- Για απευθείας σκυροδέτηση σε μη διαμορφωμένο έδαφος 75mm.

- Για σκυροδέτηση επί διαμορφωμένου εδάφους, με στρώση σκυροδέματος καθαριότητας, 40mm.
- Για υποθαλάσσια έργα ή έργα που διαβρέχονται με θαλασσινό νερό απαιτείται ελάχιστη επικάλυψη 40mm.

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.

Πέραν των παραπάνω επιβάλλεται για τις κατασκευές η επικάλυψη του σιδηρού οπλισμού να είναι όχι μικρότερη από 6 εκ. και άνω. Υπενθυμίζεται ότι οι έντονες διεργασίες πραγματοποιούνται στην τριεπιφάνεια της όλης κατασκευής, δηλαδή εκεί που συναντάται, ο αέρας, η θάλασσα και το οπλισμένο σκυρόδεμα. Σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλο ύψος παλίνρροιας η ευαίσθητη επιφάνεια φτάνει σε αρκετά μέτρα. Τα παρακάτω είδη προστασίας, προσφέρει σήμερα η τεχνολογία για την αποτελεσματική προστασία του σιδηρού οπλισμού:

- Χρήση Ορυκτών Πρόσθετων
- Καθοδική προστασία
- Προσθήκη στο σκυρόδεμα αναστολέων διάβρωσης
- Χρήση οργανικών επικαλύψεων (χρωμάτων)
- Η χρήση ειδικών χαλύβων

4.2.1 Χρήση Ορυκτών 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, αργυλοπυριτικά 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.

4.2.1.1 Ιπτάμενη Τέφρα

Η Ιπτάμενη Τέφρα (Ι.Τ.) 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 Ι.Τ. 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 Ι.Τ. (πρέπει να είναι $> 2500 \text{ cm}^2/\text{g}$).
- Η περιεκτικότητα σε ενεργά συστατικά SiO_2 και Al_2O_3 .
- Η περιεκτικότητα σε επιβλαβή συστατικά ($\text{C} < 3\%$ και SO_2).
- Η περιεκτικότητα σε ελεύθερη άσβεστο.

Η χρήση της Ιπτάμενης Τέφρας σαν πρόσθετο στο τσιμέντο, έχει τα ακόλουθα αποτελέσματα (N. Kouloumbi, G. Batis., 1992):

- 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 ελευθέρα άσβεστο αυξάνει την ταχύτητα της ενανθράκωσης.

4.2.1.2 Σκωρία υψικαμίνων

Η σκωρία υψικαμίνων (slag, Schlacke) είναι υλικό μη μεταλλικό, το οποίο αποτελείται από πυριτικά και αργυλοπυριτικά άλατα του ασβεστίου (Ch. Malami, G. Batis, N. Kouloumbi, V. Kaloidas, 1994). 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.

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 (An Cheng, Ran Huang, Jiann-Kuo Wu and Cheng-Hsin Chen, 2005). 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

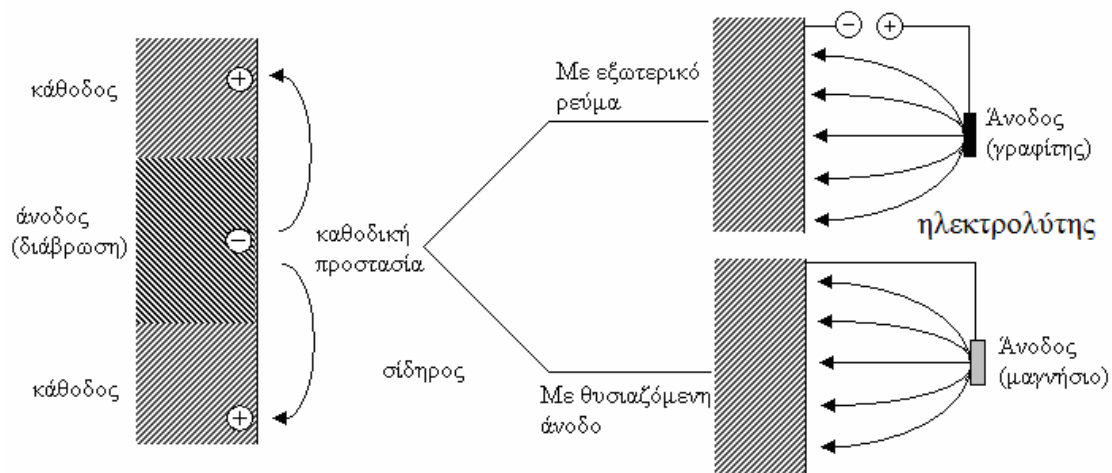
Τα τσιμέντα σκωρίας έχουν επίσης καλή εργασιμότητα και χαμηλή απαίτηση σε νερό (Ch. Malami, V. Kaloidas, G. Batis, N. Kouloumbi,, 1994). Στην ενυδάτωση της σκωρίας σημαντικό ρόλο παίζει η επίδραση της θερμοκρασίας. Η ενυδάτωση επιτυγχάνεται στις υψηλές θερμοκρασίες και επιβραδύνεται στις χαμηλότερες, σε σχέση με την ενυδάτωση του τσιμέντου πόρτλαντ (G. Batis, N. Kouloumbi, A. Aidini, 1994).

4.2.2 Καθοδική προστασία

Η καθοδική προστασία επιτυγχάνεται με δύο μεθόδους:

- Καθοδική προστασία με εφαρμοζόμενο ρεύμα
- Καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους

Στο παρακάτω σχήμα 4.1 απεικονίζεται η αρχή λειτουργίας των δύο μεθόδων.



Σχήμα 4.1 Καθοδική προστασία μέσω εξωτερικού ρεύματος και μέσω θυσιαζόμενων ανόδων.

Από το Σχήμα 4.1 γίνεται σαφής η διαφορά των δύο μεθόδων. Στην πρώτη μέθοδο η προς προστασία επιφάνεια συνδέεται με τον αρνητικό πόλο (-) μέσω εξωτερικής πηγής συνεχούς ρεύματος. Το κύκλωμα κλείνει μέσω αδρανούς (inert) ηλεκτρόδιο (συνήθως ηλεκτρογραφίτης, επιπλατινωμένο τιτάνιο). Στη δεύτερη μέθοδο η προς προστασία επιφάνεια πολώνεται διαφορετικά. Συνδέεται αγώγιμα με άνοδο από μέταλλο όπως Mg, Zn, Al. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται γαλβανικό στοιχείο του οποίου η άνοδος (Mg, Zn, Al) με την πάροδο του χρόνου διαβρώνεται (εξ' ου και ο όρος θυσιαζόμενη άνοδος) ενώ η μεταλλική επιφάνεια είναι κάθοδος και προστατεύεται. Οι δύο μέθοδοι έχουν μεταφερθεί με επιτυχία στην πράξη και εφαρμόζονται ευρύτατα.

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.

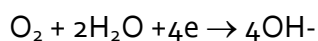
Η διάβρωση του χάλυβα στο σκυρόδεμα είναι ηλεκτροχημικό φαινόμενο το οποίο περιλαμβάνει μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου. Ο χαλύβδινος οπλισμός οξειδώνεται στις ανοδικές περιοχές του συστήματος, επομένως η διάλυση του χάλυβα είναι η ανοδική δράση. Ωστόσο ο ρυθμός διάβρωσης του οπλισμού μπορεί να ελαττωθεί ή το φαινόμενο της διάβρωσης του να αντιστραφεί εάν το δυναμικό του οπλισμού γίνει ηλεκτροαρνητικότερο (καθοδικό). Αυτό στην πράξη επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση στο σκυρόδεμα ανόδων όπου πάνω σε αυτές πραγματοποιείται η ανοδική δράση. Για την αντιστροφή του φαινομένου της διάβρωσης (αντιστροφή της πολικότητας του ηλεκτροχημικού στοιχείου) επιβάλλεται ένα σχετικά χαμηλό ρεύμα, συνήθως $2-10 \text{ mA/m}^2$ επιφάνειας σκυροδέματος, μεταξύ των ανόδων και των οπλισμών, έτσι ώστε το δυναμικό του οπλισμού να πάρει ηλεκτροαρνητικότερες τιμές. Θα πρέπει να τονιστεί ότι το σύστημα καθοδικής προστασίας (άνοδοι, ηλεκτρόδια αναφοράς) τοποθετείται μόνιμα στην κατασκευή.

Τα κριτήρια σχεδιασμού της καθοδικής προστασίας στο Ο.Σ. είναι τελείως διαφορετικά από αυτά που εφαρμόζονται για τον σχεδιασμό συστημάτων καθοδικής προστασίας στο έδαφος ή στο θαλασσινό νερό. Η καθοδική προστασία είναι μια ενδεδειγμένη αποτελεσματική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων διάβρωσης σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος με υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων στη μάζα τους σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους προστασίας (G.K. Glass, 1999, NACE Standard RP0290-90, 1990).

Με την εφαρμογή συστήματος Καθοδικής Προστασίας στο σκυρόδεμα το δυναμικό του οπλισμού φέρεται σε τιμές ίσες ή και μικρότερες του δυναμικού ισορροπίας του E_{eq} έτσι ώστε να επιτευχθούν συνθήκες παθητικοποίησης του και η τιμή της πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης i_a του να μηδενιστεί. Το επιβαλλόμενο ρεύμα που απαιτείται για να επιτευχθούν οι συνθήκες παθητικοποίησης είναι ίσο με το καθοδικό ρεύμα στην κατάσταση ισορροπίας $E_{eq} : i_a = i_c$. Δηλαδή σε καθοδικά προστατευόμενες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα η σχέση μεταξύ του επιβαλλόμενου ρεύματος (i) προστασίας (του ρυθμού της ανοδικής αντίδρασης, ρυθμός διάβρωσης, i_a) και του ρεύματος της καθοδικής δράσης (i_c) είναι $i_a + i = i_c$ και στο δυναμικό ισορροπίας του χάλυβα $E_{eq} i_a = 0$. Για τις μεταλλικές κατασκευές είτε στο έδαφος είτε στο θαλασσινό νερό η προστασία αυτών επιτυγχάνεται όταν το δυναμικό παίρνει τιμές μικρότερες

από -850mV ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς Cu/CuSO₄ ή -950mV παρουσία μικροβιακής διάβρωσης (θειοβακτήρια). Το δυναμικό καθοδικά προστατευόμενων χαλύβων σε ατμοσφαιρικά εκτεθειμένες κατασκευές Ο.Σ. βρίσκεται σε περιοχή προστασίας (immunity) (P.M. Chess, 1998). Στο οπλισμένο σκυρόδεμα με την εφαρμογή της καθοδικής προστασίας δεν επιτυγχάνεται ο μηδενισμός του ρεύματος διάβρωσης, αλλά η μείωση του ρεύματος διάβρωσης σε βαθμό όπου ο οπλισμός να φτάσει στην παθητική κατάσταση (D.A. Hausmann, 1969).

Με την καθοδική πόλωση του χάλυβα (εφαρμογή συστήματος καθοδικής προστασίας) η αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι η αναγωγή του οξυγόνου σε ιόντα υδροξυλίου τα οποία αυξάνουν τοπικά την αλκαλικότητα στην επιφάνεια του χάλυβα (G.K. Glass and J.R. Chadwick, 1994).



Η μεταφορά του ρεύματος στη μάζα του σκυροδέματος γίνεται μέσω των ιόντων. Η κίνηση των θετικών ιόντων (κατιόντων) έχει τη φορά του ρεύματος (από την άνοδο προς την κάθοδο) ενώ των αρνητικών ιόντων (ανιόντων) αντίθετη κατεύθυνση. Η κυκλοφορία του ρεύματος σε σκυροδέματα «μολυσμένο» με χλωριόντα δημιουργεί τη ροή των χλωριόντων από τον καθοδικά πολωμένο οπλισμό στην επιφάνεια των ανόδων, μειώνει την είσοδο των χλωριόντων και επαναφέρει τις συνθήκες παθητικής κατάστασης του οπλισμού μορφοποιώντας ένα αρκετά συνεκτικό και σταθερό προστατευτικό λεπτό στρώμα οξειδίων στην επιφάνεια του χάλυβα (G.K. Glass, J.-Z. Zhang, and N.R. Buenfeld, 1995).

Θεωρητικά η αύξηση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα εάν το σκυρόδεμα περιέχει αδρανή επιρρεπή στην αλκαλοπυριτική αντίδραση. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί σε συστήματα καθοδικής προστασίας σε πολύ υψηλές πυκνότητες ρεύματος προστασίας. Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι για υψηλές πυκνότητες ρεύματος επηρεάζεται αρνητικά η συνάφεια μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος. Επιπρόσθετα με χρήση ανόδων άνθρακα κατά την ανοδική αντίδραση παράγονται όξινα διαλύματα τα οποία έχουν αρνητικές επιπτώσεις στη διεπιφάνεια οπλισμού σκυροδέματος (R.P. Brown, J.S. Tinnea, 1991).

Για το λόγο αυτόν οι άνοδοι άνθρακα δεν χρησιμοποιούνται στην πράξη.

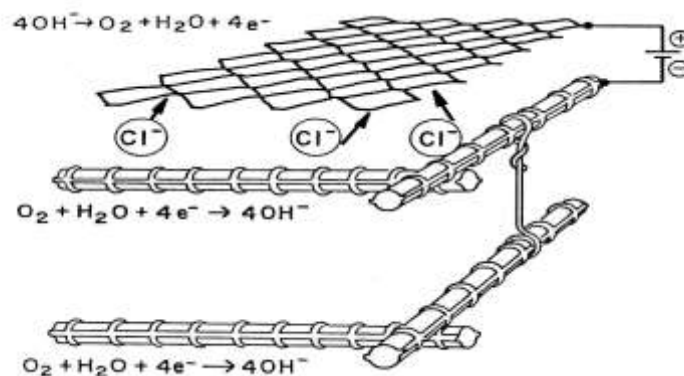
Για χαμηλής αντοχής φεριτικούς χάλυβες (*low strength ferritic steel*) οπλισμού σκυροδέματος δεν ενδείκνυται η εφαρμογή της καθοδικής προστασίας λόγω ψαθυρής θραύσης από υδρογόνο (Hydrogen embrittlement). Επίσης για χάλυβες προεντεταμένου σκυροδέματος (υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων) η εφαρμογή της καθοδικής προστασίας θα πρέπει να γίνεται με επιφύλαξη λόγω του κινδύνου ευθραστοποίησης του χάλυβα από υδρογόνο, εάν το δυναμικό του οπλισμού πάρει υψηλές τιμές λόγω υπερπροστασίας του. Η ευθραστοποίηση του χάλυβα προέρχεται από την απελευθέρωση έγκλειστων φυσαλίδων υδρογόνου από το χάλυβα στην κάθοδο. Σε αλκαλικό περιβάλλον (pH >12), με οπλισμό υπό καθοδική προστασία, η δημιουργία υδρογόνου συμβαίνει μόνο στην περίπτωση όπου το δυναμικό του πάρει τιμές αρνητικότερες του -950mV ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς SCE (A.-L. Stauder and W.H. Hartt, 1998, A. Roeydomenge and W.H. Hartt, 1998, A.M. El-Sherik and M. Shirkhazadeh, 1992).

Επίσης ένα εξίσου σημαντικό πρόβλημα δημιουργείται εάν το σύνολο του οπλισμού της κατασκευής δεν βρίσκεται σε ηλεκτρική συνέχεια. Η ηλεκτρική ασυνέχεια του οπλισμού έχει ως συνέπεια την μερική προστασία της κατασκευής με αποτέλεσμα τον σχηματικό γαλβανικών

στοιχείων μεταξύ των υπό προστασία περιοχών και μη (E. Proverbio, E.Mejía, O. García and E. Traversa, 1995, J.P. Broomfield, 1992).

Η αντιμετώπιση του σχηματισμού των γαλβανικών στοιχείων, όταν αυτά ήδη έχουν σχηματισθεί και έχουν προξενήσει βλάβες είναι αρκετά δύσκολη. Εάν π.χ. έχει σχηματισθεί γαλβανικό μακροστοιχείο λόγω διάχυσης χλωριόντων από το περιβάλλον σε ένα οπλισμένο σκυρόδεμα και η διάβρωση έχει ήδη προχωρήσει, η κάλυψη του οπλισμένου σκυροδέματος με μανδύα δεν προσφέρει προστασία. Το παλιό μακροστοιχείο εξακολουθεί να υπάρχει και να λειτουργεί. Ακόμη η ύπαρξη νέου οπλισμού στο νέο σκυρόδεμα που συγκολλείται με τον παλιό οπλισμό επιτείνει την διαβρωτική δράση του γαλβανικού μακροστοιχείου. Ο παλιός οπλισμός εξακολουθεί να διαβρώνεται και να ασκεί εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα και επομένως η δημιουργία και νέων ρωγμών αργά ή γρήγορα θα συμβεί. Στις περιπτώσεις αυτές η μέθοδος της καθοδικής προστασίας μπορεί να δώσει αποτελεσματική λύση. Η εφαρμογή της καθοδικής προστασίας βασίζεται στην ύπαρξη πηγής συνεχούς ρεύματος και βοηθητικής ανόδου κοντά στην επιφάνεια του σκυροδέματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. 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.

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. Η μέθοδος της καθοδικής προστασίας εφαρμοζόμενη 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. Η προστατευτική επίδραση της καθοδικής προστασίας είναι φανερό ότι διαρκεί όσο υπάρχουν άνοδοι. Η αντικατάσταση των ανόδων είναι ένα τεχνικά πολύ δύσκολο πρόβλημα. Για να επιτευχθεί μεγάλη διάρκεια ζωής των ανόδων, οι άνοδοι κατασκευάζονται από τιτάνιο. Είναι γνωστό ότι η αντοχή του τιτανίου στην διάβρωση ιδιαίτερα σε συνθήκες ανοδικής φόρτισης, είναι μεγάλη διότι σχηματίζεται οξειδίο τιτανίου (TiO_2) το οποίο σχηματίζει ένα ιδιαίτερα παθητικό στρώμα που προστατεύει το τιτάνιο από την διάβρωση. Ακόμη αξίζει να σημειωθεί ότι ο μοριακός όγκος του τιτανίου δεν διαφέρει σημαντικά από τον μοριακό όγκο του οξειδίου.



Σχήμα 4.2 Αρχή της καθοδικής προστασίας του σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα

Το ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να προκύψει με την χρήση θυσιαζόμενων ανόδων αντί της παροχής συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος από εξωτερική πηγή (μετασχηματιστής- ανορθωτής). Η θυσιαζόμενη άνοδος θα πρέπει να είναι κατασκευασμένη από υλικό που ευρίσκεται υψηλότερα από τον χάλυβα στην ηλεκτροδιακή σειρά π.χ. από ψευδάργυρο. Στην περίπτωση αυτή το πλέγμα ψευδαργύρου συνδέεται αγωγίμα με τον οπλισμό. Ας σημειωθεί ότι οι θυσιαζόμενες άνοδοι όταν εξαντληθούν αντικαθίστανται. Η διάρκεια ζωής των ανωτέρω πλεγμάτων ψευδαργύρου είναι συνήθως 20-30 χρόνια. Υπάρχουν στο εμπόριο ειδικά σχεδιασμένες άνοδοι ψευδαργύρου για την καθοδική προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα. Οι άνοδοι αυτοί μπορεί να χρησιμοποιηθούν είτε για συνολική προστασία του οπλισμού ή σε περιοχές της κατασκευής όπως συμβαίνει συχνά σε περιπτώσεις επισκευών. Στην περίπτωση κατασκευής έργων με κυψελωτά κιβώτια από οπλισμένο σκυρόδεμα τοποθετήθηκε ως οπλισμός διανομής στην περιοχή της τριεπιφάνειας αντί ράβδων χάλυβος, ράβδοι ίδιας περίπου διατομής, από ψευδάργυρο. Η άνοδος τοποθετείται στην επιφάνεια του σκυροδέματος ως πούμε 2-3 εκ. πιο κάτω και αποτελείται από Τιτάνιο ή Ψευδάργυρο. Το εξωτερικά εφαρμοζόμενο δυναμικό εξαλείφει την επίδραση των μακροστοιχείων. Στον χάλυβα πραγματοποιείται μόνο η μετατροπή του οξυγόνου προς υδροξύλιο. Τα χλωριόντα πηγαίνουν στην άνοδο και η διάβρωση μεταφέρεται από τον χάλυβα στην άνοδο. Στο παρακάτω σχήμα 4.3 εμφανίζονται ενδεικτικά διάφορα παραδείγματα θυσιαζόμενων ανόδων.



Σχήμα 4.3 Ενδεικτικά παραδείγματα θυσιαζόμενων ανόδων

4.2.3 Χημικά πρόσθετα – Αναστολείς διάβρωσης στο σκυρόδεμα

Η μέθοδος της τοπικής επισκευής των προβλημάτων διάβρωσης, όπως η αφαίρεση του αποσαθρωμένου σκυροδέματος, η εξυγίανση των οπλισμών με τρίψιμο και η εφαρμογή αντιδιαβρωτικών και έπειτα η αποκατάσταση της αρχικής διατομής με ειδικά επισκευαστικά κονιάματα, έχει σαν αποτέλεσμα να μην επισκευάζονται πολλά τμήματα σκυροδέματος. Η περιεκτικότητα όμως σε χλωρίδια παραμένει υψηλή και το πρόβλημα να παρουσιάζεται ξανά, καθώς η διάβρωση συνεχίζει να προχωρά με αποτέλεσμα το σκυρόδεμα να ρηγματώνεται και σταδιακά να αποσαθρώνεται και τελικά το κόστος της επισκευής απογειώνεται (Gaidis J.M., 2001).

Μεταξύ των συστημάτων προστασίας από τη διάβρωση η χρήση των αναστολέων διάβρωσης ως πρόσμεικτα στο σκυρόδεμα είναι μία δημοφιλής, εύκολη και σχετικά οικονομική μέθοδος. Τα χημικά πρόσθετα αναστολής διάβρωσης στο σκυρόδεμα έχουν σαν στόχο τον περιορισμό της διάβρωσης του οπλισμού δια μέσω της δράσης τους στην επιφάνεια του οπλισμού. Παρόλα αυτά στην Ελλάδα η εφαρμογή τους ως μέθοδος προστασίας από τη διάβρωση του Ο.Σ. είναι πρόσφατη.

Η χρονική αυτή υστέρηση οφείλεται κυρίως σε λόγους δυσπιστίας και επιφύλαξης από την πλευρά των κατασκευαστών αλλά και σε οικονομικούς παράγοντες. Η επιφύλαξη ως προς τη χρήση των αναστολέων διάβρωσης στο σκυρόδεμα οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η προσθήκη αυτών στο σκυρόδεμα είναι μόνιμη και δεν αλλάζει εάν αυτοί αποδειχθούν μη αποτελεσματικοί ενώ εάν αποδειχθεί ότι ασκούν αρνητική δράση στις ιδιότητες του σκυροδέματος δεν είναι δυνατόν να απομακρυνθούν από αυτό. Αρχικά η χρήση των αναστολέων διάβρωσης πραγματοποιήθηκε σε κλειστά συστήματα σωληνώσεων διακίνησης και ανακύκλωσης ρευστών και έχει σαν σκοπό την προστασία από τη διάβρωση για μικρό χρονικό διάστημα. Η αντικατάσταση του αναστολέα διάβρωσης σε τέτοιου είδους συστήματα είναι σχετικά εύκολη. Αντίθετα στο σκυρόδεμα η προστασία του οπλισμού απαιτεί χρονικό ορίζοντα πάνω από πενήντα χρόνια και η ανανέωση του είναι δύσκολη έως αδύνατη. Επίσης η προσθήκη του αναστολέα διάβρωσης δεν πρέπει να επηρεάζει σημαντικά άλλες ωφέλιμες ιδιότητες του σκυροδέματος όπως τη θλιπτική αντοχή και γενικότερα τις μηχανικές του ιδιότητες (G. De Shutter and L.Luo, 2004, T.A. Soylev, 2007). Οι διεισδυτικοί αναστολείς διάβρωσης (MCI's – Migrating Corrosion Inhibitors) χρησιμοποιούνται ως η μοναδική λύση ώστε το μη αποσαθρωμένο σκυρόδεμα να παραμείνει στη θέση του και η «θεραπεία» των οπλισμών από τη διάβρωση να γίνει εξωτερικά. (Παναγιωτίδης Θ., 2011). Οι αναστολείς διάβρωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρόσμικτοι και ως ψεκαζόμενοι στις κατασκευές και στις δύο περιπτώσεις η δράση των αναστολέων είναι αποτελεσματική (Pedro Faustino, Ana Bras, Thomas Ripper, 2014).

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 (H.E. Jamil, A. Shrirri, R. Boulif, M. F. Montemor, M.G.S. Ferreira, 2004). Το βενζοϊκό κάλιο είναι ένα είδος αναστολέα διάβρωσης με πολύ καλό βαθμό προστασίας στον χάλυβα που όμως η χρήση του ως πρόσθετο στο σκυρόδεμα μειώνει τη θλιπτική αντοχή του. Αντίθετα η χρήση του νιτρώδες ασβεστίου, $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ως αντιδιαβρωτικό πρόσθετο σκυροδέματος προκαλεί μια ελαφριά αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος με παράλληλη αύξηση της ανθεκτικότητας τους ως προς τη διάβρωση (N. S. Berke, 1992, U. Nuerbeger, 1986).

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. Εάν τα χλωριόντα εισχωρήσουν στο σκυρόδεμα, τότε η διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα δεν είναι πλέον αμελητέα, παράγοντες που επηρεάζονται από τους αναστολείς διάβρωσης είναι (J.M Gaidis, 2004):

- Ο ρυθμός εισόδου των χλωριόντων από το περιβάλλον,
- Ο βαθμός με τον οποίο αυτά τα χλωριόντα χημικά ενσωματώνονται ή δεσμεύονται 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 ενισχύει την καθοδική αντίδραση,
- Η ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος και τέλος
- Η χημική σύσταση του ηλεκτρολύτη (όπως το διάλυμα των πόρων στο τσιμέντο).

Η λειτουργία των αναστολέων διάβρωσης βασίζεται στην παρεμπόδιση είτε της ανοδικής ή της καθοδικής δράσης ή και των δύο. Πολλοί αναστολείς διάβρωσης είναι οργανικοί και η λειτουργία αυτών στηρίζεται στη δημιουργία ενός αδιάβροχου, και μη διαπερατού φιλμ στην επιφάνεια του μετάλλου, είτε με την παρεμπόδιση της ανοδικής ή της καθοδικής αντίδρασης (G. Batis, N. Kouloumbi, A. Katsiamboulas, 1996).

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

- **Ανοδικοί αναστολείς διάβρωσης:** Τα υλικά αυτά αναστέλλουν τη διάβρωση, σταθεροποιώντας το προστατευτικό φιλμ του οπλισμού και το οποίο έχει τη τάση να διασπάται όταν ανεβαίνει η περιεκτικότητα των χλωριδίων. Χαρακτηριστικό δείγμα τέτοιων αναστολέων είναι αυτοί που περιέχουν νιτρώδες ασβέστιο και οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε κονιάματα επισκευών. Το νιτρώδες ασβέστιο όμως έχει σαν παράπλευρη δράση την επιτάχυνση της πήξης και θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για την αποφυγή φαινομένων «άμεσης πήξης» (flash setting) (K.Y. Ann, H.S. Jung, H.S. Kim, S.S. Kim and H.Y. Moon, 2006).
- **Καθοδικοί αναστολείς διάβρωσης:** Αυτοί προσροφώνται από τον οπλισμό και σχηματίζουν στην επιφάνειά του ένα φράγμα στη μείωση οξυγόνου, που είναι η κύρια αιτία καθοδικής αντίδρασης του χάλυβα στο σκυρόδεμα. Όμως, οι πιο πολλοί καθοδικοί αναστολείς, όπως οι αμίνες και τα φωσφορικά, έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη επιβράδυνση της πήξης του σκυροδέματος. Οι καθοδικοί αναστολείς διάβρωσης θεωρούνται ως «ασφαλείς αναστολείς» διότι η ενεργή καθοδική επιφάνεια μειώνεται σε συνάρτηση με την ποσότητα του αναστολέα που χρησιμοποιείται (G. Batis, Th. Routoulas, 1999). Η αντίδραση αναστολής της διάβρωσης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως: διαλυτότητα, διασπορά και την αναλογία αναστολέα χλωριόντων (για τους ανοδικούς αναστολείς), τη χημική σύσταση του τσιμέντου, τις συνθήκες ωρίμανσης,

θερμοκρασία και το pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος (M. Ormellesse, M. Berra, F. Bolzoni and T. Pastore, 2006).

- Οργανικοί αναστολείς διάβρωσης: Ονομάζονται επίσης και προσροφητικοί αναστολείς διάβρωσης και η δράση τους συνδυάζει ανοδική και καθοδική προστασία. Τυπικό είδος αυτών των αναστολέων είναι οι οργανικές αμίνες όπως π.χ. οι αμινοαιθανόλες (T.H. Misselbrook, J. Webb and S.L. Gilhespy, 2006).
- 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:

$$Z\% = \frac{W_1 - W_2}{W_3}$$

όπου: Z% = ο % βαθμός προστασίας που παρέχει ο αναστολέας,

W₁= ο ρυθμός μείωσης του πάχους σε mm/έτος

W₂=ο ρυθμός μείωσης του πάχους χωρίς αναστολέα, σε mm/έτος

W₃= 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 διεισδυτικών αναστολέων διάβρωσης (MCI's – Migrating Corrosion Inhibitors), έχει ως εξής:

- Γίνεται καθαρισμός των αποσπασμένων 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.

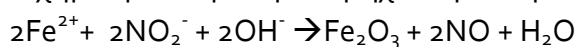
Αρχικά η χρήση των αναστολέων διάβρωσης ήταν η προσθήκη του αναστολέα ως πρόσθετο κατά την παραγωγή του σκυροδέματος. Σαν αναστολείς διάβρωσης είχαν προταθεί τα: νιτρώδες νάτριο (NaNO_2), νιτρώδες κάλιο, χρωμικό κάλιο, βενζοϊκό νάτριο, εστέρες νατρίου κ.α.. Η χρήση των αναστολέων αυτών έδωσε θετικά αποτελέσματα 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 νιτρώδους 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 Fe^{2+} σχηματίζοντας σταθερό φιλμ Fe_2O_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

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 (D. Ramirez, E. Oters, J. A. Conzalas, 1993).

4.2.4 Χρήση οργανικών επικαλύψεων (χρωμάτων)

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
- 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)

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. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται και ανόργανες επικαλύψεις με βάση την υδρύαλο. Υδρύαλος είναι η συνήθης ονομασία των πυριτικών αλάτων των αλκαλίων με γενικό τύπο $Me_2O \cdot nSiO_2$ 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. Η υδρύαλος δεν έχει καθορισμένο χημικό τύπο και η αναλογία του SiO_2 είναι κυμαινόμενη μεταξύ 2 και 4. Όσο μεγαλύτερο είναι το 'n' τόσο πιο δυσδιάλυτη στο νερό είναι η υδρύαλος. Τα τελευταία χρόνια, παράλληλα με τις κλασικές επικαλύψεις (χρώματα), χρησιμοποιούνται και επικαλύψεις με κονίες πολυμερών που εξαιτίας της απουσίας οργανικών διαλυτών είναι περιβαλλοντικά αβλαβείς (Μπατής Γ., 1999).

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_2 , SO_2 και NO_x 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 CO₂, SO₂
- 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 καθαρισμού, 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 σημαία 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 διείδυση του χρώματος στους πόρους του σκυροδέματος και η καλή συνάφεια χρώματος και σκυροδέματος.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα υποστρώματα (αστάρια) έχουν την ίδια περίπου χημική σύσταση με το χρώμα που θα ακολουθήσει αλλά περιέχουν μεγαλύτερο ποσοστό διαλυτών, πράγμα που διευκολύνει τη διείσδυση του χρώματος στους πόρους του σκυροδέματος. Η σωστή εφαρμογή του υποστρώματος είναι μεγάλης σημασίας για τη διάρκεια ζωής του χρώματος.

Τα χρώματα σιλικόνης έχουν σαν συνδετικό μέσο μία υδατική διασπορά ρητίνης σιλικόνης. Τα χρώματα αυτά 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. 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 CO₂ και SO₂, 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.

Ρητίνες από ακρυλικά και μεθακρυλικά συμπολυμερή διαλυτές σε οργανικούς διαλύτες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παραγωγή προστατευτικών χρωμάτων στο σκυρόδεμα. Τα χρώματα της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν πολύ καλή διαπερατότητα σε νερό και διοξείδιο του άνθρακα καθώς και καλή αντοχή στην ακτινοβολία UV. Επίσης παρουσιάζουν πολύ καλή διεισδυτικότητα στους πόρους του σκυροδέματος και καλή συνάφεια. Χρώματα δύο συστατικών με βάση τις εποξικές και πολυουρεθανικές ρητίνες έχουν χρησιμοποιηθεί για την προστασία του σκυροδέματος. Η σκλήρυνσή τους γίνεται με την αρχή της πολυπροσθήκης. Τα δύο συστατικά 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. Τα χρώματα της κατηγορίας αυτής 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 κλπ 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 νεώτερη εξέλιξη στα χρώματα της κατηγορίας αυτής είναι η χρήση ακόρεστων πολυεσταρικών ρητινών σε συνδυασμό με ίνες για την κάλυψη δεξαμενών από οπλισμένο σκυρόδεμα (A.A. Almusallam, F.M. Khan, S.U. Dulaijan, 2003)

4.2.5 Χρήση ειδικών χαλύβων

Μία μέθοδος προστασίας για την αντιμετώπιση των προβλημάτων, που εμφανίζονται στο οπλισμένο σκυρόδεμα σε έντονο διαβρωτικό περιβάλλον, είναι η χρήση ειδικών χαλύβων. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αναφορές με διάφορα επιστρώματα (ανόργανα όπως ψευδάργυρος, κεραμικά ή οργανικά όπως PVC, εποξικά) καθώς και άλλα μέταλλα όπως π.χ. ανοξείδωτος χάλυβας. Στην πράξη όμως έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως ο κοινός δομικός χάλυβας, επιψευδαργυρωμένος χάλυβας, χάλυβας με εποξική επικάλυψη, χάλυβας με επικάλυψη ανοξείδωτου χάλυβα και ανοξείδωτος χάλυβας. Κάθε είδος από τους παραπάνω δομικούς χάλυβες έχει διαφορετικό βαθμό προστασίας και διαφορετικό τρόπο εφαρμογής. Η χρήση αυτών γίνεται σε περιπτώσεις όπου είτε προαπαιτείται από τον σχεδιασμό της κατασκευής λόγω της ύπαρξης διαβρωτικού περιβάλλοντος έκθεσης της κατασκευής, ή σε αποκαταστάσεις κτιρίων ύψιστης σπουδαιότητας (ιστορικά κτίρια, μνημεία, κ.α).

4.2.5.1 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 (Marder, A.R., 2000).

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 (Marder, A.R., 2000). 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 τη συγκέντρωση των χλωριόντων να υπερβεί ένα όριο. Το όριο των χλωριόντων για την ενεργοποίηση της διάβρωσης του ψευδαργύρου είναι 1.5g Cl⁻ 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_4^{2-} 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.

Όπως προκύπτει από τα προηγούμενα, το θερμό γαλβάνισμα μπορεί να προσφέρει ικανοποιητική προστασία των χαλύβων οπλισμού σε ορισμένα βέβαια όρια. Η εφαρμογή του στο χώρο αυτό ξεκίνησε το 1931 (Ramirez, E., 1996) και από τότε χρησιμοποιείται σε αρκετά μεγάλη έκταση.

Ο κύριος ανταγωνιστής του στη συγκεκριμένη αγορά είναι οι εποξειδικές επικαλύψεις. Το νικέλιο επειδή είναι πολύ ακριβότερο (στοιχίζει περίπου επτά φορές περισσότερο από τον ψευδάργυρο (London Metal Exchange, 2005) και η ανάπτυξη των επικαλύψεών του είναι πολύ πιο πολύπλοκη) αποφεύγεται για οικονομικούς λόγους. Οι εποξειδικές επικαλύψεις εμφανίστηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1950 (American Galvanizers Association, 2000) και εφαρμόζονται με ψεκασμό με τη μορφή σκόνης κατά τρόπο ανάλογο με τις συνήθεις ηλεκτροστατικές βαφές. Ακολουθώντας, με "ψήσιμο" σχηματίζουν ένα αδιαπέραστο υμένιο πολυμερούς. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι η χημική αδράνεια ως προς το σκυρόδεμα. Σε σχέση όμως με το θερμό γαλβάνισμα παρουσιάζουν τρία μειονεκτήματα (American Galvanizers Association, 2000):

α) Δεν προσφέρουν καθοδική προστασία όπως ο Zn. Σε περίπτωση έστω και σημειακής καταστροφής της επικάλυψης η διάβρωση προχωρεί ανεξέλεγκτα.

β) Υπάρχει κίνδυνος να υποστούν φθορά στο εργοτάξιο γιατί γενικά οι οργανικές επικαλύψεις δεν έχουν τη σκληρότητα των μετάλλων.

γ) Επειδή δεν αντιδρούν με το σκυρόδεμα, η πρόσφυσή τους στο μπετόν είναι μικρότερη από αυτή του "μαύρου" και του γαλβανισμένου χάλυβα (American Galvanizers Association, 2000, Kayali, O., 2000).

Η σύγκριση του θερμού γαλβανίσματος σε σχέση με τις άλλες τεχνικές προστασίας είναι αρκετά δύσκολη, γιατί η αρχή στην οποία βασίζονται είναι διαφορετική. Έτσι, η καθοδική προστασία με εφαρμογή εξωτερικού ρεύματος είναι πολύ πιο αξιόπιστη και μπορεί να εγγραφεί πλήρη

προστασία για όλο το χρόνο ζωής της κατασκευής και για οποιοσδήποτε συνθήκες, πράγμα που δεν μπορεί να εγγυηθεί καμία άλλη τεχνική (Λιόσης, Ε., 1999). Απαιτεί όμως, μια αρκετά πολύπλοκη εγκατάσταση που συνεπάγεται αυξημένο κόστος.

Όσον αφορά στη χρήση αναστολέων διάβρωσης και την επικάλυψη του σκυροδέματος, θα μπορούσαμε να πούμε ότι λειτουργούν συνεργιστικά με το θερμό γαλβάνισμα και όχι ανταγωνιστικά, οπότε ο συνδυασμός τους προσφέρει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Η συνδυασμένη χρήση αναστολέων-γαλβανισμένου χάλυβα είναι πολύ συνηθισμένη σε διάφορες μεταλλικές κατασκευές, όπως οι ψυκτικοί πύργοι. Στην περίπτωση αυτή, ενώ τα μεταλλικά τμήματα της κατασκευής είναι από γαλβανισμένο χάλυβα, στο κύκλωμα του νερού προστίθενται και κατάλληλοι αναστολείς διάβρωσης για αυξημένη απόδοση (Marder, A.R., 2000).

Η αντιδιαβρωτική προστασία του χάλυβα οπλισμού στην Ελλάδα πραγματοποιείται συνήθως με την προσθήκη αυξημένης ποσότητας σκυροδέματος κατά την κατασκευή. Οι αναστολείς διάβρωσης και η επικάλυψη του σκυροδέματος με στεγανοποιητικά επιχρίσματα χρησιμοποιείται επίσης, αν και σε μικρότερο βαθμό. Στην ελληνική αγορά πάντως κυκλοφορούν πολλά διαφορετικά προϊόντα γι' αυτό το σκοπό, που μπορούν είτε να προστεθούν στο σκυρόδεμα κατά την παρασκευή του, είτε να απλωθούν στην επιφάνειά του μετά την πήξη. Η επικάλυψη του χάλυβα με εποξειδικές ρητίνες ή νικέλιο δεν χρησιμοποιείται στη χώρα μας, ενώ το θερμό γαλβάνισμα χρησιμοποιείται μόνο για τα δομικά πλέγματα και όχι για τα υπόλοιπα στοιχεία οπλισμού. Ακόμα όμως και η περίπτωση αυτή δεν είναι κανόνας γιατί συχνά για λόγους οικονομίας χρησιμοποιούνται "μαύρα" πλέγματα.

Απ' ότι φαίνεται λοιπόν από τα παραπάνω για την αντιδιαβρωτική προστασία του σιδηροπλισμού στην Ελλάδα, δεν λαμβάνονται όλα τα απαραίτητα μέτρα, παρά το γεγονός ότι μεγάλο ποσοστό των έργων είναι παραθαλάσσιο και επομένως, εκτίθεται σε αεροζόλ με υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων. Συνεπώς, το θερμό γαλβάνισμα σε συνδυασμό με αναστολείς διάβρωσης και στεγανοποιητικές επικαλύψεις θα μπορούσε να συντελέσει σημαντικά στη σωστή κατεύθυνση αντιμετώπισης του προβλήματος αυξάνοντας το χρόνο ζωής μιας κατασκευής. Αυτό βέβαια θα αύξανε σε μεγάλο βαθμό και το κόστος, σε κατασκευές όμως υψηλών απαιτήσεων, όπως γέφυρες ή σήραγγες, που μάλιστα επιβαρύνονται πολύ περισσότερο από τους διαβρωτικούς παράγοντες σε σχέση με κατασκευές σε αστικό περιβάλλον, η λύση του γαλβανισμένου οπλισμού θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και να αξιολογείται προσεκτικά από το μελετητή (Ν. ΠΙΣΤΟΦΙΔΗΣ, σελ. 9-13, 2006).

4.2.5.2 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.

4.2.6 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.

Σημαντικές εξελίξεις έχουν γίνει σε σχέση με τη χρήση του ανοξειδωτου χάλυβα σε κατασκευές των τελευταίων ετών, καθώς και η δημοσίευση μιας σειράς μεγάλων διαρθρωτικών κατασκευών από ανοξειδωτο χάλυβα σύμφωνα με τα πρότυπα σχεδιασμού. Αν και το αρχικό κόστος των υλικών από ανοξειδωτο χάλυβα προϊόντων είναι περίπου τέσσερις φορές μεγαλύτερη από ισοδύναμα προϊόντα χάλυβα, άνθρακα ο ανοξειδωτος χάλυβας έχει καλύτερη συμπεριφορά από τον κοινό χάλυβα, αν και υπάρχει επαρκής ποικιλία των φυσικών ιδιοτήτων τους (L.Gardner, 2005).

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.

Όταν ένα δείγμα είναι σε παθητική κατάσταση είναι πολωμένο είτε καθοδικά είτε ανοδικά, το μηδενικό δυναμικό δείχνει διαφορετικές τιμές σε συνέχεια της σάρωσης της γραμμικής καμπύλης πόλωσης. Η μη γραμμικότητα μαζί με αυτό το δυναμικό μετατόπισης προκαλεί ότι ο καθορισμός των τιμών αντίστασης πόλωσης είναι αναξιόπιστος, επειδή οι αξίες είναι υποτιμημένες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο προσδιορισμός της απόκλισης της καμπύλης πόλωσης σύμφωνα με το γραμμικό σχήμα μας βοηθάει να διακρίνουμε τη διάβρωση σε μια ενεργή ή σε μια παθητική κατάσταση. Ο προσδιορισμός της αντίστασης πόλωσης από τη μέθοδο γραμμικής πόλωσης είναι αναξιόπιστη στην περίπτωση του χάλυβα σε μια παθητική κατάσταση (Milan Kouril, 2006).

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., 2006)

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες είναι πολύ καλό και μόνιμο αντιοξειδωτικό 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., Δημόγλου Ε., 2007).

4.2.7 Επισκευή και αποκατάσταση δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα

Ο συμβατικός τρόπος επισκευής μιας διαβρωμένης κατασκευής είναι η αποκατάσταση των δομικών στοιχείων. Τα κυριότερα στάδια της μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

- Καθαίρεση του πάχους επικάλυψης του σκυροδέματος συνήθως μέχρι αποκαλύψεως των οπλισμών.
- Καθαρισμός των διαβρωμένων οπλισμών

- Ενίσχυση του υπάρχοντος οπλισμού όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο για τη στατική επάρκεια της κατασκευής (απομοίωση της διατομής του υπάρχοντος οπλισμού λόγω διάβρωσης, στατική ανεπάρκεια της κατασκευής λόγω διάβρωσης)
- Επικάλυψη του εκτεθειμένου οπλισμού με τσιμεντοειδή χρώματα ή εποξειδικές ρητίνες ανάλογα βέβαια και με το σύστημα επισκευής που θα επιλεγεί στο στάδιο της αποκατάστασης.
- Αποκατάσταση του πάχους επικάλυψης των οπλισμών με νέο σκυρόδεμα, τσιμεντοκονίαμα, εποξειδικό κονίαμα.
- Εφαρμογή συστήματος επικάλυψης με χρώματα του σκυροδέματος τόσο για λόγους αισθητικής όσο και για τη μείωση της διαπερατότητας (στεγανοποίηση) του σκυροδέματος σε ρυπούς όπως χλωριόντα, διοξείδιο του άνθρακα ή υγρασία, νερό.

Κρίσιμο στάδιο της παραπάνω μεθόδου είναι η επιλογή των υλικών αποκατάστασης των φθορών αλλά και η τεχνική εφαρμογής τους. Ωστόσο θα πρέπει να σημειωθεί και να αποσαφηνισθεί ότι η παραπάνω μέθοδος είναι αποτελεσματική σε κατασκευές που πάσχουν κυρίως από ενανθράκωση του σκυροδέματος (ΚΑΝΕΠΕ). Στην περίπτωση όμως διάβρωσης λόγω χλωριόντων η μέθοδος κρίνεται ανεπαρκής.

Η τοπική αποκατάσταση φθορών σε είδη «μολυσμένο» από χλωριόντα σκυρόδεμα μελλοντικά προκαλεί επανεμφάνιση της διάβρωσης και δημιουργία ρηγματώσεων στις παράπλευρες/ γειτονικές επιφάνειες του σκυροδέματος όπου έγινε η επισκευή και η αποκατάσταση. Η επανεμφάνιση της διάβρωσης συμβαίνει ακόμα και αν είχαν καθαιρεθεί και αποκατασταθεί όλα τα σαθρά (διαβρωμένα) δομικά στοιχεία της κατασκευής κατά τη διάρκεια των επισκευών της/ της αναμόρφωσης της. Κυρίως λόγος επανεμφάνισης της διάβρωσης είναι ότι λόγω της δημιουργίας γαλβανικού στοιχείου μεταξύ των επισκευασμένων και μη περιοχών. Η μερική αποκατάσταση των φθορών έχει ως συνέπεια τη διάβρωση των γειτονικών περιοχών εκεί όπου η συγκέντρωση των χλωριόντων στη μάζα του υπάρχων σκυροδέματος έχει ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή. Στην περίπτωση αυτή η διάβρωση προχωρά σε εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς εξαιτίας της διαφοράς δυναμικού που αναπτύσσεται στον οπλισμό μεταξύ των επισκευασμένων (ο οπλισμός βρίσκεται σε παθητική κατάσταση) και των κρίσιμων (οπλισμός σε ενεργή κατάσταση στις γειτονικές μη επισκευασμένες περιοχές) και μη περιοχών.

Συνήθως η αποκατάσταση και η προστασία κατασκευών από Ο.Σ. των οποίων η διάβρωση οφείλεται στην προσβολή τους από χλωριόντα, γίνεται με εφαρμογή άλλων μεθόδων προστασίας (π.χ. καθοδική προστασία, απομάκρυνση χλωριόντων, αναστολείς διάβρωσης), ή με συνδυασμό συμβατικής αποκατάστασης και προστασία αυτής δια μέσω ηλεκτροχημικών μεθόδων.

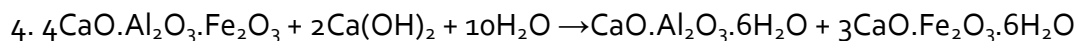
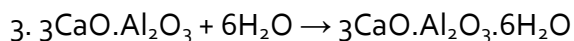
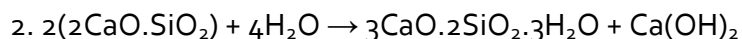
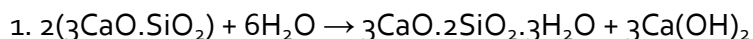
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5 ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ

5.1 Εισαγωγή

Τσιμέντο είναι ένα υδραυλικό συνδετικό κονίαμα, δηλαδή ένα λεπτό διαμερισμένο ανόργανο υλικό (σκόνη), 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 σκληραίνει 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 $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ και η αλκαλική φύση του στο $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Τσίμας Σ., 2001). Στη χημεία του τσιμέντου, ακολουθούνται συχνά οι εξής συντμήσεις για κωδικοποίηση των βασικών του συστατικών :

C=CaO, S=SiO₂, A=Al₂O₃, F=Fe₂O₃, H=H₂O, M=MgO

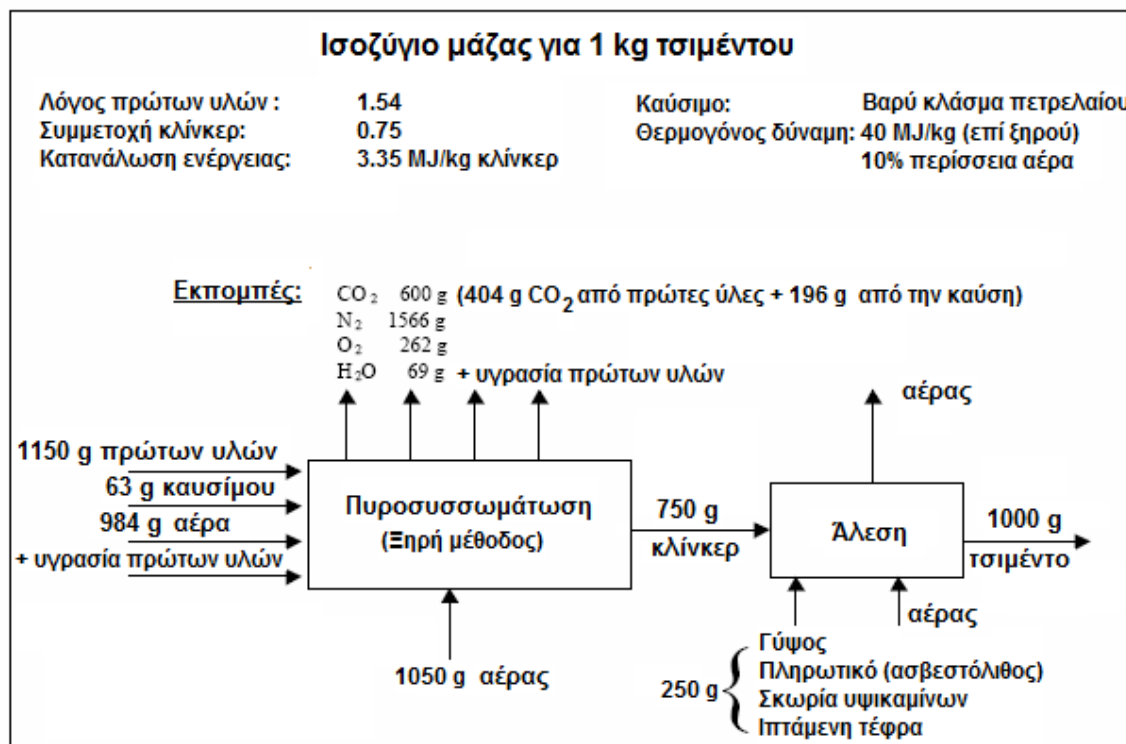
Τα ανωτέρω είναι τα τέσσερα κύρια συστατικά του τσιμέντου, τα οποία δεν παρουσιάζονται στο τσιμέντο τελείως καθαρά, αλλά με προσμίξεις MgO, TiO₂, K₂O, Na₂O, Mn₂O₃, κ.λ.π. Ο προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης (των τεσσάρων βασικών συστατικών) του κλίνκερ του τσιμέντου πόρτλαντ γίνονται με βάση τους υπολογισμούς του Bogue R. H (R.H.Bogue, 1955).

Εκτός από το τσιμέντο τύπου πόρτλαντ χρησιμοποιούνται και άλλα είδη τσιμέντων ειδικά τσιμέντα ή τσιμέντα ειδικών κατηγοριών ανάλογα τις απαιτήσεις του έργου και τις ιδιότητες που πρέπει να έχει. Η διαφορά τους με τα κοινά τσιμέντα είναι η σύνθεση του μίγματος των πρώτων υλών (Frey, 1999). Τα ειδικά τσιμέντα διακρίνονται σε: τσιμέντα τοιχοποιίας, ανθεκτικά στην επίδραση των θεικών αλάτων, χαμηλής θερμότητας ενυδάτωσης, ανθεκτικά στον παγετό, συνδετικές κονίες για υποστρώματα δρόμων, αλινιτικά τσιμέντα, αλουμινικά και αλουμινοθειικά τσιμέντα και λευκά τσιμέντα.

5.2 Συστατικά τσιμέντου

Η σημαντικότερη πρώτη ύλη για την παραγωγή του κλίνκερ τσιμέντου είναι τα ασβεστολιθικά πετρώματα, που εξορύσσονται επιφανειακά κοντά στη μονάδα παραγωγής του τσιμέντου. Επειδή, ποσοστό περίπου 80% από τους 1.50 - 1.65 τόνους πρώτων υλών, που απαιτούνται για

την παραγωγή 1 τόνου κλίνκερ, είναι ασβεστολιθικό υλικό, είναι προφανής η αναγκαιότητα γειτνίασης της θέσης εξόρυξης ασβεστολιθικών πετρωμάτων και της μονάδας παραγωγής κλίνκερ τσιμέντου. Ενδεικτικό ισοζύγιο πρώτων υλών και οι πρώτες ύλες, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή τσιμέντου, δίνονται στο Σχήμα 5.1 (Τσακαλάκης Κ., 2010).



Σχήμα 5.1 Ισοζύγιο πρώτων υλών και προϊόντων στην παραγωγή 1 kg τσιμέντου.

Το μείγμα των πρώτων υλών (θραυσμένος ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα, χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομετάλλευμα, βωξίτης, κ.α.) αναμειγνύονται σε κατάλληλη αναλογία και λειοτριβούνται (Σχήμα 5.1).

Το τσιμέντο συνίσταται από τα κύρια συστατικά του, από τα δευτερεύοντα συστατικά του, από το θειικό ασβέστιο και τα πρόσθετα. Ως κύρια συστατικά, εκτός του κλίνκερ (Κ) 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_3 καθώς και από τα θειικά του καυσίμου. Το θειικό ασβέστιο μπορεί να προστεθεί κυρίως ως γύψος, που είναι και η περισσότερο συνηθισμένη μορφή.

Τα πρόσθετα συστατικά είναι τα λεπτομερώς διαμερισμένα ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα 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., 2001).

5.3 Ορυκτά Πρόσθετα Τσιμέντου

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 (Θηραϊκή γη, Μηλαϊκή γη) και 2. Τεχνητές ποζολάνες όπως :α. Ιπτάμενες τέφρες, β. Πυριτική παιπάλη, γ. Σκωρίες υψικαμίνων, δ. Τέφρα κελύφους ρυζιού

Οι ποζολάνες είναι υλικά τα οποία από μόνα τους δεν έχουν υδραυλικές ιδιότητες, όταν όμως αναμιχτούν με νερό παρουσία οξειδίου και υδροξειδίου του ασβεστίου, $Ca(OH)_2$ αποκτούν υδραυλικές ιδιότητες παρόμοιες του τσιμέντου. Οι ποζολάνες είναι υλικά τα οποία περιέχουν υψηλές ποσότητες διοξειδίου πυριτίου καθώς επίσης περιέχουν και σημαντικά ποσά από οξείδια αλουμινίου και σιδήρου. Η ενυδάτωση των ποζολανών σε σύγκριση με την ενυδάτωση των πυριτικών ενώσεων στο τσιμέντο Πόρτλαντ, είναι σχετικά αργή αντίδραση και χαρακτηρίζεται από χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης και χαμηλές πρώιμες αντοχές. Η ενυδάτωση των πυριτικών ενώσεων στο τσιμέντο Πόρτλαντ έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό του C-S-H και του υδροξειδίου του ασβεστίου CH. Οι ποζολάνες αντιδρούν με το υδροξείδιο του ασβεστίου το οποίο σχηματίζεται από την αντίδραση ενυδάτωσης του τσιμέντου Πόρτλαντ με το νερό προς σχηματισμό του C-S-H. Το C-S-H το οποίο παράγεται από την ποζολανική αντίδραση έχει μικρότερη πυκνότητα από το C-S-H που παράγεται από την ενυδάτωση του τσιμέντου. Ωστόσο,

λόγο του ότι η ταχύτητα αντίδρασης είναι πολύ μικρότερη, τα προϊόντα της ποζολανικής αντίδρασης καταλαμβάνουν τους είδη υπάρχον τριχοειδής πόρους της τσιμεντόπαστας. Η προσθήκη των ποζολανών στο τσιμέντο βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες και μειώνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η προσθήκη των ποζολανικών ορυκτών πρόσθετων στο τσιμέντο δεν κλείνει τους τριχοειδής πόρους, αλλά μειώνει σημαντικά το ποσοστό τους χαμηλώνοντας το κλάσμα του όγκου του CH με ταυτόχρονη αύξηση του συνολικού ποσού του C-S-H (Garboczi, E.Z. and Bentz, D.P., 2001). Τα ορυκτά πρόσθετα λόγω της μικρής κοκκομετρίας τους είναι γνωστό ότι αυξάνουν την απαίτηση σε νερό ανάμιξης σχεδόν ευθέως ανάλογα με την ποσότητα τους στη τσιμεντόπαστα. Κατά συνέπεια για να κρατηθεί αμετάβλητος ο λόγος νερού / τσιμέντο με προσθήκη ποζολανικών προϊόντων σε ένα μίγμα, θα πρέπει να γίνει ταυτόχρονα προσθήκη ρευστοποιητών έτσι ώστε να βελτιωθεί η εργασιμότητα του τελικού μίγματος.

Οι ποζολάνες που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

τεχνητές ποζολάνες (παραπροϊόντα χημικών βιομηχανιών ή βιομηχανιών παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από λιγνίτη) αργυλοπυριτικά υλικά που προέρχονται από κάποια θερμική κατεργασία σαν απόβλητα. Τέτοια υλικά είναι ιπτάμενη τέφρα παραπροϊόν τη παραγωγικής διαδικασίας των ατμοηλεκτρικών σταθμών, η σκωρία υψικαμίνων και η φαρίνα ηλεκτροφίλτρων παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου.

φυσικές ποζολάνες όπως Μηλαϊκή γη, προέρχονται από ηφαιστιογενής πηγές (πυροκλαστικά υλικά).

Για τη χρήση των φυσικών ποζολανών απαιτείται διαδικασία θραύσης, άλεσης και κοκκομετρική διαβάθμιση αυτών. Στην παραπάνω διαδικασία πολλές φορές περιλαμβάνεται και τη θερμική ενεργοποίηση τους. Οι τεχνητές ποζολάνες είναι συνήθως βιομηχανικά παραπροϊόντα όπως της βιομηχανίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της βιομηχανίας παραγωγής χυτοσιδήρου, κραμάτων σιδηροπυριτίου. Βασικό πλεονέκτημα της χρήσης των τεχνητών ποζολανών είναι ότι δεν απαιτούν πριν την προσθήκη τους στο σκυρόδεμα οποιαδήποτε διαδικασία με συνέπεια τη μείωση του κόστους και την εξοικονόμηση ενέργειας.

Τεχνητές ποζολάνες αναφέρονται παρακάτω:

➤ **Ιπτάμενη Τέφρα (Fly Ash – EN450-1:2005):**

Η ιπτάμενη τέφρα είναι παραπροϊόν της καύσης λεπτοαλεσμένου άνθρακα στα ηλεκτροπαραγωγά εργοστάσια (λιγνίτη για τα Ελληνικά δεδομένα). Οι ιδιότητες της ιπτάμενης τέφρας εξαρτώνται από τη χημική σύσταση τους και βάση αυτών κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες τη Class F και Class C. Η κατηγορία C περιέχει μεγαλύτερη συγκέντρωση σε μονοξείδιο του ασβεστίου CaO από ότι η κατηγορία F και κατά συνέπεια έχει περισσότερα τσιμεντοειδή χαρακτηριστικά από ότι οι ποζολάνες. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM 618 (ASTM C 618, American Society for Testing and Materials) ιπτάμενες τέφρες κατηγορίας F είναι παραπροϊόντα από την καύση του Λιθάνθρακα ή του ασφαλούχου άνθρακα (άνθρακας περιέχων άσφαλτο). Ενώ η κατηγορία C είναι παραπροϊόν της καύσης του λιγνίτη (Helmuth, R.A., 1987). Επίσης η κατηγορία F αποτελείται κυρίως από υαλώδης πυριτικές ενώσεις οι οποίες περιέχουν αλουμίνιο, σίδηρο και αλκάλια. Αποτελούνται κυρίως από σφαιρικά σωματίδια διαστάσεων της τάξης από 1μm έως 100μm με μέση διάμετρο 20μm (Benjamin S.E., 2000). Το

70% της χημικής σύστασής τους αποτελείται από SiO_2 , Al_2O_3 και Fe_2O_3 (Klieger, Paul, 1994). Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα είναι τα εξής (Kouloumbi N., Batis G., 1992):

- Βελτιώνουν την εργασιμότητα του σκυροδέματος,
- Μειώνουν τη θερμότητα ενυδάτωσης,
- Δίνουν σκυροδέματα υψηλής ποιότητας και χαμηλού κόστους,
- Αυξάνουν την αντίσταση σε θειικά ιόντα,
- Βελτιώνουν την αντίσταση έναντι της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης,
- Αυξημένες τελικές αντοχές,
- Χαμηλότερη συρρίκνωση σκυροδέματος,
- Μικρότερο πορώδες και κατά συνέπεια μικρότερη διαπερατότητα σε περιβαλλοντικούς ρύπους,
- Μεγαλύτερη αντοχή σε κύκλους ψύξης – θέρμανσης.

➤ Πυριτική Παιπάλη (Silica Fume ή microsilica- EN13263-1:2005):

Η πυριτική παιπάλη είναι παραπροϊόν της βιομηχανικής παραγωγής πυριτικών κραμάτων ή του σιδηροπυριτίου. Είναι εξαιρετικά λεπτόκοκκη (παιπάλη) με μέγεθος σφαιρικών σωματιδίων 100 φορές μικρότερο από αυτά του τσιμέντου πόρτλαντ ή της ιπτάμενης τέφρας. Η διάμετρος των σωματιδίων της πυριτικής παιπάλης κυμαίνεται από 0,02 έως 0,5μm και μέση διάμετρο 0,1μm. Κατά κύριο λόγο η χημική σύσταση της πυριτικής παιπάλης είναι διοξείδιο του πυριτίου SiO_2 σε ποσοστό 85% έως 90%.

Η προσθήκη της πυριτικής παιπάλης στο σκυρόδεμα έχει τις εξής ιδιότητες (J.M.R. Dotto, 2004):

- Χαμηλώνει τη θερμότητα ενυδάτωσης
- Επιβραδύνει την αλκαλοπυριτική αντίδραση
- Αυξάνει τις μηχανικές αντοχές του σκυροδέματος
- Αυξάνει την αντίσταση έναντι της προσβολής σε θειικά ιόντα
- Μειώνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος
- Και τέλος αυξάνει την αντοχή σε κύκλους ψύξης - θέρμανσης και την ανθεκτικότητα σε διάβρωση από νερό.

➤ Σκωρίες Υψικαμίνων (Ground Granulated Blast Furnace Slag – BS6699:1992):

Η σκωρία προέρχεται από κονιορτοποίηση των παραπροϊόντων υψικαμίνων σιδηρομεταλλευμάτων. Η σκωρία δεν είναι μεταλλικό προϊόν και αποτελείται κατά βάση από πυριτικά και αργυλοπυριτικά άλατα του ασβεστίου (Ch. Malami, G. Batis, 1994).

Λόγω των υδραυλικών ιδιοτήτων της σκωρίας, σωματίδια κοκκομετρίας μικρότερης από 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 (An Cheng, 2005). 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.
- Υψηλή ανθεκτικότητα στη διάβρωση από θειικά ιόντα
- Μείωση της συρρίκνωσης και κατά συνέπεια μείωση του πορώδους και της διαπερατότητας του σκυροδέματος.

Τα τσιμέντα σκωρίας έχουν επίσης καλή εργασιμότητα και χαμηλή απαίτηση σε νερό (Ch. Malami, V. Kaloidas, 1994). 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 (G. Batis, N. Kouloumbi, 1994).

➤ Φαρίνα Ηλεκτροφίλτρων (Cement Kiln Dust):

Η φαρίνα ηλεκτροφίλτρων (Φ/ΗΦ), είναι παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου, περιέχει κυρίως ανθρακικό ασβέστιο και μπορεί να καταταχθεί στα πρόσθετα τύπου Ι, σύμφωνα με την νέα ευρωπαϊκή κωδικοποίηση. Με την προσθήκη της Φ/ΗΦ σαν πληρωτικό πρόσθετο στο τσιμέντο ή το σκυρόδεμα βελτιώνεται καταρχήν η ανθεκτικότητα του ως προς τη διάβρωση (Batis G., Katsiamboulas A., 1996, G. Batis, Th. Routoulas, 1999, Γ. Μπατής, Κ. Μελετίου, 1999). Επιπρόσθετα, η υψηλή περιεκτικότητα της Φ/ΗΦ σε αλκάλια της δίνει ένα ακόμα πλεονέκτημα στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί μαζί με σκωρία στο τσιμέντο αφού ενεργοποιεί την ενυδάτωση της σκωρίας (C. Shi and R.L. Day, 1996). Οπότε οι πρώιμες αντοχές σε θλίψη των σκυροτσιμέντων βελτιώνονται με ενεργοποίηση είτε με NaOH, ή Na₂CO₃, ή Na₂SiO₃ (C. Shi and R.L. Day, 1995).

➤ Φυσικές Ποζολάνες - Φυσικοί Ηφαιστειακοί Λίθοι:

Η προέλευση των φυσικών ποζολανών είναι ηφαιστειογενής. Η δραστική ύαλος που περιέχουν δημιουργήθηκε από ηφαιστειογενή έκρηξη. Τα αέρια που ελευθερώθηκαν κατά την έκρηξη από το υπό μορφή τήγματος μίγμα και η απότομη ψύξη, που ακολούθησε, προκάλεσε την κρυστάλλωση με μεγάλη εσωτερική επιφάνεια. Κατά συνέπεια οι φυσικές ποζολάνες είναι ενεργειακά αναβαθμισμένα υλικά.

Η σύσταση διαφόρων φυσικών ποζολανών δίνονται στον Πίνακα 1.1. Στην Ελλάδα υπάρχει φυσική ποζολάνη που έχει πάρει το όνομα της από τη νήσο Σαντορίνη, και είναι γνωστή με το όνομα Θηραϊκή Γη (στο εξωτερικό γνωστή σαν *Santorin Earth*). Σε σύγκριση με τις άλλες φυσικές ποζολάνες έχει υψηλότερο ποσοστό SiO₂.

Η χρήση των φυσικών ποζολανών σαν πρόσθετα στο τσιμέντο έχει μακρόχρονη παρουσία. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για λόγους μείωσης του κόστους. Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν για εξοικονόμηση ενέργειας. Για αυτόν τον λόγο η χρήση τους γενικεύθηκε μετά την ενεργειακή κρίση του 1970. Με τον χρόνο διαπιστώθηκε η αυξημένη αντοχή τους στη διάβρωση.

Σύμφωνα με διεθνείς προδιαγραφές ASTM C595 τα τσιμέντα αυτά χαρακτηρίζονται σαν Type IP. Σύμφωνα με Ευρωπαϊκές EN 246-1 και Γερμανικές προδιαγραφές DIN 1164 T1 χαρακτηρίζονται σαν Trasszement (εν συντομία Trz) (ASTM C 595-07, 2007, DIN 1164-31, 1990, DIN 1164-10, 2004).

Η χρήση των ποζολανών σαν πρόσθετα μπορεί να γίνει είτε κατά την παραγωγή του τσιμέντου με ξηρή συνάλεση στο κλίνκερ, (Σύνθετα Τσιμέντα), είτε με ανάμιξη εκ των υστέρων κατά την παραγωγή του σκυροδέματος. Στη δεύτερη περίπτωση η ποζολάνη πρέπει να έχει αλεσθεί.

Οι φυσικές ποζολάνες σαν πρόσθετα στο τσιμέντο πόρτλαντ συντελούν ώστε :

- Να μειωθεί η εκλυόμενη θερμότητα κατά την πήξη
- Να αυξηθεί η αντοχή σε διάβρωση
- Επιβραδύνεται η ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών

Όλα αυτά είναι συνέπειες της συμμετοχής της φυσικής ποζολάνης στις αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου.

Κατά την ενυδάτωση πρώτα αντιδρούν οι ενώσεις του κλίνκερ. Στη συνέχεια όμως αρχίζει με βραδύ ρυθμό η αντίδραση της υδράσβεστου, που απελευθερώνεται από τις ενώσεις του κλίνκερ με τα δραστικά συστατικά της ποζολάνης. Κύριο προϊόν της αντίδρασης αυτής είναι το CSH. Επειδή η αντίδραση αυτή είναι βραδεία επιβραδύνεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας αλλά και η ανάπτυξη μηχανικών αντοχών. Ταυτόχρονα η δέσμευση της υδρασβέστου συντελεί στην αύξηση της ανθεκτικότητας σε όξινο περιβάλλον. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι, η αντίδραση της υδρασβέστου με τα SiO₂, Al₂O₃ αλλά και το Fe₂O₃ γίνεται μέσα στους πόρους της μάζας του τσιμέντου και τα προϊόντα μειώνουν το πορώδες.

Πίνακας 5.1 Χημική Σύσταση και Ειδικό Βάρος Φυσικών Ποζολανών Διαφορετικής Προέλευσης.

Σύνθεση	Περιοχή προέλευσης					
	Ρήνου	Βαυαρίας	Αυστρίας	Salone Ιταλίας	Bacoli Ιταλίας	Θηραϊκή Γη
ΑΠ %	4,6- 11,8	6,0-8,8	15,2	4,3	3,5	4,5
SiO ₂	51,0- 57,7	59,0-65,9	57,1	48,1	58,9	63,6
Al ₂ O ₃	17,1- 19,0	13,8-16,6	17,5	18,2	20,5	17,1
Fe ₂ O ₃	1,8-5,8	3,0-5,4	3,3	7,3	0,8	4,1
TiO ₂	Ίχνη	Ίχνη	0,8	0,7	0,5	0,5-1
CaO	3,1-5,8	3,3-7,8	0,3	9,9	4	3,6
MgO	1,1-1,7	0,9-2,8	0,9	5,7	1,5	1,8
Na ₂ O	0,8-5,4	1,7-2,2	0,5	0,9	2,7	2,4
K ₂ O	2,8-6,3	1,5-2,3	2,8	4,4	6,6	2,1
SO ₃	Ίχνη	Ίχνη	1,9	Ίχνη	Ίχνη	Ίχνη
Ε.β.	2,4-2,6	2,5-2,6	2,4	2,7	2,4	2,4

Τα τσιμέντα με πρόσθετο φυσική ποζολάνη είναι ανθεκτικότερα σε σχέση με το αμιγές τσιμέντο πόρτλαντ σε μαλακό νερό, θαλασσινό νερό και σε αραιά διαλύματα αλάτων μαγνησίου. Μόνο σε πυκνά διαλύματα αλάτων μαγνησίου η αντοχή του τσιμέντου πόρτλαντ είναι μεγαλύτερη. Ακόμη λόγω της ικανότητας δέσμευσης των χλωριόντων συντελούν στην προστασία του οπλισμού. Στην προστασία του οπλισμού συνεισφέρουν και με θυσιαζόμενες αταξίες, τις οποίες απέκτησαν λόγω της απότομης ψύξης κατά τον σχηματισμό τους.

5.4 Τύποι τσιμέντου

Η αντοχή του σκυροδέματος εξαρτάται και από την κατηγορία αντοχής του τσιμέντου. Το κριτήριο της οικονομικότητας είναι εκείνο, που καθορίζει ποιος συνδυασμός ποιότητας τσιμέντου και λόγου νερού προς τσιμέντο θα επιλεγεί για την παρασκευή του σκυροδέματος. Ανάλογα με τη σύνθεση τους, το βαθμό άλεσης και τα πρόσθετα υλικά, τα τσιμέντα κατατάσσονται σε διάφορους τύπους και κατηγορίες αντοχών.

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. Το πρότυπο αυτό έχει τεθεί σε ισχύ στην Ελλάδα από το 2001 (ΕΛΟΤ EN 197-1).

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

- CEM I, Τσιμέντο Portland
- CEM II, Σύνθετα τσιμέντα Portland, (Πόρτλαντ με έως 20% τεχνητή ή φυσική Ποζολάνη)
- CEM III, Σκωριοτσιμέντα, (Ποζολανικό τσιμέντο Πόρτλαντ) με ποσοστό ποζολάνης που κυμαίνεται από 20-40%
- CEM IV, Ποζολανικά τσιμέντα, που περιλαμβάνει τα τσιμέντα που είναι ανθεκτικά στην επίδραση των θεικών αλάτων.
- CEM V, Σύνθετα τσιμέντα

Στον πίνακα 1.2, παρουσιάζονται οι επιπλέον κατηγορίες στις οποίες χωρίζεται ο καθένας από τους παραπάνω πέντε κύριους τύπους τσιμέντου (Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., 2000).

Σε αυτό τον πίνακα περιέχονται επιπρόσθετα το θειικό ασβέστιο και τα ενδεχόμενα πρόσθετα.

Πίνακας 5.2: Τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1

Τύπος	Ονομασία	Κύρια συστατικά*									Δευτ σοστ
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L	
ΤΣΙΜΕΝΤΑ PORTLAND**											
CEM I	I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ PORTLAND											
CEM II	II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	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	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	
	II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	
	II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	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								
II/B-M	65-79	21-35									
ΕΚΘΡΟΤΕΤΣΙΜΕΝΤΑ											
CEM III	III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	
	III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	
ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ											
CEM IV	IV/A	65-89	-	11-35			-	-	-	-	0-5
	IV/B	45-64	-	36-55			-	-	-	-	
ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ											
CEM V	V/A	40-64	18-30	-	18-30		-	-	-	-	0-5
	V/B	20-39	31-50	-	31-50		-	-	-	-	

5.5 Ασβεστολιθικά τσιμέντα

Οι τύποι των τσιμέντων που παρασκευάζονται σε κάθε χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης εξαρτώνται από τις διαθέσιμες πρώτες ύλες, όπως επίσης και από τη ζήτηση κάθε τύπου τσιμέντου. Έτσι, ανάλογα με τις διαθέσιμες και χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες, δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων που μπορούν να παραχθούν. Οι τύποι αυτοί είναι το κοινό τσιμέντο Portland, τα τσιμέντα με ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα (πυριτική ή ασβεστιτική), τσιμέντα με σκωρία υψικαμίνου, τσιμέντα με πυριτική παιπάλη, με ασβεστόλιθο κλπ. 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. Το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 προδιαγράφει 4 τύπους ασβεστολιθικών τσιμέντων Portland, που περιέχουν τον ασβεστόλιθο ως κύριο συστατικό σε ποσοστά 6-20% (τύποι II/AL και II/A-LL) και 21-35% (τύποι II/B-L και II/B-LL). Σύμφωνα με το ίδιο πρότυπο, όταν ο ασβεστόλιθος (L, LL) χρησιμοποιείται ως κύριο συστατικό στο τσιμέντο, θα πρέπει να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

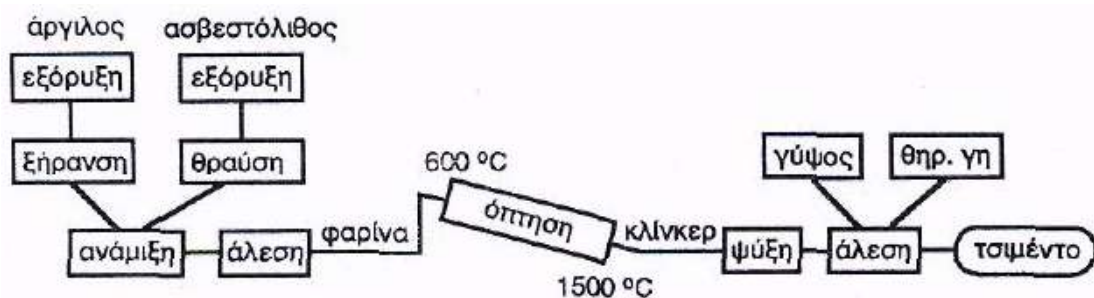
- Η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο υπολογιζόμενη από την περιεκτικότητα σε οξείδιο του ασβεστίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 75% κατά μάζα.
- Η περιεκτικότητα αργίλου προσδιοριζόμενη με τη μέθοδο κυανού του μεθυλενίου σύμφωνα με το EN 933-9 δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 1.20 g/100 g. Για τη δοκιμή αυτή ο ασβεστόλιθος πρέπει να κονιοποιηθεί σε μία λεπτότητα περίπου 5000 cm²/g προσδιοριζόμενη ως ειδική επιφάνεια σύμφωνα με το EN 196-6.
- Η περιεκτικότητα ολικού οργανικού άνθρακα (TOC), όταν προσδιορίζεται σύμφωνα με το prEN 13639:1999, πρέπει να συμμορφώνεται με τα παρακάτω κριτήρια:
 - LL: δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.20% κατά μάζα.
 - L: δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.50% κατά μάζα.

5.6 Τσιμέντο Portland

Το κοινό τσιμέντο Portland (OPC, Ordinary Portland Cement, Type I) είναι γενικώς κατάλληλο για παραγωγή σκυροδέματος, στις περιπτώσεις όμως που δεν υπάρχει επαφή του σκυροδέματος με θεικές ενώσεις (τόσο στο έδαφος όσο και στα υπόγεια νερά με τα οποία πιθανόν έρχεται σε επαφή).

Το τσιμέντο τύπου πόρτλαντ είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σε παγκόσμια κλίμακα υλικό και προκύπτει από την έψηση σε θερμοκρασία κλίνκερ 1400° έως 1500°C, ομογενοποιημένου μίγματος ασβεστόλιθου σε περιεκτικότητα 75% και αργιλοपुरιτικών ενώσεων σε περιεκτικότητα 25%. Ακολουθεί συνάλεση του ενδιάμεσου προϊόντος (κλίνκερ) με κατάλληλη ποσότητα γύψου. Ο γύψος προστίθεται προκειμένου να ελέγξει το χρόνο πήξης του τσιμέντου. Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα BS 12: 1991 και ASTM C 150-92 κανένα άλλο υλικό εκτός του γύψου, νερού δεν δύναται να προστεθούν μετά την έψηση του τσιμέντου πόρτλαντ (BS 12: 1991, ASTM C 150-05, 2005).

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 5.3: Σχηματικό διάγραμμα παρασκευής του τσιμέντου Portland.

5.7 Πλεονεκτήματα παραγωγής

Τα πλεονεκτήματα της παραγωγής τσιμέντων Portland με ασβεστόλιθο (ασβεστολιθικά τσιμέντα Portland), είναι η μείωση του κόστους παραγωγής, η εξοικονόμηση καυσίμου, η αύξηση της παραγωγικής ικανότητας των βιομηχανικών μονάδων, η αξιοποίηση των υψηλών αποθεμάτων ασβεστόλιθου στην Ελλάδα και η περιβαλλοντική ελάφρυνση (μείωση εκπομπών CO₂).

Ειδικότερα, όταν παράγεται ένα σύνθετο τσιμέντο με 20% ασβεστόλιθο, είναι προφανές ότι για 1 t προϊόντος χρειάζεται παραγωγή μόνο 750 kg κλίνκερ (5% γύψος) και, επομένως, σημαντικά μικρότερη κατανάλωση καυσίμου. Λαμβάνοντας υπόψη και τη μεγαλύτερη ενέργεια άλεσης που απαιτείται, όπως και το πρόσθετο κόστος μεταφοράς του ασβεστόλιθου στις διατάξεις άλεσης του τσιμέντου, τελικά προκύπτει ότι π.χ. προσθήκη 20% ασβεστόλιθου οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 16-17%. Επίσης, η χρήση ασβεστόλιθου για την παραγωγή ασβεστολιθικών τσιμέντων Portland έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγικής δυναμικότητας των τσιμεντοβιομηχανιών. Έτσι, σε ποσοστό προσθήκης του ασβεστόλιθου 1% αντιστοιχεί περίπου 1% αύξηση της παραγωγής. Ακόμη, η παραγωγή ασβεστολιθικών τσιμέντων Portland οδηγεί στη μείωση των εκπομπών CO₂, οι οποίες είναι περίπου 0.81-0.85 t/(t τσιμέντου). Η προσθήκη 15% ασβεστόλιθου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά περίπου 12%. Η μείωση αυτή είναι σημαντική, αν ληφθεί υπόψη η επικείμενη θεσμοθέτηση περιβαλλοντικού φόρου CO₂. Τέλος, με την παραγωγή ασβεστολιθικών τσιμέντων Portland επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών NO_x, που σήμερα είναι στο επίπεδο των 2 kg/(t κλίνκερ).

Ο απαιτούμενος πάγιος εξοπλισμός για την παραγωγή ασβεστολιθικών τσιμέντων συνίσταται στην εγκατάσταση συστήματος μεταφοράς του ασβεστόλιθου από το χώρο διαχείρισης των πρώτων υλών στους μύλους τελικής άλεσης του τσιμέντου. Στις περισσότερες βιομηχανικές μονάδες η διάταξη αυτή υπάρχει, αφού ο ασβεστόλιθος, με βάση τους παλαιότερους ελληνικούς κανονισμούς, μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως filler σε ποσοστό έως 3%. Κατά την παραγωγή των ασβεστολιθικών τσιμέντων μπορούν να επιτευχθούν επίπεδα ποιοτικού ελέγχου όμοια με της παραγωγής του αμιγούς τσιμέντου.

Τα ασβεστολιθικά τσιμέντα Portland οδηγούν σε ανταγωνιστικές ιδιότητες σκυροδέματος και βελτιώνουν την ανθεκτικότητά του. Η ανταγωνιστική συμπεριφορά των ασβεστολιθικών τσιμέντων αποδίδεται στη δράση του ασβεστόλιθου ως filler, στη βελτίωση του ρυθμού ενυδάτωσης του τσιμέντου, στο σχηματισμό των carboaluminates και σε διαφοροποιήσεις της μικροδομής του τσιμέντου. Το γεγονός ότι ο ασβεστόλιθος είναι πιο ευάλεστος από το κλίνκερ επιτρέπει την ευρύτερη κατανομή μεγέθους των σωματιδίων του τσιμέντου σε κλειστό κύκλωμα μύλου με διαχωριστές υψηλής αποτελεσματικότητας. Αυτό οδηγεί σε βελτιωμένη εργασιμότητα και λιγότερη διαρροή στα σκυροδέματα με ασβεστολιθικά τσιμέντα Portland, σε σύγκριση με το σκυρόδεμα αμιγούς τσιμέντου. Η πλατύτερη κατανομή μεγέθους των σωματιδίων μειώνει, επίσης, την απαίτηση σε νερό, αυξάνοντας την πυκνότητα και την αντοχή (ΕΛΟΤ EN 197-1, 2000, Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., 2004, Hawkins P., 2003, Kakali G., 2000).

5.8 Ενυδάτωση

Η ενυδάτωση του τσιμέντου είναι μια διαδικασία περισσότερο πολύπλοκη από την απλή μετατροπή άνυδρων ενώσεων στις αντίστοιχες ενυδατωμένες και περιλαμβάνει ένα σύνολο χημικών και φυσικό-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 τσιμέντο 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)
- Αργιλική φάση C_3A
- Φερριτική φάση C_4AF
- Ελεύθερο CaO
- Θεϊκά αλκάλια
- Θεϊκό ασβέστιο ως διυδρίτης, ημιυδρίτης ή ανυδρίτης
- Νερό

Το C_3S συνεισφέρει στην γρήγορη ενυδάτωση του τσιμέντου, στην καλή αρχική και τελική αντοχή και στην ανάπτυξη υψηλής θερμότητας ενυδάτωσης. Αντίστοιχα, το C_2S συνεισφέρει στην αργή ενυδάτωση, στην καλή τελική αντοχή και στην ανάπτυξη χαμηλής θερμότητας ενυδάτωσης. Το αργιλικό τριασβέστιο (C_3A) συνεισφέρει στην γρήγορη ενυδάτωση, στην ανάπτυξη υψηλής θερμότητας ενυδάτωσης και στην αρχική αντοχή. Τέλος το αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο (C_4AF) 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 θεϊκού 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 αργιλικά 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.

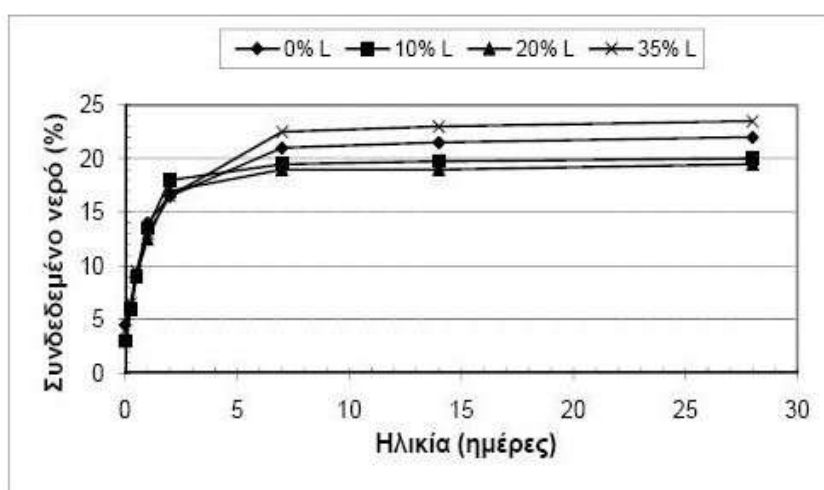
Ο ρυθμός ενυδάτωσης εξαρτάται κυρίως από τη σύσταση του αλίτη και ειδικότερα από τις προσμίξεις του, καθώς και από τις συνθήκες έψησης του κλίνκερ. Ο ρυθμός αυξάνεται με αύξηση των SO_3 στο τσιμέντο και ελαττώνεται με αύξηση του λόγου $\beta-C_2S / C_3S$ στο κλίνκερ.

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.

Η χημική αντίδραση του τσιμέντου με το νερό (ενυδάτωση τσιμέντου) παράγει προϊόντα που έχουν χαρακτηριστικά πήξης και σκλήρυνσης. Ουσιαστικά η χημεία-τεχνολογία του σκυροδέματος είναι η χημεία της αντίδρασης μεταξύ του τσιμέντου και του νερού. Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι όσο περισσότερο τσιμέντο (μέχρις ενός ορισμένου ορίου βέβαια) περιέχεται στην μονάδα όγκου του σκυροδέματος, εφόσον και οι λοιποί παράγοντες (ποιότητα και κοκκομετρική σύνθεση των αδρανών, ποσότητα νερού, μέθοδος διάστρωσης και συμπύκνωσης, κλπ.) παραμένουν σταθεροί, τόσο μεγαλύτερη αντοχή εμφανίζει το σκυροδέμα. Φυσικά η αύξηση αυτής της αντοχής δεν είναι απεριόριστη, αλλά σταματά στην αντοχή του λιγότερο ανθεκτικού υλικού του σκυροδέματος. Πάντως πρέπει να σημειωθεί ότι η τσιμεντόπαστα είναι η πηγή ανεπιθύμητων φαινομένων (πχ. ερπυσμός, συστολή ξήρανσης, μικρορηγματώση, χημική επίδραση διαβρωτικών παραγόντων) που δρουν αρνητικά στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Γι' αυτό είναι προτιμότερο η ποσότητα του τσιμέντου να κρατιέται σε χαμηλές τιμές (καλή κοκκομετρία αδρανών).

Η επικρατούσα άποψη είναι ότι ο ασβεστόλιθος συμμετέχει στις αντιδράσεις ενυδάτωσης και δεν συμπεριφέρεται αποκλειστικά ως αδρανές υλικό. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αντιφατικά αποτελέσματα σχετικά με το ποσοστό του ασβεστόλιθου, που ενσωματώνεται στις ενυδατωμένες φάσεις του τσιμέντου (το ποσοστό αυτό προσδιορίζεται σε 3-8% από διάφορους ερευνητές) και αυξάνεται με την αύξηση του C_3A του τσιμέντου. Παρότι, λοιπόν, ο ασβεστόλιθος συμπεριφέρεται κατά μεγάλο βαθμό ως αδρανές υλικό, έχει ευνοϊκή φυσική επίδραση στην ενυδάτωση του τσιμέντου, αφού οι πολύ λεπτοί κόκκοι του αποτελούν πυρήνες κρυστάλλωσης των προϊόντων ενυδάτωσης του κλίνκερ, με αποτέλεσμα την ταχύτερη καταβύθιση τους. Πάντως είναι αποδεκτό ότι ο ασβεστόλιθος ευνοεί το σχηματισμό των monocarboaluminates

(C₄AC H₁₁) σε βάρος του ετρινγκίτη κατά την πρώτη ημέρα ενυδάτωσης, αφού το CaCO₃ αντιδρά σε μικρή έκταση με το C₃A. Τα monocarboaluminates ανιχνεύονται μετά από 7-127 ημέρες σε ποσότητες που εξαρτώνται από την ποσότητα και τη δραστικότητα του υπάρχοντος CaCO₃. Αυτή η παρατήρηση δείχνει ότι η συνάθροιση των φάσεων μονοθειικού άλατος (AFm) και ετρινγκίτη (Aft), που παράγονται, μπορεί να εξαρτάται από τους σχετικούς ρυθμούς, που γίνονται ωφέλιμα τα ιόντα SO₄²⁻, Al(OH)₄⁻, CO₃²⁻. Έχει βρεθεί επίσης ότι παρεμποδίζεται η αντικατάσταση του ετρινγκίτη από τα μονοθειικά άλατα. Σε μεγαλύτερες ηλικίες παρατηρούνται παραπλήσιες ποσότητες ετρινγκίτη στα ασβεστολιθικά και τα αμιγή τσιμέντα. Στο Σχήμα 1-2 φαίνεται ότι η συμμετοχή του ασβεστόλιθου δεν επιδρά σημαντικά στο συνδεδεμένο νερό για ηλικίες παστών έως και δύο ημερών. Σε μεγαλύτερες ηλικίες, κατά κανόνα, το ποσοστό του συνδεδεμένου νερού των ασβεστολιθικών τσιμέντων είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του αμιγούς, ειδικότερα για ποσοστά συμμετοχής 20% και 35%. Πρέπει να σημειωθεί ότι το CaCO₃ δρα ως παράγοντας ελέγχου της πήξης και μπορεί να αντικαταστήσει σημαντικό ποσό της γύψου. Χαρακτηριστικό των ασβεστολιθικών τσιμέντων είναι ότι ο ρυθμός ενυδάτωσης του αλίτη και των αργλικών φάσεων είναι αυξημένος σε σχέση με τα αμιγή τσιμέντα. Σχετικά με τη θερμότητα ενυδάτωσης των ασβεστολιθικών τσιμέντων, υπάρχουν έρευνες που δείχνουν ότι η χρήση ασβεστόλιθου οδηγεί σε ελάττωσή της, ενώ άλλες δείχνουν αύξησή της (Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., 2004, Hawkins P., 2003, Baker A.P., 1991, Ingram K.D., 1992, Klemm W.A., 1990, Regourd M., 1986, Vernet C., 1986, Tulliani J.-M., 2002).

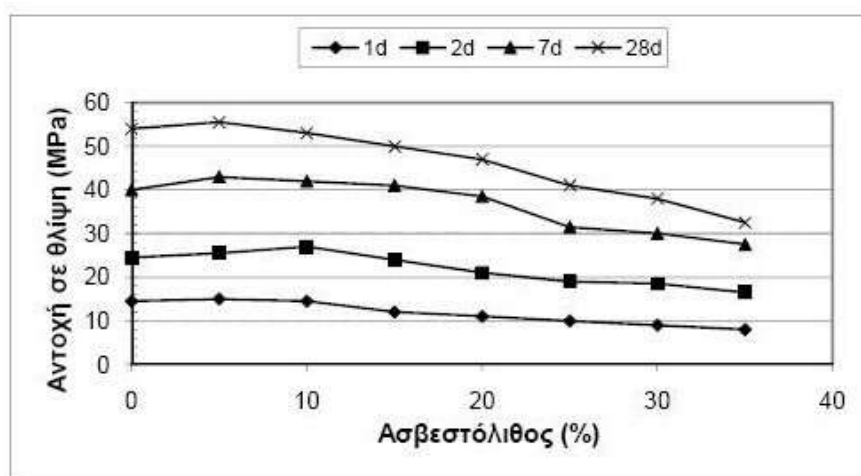


Σχήμα 5.2: Συνδεδεμένο νερό σε σχέση με τη συμμετοχή του ασβεστόλιθου και το χρόνο ενυδάτωσης.

5.9 Μηχανικές ιδιότητες

Η προσθήκη ασβεστόλιθου έχει γενικά θετική επίδραση στην ανάπτυξη των αντοχών των αντίστοιχων τσιμέντων. Οι αντοχές όλων των ηλικιών ασβεστολιθικών τσιμέντων Portland με περιεχόμενο ασβεστόλιθο 5-10% παραμένουν πρακτικά αμετάβλητες, συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες αντοχές των αμιγών τσιμέντων Portland. Ακόμα και για μεγαλύτερη συμμετοχή ασβεστόλιθου, η ποσοστιαία μείωση των αντοχών τους, σε σχέση με τα αμιγή, είναι σαφώς

μικρότερη από την αντίστοιχη μείωση της περιεκτικότητας τους σε κλίνκερ, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-3. Υπάρχουν αρκετές έρευνες σχετικά με τις αντοχές των ασβεστολιθικών τσιμέντων, οι οποίες υποδεικνύουν τη βέλτιστη ποσότητα του ασβεστόλιθου, που χρειάζεται να καθοριστεί για τον κάθε συνδυασμό ασβεστόλιθου και κλίνκερ, ώστε οι προκύπτουσες αντοχές να είναι στα αποδεκτά επίπεδα. Τα ασβεστολιθικά τσιμέντα Portland II/A-L (6-20% ασβεστόλιθος) μπορούν να ενταχθούν στις κατηγορίες αντοχών 52.5 N, 42.5 R, 42.5 N, 32.5 R και 32.5 N του EN 197-1, ενώ τα ασβεστολιθικά τσιμέντα Portland II/B-L (21-35% ασβεστόλιθος) μπορούν να ενταχθούν στις κατηγορίες αντοχών 42.5 R, 42.5 N, 32.5 R και 32.5 N του EN 197-1 (Πίνακας 1-3).



Σχήμα 5.3: Αντοχή σε θλίψη ασβεστολιθικών τσιμέντων συναρτήσει του περιεχόμενου ασβεστόλιθου.

Κατά την παραγωγή των ασβεστολιθικών τσιμέντων, ο ασβεστόλιθος συναλέθεται με το κλίνκερ και, λόγω της φύσης του και του γεγονότος ότι είναι πιο ευάλεστος από το κλίνκερ, το τελικό μείγμα γίνεται πιο λεπτόκοκκο. Για μια συγκεκριμένη επιφάνεια των 442 m²/kg και για τσιμέντο με 10% ασβεστόλιθο, το 50% του ασβεστόλιθου είναι κάτω από 7 μm, ενώ το 50% του κλίνκερ κάτω από τα 15 μm. Τα επίπεδα αντοχής των τσιμέντων με ασβεστόλιθο μπορούν να ρυθμιστούν χρησιμοποιώντας αυτές τις διαφορές στην αλεστικότητα των δύο υλικών. Η επίδραση στην αντοχή 28 ημερών της μερικής αντικατάστασης του κλίνκερ με ασβεστόλιθο μπορεί να βελτιωθεί με λεπτότερη άλεση και για ισοδύναμη αντοχή 28 ημερών, η 1η ημέρα αντοχής του τσιμέντου, που περιέχει ασβεστόλιθο, μπορεί να υπερβεί αυτή του τσιμέντου, που δεν περιέχει ασβεστόλιθο. Αυτό οφείλεται στην λεπτότητα του κλίνκερ και στην επίδραση του ασβεστόλιθου (Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., 2004, Hawkins P., 2003, Tsivilis S., 1999, Taylor H.F.W., 1997).

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 1.3.

Πίνακας 5.3: Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις τσιμέντων.

Κατηγορία αντοχών	Αντοχή σε θλίψη (N/ mm ²)			Αρχή πήξης (min)	Διόγκωση (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		

Κάθε κατηγορία αντοχής ορίζεται από ένα κατώτερο και από ένα ανώτερο όριο αντοχής. Το κατώτερο όριο αντοχής σε θλίψη (28 ημερών) χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη κατηγορία. Κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες περιλαμβάνει δύο υποκατηγορίες πρώιμης αντοχής N και R. (πίνακας 1.3)

5.10 Φυσικές ιδιότητες

Τα ασβεστολιθικά τσιμέντα, παρά τη μεγαλύτερη λεπτότητά τους, απαιτούν λιγότερο νερό συγκρινόμενα με τα αμιγή τσιμέντα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σε τσιμέντα με 10% ασβεστόλιθο η απαίτηση σε νερό μειώνεται σε 24-25% από 26% στα αμιγή τσιμέντα. Η επίδραση του ασβεστόλιθου στην απαίτηση σε νερό των τσιμέντων αποδίδεται στη διαφοροποιούμενη κοκκομετρική κατανομή των τσιμέντων. Τα ασβεστολιθικά τσιμέντα, παρά τη μεγαλύτερη λεπτότητα τους, έχουν ευρύτερες (λιγότερο ομοιόμορφες) κοκκομετρικές κατανομές (μικρότερες τιμές του συντελεστή ομοιομορφίας της κατανομής Rosin-Rammler) από τα αμιγή τσιμέντα Portland. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη συνάλεση ενός ευάλεστου υλικού, όπως είναι ο ασβεστόλιθος, με το κλίνκερ. Οι χρόνοι πήξης (αρχή, τέλος) των ασβεστολιθικών τσιμέντων είναι παραπλήσιοι με τους αντίστοιχους των αμιγών τσιμέντων. Ακόμη τα ασβεστολιθικά τσιμέντα έχουν ικανοποιητική σταθερότητα όγκου. Ειδικότερα, η διόγκωσή τους, μετρούμενη με τη μεθοδολογία Le Châtelier, κυμαίνεται από 0.5-1.5 mm, ενώ η προδιαγραφή του EN 197-1 είναι 10 mm. Ακόμη, τόσο η γραμμική συστολή όσο και η γραμμική διαστολή κονιαμάτων με ασβεστολιθικά τσιμέντα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη των αμιγών τσιμέντων. Όμως, οι εν λόγω διαφορές στη συστολή είναι περιορισμένης πρακτικής σημασίας (Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., 2004, Hawkins P., 2003, Tsvilis S., 1999).

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 1.3 (ΕΛΟΤ EN 197-1).

5.11 Ιδιότητες σκυροδέματος

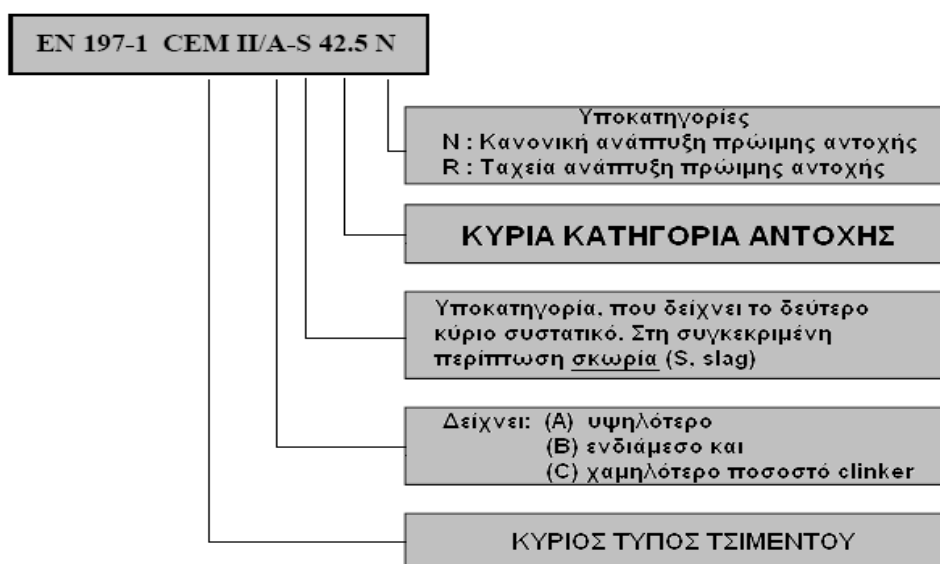
Όσον αφορά στις ιδιότητες του σκυροδέματος με ασβεστολιθικά τσιμέντα Portland, αυτά παρουσιάζουν ικανοποιητικές αντοχές και πολύ καλή πλαστικότητα και εργασιμότητα για συμμετοχή ασβεστόλιθου έως και 20%. Επίσης, το εν λόγω σκυρόδεμα εμφανίζει μικρότερη διαρροή. Η παρουσία έως 25% του filler δεν επηρεάζει σημαντικά την εργασιμότητα, αλλά με πολύ δραστικό ή πολύ λεπτοαλεσμένο κλίνκερ μπορεί να βελτιωθεί. Ακόμη, τα σκυροδέματα με ασβεστολιθικά τσιμέντα δεν διαφοροποιούνται σημαντικά συγκρινόμενα με τα σκυροδέματα που περιέχουν αμιγή τσιμέντα, όσον αφορά στην υδατοαπορροφητικότητα, στο πορώδες, στην αντίσταση έναντι του φαινομένου παγώματος/τήξης και στη διαπερατότητα. Πιο συγκεκριμένα, σχετικά με τη διαπερατότητα, μπορεί να αναφερθεί ότι αυτή έστω και λίγο ελαττώνεται, όταν χρησιμοποιείται ο ασβεστόλιθος. Αυτό οφείλεται μάλλον σε μείωση της συνδεσιμότητας των πόρων του σκυροδέματος, παρά σε ελάττωση του όγκου τους. Συγκεκριμένες έρευνες έχουν δείξει ότι σκυροδέματα με ασβεστολιθικά τσιμέντα παρουσιάζουν βελτιωμένη αντίσταση έναντι των θειικών ιόντων. Αυτό φαίνεται ότι σχετίζεται με το ρυθμό της ενδεχόμενης φθοράς. Αν η περίοδος της δοκιμής επιμηκυνθεί, η απόδοση των ασβεστολιθικών τσιμέντων είναι ισοδύναμη με εκείνη των αμιγών τσιμέντων. Η αντίσταση έναντι των θειικών ιόντων είναι, πρωτίστως, συνάρτηση της περιεκτικότητας σε C₃A και του λόγου W/C. Έχει βρεθεί, επίσης, ότι η συμβολή των ποζολανικών υλικών στις ιδιότητες του σκυροδέματος δεν επηρεάζεται από τον ασβεστόλιθο του τσιμέντου. Τα κονιάματα με ασβεστολιθικά τσιμέντα παρουσιάζουν, τέλος, βελτιωμένη συμπεριφορά έναντι της διάβρωσης, μικρότερο πορώδες και ενανθράκωση για συμμετοχή ασβεστόλιθου έως και 20% (Hawkins P., 2003, Taylor H.F.W., 1997). Επιπλέον, αν η περιεκτικότητα του ασβεστόλιθου στο τσιμέντο είναι 5%, τότε ο ασβεστόλιθος δεν αυξάνει την ευαισθησία των κονιαμάτων στην αντίδραση αλκαλίων – πυριτικών. Μερικοί ερευνητές ισχυρίζονται τη θετική επίδραση του ασβεστόλιθου στην αντοχή του σκυροδέματος έναντι της διάβρωσης για περιεκτικότητές του έως 10% (Tsilivilis S., 2000).

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι σαφές ότι τα ασβεστολιθικά τσιμέντα έχουν πολλά πλεονεκτήματα σχετικά με τις φυσικές και τις μηχανικές τους ιδιότητες. Πιστεύεται ότι, ανάλογα με την ποιότητα του κλίνκερ και του ασβεστόλιθου και με την αριστοποίηση του ποσοστού συμμετοχής του ασβεστόλιθου στο τσιμέντο, είναι δυνατόν να παραχθεί σκυρόδεμα βελτιωμένης ποιότητας σε σχέση με το σκυρόδεμα με αμιγή τσιμέντα. Θα πρέπει να τονισθεί ότι τα ασβεστολιθικά τσιμέντα είναι ανταγωνιστικά, όσον αφορά στις ιδιότητες τους, τόσο των τσιμέντων τύπου I, όσο και των τσιμέντων τύπου II που περιέχουν ποζολανικά συστατικά. Η προσθήκη ποζολανικών υλικών, είτε υπό τη μορφή φυσικών ποζολανών ή βιομηχανικών παραπροϊόντων βελτιώνει τις ιδιότητες του σκυροδέματος, αφενός μεν λόγω της ποζολανικής δράσης και αφετέρου λόγω της μείωσης του πορώδους και της διαπερατότητας των κατασκευών. Επιπλέον, η παρουσία του ασβεστόλιθου ευνοεί την ενυδάτωση του κλίνκερ λόγω

φυσικής και χημικής δράσης, ενώ δεν επιδρά αρνητικά στο πορώδες και τη διαπερατότητα των κατασκευών παρά τη μειωμένη συμμετοχή της βασικής δομικής μονάδας του τσιμέντου, του κλίνκερ. Το θετικό σημείο της παραγωγής τους και τελικά της χρήσης τους είναι η δυνατότητα αξιοποίησης από τις τσιμεντοβιομηχανίες κοιτασμάτων ασβεστόλιθου ελεγχόμενης καθαρότητας και διαθεσιμότητας σε αντίθεση με τα βιομηχανικά παραπροϊόντα, των οποίων η ομοιογένεια και η διαθεσιμότητα δεν ελέγχεται από τις ίδιες τις βιομηχανικές μονάδες (Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., 2004).

Η συμμόρφωση των τσιμέντων ως προς τα όρια των αντοχών είναι στατιστική και περιγράφεται στο πρότυπο. Ο συμβολισμός των τσιμέντων σύμφωνα με το πρότυπο EN 197-1 άρα και με το ΕΛΟΤ EN 197-1, (πίνακας 1.3) καθορίζεται από: τον κύριο τύπο τσιμέντου, το ποσοστό κλίνκερ που περιέχεται στο τσιμέντο, τον τύπο του δεύτερου κύριου συστατικού, την κατηγορία αντοχής και το επίπεδο της πρώιμης αντοχής.

Όσον αφορά τις χημικές απαιτήσεις ελέγχονται μόνο η απώλεια πύρωσης, το αδιάλυτο υπόλειμμα, τα SO₃, τα χλωριόντα και η ποζολανικότητα.



Σχήμα 5.4. Συμβολισμός των διαφόρων τύπων τσιμέντου του ευρωπαϊκού προτύπου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η επίδραση προσθέτων στις επισκευές του οπλισμένου σκυροδέματος. Διερευνήθηκε η θεωρητική και η πειραματική επίδραση των ειδικών πρόσθετων αναστολέων διάβρωσης για την προστασία του χάλυβα του οπλισμένου σκυροδέματος (ΧΟΣ). Η δράση και η αποτελεσματικότητα των αναστολέων διάβρωσης εξετάζεται με τη βοήθεια εργαστηριακών δοκιμών διάβρωσης.

Συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας περιλαμβάνει δύο κατηγορίες.

Στην πρώτη κατηγορία εξετάστηκε η επίδραση των αναστολέων διάβρωσης ως πρόσμικτοι σε διαφορετικά ποσοστά. Περιλαμβάνει δοκίμια οπλισμών εγκιβωτισμένα στο σκυρόδεμα όπου στην σύσταση του σκυροδέματος έχει προστεθεί αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο σε δύο διαφορετικές περιεκτικότητες (0,1g/100g τσιμέντου και 0,4g/100g τσιμέντου αντίστοιχα).

Στην δεύτερη κατηγορία εξετάστηκε η επίδραση των αναστολέων διάβρωσης σε ασβεστολιθικά τσιμέντα. Είναι γνωστό, από μελέτες που έχουν γίνει κατά καιρούς, ότι είναι δυνατή η παραγωγή ασβεστολιθικών τσιμέντων με σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα. Από την μελέτη της ανθεκτικότητας των ασβεστολιθικών τσιμέντων προέκυψε ότι αυτά υστερούν έναντι των τσιμέντων τύπου CEM I, όσον αφορά την συμπεριφορά της διάβρωσης των οπλισμών. Επίσης, μελετήσαμε και την συμπεριφορά του τσιμέντου SR, τσιμέντο ανθεκτικό σε θειικά.

Υπάρχει η δυνατότητα να αυξηθεί η αντοχή σε διάβρωση των οπλισμών των ασβεστολιθικών τσιμέντων με την χρήση αναστολέων διάβρωσης. Η χρήση των αναστολέων διάβρωσης μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Την προσθήκη του αναστολέα διάβρωσης σαν πρόσθετο κατά την παραγωγή του σκυροδέματος, όπως συνηθίζεται σε νέες κατασκευές.
- Με τον ψεκασμό της επιφάνειας του σκυροδέματος με αναστολέα διάβρωσης, όπως συνηθίζεται σε επισκευές.

Η παρούσα διδακτορική εργασία εξετάζει την χρήση αναστολέων διάβρωσης και με τους δύο τρόπους.

Στην περίπτωση του ψεκασμού, προκειμένου να επιτευχθεί επιτάχυνση των πειραμάτων έγινε προέκθεση σε διάβρωση (3,5% κ.β. NaCl) για 80 ημέρες. Μετά τις 80 ημέρες έγινε ψεκασμός με αναστολέα διάβρωσης. Στη συνέχεια εξετάστηκε η συμπεριφορά των δοκιμίων σε διάβρωση (3,5% κ.β. NaCl).

Ο έλεγχος της ανθεκτικότητας των διαφόρων κονιαμάτων με αναστολείς διάβρωσης μελετήθηκε με τους εξής τρόπους:

- Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα και κατασκευή καμπυλών δυναμικού-χρόνου.
- Μέτρηση της αντίστασης πόλωσης και κατασκευή καμπυλών αντίστασης χρόνου.
- Απώλεια μάζας (στον οπλισμό)
- Μέτρηση Χλωριόντων (στο σκυρόδεμα)

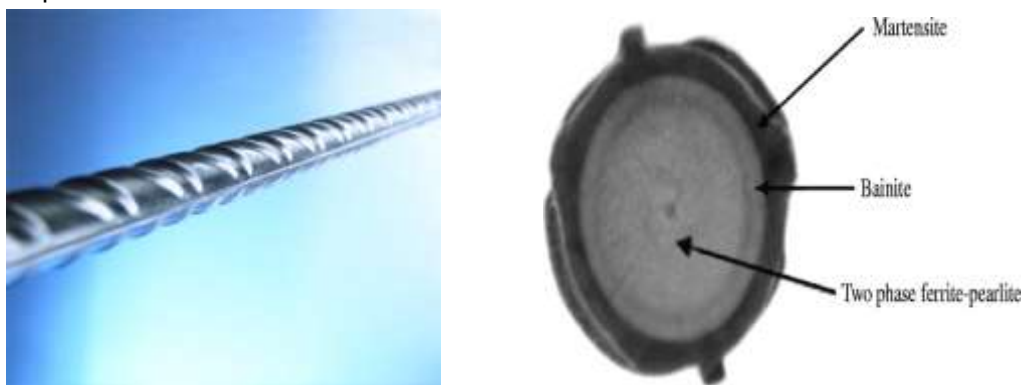
Τέλος, για λόγους σύγκρισης μελετήθηκε η διάβρωση των χαλύβων εγκιβωτισμένων σε κονίαμα χωρίς αναστολέα διάβρωσης και χωρίς κανένα πρόσμικτο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7 ΥΛΙΚΑ

7.1 Χάλυβας Οπλισμένου Σκυροδέματος (Χ.Ο.Σ.)

Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου B 500c, διαμέτρου 10 mm και μήκους 100 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 συνίσταται σε μια διαδικασία κατά την οποία, αμέσως μετά τη θερμή έλαση (1000 ως 1050 ο 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 ωστενιτικός. Το στάδιο της αυτό – επαναφοράς (self tempering) η θερμότητα άγεται από τον πυρήνα του υλικού προς τον μαρτενσιτικό φλοιό, μετατρέποντας τη δομή του σε επαναφερόμενο μαρτενσίτη, ενώ ο πυρήνας μετασχηματίζεται κατά την τελική απόψυξη σε όλκιμο φερίτη και περλίτη. Το τελικό προϊόν έχει μια σύνθετη μικροδομή, που αποτελείται από ένα σκληρό εξωτερικό φλοιό (επαναφερόμενου) μαρτενσίτη και από ένα όλκιμο πυρήνα φερριτο – περλιτικής δομής. Δια μέσω της παραγωγικής διεργασίας αυτής της κατηγορίας των χαλύβων παράγεται μια σύνθετη δομή, η οποία δίνει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι θα πρέπει να δίνεται εξαιρετική προσοχή στη φάση της παραγωγής, έτσι ώστε τα δύο στρώματα δομής να έχουν σωστή κατανομή, διαφορετικά θα υπάρχουν προβλήματα στο τελικό προϊόν.



Σχήμα 7.1 Πλαινή όψη και εγκάρσια τομή ράβδου B500c

Η χημική σύσταση των χαλύβδινων ράβδων τύπου B 500c (πίν. 7.1) πληρεί τις προϋποθέσεις του προτύπου ΕΛΟΤ-971 για συγκολλησίμους χάλυβες και συγχρόνως του ισοδύναμου σε άνθρακα. Η ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα C_{eq} υπολογίζεται σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο από τις τιμές % κ.β των στοιχείων:

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

Πίνακας 7.1: Χημική σύσταση των χαλύβδινων ράβδων τύπου B500c.

Στοιχείο	C	Mn	S	P	Si	Cr	V	Mo	Ni	Cu	N	Ceq
% κ.β	0,217	1,04	0,047	0,021	0,151	0,113	0.002	0.021	0,097	0,41	0,008	0,45

Σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Χάλυβα ΚΤΧ/2000 τα μηχανικά χαρακτηριστικά των χαλύβδινων ράβδων τύπου B500c κατά ΕΛΟΤ 959 και ΕΛΟΤ 971 δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 7.2: Μηχανικά χαρακτηριστικά των χαλύβδινων ράβδων τύπου B500c.

Μέγεθος	Όριο διαρροής fy (MPa)	Εφελκυστική αντοχή ft (MPa)	Λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής ft/fy
B500c	500	550	≥ 1,05

7.2 Τσιμέντο

Για την παρούσα διδακτορική εργασία χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα είδη τσιμέντου. Χρησιμοποιήθηκε βιομηχανικό κλίνκερ τσιμέντου Portland (Πίνακας 7.3) και ασβεστόλιθος με υψηλή περιεκτικότητα σε ασβεσίτη (CaCO_3 : 97.5%) (Πίνακας 7.4). Η χημική ανάλυση των υλικών έχει γίνει με την αναλυτική μέθοδο XRF.

Πίνακας 7.3: Χημική και ορυκτολογική σύνθεση του κλίνκερ.

Χημική σύσταση (%)		Ορυκτολογική σύσταση (%)	
SiO_2	21.92	C_3S	48.4
Al_2O_3	5.68	C_2S	26.3
Fe_2O_3	3.29	C_3A	9.5
CaO	63.35	C_4AF	10.0
MgO	1.44	Δείκτες	
K_2O	1.32		
Na_2O	0.84	Βαθμός κορεσμού σε άσβεστο (LSF)	0.92
SO_3	1.25	Πυριτικός δείκτης (SR)	2.44
TiO_2	0.27	Αργιλικός δείκτης (AR)	1.73
P_2O_5	0.08	Υδραυλικός δείκτης (HM)	2.05
LOI (wet)	0.91		
Σύνολο	100.33		
fCaO	1.15		

Πίνακας 7.4: Χημική ανάλυση ασβεστόλιθου και ποζολανικών υλικών.

Συστατικό	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI (wet)	Σύνολο
Ασβεστόλιθος (L)	0.57	0.33	0.19	54.60	1.64	0.04	0.00	0.02	0.03	0.02	42.76	100.2

Πίνακας 7.5: Χημική ανάλυση τσιμέντου ανθεκτικού σε θειικά.

Συστατικό	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Υπ. πύρωσης	IR (ISO/CEN)	CaO (F)
SR	20.07	4.46	6.61	63.34	2.68	0.35	0.28	1.96	2.42	0.11	2.20

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι εργαστηριακών τσιμέντων. Το αμιγές τσιμέντο (σύνθεση CEM I) παρασκευάστηκε με συνάλεση κλίνκερ και γύψου, ενώ τα δύο ασβεστολιθικά τσιμέντα, διαφορετικής περιεκτικότητας σε ασβεστόλιθο (συνθέσεις LC1 και LC2) παρασκευάστηκαν με συνάλεση κλίνκερ γύψου και ασβεστόλιθου. Η συνάλεση έγινε σε σφαιρόμυλο pilot plant δυναμικότητας 5 kg. Η ειδική επιφάνεια του τσιμέντου ήταν 3010, 3980 και 5040 cm²/g, σύμφωνα με τη μέθοδο Blaine, για τα τσιμέντα CEM I, LC1 και LC2 αντίστοιχα. Στον Πίνακα 7.6 δίνεται η σύνθεση και η αντοχή σε θλίψη 28 ημερών των εργαστηριακών τσιμέντων.

Πίνακας 7.6: Χαρακτηριστικά εργαστηριακών τσιμέντων.

Κωδικός	Σύνθεση*	Αντοχή θλίψης 28 ημερών
CEM I	κλίνκερ: 100% κ.β.	43.0
LC1	κλίνκερ: 85% κ.β., ασβεστόλιθος: 15% κ.β.	41.3
LC2	κλίνκερ: 65% κ.β., ασβεστόλιθος: 35% κ.β.	32.4
SR	κλίνκερ: 100% κ.β.	43.0

*γύψος 5% κατά βάρος επί του κλίνκερ

7.3 Αδρανή

Τα χρησιμοποιούμενα αδρανή πρέπει να είναι σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 12620, εφ' όσον πρόκειται για κανονικά ή βαριά αδρανή και την προδιαγραφή EN 13055-1, εφ' όσον πρόκειται για ελαφροβαρή αδρανή.

Στην παρούσα εργασία ως αδρανές υλικό χρησιμοποιήθηκε άμμος, η οποία πληρεί όλες τις απαιτούμενες προδιαγραφές.

Για την κατασκευή των τσιμεντοκονιαμάτων χρησιμοποιήθηκε άμμος όπου η κοκκομετρική διαβάθμιση και η χημική σύσταση της άμμου δίνεται στους πίνακες 7.6 και 7.7 δίνεται, αντίστοιχα.

Πίνακας 7-7: Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου κατά EN 933-1

	Βάρος (g)	%
4mm<d	23	5.23
2mm<d<4mm	106.08	24.13
1mm<d<2mm	77.62	17.66
500μm<d<1mm	56.47	12.85
250μm<d<500μm	45.88	10.44
d<250μm	130.55	29.7

Πίνακας 7-8: Χημική σύσταση άμμου

% αρχικού δείγματος άμμου						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	LOI
1,4	0,64	0,48	54,6	0,34	0,08	42,4

7.4 Νερό

Για το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος υπάρχει μια ανοχή σχετικά με την ποιότητά του, σε αντίθεση με τα νερά που δρουν εξωτερικά και μόνιμα. Και αυτό γιατί η ποσοστιαία αναλογία του νερού ανάμιξης και συνεπώς και κάθε ξένης ουσίας μέσα σε αυτό, είναι μικρή και εξάλλου οι ουσίες αυτές δρουν μέχρι να εξαντληθούν.

Το χρησιμοποιούμενο νερό πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγραφή EN 1008, ενώ η χρησιμοποίηση νερού από ανακύκλωση πρέπει να γίνεται με βάση το παράρτημα Α της ίδιας προδιαγραφής.

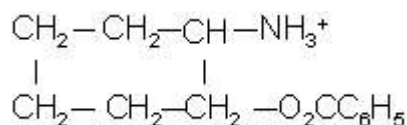
Στην παρούσα διατριβή, για την παρασκευή των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος και την συντήρησή τους, χρησιμοποιήθηκε νερό από την Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

7.5 Αναστολέας διάβρωσης

7.5.1 Αναστολέας διάβρωσης ως πρόσμικτο

Ο αναστολέας διάβρωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι το Βενζοϊκό κυκλοεξαμμώνιο. Το Βενζοϊκό κυκλοεξαμμώνιο είναι ένας διαχεόμενης μορφής (πηκτικός), πολυλειτουργικός αναστολέας διάβρωσης. Προστατεύει τον οπλισμό ηλεκτροχημικά, μέσω της ανοδικής ή καθοδικής αντίδρασης, ως αναστολέας επαφής και διάχυσης μορίων (δυνατότητα μετανάστευσης μορίων). Η φύση του προϊόντος είναι να εκμεταλλεύεται όποια απορροφητικότητα του υποστρώματος, δημιουργώντας διάχυση μέσω του πορώδους του

σκυροδέματος, προσεγγίζοντας του σιδηρούς οπλισμούς (στοιχεία δομικού χάλυβα), με σκοπό να τους προστατεύει από περαιτέρω διάβρωση, επιμηκύνοντας ταυτόχρονα τη χρονική διάρκεια και τα όρια λειτουργίας της κατασκευής. Ο συντακτικός τύπος του βενζοϊκού κυκλοεξαμμώνιου (Cyclohexylammonium benzoate) είναι ο εξής (Δ. Κ. Υφαντής, 2000) :



Επιπλέον τεχνικά χαρακτηριστικά και φυσικές ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.9.

Πίνακας 7.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά και φυσικές ιδιότητες του αναστολέα.

Εμφάνιση - Χρώμα	Λευκό γαλακτώδες υγρό
Χρόνος αναμονής μεταξύ των στρώσεων	8-24 ώρες
Ειδικό βάρος	1,03 ± 0,01 kg/lit
Θερμοκρασία Εφαρμογής	Ελάχιστη +1°C (υποστρώματος και περιβάλλοντος)
Κατανάλωση	1 ή 2 στρώσεις x ~0,0150 kg/m ²
Βαθμός pH	8.9 - 9.4

7.5.2 Βενζοϊκό κυκλοεξαμμώνιο (για ψεκασμό)

Το Βενζοϊκό κυκλοεξαμμώνιο επίσης χρησιμοποιήθηκε στην παρασκευή των δοκιμών για επιφανειακό ψεκασμό των δοκιμών. Είναι ένα μίγμα που προστίθεται στη διεργασία παραγωγής σκυροδέματος για να επιτευχθεί καλύτερη προστασία του χάλυβα από τη διάβρωση. Είναι ενεργό όχι μόνο σε επαφή με το χάλυβα, αλλά μπορεί να διεισδύσει μέσω του πορώδους του σκυροδέματος για να φθάσει στις ράβδους του οπλισμού και να αναστείλει τις διεργασίες ανοδικής και καθοδικής διάβρωσης. Το Βενζοϊκό κυκλοεξαμμώνιο για ψεκασμό είναι μια ανώτερη τεχνική λύση για την παράταση της αναμενόμενης διάρκειας ζωής του οπλισμένου σκυροδέματος που υπόκειται στη δράση των παραγόντων που προάγουν την επιθετική διάβρωση όπως το οξυγόνο, η υγρασία, τα χλωριούχα άλατα από τα αντιπαγετικά άλατα που υπάρχουν σε θαλάσσια περιβάλλοντα.

Ο αναστολέας βασίζεται σε οργανικά και ανόργανα συστατικά, διεισδύει στο σκυρόδεμα και σχηματίζει μια μονομοριακή προστατευτική στρώση στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Η προστασία που προσφέρει ο ανωτέρω αναστολέας είναι διπλής λειτουργίας, αναστέλλει την έναρξη της διάβρωσης και μειώνει το ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα. Η προστασία έναντι της διαβρώσεως έχει ως αποτέλεσμα την επιμήκυνση του χρόνου ζωής και λειτουργίας της

κατασκευής. Δεν αλλοιώνει την εμφάνιση της κατασκευής σκυροδέματος και έχει εύκολη εφαρμογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

8 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

8.1 Εισαγωγή

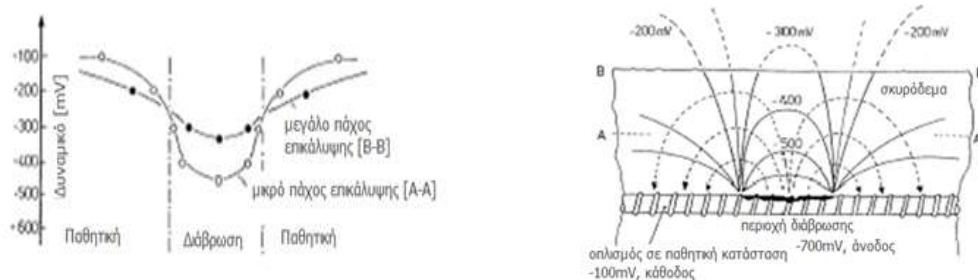
Υπάρχουν πολλές έμμεσες μέθοδοι για τη μέτρηση της διάβρωσης του χάλυβα σε υγρό περιβάλλον μερικές από τις οποίες είναι ηλεκτροχημικές και άλλες όχι. Μερικές από αυτές τις μεθόδους έχουν χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για μέτρηση της διάβρωσης χάλυβα ενσωματωμένου σε σκυρόδεμα. Μέσα από τις ηλεκτροχημικές μεθόδους και το ρυθμό διάβρωσης μπορεί να προβλεφθεί η διάρκεια ζωής των κατασκευών (Saeid A. Alghamdi, Shamsad Ahmad, 2014).

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι:

- Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης
- Ηλεκτροχημικός προσδιορισμός της πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης
- Μέτρηση της απώλειας μάζας
- Μέτρηση Χλωριόντων

8.2 Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης

Το δυναμικό διάβρωσης είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας της διάβρωσης και προσδιορίζεται από το άθροισμα των συνολικών ηλεκτροχημικών δράσεων αναγωγής και οξειδωσης. Η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης είναι μια μέθοδος μη καταστροφική, η οποία επιτρέπει την παρακολούθηση και τον χαρακτηρισμό της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα συναρτήσει του χρόνου. Η μέθοδος αυτή είναι απλή στην εφαρμογή της και γρήγορη, γι' αυτόν δε τον λόγο χρησιμοποιείται ευρέως. Πάντως, η εφαρμογή και η ερμηνεία της μεθόδου πρέπει να γίνεται από ειδικευμένο προσωπικό. Το δυναμικό διάβρωσης εξαρτάται από τον τύπο του μετάλλου, τις συνθήκες περιβάλλοντος έκθεσης (υγρασία, pH, συγκέντρωση αλάτων), τη διαθεσιμότητα σε οξυγόνο, τα επαγόμενα ρεύματα και από τη θερμοκρασία. Η χρονική εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης για μακρές περιόδους, είναι αυτή που δίνει πιο αξιόπιστα στοιχεία για την προδιάθεση μετάλλων σε διάβρωση.



Σχήμα 8.1 Κατανομή δυναμικών διάβρωσης σε διαβρωμένο χάλυβα – δημιουργία μικρο-γαλβανικού στοιχείου

Η παθητική και ενεργή περιοχή στην επιφάνεια του χάλυβα σχηματίζουν ένα μικρο - γαλβανικό στοιχείο με άνοδο την περιοχή όπου διαβρώνεται ο χάλυβας και κάθοδο την παθητική περιοχή. Η διαφορά δυναμικού του δημιουργούμενου στοιχείου (διαφορά δυναμικού ΔV μεταξύ παθητικής και ενεργής περιοχής) παίρνει τιμές μερικών εκατοντάδων mV. Το προκύπτον ρεύμα I από το σχηματισμό του γαλβανικού στοιχείου προσδιορίζεται από την αντίσταση του σκυροδέματος και το άθροισμα των αντιστάσεων της ανοδικής και καθοδικής αντίδρασης,

$$I = \frac{\Delta V}{R_E + R_A + R_C}$$

όπου:

I : ρεύμα διάβρωσης από την άνοδο προς την κάθοδο

ΔV : Διαφορά δυναμικού μικρο-γαλβανικού στοιχείου

R_E : Ηλεκτρική αντίσταση σκυροδέματος

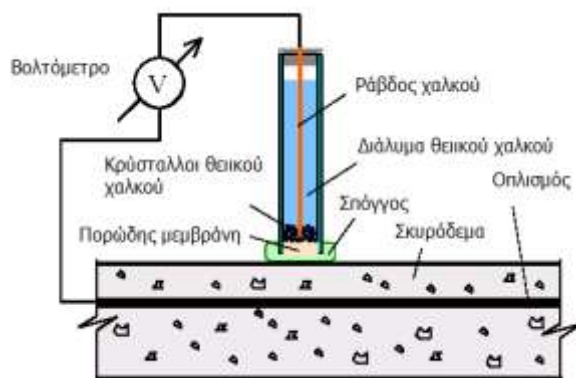
R_A : Αντίσταση ανοδικής αντίδρασης

R_C : Αντίσταση καθοδικής αντίδρασης

Οι παράγοντες που επιδρούν στη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού είναι το πάχος επικάλυψης των οπλισμών και η αντίσταση του σκυροδέματος. Αυξανόμενου του πάχους επικάλυψης του οπλισμού, οι τιμές του δυναμικού στην ενεργή και καθοδική περιοχή γίνονται σχεδόν ίσες. Επίσης μικρής έκτασης ανοδικές περιοχές δεν είναι εύκολο να προσδιοριστούν όταν το πάχος επικάλυψης των οπλισμών στην κατασκευή είναι μεγάλο. Σε σκυρόδεμα υψηλής αντίστασης το μετρούμενο δυναμικό είναι ηλεκτροθετικότερο από το πραγματικό, με συνέπεια να μην εντοπίζονται οι περιοχές διάβρωσης. Μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στη διάβρωση έχει εκείνο το μέταλλο, για το οποίο το δυναμικό διάβρωσης μένει σταθερότερο για ίδιες συνθήκες. Γρήγορη πτώση του δυναμικού διάβρωσης, δείχνει γρήγορο σχηματισμό προϊόντος διάβρωσης. Την πτώση αυτή ακολουθεί, συνήθως, στη συνέχεια απότομη αύξηση του δυναμικού διάβρωσης, λόγω ρήξης του στρώματος του προϊόντος διάβρωσης. Η μέτρηση του δυναμικού δεν δίνει πληροφορίες, όσον αφορά την ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα.

Η χρονική εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα ως προς κάποιο ηλεκτρόδιο αναφοράς προσφέρει πληροφορίες για την πιθανότητα διάβρωσης του χάλυβα. Ως ηλεκτρόδια αναφοράς χρησιμοποιούνται συνήθως, το ηλεκτρόδιο καλομέλανα SCE [Hg/HgCl/KCl] ή το ηλεκτρόδιο θειικού χαλκού CSE [Cu/CuSO₄]. Τότε έχουμε ένα ολοκληρωμένο ηλεκτρικό κλειστό κύκλωμα και μετράται η διαφορά δυναμικού μεταξύ του οπλισμού στο σκυρόδεμα ως προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς.

Από τα δύο είδη ηλεκτροδίων, το ηλεκτρόδιο καλομέλανα είναι ακριβότερο από το ηλεκτρόδιο θειικού χαλκού. Το ηλεκτρόδιο θειικού χαλκού όμως ετοιμάζεται γρήγορα, και γι' αυτό το λόγο προτιμάται για μετρήσεις σε εξωτερικούς χώρους. Το ηλεκτρόδιο καλομέλανα προσβάλλεται από άλατα βρωμίου και ιωδίου. Το ηλεκτρόδιο θειικού χαλκού προσβάλλεται από άλατα χλωρίου, το δε υγρό του χρειάζεται συχνή αντικατάσταση. Η επιφάνεια του σκυροδέματος κατά τη μέτρηση του δυναμικού δεν πρέπει να είναι κορεσμένη ούτε απολύτως ξηρή, αλλά απλώς υγρή για να υπάρχει αγωγιμότητα.



Σχήμα 8.2 Μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα

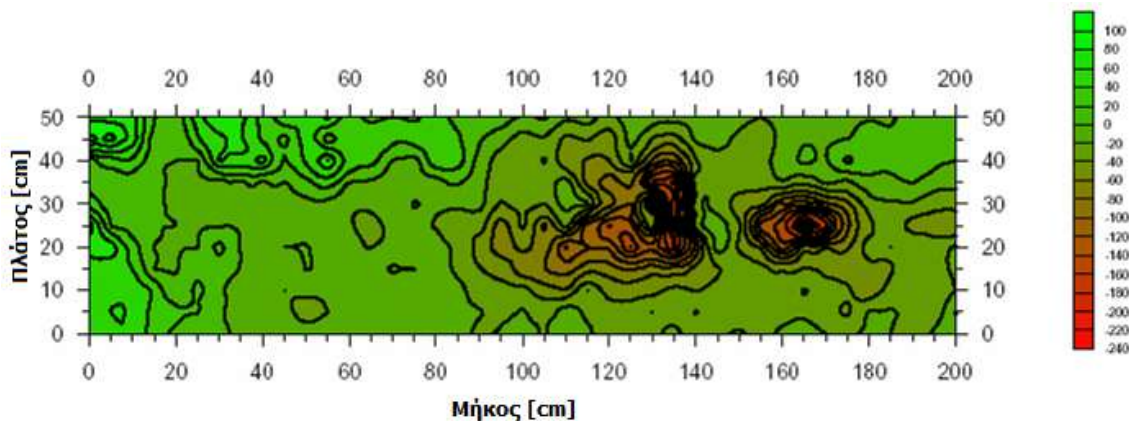
Οι κλίμακες μέτρησης του δυναμικού ως προς τα ηλεκτρόδια καλομέλανα (SCE [Hg/HgCl/KCl]) και θειικού χαλκού (CSE [Cu/CuSO₄]) είναι διαφορετικές. Στο μηδέν της κλίμακας SCE αντιστοιχεί το +240 mV της κλίμακας H₂ και το -60 mV της κλίμακας CSE. Δηλαδή η σχέση μεταξύ τους είναι :

$$V_H = V_{SCE} + 240 = V_{CSE} + 300 \text{ (σε mV).}$$

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρόδιο καλομέλανα (SCE [Hg/HgCl/KCl]).

Η τιμή του δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα συναρτήσεως του χρόνου αποτελεί ένδειξη της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα δηλαδή εάν ο χαλύβδινος οπλισμός βρίσκεται σε ενεργή ή παθητική κατάσταση. Η διαδικασία μέτρησης των δυναμικών διάβρωσης του οπλισμού δια μέσω του σκυροδέματος και η καταγραφή του σε χάρτες σε όλη την επιφάνεια της κατασκευής είναι μια μέθοδος σχετικά απλή, άμεση και ευρέως διαδεδομένη στην αγορά για την αποτίμηση της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα. Οι χάρτες δυναμικών (mapping potential) σε μια κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα δημιουργούνται ως εξής:

Ένα ή περισσότερα ηλεκτρόδια αναφοράς τοποθετούνται στην επιφάνεια του σκυροδέματος και συνδέονται με ψηφιακό πολύμετρο (βολτόμετρο) υψηλής εσωτερικής σύνθετης αντίστασης. Ο θετικός πόλος συνδέεται με τον οπλισμό. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην καλή ηλεκτρική επαφή του οπλισμού με τον θετικό πόλο του βολτομέτρου. Η καλή ηλεκτρολυτική επαφή του ηλεκτροδίου αναφοράς με το σκυρόδεμα εξασφαλίζεται με έναν βρεγμένο σπόγγο ο οποίος τοποθετείται στη διεπιφάνεια του ηλεκτροδίου αναφοράς με το σκυρόδεμα (σχήμα 8.2). Μετρώντας και καταγράφοντας τη διαφορά δυναμικού σε καθορισμένα διαστήματα σε όλο το μήκος της κατασκευής επιτυγχάνεται η χαρτογράφηση των δυναμικών δηλαδή των ενεργών και παθητικών περιοχών σε όλη την κατασκευή (σχήμα 8.3).



Σχήμα 8-1: Χαρτογράφηση των δυναμικών διάβρωσης (mV) ως προς ηλεκτρόδιο αναφοράς SCE κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος.

Η χρήση των ηλεκτροχημικών δυναμικών για τον προσδιορισμό περιοχών με αυξημένη πιθανότητα διάβρωσης του οπλισμού είναι μια μέθοδος επαρκώς τεκμηριωμένη και ευρέως διαδεδομένη σε συστήματα καθοδικής προστασίας αλλά και για εξέταση της κατάστασης κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος ως προς τη διάβρωση.

Η διαφορά δυναμικού του οπλισμού στο σκυρόδεμα εμφανίζει διαφορετικές τιμές ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο σκυρόδεμα δηλαδή, τη σχετική υγρασία και τη συγκέντρωση των χλωριόντων. Μέσα από την συσχέτιση μεταξύ των τιμών του δυναμικού του οπλισμού σε συνάρτηση με την κατάσταση του περιβάλλοντος σκυροδέματος, προκύπτουν οι ενδείξεις για την προδιάθεση του σιδηροπλισμού για διάβρωση και διακρίνονται τα εξής ενδεχόμενα :

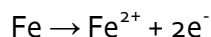
- $\Delta V > -1100$, υγρό σκυρόδεμα χωρίς διαθεσιμότητα σε οξυγόνο
- $\Delta V > -600$, υγρασία, σκυρόδεμα με χλωριόντα
- $0 < \Delta V < +200$, 1. Ύπαρξη υγρασίας, σκυρόδεμα χωρίς χλωριόντα
2. Ύπαρξη υγρασίας, σκυρόδεμα ενανθρακωμένο
3. Ξηρό και ενανθρακωμένο σκυρόδεμα
4. Ξηρό σκυρόδεμα

Όπως αναφέρεται στο πρότυπο ASTM C876-87, «Standard test method for Half Cell Potentials of reinforcing Steel in Concrete», από τις τιμές του μετρούμενου δυναμικού διάβρωσης, προκύπτουν οι ενδείξεις για την προδιάθεση του σιδηροπλισμού για διάβρωση και διακρίνονται τα εξής ενδεχόμενα :

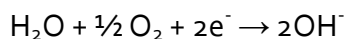
- Όταν $E_{corr} > -200 \text{ mVCSE}$, κατά πιθανότητα 90% δεν συμβαίνει διάβρωση, ο οπλισμός βρίσκεται σε παθητική κατάσταση.
- Όταν $E_{corr} < -350 \text{ mVCSE}$, κατά πιθανότητα 90% συμβαίνει διάβρωση, ο οπλισμός βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση.
- Όταν $-200 \text{ mVCSE} > E_{corr} > -350 \text{ mVCSE}$, δεν είναι βέβαιο αν συμβαίνει ή όχι διάβρωση.

8.3 Ηλεκτροχημικός προσδιορισμός της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης

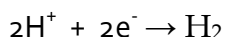
Γενικά, ένα μέταλλο το οποίο διαβρώνεται είναι ισοδύναμο με ένα κύκλωμα ή ένα κελί στο οποίο η κατανάλωση ενέργειας συμβαίνει με την παραγωγή των προϊόντων διάβρωσης. Ο ρυθμός διάβρωσης είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με ακρίβεια από τη μέτρηση της διαλυμένης ποσότητας του μετάλλου το οποίο καταναλώνεται στο μετασχηματισμό του σε οξειδίο (σκουριά). Αυτό μπορεί να γίνει άμεσα μετρώντας την πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο δημιουργείται από την ανοδική αντίδραση του σιδήρου:



και καταναλώνεται από την καθοδική αντίδραση:



ή



Μετατρέποντας τη ροή ηλεκτρονίων σε απώλεια μάζας με βάση τον νόμο του Faraday προκύπτουν τα ακόλουθα:

$$m = \frac{MI t}{zF}$$

Όπου:

m: η μάζα του μετάλλου που καταναλώνεται,

I: ηλεκτρικό ρεύμα (A),

t: χρόνος (s),

F: σταθερά Faraday (A s ή Cb/mol)

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

M: Ατομικό βάρος μετάλλου (56 g για το Fe).

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι για πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης $1\mu\text{A cm}^{-2}$ ισούται με απώλεια διατομής χάλυβα 11,6 $\mu\text{m}/\text{έτος}$.

Ο ρυθμός διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα εκφράζεται σε μικρόμετρα ανά έτος [$\mu\text{m}/\text{y}$], δηλαδή σε απομείωση διατομής οπλισμού. Ωστόσο πολλές φορές στη βιβλιογραφία ο ρυθμός διάβρωσης εκφράζεται δια μέσω της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος. Η μετατροπή της απομείωσης της διατομής σε ένταση ρεύματος και αντίστροφα γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση

$$\text{Ρυθμός διάβρωσης} = \frac{i_{corr} \cdot t_a \cdot M_{Me}}{zF \cdot d_{Me}} \cdot 10^6 \quad [\mu\text{m}/\text{y}]$$

Όπου :

i_{corr} : Πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης σε [A/m^2]

t_a : Χρόνος έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον σε [**s**] (31557600s/y)

M_{Me} : Ατομικό βάρος μετάλλου (για το Fe 0,056Kg/mol)

z: Αριθμός ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων (για το Fe, z=2)

F: Σταθερά του Faraday [96485 Cb/mol]

d_{Me} : Πυκνότητα μετάλλου (για το Fe $d_{Fe}=7860\text{Kg}/\text{m}^3$)

Πυκνότητα ρεύματος $1\text{mA}/\text{m}^2$ επιφάνειας σιδήρου αντιστοιχεί με ρυθμό διάβρωσης $1,16\mu\text{m}/\text{y}$. Εάν οπλισμός ονομαστικής διαμέτρου 16mm διαβρώνεται για 20 χρόνια με πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης $100\text{mA}/\text{m}^2$, τότε η απομείωση της διατομής του οπλισμού θα έφτανε τα 11,4mm, με επακόλουθα στατικά προβλήματα της όλης κατασκευής.

Ο προσδιορισμός της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης μπορεί να γίνει με διάφορες ηλεκτροχημικές μεθόδους, η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η τεχνική της Γραμμικής Πόλωσης (Linear Polarization Technique) (N.Perez, 2004).

8.3.1 Τεχνική της λήψης καμπυλών πόλωσης (Linear Polarization Technique)

Οι καμπύλες πόλωσης είναι καμπύλες δυναμικού σε συνάρτηση με το ρεύμα διάβρωσης, $E = f(I)$ ή ρεύματος σε συνάρτηση με το δυναμικό $I = f(E)$, και γράφονται:

- Εντασιοστατικά : όπου ένα ορισμένο ποσό ρεύματος περνάει από ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο στο ηλεκτρόδιο εργασίας και μετράται το δυναμικό του ηλεκτροδίου εργασίας ως προς κάποιο ηλεκτρόδιο αναφοράς.
- Δυναμοστατικά : όπου εφαρμόζεται ένα σταθερό δυναμικό μεταξύ ηλεκτροδίου εργασίας και ηλεκτροδίου αναφοράς και μετράται η μεταβολή της έντασης του ρεύματος.
- Δυναμοδυναμικά : όπου το δυναμικό του ηλεκτροδίου μεταβάλλεται συνεχώς και καταγράφεται το αντίστοιχο ρεύμα.

Μια καμπύλη πόλωσης δίνει τις παρακάτω πληροφορίες για ένα παθητικό μέταλλο:

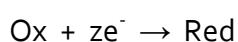
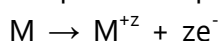
- Δυνατότητα του μετάλλου να παθητικοποιηθεί αυθόρμητα σε ορισμένο περιβάλλον.
- Την περιοχή του δυναμικού, στην οποία το δοκίμιο παραμένει παθητικό.
- Την ταχύτητα διάβρωσης (ρεύμα διάβρωσης) στην παθητική περιοχή.
- Την πιθανότητα έντονων βελονισμών (διάβρωση στην υπερπαθητική περιοχή).

Και για ένα ενεργό (μη παθητικό) μέταλλο:

- Την ταχύτητα διάβρωσης
- Συγκριτικά την αντοχή στη διάβρωση διαφόρων γυμνών ή επικαλυμμένων δοκιμίων

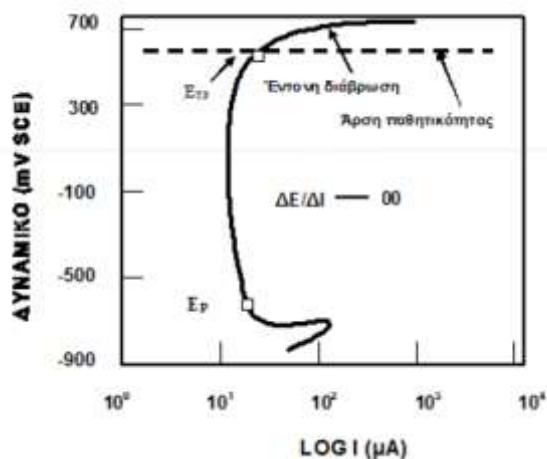
Για τη μέτρηση των απόλυτων ταχυτήτων διάβρωσης χρησιμοποιούνται δύο συγκεκριμένες τεχνικές λήψης των καμπυλών πόλωσης: η τεχνική της γραμμικής πόλωσης και η τεχνική προεκβολής του Tafel. Όλα τα ανωτέρω περιγράφονται παρακάτω αναλυτικά.

Οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις βασίζονται στην ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης και μετρούν τις ηλεκτρικές ιδιότητες της ηλεκτρισμένης διπλοστοιβάδας, δηλαδή της διεπιφάνειας μετάλλου / διαλύματος. Επιτρέπουν τη διερεύνηση του μηχανισμού της διάβρωσης, την παρακολούθηση και τον έλεγχο της. 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 (β_a και β_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 M ισχύει το παρακάτω κινητικό σενάριο:



Υπολογίζεται η ένταση ρεύματος ή το φορτίο του ρεύματος που πέρασε, σε ορισμένο χρονικό διάστημα ($Q = I \cdot t$) από κύκλωμα, που αποτελείται από το μέταλλο που διαβρώνεται και ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο από αδρανές υλικό (λ.χ. λευκόχρυσο ή γραφίτη). Και τα δύο ηλεκτρόδια

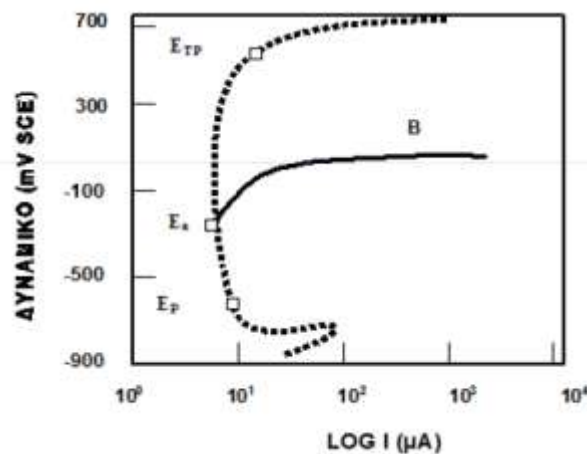
(μέταλλο και βοηθητικό) τοποθετούνται στο διαβρωτικό περιβάλλον, που εξετάζεται. Αν συνδυαστεί η τιμή της έντασης διάβρωσης με την τιμή του δυναμικού διάβρωσης οδηγεί σε βεβαιότερη πρόβλεψη για τη συμπεριφορά στη διάβρωση των συγκρινόμενων μετάλλων, συγκριτικά με αυτήν που προκύπτει από την τιμή μόνο του δυναμικού διάβρωσης. Για τη βέβαιη όμως πρόβλεψη απαιτείται η προσφυγή και σε άλλες μεθόδους. Όπως στην περίπτωση του δυναμικού διάβρωσης, έτσι και στην περίπτωση της έντασης διάβρωσης, παρακολουθείται η τιμή της έντασης του ρεύματος διάβρωσης σε συνάρτηση με το χρόνο, σε τακτά χρονικά διαστήματα. Για την εφαρμογή της μεθόδου, απαιτείται να προσδιορισθεί πρώτα το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα (αναμονή μέχρι επίτευξη της ισορροπίας). Στη συνέχεια επιβάλλονται με τη βοήθεια ποτενσιοστάτη διάφορες σταθερές τάσεις (θετικές ή αρνητικές) μεταξύ του δοκιμίου και του ηλεκτροδίου αναφοράς και μετράται κάθε φορά η ένταση του ρεύματος απόκρισης, μεταξύ του δοκιμίου και του βοηθητικού ηλεκτροδίου. Εάν το δυναμικό μεταβάλλεται με κάποιο σταθερό βήμα (πχ 0,1 mV/s) τότε η καμπύλη ονομάζεται **δυναμοδυναμική**. Η μορφή της καμπύλης για αργές μεταβολές δυναμικού ελάχιστα διαφέρει από την δυναμοστατική.



Σχήμα 8.4 Καμπύλη ανοδικής πόλωσης σε χάλυβα σε αλκαλικό περιβάλλον.

Από την μελέτη των καμπυλών πόλωσης εξάγονται ενδιαφέροντα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του σιδηροπλισμού. Μία καμπύλη ανοδικής πόλωσης (προκύπτει από επιβολή ανοδικής φόρτισης) φαίνεται στο Σχήμα 8.5. Τα εφαρμοζόμενα δυναμικά είναι μερικές εκατοντάδες mV μεγαλύτερα και μικρότερα από το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα. Όταν η μεταβολή $\Delta E/\Delta I$ είναι πολύ μεγάλη βρισκόμαστε στην παθητική περιοχή. Αντίθετα, όταν η παραπάνω μεταβολή γίνει σχεδόν μηδενική, δηλαδή για μικρές μεταβολές του δυναμικού παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές της έντασης ρεύματος, αίρεται η παθητική προστασία του χάλυβα και ξεκινά η διάβρωσή του. Η σχετική περιοχή χαρακτηρίζεται ως υπερπαθητική και ξεκινά μετά από ορισμένο δυναμικό (ETP). Η παθητικότητα στον χάλυβα αποδίδεται στο σχηματισμό οξειδίων, υδροξειδίων ή άλλων ελάχιστα διαλυτών ενώσεων. Όταν συμβαίνει τοπική διάβρωση (π.χ. με παρουσία χλωριόντων), η παθητικότητα στον χάλυβα χάνεται για μικρότερες τιμές του δυναμικού σε σχέση με το δυναμικό ETP. Στο παράδειγμα του Σχήματος 8.6, παρατηρείται (σημείο E_n) μια «εκτροπή» (E nB) απ' την παθητικότητα, παρ' όλο που το

δυναμικό είναι χαμηλότερο του ETP. Η εστιγμένη καμπύλη αντιστοιχεί σε διάβρωση χάλυβα χωρίς την παρουσία χλωριόντων. Το EP είναι το μέγιστο δυναμικό για το οποίο δεν παρατηρείται διάβρωση κατά βελονισμό. Η χρήση αναστολέων διάβρωσης αυξάνει την τιμή του μέγιστου δυναμικού κατά το οποίο δεν παρατηρείται τοπική διάβρωση του σιδηροπλισμού, παρέχοντας προστασία έναντι διάβρωσης για διάφορες συνθήκες. Ο C. Hansson, αναφέρει ότι η μέθοδος ελέγχου διάβρωσης του χάλυβα με τη σύνταξη καμπυλών πόλωσης έχει το πλεονέκτημα της δυνατότητας ελέγχου της επίδρασης των προσθέτων σκυροδέματος, καθώς και της επίδρασης των μεταβολών των συνθηκών του περιβάλλοντος στη διάβρωση του χάλυβα. Παρουσιάζει όμως η μέθοδος το μειονέκτημα ότι απαιτεί αρκετές ώρες για να πραγματοποιηθεί, κυρίως όταν πρόκειται για μετρήσεις σε εξωτερικούς χώρους. Ο αριθμός των μετρήσεων σ' αυτήν την περίπτωση περιορίζεται, υπάρχει δε ο κίνδυνος λανθασμένης σύνταξης των καμπυλών. Η εφαρμογή δυναμικών αρκετά διαφορετικών από το δυναμικό διάβρωσης, μπορεί να μεταβάλλει τη διεπιφάνεια μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να μην αφορούν την συμπεριφορά του χάλυβα στο φυσικό του περιβάλλον.



Σχήμα 8.5 Καμπύλη ανοδικής πόλωσης για χάλυβα σε αλκαλικό περιβάλλον και σε αλκαλικό που περιέχει χλωριόντα.

Η μέτρηση μπορεί να γίνει είτε με εφαρμογή δυναμικών και μέτρηση των αντίστοιχων ρευμάτων (**δυναμοστατική μέθοδος**) όπως έχει ήδη περιγραφεί, είτε με εφαρμογή ρευμάτων και μέτρηση των αντίστοιχων δυναμικών (**εντασιοστατική μέθοδος**). Στην περίπτωση της δυναμοστατικής μεθόδου, εφαρμόζονται στον χάλυβα διάφορα δυναμικά, πολύ κοντά στο δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα (μέχρι και 25 mV εκατέρωθεν του δυναμικού διάβρωσης, αλλά συνήθως 10 mV) και μετράται η ένταση του αντίστοιχου ρεύματος. Καταγράφεται η καμπύλη του δυναμικού V ως προς την ένταση του ρεύματος I, η οποία για μικρές μεταβολές του εφαρμοζόμενου δυναμικού, είναι περίπου ευθεία γραμμή. Αυτό συμβαίνει γιατί στην περιοχή χαμηλής υπέρτασης ισχύει η προσεγγιστική μορφή της εξίσωσης Butler-Volmer. Η κλίση της ευθείας δίνει την αντίσταση πόλωσης.

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

$$i = i_o \left\{ \exp\left(\frac{azF\eta}{RT}\right) - \exp\left[-\frac{(1-a)zF\eta}{RT}\right] \right\} \quad (8.1)$$

Όπου, T: η απόλυτη θερμοκρασία σε K, R: Σταθερά των αερίων, z: ο αριθμός των ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων, α: παράγοντας συμμετρίας, F: σταθερά Faraday
Για χαμηλές υπερτάσεις $\eta = E - E_o$, δηλαδή

$$\text{όταν } \left(\frac{azF\eta}{RT}\right) \ll 1 \text{ και } \frac{(1-a)zF\eta}{RT} \ll 1$$

Τότε οι εκθετικοί όροι της εξίσωσης (7.1) για την ανοδική και καθοδική συνιστώσα του ολικού ρεύματος μπορούν κατά προσέγγιση να αποδοθούν από τους δύο πρώτους όρους των αντιστοιχών σειρών Taylor, δηλαδή

$$\exp\left[-\frac{(1-a)zF\eta}{RT}\right] = 1 - \frac{(1-a)zF\eta}{RT}$$

Αν στην εξίσωση Butler – Volmer αντικαταστήσουμε τους εκθετικούς όρους με τα αναπτύγματα Taylor τότε $i = i_o \frac{zF}{RT} \eta$. Από αυτή 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 (σχήμα 7.4).

Η κλίση της ευθείας αυτής για δυναμικό E_{corr} συνιστά την αντίσταση πόλωσης R_p , όπου

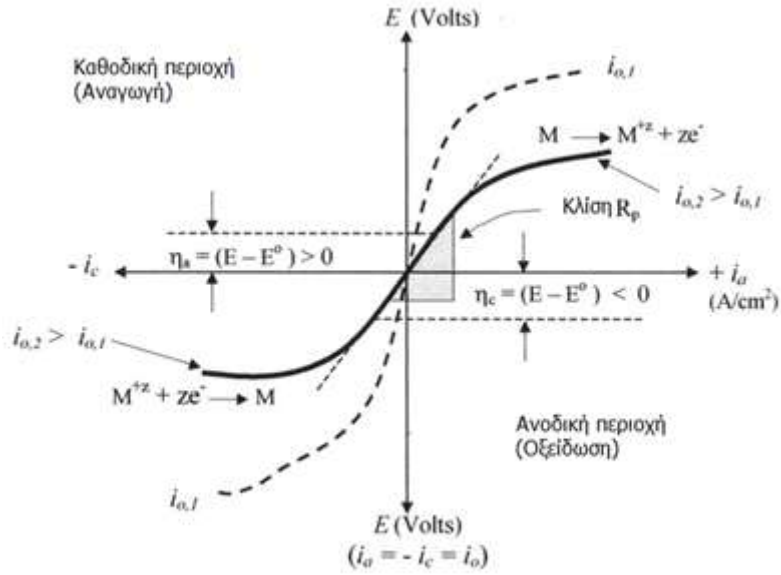
$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} = \frac{\eta}{\Delta i} \quad (8.2)$$

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:

$$\eta_a = \beta_\alpha \log\left(\frac{i_a}{i_o}\right) = \beta_\alpha \log\left(\frac{i_a}{i_{corr}}\right) \quad \eta_a = \Delta E = (E - E_{corr}) > 0 \quad (8.3)$$

$$\eta_c = -\beta_c \log\left(\frac{i_c}{i_o}\right) = -\beta_c \log\left(\frac{i_c}{i_{corr}}\right) \quad \eta_c = \Delta E = E - E_{corr} < 0 \quad (8.4)$$



Σχήμα 8-6: Ανοδική και καθοδική περιοχή των δυναμικών E συναρτήσεως της πυκνότητας του ρεύματος.

Λύνοντας τις σχέσεις (8.3) και (8.4) ως προς την ανοδική και καθοδική πυκνότητα ρεύματος τότε η συνολική πυκνότητα ρεύματος είναι:

$$i = i_a - i_c = i_{corr} \left\{ \exp \left[\frac{2,303(E - E_{corr})}{\beta_a} \right] - \exp \left[\frac{2,303(E - E_{corr})}{\beta_c} \right] \right\} \quad (8.5)$$

Η εξίσωση (8.5) είναι μία 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:

$$\left(\frac{di}{dE} \right) = 2,303i_{corr} \left\{ \beta_a^{-1} \exp \left[\frac{2,303(E - E_{corr})}{\beta_a} \right] - \beta_c^{-1} \exp \left[-\frac{2,303(E - E_{corr})}{\beta_c} \right] \right\} \quad (8.6)$$

Για $E = E_{corr}$ τότε:

$$\left(\frac{di}{dE} \right)_{E=E_{corr}} = 2,303i_{corr} \left(\frac{\beta_a + \beta_c}{\beta_a \beta_c} \right) \quad (8.7)$$

$$R_p = \left(\frac{di}{dE} \right)_{E=E_{corr}}^{-1} = \frac{\beta_a \beta_c}{2,303i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} = \frac{B}{i_{corr}} \quad (8.8)$$

Όπου **B** σταθερά Stern - Geary ίση με $B = \frac{\beta_a \beta_c}{2,303 i_{corr} (\beta_a + \beta_c)}$ και συνδέεται με την ανοδική β_a και

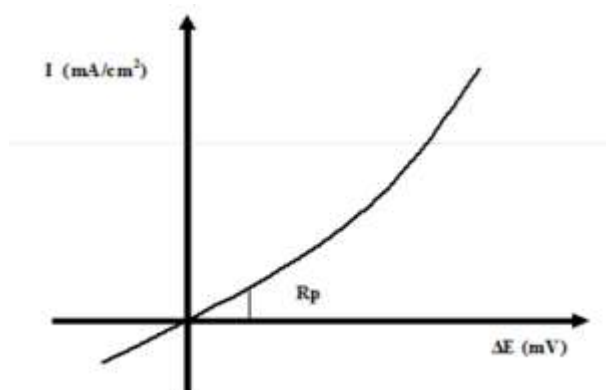
καθοδική β_c σταθερά Tafel. Η σταθερά B εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος (το είδος του τσιμέντου, το λόγο N/T, τη συντήρηση του σκυροδέματος και την κατάσταση του οπλισμού). Για το οπλισμένο σκυρόδεμα οι τιμές της σταθεράς B κυμαίνονται από 26mV – 52mV, ανάλογα την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο οπλισμός μέσα στο σκυρόδεμα (B=26 mV όταν ο οπλισμός είναι σε ενεργή κατάσταση, δυναμικά ηλεκτροθετικότερα του ETP ή ηλεκτραρνητικότερα του EP και B=52 mV όταν ο οπλισμός είναι σε παθητική κατάσταση, δυναμικά μεταξύ Ep και ETP). Ανάλογα όμως με το είδος του σκυροδέματος, οι τιμές της σταθεράς B διαφέρουν από τις προαναφερθείσες τιμές, συνήθως δε κυμαίνονται από 13 έως 52 mV.

Από τη σχέση (8.8) προκύπτει ότι η αντίσταση πόλωσης R_p είναι αντιστρόφως ανάλογη της πυκνότητας ρεύματος.

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

Ο επακριβής προσδιορισμός της σταθεράς B για ένα είδος σκυροδέματος απαιτεί τον προσδιορισμό επι τόπου με λήψη της καμπύλης Taffel.



Σχήμα 8.7 Καμπύλη συσχέτισης της έντασης του ρεύματος I προς το δυναμικό V.

8.3.2 Συσχέτιση των μετρήσεων γραμμικής πόλωσης με την κατάσταση του χάλυβα Ο.Σ

Η συσχέτιση μεταξύ των τιμών της πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης χαλύβδινων οπλισμών σε σκυρόδεμα και της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα, εκφράζεται με το παρακάτω κριτήριο, το οποίο αναπτύχθηκε με βάση εργαστηριακές δοκιμές: (F. Massazza, 1985)

- $i_{corr} < 0,1 \mu\text{A cm}^{-2}$, παθητική κατάσταση
- $0,1 < i_{corr} < 0,5 \mu\text{A cm}^{-2}$, χαμηλός ως μέτριος ρυθμός διάβρωσης

- $0,5 < i_{corr} < 1 \mu\text{A cm}^{-2}$, μέτριος ως υψηλός ρυθμός διάβρωσης
- $i_{corr} > 1 \mu\text{A cm}^{-2}$, υψηλός ρυθμός διάβρωσης

Άλλη συσχέτιση των αποτελεσμάτων της γραμμικής πόλωσης με την κατάσταση του χάλυβα Ο.Σ, περιγράφεται παρακάτω με ένα άλλο ακόμα κριτήριο (RILEM 12-CRC, 1976)

- $i_{corr} < 0,2 \mu\text{A cm}^{-2}$, δεν αναμένονται φαινόμενα διάβρωσης
- $0,2 < i_{corr} < 1,0 \mu\text{A cm}^{-2}$, πιθανότητα διάβρωσης σε 10-15 χρόνια
- $1,0 < i_{corr} < 10 \mu\text{A cm}^{-2}$, πιθανότητα διάβρωσης σε 2-10 χρόνια
- $i_{corr} > 10 \mu\text{A cm}^{-2}$, πιθανότητα διάβρωσης σε 2 χρόνια ή λιγότερο

Οι μετρήσεις του ρυθμού διάβρωσης επηρεάζονται από τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία, οπότε οι συνθήκες στις οποίες πραγματοποιούνται οι μετρήσεις θα πρέπει να καθορίζονται όπου είναι εφικτό και να αναφέρονται.

8.4 Μέτρηση της απώλειας μάζας

Για τους υπολογισμούς της απώλειας μάζας των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος ως αρχικό βάρος λαμβάνεται το βάρος του δοκιμίου πριν την έκθεσή του στο διαβρωτικό περιβάλλον και ως τελικό βάρος λαμβάνεται το βάρος του οπλισμού μετά την έκθεσή του στο διαβρωτικό περιβάλλον, αφού πρώτα απομακρυνθεί από αυτό το οξείδιο (σκουριά). Η διαφορά βάρους προκύπτει από τη διαφορά της αρχικής μείον τη τελική τιμή μάζας του οπλισμού. Η εκτίμηση της διάβρωσης γίνεται με τον υπολογισμό του ποσοστού επί της εκατό της μεταβολής κατά βάρος των οπλισμών, καθώς επίσης και από τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης. Το ποσοστό επί τοις εκατό μεταβολής κατά βάρος των οπλισμών δίνεται από τη σχέση:

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

όπου:

$m_{\text{αρχ}}$: το αρχικό βάρος του οπλισμού πριν τον εγκιβωτισμό.

$m_{\text{τελ}}$: το τελικό βάρος του οπλισμού.

Ο ρυθμός διάβρωσης του οπλισμού δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Ρυθμός Διάβρωσης } (\mu\text{m} / \text{year}) = 8,76 \cdot 10^{-7} \Delta m / A D T$$

Όπου:

$$\Delta m = m_{\text{αρχ}} - m_{\text{τελ}} \text{ η διαφορά μάζας του οπλισμού [g]}$$

A : Η επιφάνεια του οπλισμού η οποία δίνεται από τον τύπο $A = \pi d \left(h + \frac{d}{2} \right)$ [cm²]

D : Πυκνότητα δομικού χάλυβα ίση με 7,8g/cm³

T : Χρόνος έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον [h].

Για τον προσδιορισμό της μάζας των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος πριν την έκθεσή τους στο περιβάλλον διάβρωσης, οι οπλισμοί καθαρίζονται με διάλυμα υδροχλωρικού οξέος που περιέχει αναστολέα διάβρωσης έτσι ώστε να απομακρυνθούν τυχόν οξείδια από την επιφάνειά τους. Στη συνέχεια οι οπλισμοί ξεπλένονται με απιονισμένο νερό και εμβαπτίζονται σε ακετόνη

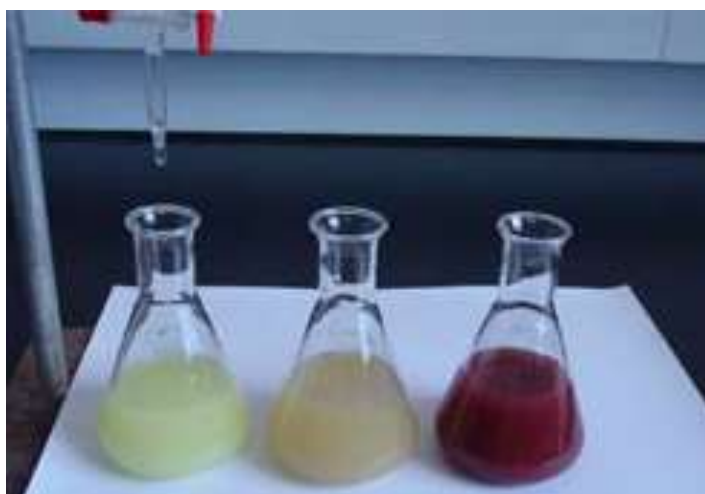
για την απομάκρυνση των λιπαρών ουσιών από την επιφάνεια τους. Τέλος ζυγίζονται με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου 0,1mg (*ISO/DIS 8407.3*).

8.5 Μέθοδος προσδιορισμού χλωριόντων.

Για να προσδιοριστεί η ποσότητα των χλωριόντων στο κονίαμα γίνεται με την μέθοδο Mohr και με την μέθοδο Volhard. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα χλωριόντα διακρίνονται σε συνολικά και διαλυτά.

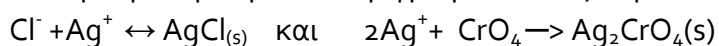
8.5.1 Μέθοδος Mohr

Η μέθοδος Mohr είναι από τις πιο παλιές αναλυτικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται και σήμερα. Αναφέρεται στον προσδιορισμό των Cl⁻ με πρότυπο διάλυμα νιτρικού αργύρου παρουσία μικρής αλλά καθορισμένης ποσότητας K₂CrO₄(δείκτης). Ο AgCl είναι λιγότερο διαλυτός από τον Ag₂CrO₄, γι' αυτό και τα Ag⁺ που προστίθενται καταβυθίζονται σαν AgCl μέχρι το ισοδύναμο σημείο (Ι.Σ.). Μετά το ισοδύναμο σημείο η περίσσεια Ag⁺ σχηματίζει Ag₂CrO₄ που έχει χρώμα καστανοκόκκινο με αποτέλεσμα να αναγνωρίζεται το τελικό σημείο της ογκομέτρησης.



Σχήμα 8.12 Σχηματισμός Ag₂CrO₄

Η όλη πορεία μπορεί να περιγραφεί από τις παρακάτω αντιδράσεις:



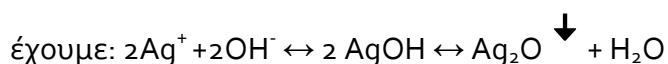
λευκό ίζημα

κεραμέρυθρο ίζημα

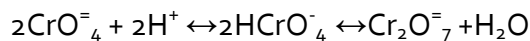
Η μέθοδος Mohr χρησιμοποιείται με τις εξής προϋποθέσεις:

- Η συγκέντρωση του δείκτη πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 0,001 και 0,003 M.

- Το pH πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 6,3 και 10. Όταν το pH είναι μεγαλύτερο του 10 τότε



ενώ όταν το $\text{pH} < 6,3$ τότε έχουμε:



οπότε στο ισοδύναμο σημείο σχηματίζεται ευδιάλυτος $\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ και γι' αυτό θα χρειαζόταν πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση Ag^+ για τον σχηματισμό ιζήματος με αποτέλεσμα μεγαλύτερο σφάλμα ογκομέτρησης.

- Πολλά ξένα ιόντα παρεμποδίζουν τον προσδιορισμό γι' αυτό δεν πρέπει να υπάρχουν i) έγχρωμα κατιόντα (π.χ. Cu^{+2}) ii) κατιόντα που σχηματίζουν σύμπλοκα (π.χ. Sn^{+4}) με τα Cl^- και iii) ιόντα που ανάγουν το Ag^+ σε Ag^0 , όπως π.χ. ο Fe^{+2} .

Η μέθοδος Mohr χρησιμοποιείται και για τον προσδιορισμό Br^- αλλά όχι J^- ή SCN^- γιατί ο AgJ και ο AgSCN στο ισοδύναμο σημείο προσροφούν CrO_4 με συνέπεια αυτό να είναι ασαφές. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας:

- Αφαιρείται τμήμα σκυροδέματος από το δείγμα που είναι προς εξέταση. Το δείγμα αυτό, αφού λειοτριβηθεί καλά, ζυγίζονται 5 γραμμάρια σε ζυγαριά ακριβείας. Στη συνέχεια το καλά λειοτριβημένο δείγμα των 5 γραμμαρίων προστίθεται σε μια κωνική φιάλη 250 ml μαζί με 50 ml HNO_3 (1N) και προστίθεται απιονισμένο νερό μέχρι το σημείο συμπλήρωσης των 250 ml συνολικού δείγματος. Το δείγμα παραμένει σε αυτές τις συνθήκες για 1 ημέρα.
- Με την βοήθεια προχοίδας αφαιρούνται 10ml δείγματος χωρίς ίζημα τα οποία εισάγονται σε κωνική φιάλη με την προσθήκη 90ml απιονισμένου νερού. Προστίθεται NaOH (0,1N) μέχρι το pH να γίνει 7. Στην συνέχεια προστίθενται 3-4 σταγόνες δείκτη χρωμικού καλίου.
- Γίνεται η τιτλοδότηση με AgNO_3 (1N). Το πείραμα ολοκληρώνεται όταν το διάλυμα από διαφανές αποκτήσει ένα θολό κίτρινο προς το πορτοκαλί χρώμα.

8.5.2 Μέθοδος Volhard

Η μέθοδος αυτή είναι έμμεση και προσδιορίζονται τα Cl^- , Br^- , I^- σε όξινο περιβάλλον. Προστίθεται γνωστή περίσσεια διαλύματος νιτρικού αργύρου. Η περίσσεια ογκομετρείται με πρότυπο διάλυμα θειοκυανιούχου καλίου παρουσία ιόντων Fe^{3+} σαν δείκτη. Το τελικό σημείο της ογκομέτρησης φαίνεται από το κόκκινο χρώμα που σχηματίζουν τα Fe^{3+} με τα SCN^- (σχηματισμός συμπλόκου). Η μέθοδος Volhard πρέπει να χρησιμοποιείτε με τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Η συγκέντρωση του δείκτη Fe^{3+} πρέπει να είναι περιορισμένη. Χρησιμοποιείται διάλυμα νιτρικού σιδήρου ή εναμμώνιου θειικού σιδήρου.
- Το διάλυμα του αλογονοϊόντος πρέπει να είναι ισχυρά όξινο (με HNO_3 σε $\text{pH} \approx 1$, γιατί τα Fe^{3+} υδρολύονται οπότε σχηματίζεται $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ με αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται η παρατήρηση του ισοδύναμου σημείου (κίτρινο χρώμα).

- Δεν πρέπει να υπάρχουν διάφορα οξειδωτικά που μπορεί να οξειδώσουν τα SCN^- και χρωματιστά ιόντα. Ακόμα δεν πρέπει να υπάρχουν ιόντα που σχηματίζουν ίζημα με τα SCN^- και χρωματιστά ιόντα.

Η ογκομέτρηση πρέπει να γίνεται με ισχυρή ανάδευση γιατί κοντά στο ισοδύναμο σημείο προσροφώνται Ag^+ (από το AgSCN) με αποτέλεσμα αύξηση της κατανάλωσης.

Με την μέθοδο Volhard μπορεί να προσδιοριστούν Ag^+ με άμεσο ογκομετρικό προσδιορισμό με πρότυπο διάλυμα SCN^- . Με τον έμμεσο τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω μπορούν να προσδιοριστούν εκτός των Cl^- ιόντα Br^- και I^- . Μικρό μειονέκτημα της μεθόδου θα μπορούσε να χαρακτηριστεί η χρήση δύο προτύπων διαλυμάτων Ag^+ και SCN^- .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

9 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

9.1 Εισαγωγή

Τα τσιμεντοκονιάματα που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας ήταν ενισχυμένα με χαλύβδινες ράβδους. Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου Tempcore B500c, διαμέτρου 10 mm και μήκους 100 mm.

Στον πίνακα 9.1 περιγράφονται οι ομάδες όπου πρώτον αποτελούνται από δοκίμια με αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο σε διαφορετικά ποσοστά και δεύτερον αποτελούνται από δοκίμια με αναστολέα διάβρωσης στην μισή επιφάνεια του δοκίμιου και σε διαφορετικά ποσοστά.

Πίνακας 9.1: Συνοπτικός Πίνακας Δοκιμών με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης (μισό-μισό).

Αριθμός Δοκιμών	Σύσταση Δοκιμών	Αναλογία:	Ονομασία Ομάδων
		Τσιμ. / άμμος / νερό	
4	CEM I + C.I. 0,1g/100g τσιμέντου	1/3/0.5	ΟΜΑΔΑ Α
4	CEM I + C.I. 0,4g/100g τσιμέντου	1/3/0.5	ΟΜΑΔΑ Β
4		1/3/0.5	ΟΜΑΔΑ Γ = Γ ₁ + Γ ₂
	CEM I		ΟΜΑΔΑ Γ ₁
	CEM I + C.I. 0,1g/100g τσιμέντου		ΟΜΑΔΑ Γ ₂
4		1/3/0.5	ΟΜΑΔΑ Δ = Δ ₁ + Δ ₂
	CEM I		ΟΜΑΔΑ Δ ₁
	CEM I + C.I. 0,4g/100g τσιμέντου		ΟΜΑΔΑ Δ ₂
4	CEM I	1/3/0.5	ΟΜΑΔΑ Ε

Η κάθε ομάδα από τον πίνακα 9.1 αποτελείται από τέσσερα κυβικά δοκίμια με εγκιβωτισμένους τέσσερις οπλισμούς στο κάθε δοκίμιο. Τα δοκίμια της ομάδας Α και Β περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητες 0,1g/100g τσιμέντου και 0,4g/100g τσιμέντου αντίστοιχα, τα δοκίμια της ομάδας Γ περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου

αλλά στο μισό δοκίμιο το άλλο μισό δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης. Και τα δοκίμια της ομάδας Δ είναι κατασκευασμένα όπως τα δοκίμια της ομάδας Γ απλά περιέχουν 0,4g/100g τσιμέντου περιεκτικότητα αναστολέα διάβρωσης. Στην παράγραφο 9.4 αναφέρονται αναλυτικά οι μετρήσεις για την κάθε ομάδα.

Στον πίνακα 9.2 περιγράφονται οι ομάδες των ασβεστολιθικών τσιμέντων όπου πρώτον αποτελούνται από δοκίμια με αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο και δεύτερον αποτελούνται από δοκίμια με αναστολέα διάβρωσης ως ψεκαζόμενο.

Πίνακας 9.2: Συνοπτικός Πίνακας Δοκιμίων με ψεκαζόμενο και πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης σε ασβεστολιθικά τσιμέντα.

Αριθμός Δοκιμίων	Σύσταση Δοκιμίων	Αναλογία:	Ονομασία Ομάδων
		Τσιμ. / άμμος / νερό	
3	CEM I	1/3/0.5	CEM I
3	LC 1	1/3/0.5	LC 1
3	LC 2	1/3/0.5	LC 2
3	CEM I + C.I.(additive)	1/3/0.5	CEM I
3	LC 1 + C.I.(additive)	1/3/0.5	LC 1
3	LC 2 + C.I.(additive)	1/3/0.5	LC 2
3	CEM I + C.I.(sprayed)	1/3/0.5	CEM I
3	LC 1 + C.I.(sprayed)	1/3/0.5	LC 1
3	LC 2 + C.I.(sprayed)	1/3/0.5	LC 2
3	SR	1/3/0.5	SR
3	SR + C.I.(sprayed)	1/3/0.5	SR

Η κάθε ομάδα από τον πίνακα 9.2 αποτελείται από τρία κυβικά δοκίμια με εγκιβωτισμένους από τέσσερις οπλισμούς στο κάθε δοκίμιο. Κάθε ομάδα αποτελείται από διαφορετικό τύπο εργαστηριακού τσιμέντου. Το αμιγές τσιμέντο (CEM I) παρασκευάστηκε με συνάλεση κλίνκερ και γύψου, ενώ τα δύο ασβεστολιθικά τσιμέντα, διαφορετικής περιεκτικότητας σε ασβεστόλιθο (συνθέσεις LC1 και LC2) παρασκευάστηκαν με συνάλεση κλίνκερ γύψου και ασβεστόλιθου. Και εν συνεχεία, σε κάθε ομάδα προστέθηκε αναστολέας διάβρωσης είτε ως πρόσμικτος (additive) είτε ως ψεκαζόμενος (sprayed). Στην παράγραφο 9.4 αναφέρονται αναλυτικά οι μετρήσεις για την κάθε ομάδα και οι συγκρίσεις μεταξύ τους.

9.2 Πειραματική διαδικασία

9.2.1 Καθαρισμός χαλύβων και καλουπιών

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία κατασκευής των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος απαιτείται ο καθαρισμός των ράβδων χάλυβα που θα χρησιμοποιηθούν ως ενίσχυση. Οι ράβδοι του χάλυβα τοποθετήθηκαν σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος draca και παρέμειναν σε αυτό περίπου 3-4 λεπτά. Εν συνεχεία, οι ράβδοι χάλυβα ξεπλένονται διαδοχικά με νερό βρύσης, απιονισμένο νερό και τέλος εμβαπτίζονται σε ακετόνη. Είναι πολύ σημαντικός ο καθαρισμός του χάλυβα γιατί με αυτό τον τρόπο ενεργοποιείται η επιφάνειά τους και μπορεί να πραγματοποιηθεί καλύτερη πρόσδεση με το τσιμεντοκονίαμα όταν ο χάλυβας θα τοποθετηθεί μέσα σε αυτό. Τέλος με τη διαδικασία αυτή απομακρύνονται σκόνες και οξειδία 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)

Επίσης απαιτείται ο καθαρισμός των καλουπιών μέσα στα οποία θα τοποθετηθεί ο τσιμεντοπολτός μέχρι τη σκλήρυνση, έτσι ώστε να είναι εύκολη η αποκόλληση των δοκιμών και να αποφευχθούν ανωμαλίες στην επιφάνειά τους.

9.2.2 Κατασκευή δοκιμών τσιμεντοκονιάματος

Για την κατασκευή των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος αναμίχθηκαν τσιμέντο, αδρανή και νερό σε αναλογία 1:3:0.5. Το μείγμα εκχύθηκε στα καλούπια και τοποθετήθηκε σε καθένα από αυτά μία χαλύβδινη ράβδος, μήκους 10 cm η οποία προεξέχει περίπου 2 cm. Η έκχυση του μείγματος μέσα στα καλούπια έγινε υπό συνεχή δόνηση έτσι ώστε να απομακρυνθεί ο αέρας και να αποφευχθεί τόσο η δημιουργία φυσαλίδων στο εσωτερικό του μείγματος, όσο και η δημιουργία ανωμαλιών στην επιφάνεια των δοκιμών.

Τα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος που κατασκευάστηκαν είναι κυβικού σχήματος με διαστάσεις 10 X 10 X 10 cm.

Μετά από περίπου 3 ημέρες το τσιμεντοκονίαμα είχε πλέον στερεοποιηθεί και έτσι τα δοκίμια απομακρύνθηκαν από τα καλούπια. Τοποθετήθηκαν σε λεκάνες με νερό και παρέμειναν για άλλες 3 ημέρες με σκοπό την ωρίμανση των δοκιμών.

9.2.3 Μόνωση οπλισμού

Για να είναι δυνατή η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης του χάλυβα θα πρέπει να δημιουργηθεί ηλεκτρική γέφυρα ανάμεσα στον οπλισμό και στο ηλεκτρόδιο μέτρησης με τη βοήθεια ενός μικρού κομματιού χάλκινου σύρματος, το οποίο περιτυλίγεται γύρω από τον οπλισμό. Η μέτρηση του δυναμικού επιτυγχάνεται συνδέοντας κάθε φορά το ηλεκτρόδιο μέτρησης με το ελεύθερο άκρο του σύρματος.

Ο οπλισμός όμως πρέπει να μονωθεί από το περιβάλλον και έτσι τοποθετείται πλαστικό υλικό μικρής διαμέτρου γύρω από το προεξέχον άκρο του οπλισμού. Μέσα στο πλαστικό κομμάτι περιχύνεται μίγμα από 2 κόλλες από εποξειδικές ρητίνες σε αναλογία 1:1. Για να μην υπάρχει ροή της κόλλας στη περιμέτρο των δοκιμών τοποθετείται χαρτοταινία γύρω από κάθε δοκίμιο. Η

διαδικασία εφαρμογής της κόλλας επαναλαμβάνεται 2 ή και 3 φορές, μέχρις ότου υπάρχει πλήρης μόνωση του οπλισμού.

9.2.4 Εφαρμογή αναστολέα διάβρωσης

9.2.4.1 Ψεκάσμος με αναστολέα διάβρωσης

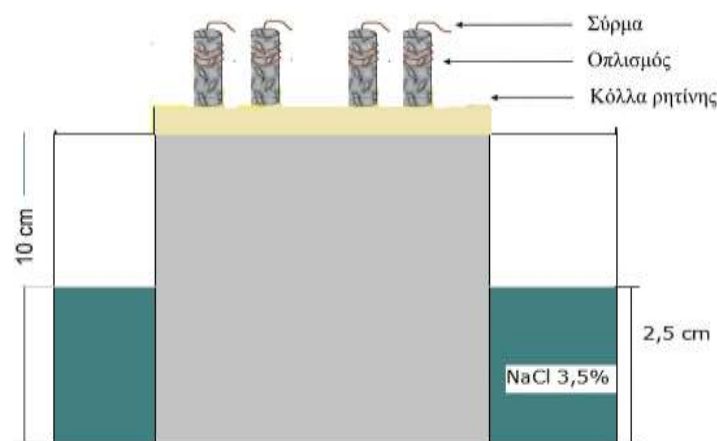
Πριν από την εφαρμογή του αναστολέα διάβρωσης απομακρύνονται σκόνες και σαθρά. Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε ως αναστολέας διάβρωσης το Βενζοϊκό κυκλοεξαμμώνιο σε ποσότητα 1 lt / m². Δώδεκα δοκίμια, από τον πίνακα 9.2, από κάθε τύπο σκυροδέματος ψεκάστηκαν με αναστολέα διάβρωσης.

9.2.4.2 Πρόσμικτος αναστολέας διάβρωσης

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε ως αναστολέας διάβρωσης το Βενζοϊκό κυκλοεξαμμώνιο σε ποσότητα 1 lt / m². Στα δοκίμια του πίνακα 9.1 και 9.2 χρησιμοποιήθηκε ο αναστολέας διάβρωσης ως πρόσμικτος στις αντίστοιχες ομάδες.

9.2.5 Εμβάπτισμα δοκιμίων

Τα δοκίμια βυθίζονται σε λεκάνη που περιέχει υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου 3.5% και αποτελεί το διαβρωτικό τους περιβάλλον. Τα δοκίμια δεν είναι πλήρως εμβαπτισμένα στο διάλυμα, αλλά μόνο κατά 25% περίπου. Για την περίπτωση όπου ο αναστολέας έχει εφαρμοσθεί ως ψεκαζόμενος, τα δοκίμια βυθίζονται στο διάλυμα αφού στεγνώσουν πλήρως από τον αναστολέα διάβρωσης που έχει εφαρμοσθεί σε αυτά.



Σχήμα 9.1: Διαστάσεις κυβικού δοκιμίου εμβαπτισμένο σε ύψος 2.5 cm, σε υδατικό διάλυμα NaCl 3.5% w/w. Διακρίνονται ο οπλισμός, η κόλλα ρητίνης & το χάλκινο σύρμα που είναι περιτυλιγμένο στον οπλισμό.

9.3 Χρησιμοποιούμενοι Μέθοδοι

Για την μελέτη της ανθεκτικότητας των κονιαμάτων σε διάβρωση χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι:

- η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης των χαλύβων των τσιμεντοκονιαμάτων και
- η μέτρηση του ρεύματος διάβρωσης και της αντίστασης πόλωσης, με τη χρήση της γραμμικής πόλωσης.

9.3.1 Δυναμικό διάβρωσης

Η μέτρηση του δυναμικού του χάλυβα ως προς κάποιο ηλεκτρόδιο αναφοράς προσφέρει πληροφορίες για την πιθανότητα διάβρωσής του. Ως ηλεκτρόδια αναφοράς χρησιμοποιούνται το ηλεκτρόδιο καλομέλανος SCE [Hg / HgCl / KCl] ή το ηλεκτρόδιο θειικού χαλκού CSE [Cu / CuSO₄].

Από τα δύο είδη ηλεκτροδίων αναφοράς το ηλεκτρόδιο καλομέλανος είναι ακριβέστερο από το ηλεκτρόδιο θειικού χαλκού. Το ηλεκτρόδιο όμως του θειικού χαλκού προτιμάται σε εξωτερικούς χώρους, αφού ετοιμάζεται γρηγορότερα. Το ηλεκτρόδιο καλομέλανα τέλος προσβάλλεται από άλατα βρωμίου και ιωδίου, ενώ του θειικού χαλκού από άλατα χλωριόντων. Απαραίτητο επίσης είναι ένα βολτόμετρο, ενώ η παρουσία υγρασίας απαιτεί μεγάλη προσοχή κατά τη μέτρηση.

Όπως αναφέρεται στο ASTM C 876-87, από τις τιμές του μετρούμενου δυναμικού, διακρίνονται τα εξής ενδεχόμενα:

- Όταν $E > -200$ mV, κατά πιθανότητα 90% δεν συμβαίνει διάβρωση.
- Όταν $E < -350$ mV, κατά πιθανότητα 90% συμβαίνει διάβρωση.
- Όταν -200 mV $> E > -350$, δεν είναι βέβαιο αν συμβαίνει ή όχι διάβρωση.

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρόδιο καλομέλανος. 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.

9.3.2 Μέθοδος γραμμικής πόλωσης

Για την εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής πόλωσης, 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 εκατοντάδες mV μεγαλύτερα και μικρότερα από το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα. Με τις τιμές του δυναμικού E και τις αντίστοιχες εντάσεις ρεύματος i , συντάσσεται το διάγραμμα $E - \log i$ το οποίο ονομάζεται καμπύλη πόλωσης. Παθητικότητα στον χάλυβα υπάρχει όταν η μεταβολή $\Delta E / \Delta i$ είναι μεγάλη. 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 E_{TP}).

Όταν συμβαίνει τοπική διάβρωση, η παθητικότητα στο χάλυβα χάνεται για μικρότερες τιμές του δυναμικού σε σχέση με το δυναμικό E_{TP} της γενικής διάβρωσης του χάλυβα.

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. Οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε προτυποποιημένο κελί ηλεκτρόλυσης υπό σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας. Η διάταξη ήταν τριών ηλεκτροδίων. Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο κεκορεσμένου καλομέλανα SCE. Ως ηλεκτρόδιο εργασίας είναι το ο υπό εξέταση οπλισμός, ενώ ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκε ράβδος άνθρακα. Ο ηλεκτρολύτης ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ήταν το διαβρωτικό διάλυμα NaCl.



Εικόνα 9.2: Ποτενσιοστάτης γραμμικής πόλωσης

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. Στη περιοχή $-20\text{mV} < E_{eq} < 20\text{mV}$ 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 (Ω). Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.3.

Οι μετρήσεις με τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης πραγματοποιούνταν κάθε 30 μέρες για όλα τα δοκίμια. Επίσης λαμβάνονταν συμπληρωματικές μετρήσεις ελεύθερων δυναμικών (δυναμικό διάβρωσης) για τα δοκίμια κάθε εβδομάδα με τη βοήθεια ενός πολύμετρου και ενός ηλεκτροδίου αναφοράς καλομέλανα.

9.4 Μετρήσεις

Οι ομάδες των δοκιμών οπλισμένων κονιαμάτων εξετάστηκαν ηλεκτροχημικά με την τεχνική της γραμμικής πόλωσης με σκοπό να συγκριθεί η αποτελεσματικότητα και η προστασία που μπορεί να προσφέρει η κάθε ομάδα στον εγκιβωτισμένο οπλισμό.

Οι χάλυβες Ο.Σ ήταν τύπου B500c Temprocore και είχαν 100mm μήκος και 10mm (Φ10) διάμετρο. Η επιφάνεια εμβάπτισης των χάλυβων στον ηλεκτρολύτη ήταν 25cm², το ισοδύναμο βάρος χάλυβα 55,85g και η πυκνότητα 7,95g/cm³.

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 Softcorr III της εταιρίας E.G & G Princeton Research. Οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε κελί ηλεκτρόλυσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος T=25±1°C. Η διάταξη ήταν τριών ηλεκτροδίων:

- Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο κεκορεσμένου καλομέλανα SCE.
- Ως ηλεκτρόδιο εργασίας είναι το υπό εξέταση χάλυβας Ο.Σ
- Ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκε ράβδος άνθρακα διαστάσεων: 100mm μήκος και 10mm διάμετρο.

Το διάλυμα (ηλεκτρολύτης) το οποίο χρησιμοποιήθηκε ήταν υδατικό διάλυμα χλωριούχου νατρίου σταθερής συγκέντρωσης χλωριόντων (3,5% κ.β NaCl).

Η περιοχή πόλωσης του χάλυβα Ο.Σ. ήταν ± 20mV από το δυναμικό διάβρωσης (E_{corr}) του υπό εξέταση χάλυβα Ο.Σ [E_{corr}-20mV, E_{corr}+20mV]. Το βήμα σάρωσης (Scan rate) του δυναμικού ήταν 0.1mV/sec.

Η αντίσταση πόλωσης R_p υπολογίστηκε από την κλίση της καμπύλης της έντασης του ρεύματος συναρτήσει των δυναμικών σάρωσης του χάλυβα Ο.Σ. (διαγράμματα E-I), σύμφωνα με τη σχέση :

$$R_p = \frac{dE}{di}$$

Η ένταση του ρεύματος διάβρωσης υπολογίστηκε από τη σχέση $i_{corr} = B/R_p$

Όπου, B σταθερά Tafel. (B=56mV για χάλυβα σε παθητική κατάσταση και B=26mV για χάλυβα σε ενεργή κατάσταση).

Από τον νόμο του Faraday και με γνωστή τη πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης i_{corr} υπολογίστηκε ο ρυθμός διάβρωσης του χάλυβα Ο.Σ.

$$\text{Ρυθμός Διάβρωσης } (\mu\text{m/y}) = \frac{3.27 \times i_{corr} \times E.W}{d}$$

Όπου: i_{corr} πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης σε $\mu A/cm^2$, $E.W.$ ισοδύναμο βάρος σε g (για τον χάλυβα $E.W.=55.85g$), d πυκνότητα χάλυβα σε g/cm^3 ($7.95g/cm^3$).

Η αντίστασης γραμμικής πόλωσης του χάλυβα στον ηλεκτρολύτη είναι ανάλογη με την διαφορά δυναμικού, σύμφωνα με τον τύπο :

$$R_p = \frac{dE}{di}$$

Παρακάτω θα ακολουθήσουν οι πίνακες και τα διαγράμματα για κάθε ομάδα όπου εξετάστηκε στην παρούσα διαδακτορική εργασία.

9.4.1 Μετρήσεις Δυναμικού Διάβρωσης

9.4.1.1 Δοκίμια με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης - Δοκίμια πίνακα 9.1

Στην περίπτωση αυτή εξετάστηκαν 5 ομάδες: Α, Β, Γ, Δ και Ε. Τα δοκίμια της ομάδας Α και Β περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητες 0,1g/100g τσιμέντου και 0,4g/100g τσιμέντου αντίστοιχα, τα δοκίμια της ομάδας Γ περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου αλλά στο μισό δοκίμιο, το άλλο μισό δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης. Και τα δοκίμια της ομάδας Δ είναι κατασκευασμένα όπως τα δοκίμια της ομάδας Γ απλά περιέχουν 0,4g/100g τσιμέντου περιεκτικότητα αναστολέα διάβρωσης. Τα δοκίμια της ομάδας Ε δεν περιέχουν αναστολέα, είναι τα δοκίμια όπου χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρο σύγκρισης. Παρακάτω θα ακολουθήσουν οι μετρήσεις κάθε ομάδας ως προς το Δυναμικό Διάβρωσης στον οπλισμό.

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της ομάδας Α.

Πίνακας 9.3: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας Α, (δοκίμια Α1, ..., Α8).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον σπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Α								
Χρόνος σε μήνες	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
1	-318	-285	-289	-295	-293	-282	-302	-285
2	-261	-234	-237	-242	-240	-232	-248	-234
3	-269	-242	-245	-249	-248	-239	-256	-241
4	-244	-219	-222	-226	-225	-217	-232	-219
5	-292	-262	-266	-271	-269	-260	-278	-262
6	-287	-258	-261	-266	-265	-255	-273	-257
7	-220	-197	-200	-204	-203	-195	-209	-197
8	-273	-245	-248	-253	-252	-243	-260	-245
9	-298	-268	-271	-276	-275	-265	-284	-267
10	-322	-289	-293	-299	-297	-286	-307	-289
11	-306	-275	-278	-283	-282	-272	-291	-274
12	-367	-330	-334	-341	-339	-327	-350	-329
13	-391	-351	-355	-362	-360	-347	-372	-350
14	-401	-360	-365	-371	-370	-356	-381	-359
15	-408	-367	-371	-378	-376	-363	-388	-366
16	-413	-371	-376	-383	-381	-367	-393	-370
17	-399	-358	-363	-369	-368	-354	-379	-357
18	-394	-354	-359	-365	-364	-350	-375	-353
19	-388	-348	-353	-359	-358	-345	-369	-348
20	-397	-357	-362	-368	-367	-353	-378	-356
21	-407	-366	-370	-377	-376	-362	-387	-365
22	-403	-362	-367	-374	-372	-359	-384	-362
23	-397	-357	-361	-368	-367	-353	-378	-356
24	-400	-359	-364	-370	-369	-355	-380	-358

Πίνακας 9.4: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας Α, (δοκίμια Α9, ..., Α16)

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Α								
Χρόνος σε μήνες	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16
1	-295	-311	-294	-303	-299	-296	-307	-271
2	-242	-255	-241	-249	-245	-243	-252	-222
3	-250	-264	-249	-257	-253	-251	-260	-229
4	-226	-239	-226	-233	-229	-227	-236	-208
5	-271	-286	-270	-279	-275	-272	-282	-249
6	-266	-281	-266	-274	-270	-268	-277	-244
7	-204	-215	-203	-210	-207	-205	-212	-187
8	-253	-267	-253	-261	-257	-255	-264	-233
9	-277	-292	-276	-285	-280	-278	-288	-254
10	-299	-316	-298	-308	-303	-300	-311	-274
11	-284	-299	-283	-292	-287	-285	-295	-260
12	-341	-360	-340	-351	-345	-342	-355	-313
13	-362	-383	-361	-373	-367	-364	-377	-333
14	-372	-392	-371	-382	-377	-374	-387	-341
15	-379	-400	-378	-389	-384	-380	-394	-347
16	-383	-404	-382	-394	-388	-385	-399	-352
17	-370	-390	-369	-380	-375	-371	-385	-339
18	-366	-386	-365	-376	-370	-367	-381	-336
19	-360	-380	-359	-370	-364	-361	-375	-330
20	-369	-389	-368	-379	-374	-370	-384	-338
21	-378	-399	-377	-389	-383	-379	-393	-347
22	-374	-395	-373	-385	-379	-376	-390	-343
23	-369	-389	-368	-379	-373	-370	-384	-338
24	-371	-391	-370	-381	-376	-372	-386	-340

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της ομάδας Β.

Πίνακας 9.5: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας Β, (δοκίμια Β1, ..., Β8).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Β								
Χρόνος σε μήνες	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
1	-300	-270	-273	-278	-277	-267	-286	-269
2	-306	-275	-278	-284	-282	-272	-291	-274
3	-259	-232	-235	-240	-239	-230	-246	-232
4	-310	-279	-282	-288	-286	-276	-295	-278
5	-282	-253	-257	-261	-260	-251	-268	-253
6	-307	-276	-280	-285	-283	-273	-292	-276
7	-286	-257	-261	-265	-264	-255	-272	-257
8	-263	-236	-239	-243	-242	-234	-250	-236
9	-272	-244	-247	-252	-251	-242	-259	-244
10	-303	-272	-276	-281	-280	-270	-289	-272
11	-307	-276	-280	-285	-284	-273	-293	-276
12	-397	-357	-361	-368	-366	-353	-378	-356
13	-407	-365	-370	-377	-375	-361	-387	-365
14	-391	-351	-356	-362	-360	-347	-372	-350
15	-396	-356	-360	-367	-366	-352	-377	-355
16	-388	-348	-353	-360	-358	-345	-369	-348
17	-383	-344	-348	-355	-353	-340	-364	-343
18	-370	-333	-337	-343	-342	-329	-352	-332
19	-376	-338	-342	-349	-347	-334	-358	-337
20	-381	-342	-346	-353	-351	-338	-362	-341
21	-387	-347	-352	-358	-357	-344	-368	-347
22	-380	-341	-345	-352	-350	-338	-361	-341
23	-368	-330	-335	-341	-339	-327	-350	-330
24	-379	-340	-345	-351	-349	-337	-360	-340

Πίνακας 9.6: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας Β, (δοκίμια Β₉, ..., Β₁₆).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Β								
Χρόνος σε μήνες	B ₉	B ₁₀	B ₁₁	B ₁₂	B ₁₃	B ₁₄	B ₁₅	B ₁₆
1	-278	-294	-278	-286	-282	-280	-290	-256
2	-284	-300	-283	-292	-288	-285	-296	-261
3	-240	-253	-239	-247	-243	-241	-250	-220
4	-288	-304	-287	-296	-292	-289	-300	-264
5	-262	-276	-261	-269	-265	-263	-273	-240
6	-285	-301	-284	-293	-289	-286	-297	-262
7	-266	-280	-265	-273	-269	-267	-277	-244
8	-244	-257	-243	-251	-247	-245	-254	-224
9	-252	-266	-252	-259	-256	-253	-263	-231
10	-281	-297	-281	-290	-285	-283	-293	-258
11	-285	-301	-284	-293	-289	-287	-297	-262
12	-368	-389	-367	-379	-373	-370	-384	-338
13	-377	-398	-376	-388	-382	-379	-393	-346
14	-363	-383	-362	-373	-367	-364	-378	-333
15	-368	-388	-367	-378	-372	-369	-383	-337
16	-360	-380	-359	-370	-365	-362	-375	-330
17	-355	-375	-354	-365	-360	-357	-370	-326
18	-344	-363	-343	-354	-348	-345	-358	-315
19	-349	-368	-348	-359	-354	-351	-363	-320
20	-353	-373	-352	-363	-358	-355	-368	-324
21	-359	-379	-358	-369	-363	-360	-373	-329
22	-352	-372	-351	-362	-357	-354	-367	-323
23	-341	-360	-340	-351	-346	-343	-355	-313
24	-351	-371	-350	-361	-356	-353	-366	-322

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της υποομάδας Γ1 της ομάδας Γ.

Πίνακας 9.7: Δυναμικό Διάβρωσης της υποομάδας Γ1.

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Γ1								
Χρόνος σε μήνες	Γ1	Γ3	Γ5	Γ6	Γ9	Γ10	Γ13	Γ14
1	-264	-277	-274	-268	-264	-269	-274	-269
2	-222	-233	-231	-225	-222	-227	-231	-227
3	-200	-210	-209	-203	-201	-205	-209	-205
4	-220	-231	-229	-223	-220	-225	-229	-225
5	-269	-282	-280	-273	-269	-274	-280	-275
6	-299	-314	-311	-303	-299	-305	-311	-305
7	-304	-320	-317	-309	-305	-311	-317	-311
8	-308	-323	-321	-313	-308	-315	-321	-315
9	-317	-332	-330	-322	-317	-324	-330	-324
10	-321	-337	-334	-326	-321	-328	-334	-328
11	-375	-393	-390	-381	-375	-383	-390	-383
12	-435	-456	-453	-441	-435	-444	-453	-444
13	-420	-441	-438	-427	-421	-429	-437	-429
14	-432	-454	-450	-439	-433	-442	-450	-442
15	-443	-466	-462	-450	-444	-453	-462	-453
16	-437	-458	-455	-443	-437	-446	-455	-446
17	-448	-471	-467	-455	-449	-458	-467	-459
18	-454	-477	-473	-461	-454	-464	-473	-464
19	-446	-469	-465	-453	-447	-456	-465	-456
20	-441	-463	-459	-448	-442	-451	-459	-451
21	-444	-466	-462	-451	-445	-454	-462	-454
22	-448	-470	-466	-455	-448	-458	-466	-458
23	-443	-465	-462	-450	-444	-453	-462	-453
24	-441	-463	-459	-447	-441	-450	-459	-450

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της υποομάδας Γ2 της ομάδας Γ.

Πίνακας 9.8: Δυναμικό Διάβρωσης της υποομάδας Γ2.

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Γ2								
Χρόνος σε μήνες	Γ3	Γ4	Γ7	Γ8	Γ11	Γ12	Γ15	Γ16
1	-169	-178	-177	-172	-170	-173	-176	-173
2	-171	-180	-178	-174	-171	-175	-178	-175
3	-149	-156	-155	-151	-149	-152	-155	-152
4	-171	-180	-179	-174	-172	-175	-179	-175
5	-212	-223	-221	-215	-212	-217	-221	-217
6	-224	-235	-233	-227	-224	-229	-233	-229
7	-291	-305	-303	-295	-291	-297	-303	-297
8	-284	-298	-296	-288	-284	-290	-296	-290
9	-280	-294	-292	-285	-281	-287	-292	-287
10	-293	-307	-305	-297	-293	-299	-305	-299
11	-303	-318	-316	-308	-303	-310	-316	-310
12	-396	-415	-412	-402	-396	-404	-412	-404
13	-400	-420	-416	-406	-400	-409	-416	-409
14	-378	-397	-394	-384	-379	-386	-394	-387
15	-408	-429	-425	-415	-409	-417	-425	-418
16	-420	-441	-437	-426	-420	-429	-437	-429
17	-394	-414	-411	-400	-395	-403	-411	-403
18	-402	-423	-419	-409	-403	-411	-419	-412
19	-405	-425	-421	-411	-405	-414	-421	-414
20	-398	-417	-414	-404	-398	-406	-414	-407
21	-408	-429	-425	-415	-409	-417	-425	-417
22	-417	-438	-435	-424	-418	-426	-435	-427
23	-421	-442	-439	-428	-422	-431	-439	-431
24	-416	-437	-433	-423	-417	-425	-433	-425

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της υποομάδας Δ1 της ομάδας Δ.

Πίνακας 9.9: Δυναμικό Διάβρωσης της υποομάδας Δ1.

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Δ1								
Χρόνος σε μήνες	Δ1	Δ2	Δ5	Δ6	Δ9	Δ10	Δ13	Δ14
1	-159	-167	-166	-161	-159	-162	-166	-163
2	-209	-219	-217	-212	-209	-213	-217	-213
3	-198	-208	-206	-201	-198	-202	-206	-202
4	-226	-237	-235	-229	-226	-231	-235	-231
5	-254	-267	-265	-258	-255	-260	-265	-260
6	-272	-285	-283	-276	-272	-278	-283	-278
7	-280	-294	-292	-284	-280	-286	-292	-286
8	-287	-301	-299	-291	-287	-293	-299	-293
9	-293	-307	-305	-297	-293	-299	-305	-299
10	-322	-338	-335	-327	-322	-329	-335	-329
11	-336	-352	-350	-341	-336	-343	-350	-343
12	-417	-438	-434	-424	-418	-426	-434	-427
13	-414	-435	-431	-420	-414	-423	-431	-423
14	-410	-430	-427	-416	-410	-419	-427	-419
15	-415	-436	-433	-422	-416	-425	-433	-425
16	-407	-428	-424	-414	-408	-416	-424	-417
17	-417	-437	-434	-423	-417	-426	-434	-426
18	-411	-432	-429	-418	-412	-421	-428	-421
19	-419	-440	-437	-426	-420	-429	-437	-429
20	-413	-433	-430	-419	-413	-422	-430	-422
21	-443	-466	-462	-450	-444	-453	-462	-453
22	-433	-455	-451	-440	-434	-443	-451	-443
23	-430	-451	-448	-437	-430	-439	-448	-439
24	-428	-450	-446	-435	-429	-438	-446	-438

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της υποομάδας Δ2 της ομάδας Δ.

Πίνακας 9.10: Δυναμικό Διάβρωσης της υποομάδας Δ2.

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Δ2								
Χρόνος σε μήνες	Δ3	Δ4	Δ7	Δ8	Δ11	Δ12	Δ15	Δ16
1	-188	-197	-195	-190	-188	-192	-195	-192
2	-174	-183	-181	-177	-174	-178	-181	-178
3	-145	-152	-151	-147	-145	-148	-151	-148
4	-165	-174	-172	-168	-165	-169	-172	-169
5	-166	-175	-173	-169	-167	-170	-173	-170
6	-192	-202	-200	-195	-193	-197	-200	-197
7	-274	-287	-285	-278	-274	-280	-285	-280
8	-281	-295	-292	-285	-281	-287	-292	-287
9	-274	-288	-285	-278	-274	-280	-285	-280
10	-269	-282	-280	-273	-269	-275	-280	-275
11	-273	-286	-284	-277	-273	-279	-284	-279
12	-375	-394	-391	-381	-376	-384	-391	-384
13	-380	-399	-395	-386	-380	-388	-395	-388
14	-381	-400	-397	-387	-382	-390	-397	-390
15	-390	-410	-406	-396	-391	-399	-406	-399
16	-394	-414	-410	-400	-394	-403	-410	-403
17	-292	-307	-305	-297	-293	-299	-304	-299
18	-382	-401	-397	-388	-382	-390	-397	-390
19	-375	-393	-390	-381	-375	-383	-390	-383
20	-388	-407	-404	-394	-388	-397	-404	-397
21	-374	-393	-390	-380	-375	-382	-390	-383
22	-370	-389	-386	-376	-371	-379	-386	-379
23	-373	-392	-388	-379	-373	-381	-388	-381
24	-367	-386	-383	-373	-368	-376	-383	-376

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της ομάδας E.

Πίνακας 9.11: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας E, (δοκίμια E1, ..., E8).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ E								
Χρόνος σε μήνες	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
1	-401	-360	-365	-372	-370	-357	-382	-360
2	-384	-412	-389	-398	-389	-425	-393	-408
3	-342	-338	-367	-367	-349	-350	-324	-344
4	-361	-372	-376	-386	-346	-393	-379	-344
5	-319	-322	-319	-356	-314	-319	-322	-277
6	-381	-400	-397	-387	-381	-389	-397	-389
7	-359	-377	-374	-365	-360	-367	-374	-367
8	-375	-393	-390	-380	-375	-383	-390	-383
9	-363	-381	-378	-368	-363	-371	-378	-371
10	-336	-353	-350	-341	-337	-344	-350	-344
11	-380	-399	-396	-386	-380	-388	-396	-389
12	-415	-436	-433	-422	-416	-424	-432	-425
13	-447	-470	-466	-454	-448	-457	-466	-457
14	-451	-474	-470	-458	-452	-461	-470	-462
15	-459	-482	-478	-466	-460	-470	-478	-470
16	-467	-490	-486	-474	-468	-477	-486	-478
17	-460	-483	-479	-467	-461	-470	-479	-471
18	-442	-464	-460	-448	-442	-451	-460	-451
19	-447	-469	-465	-454	-447	-457	-465	-457
20	-454	-477	-473	-461	-455	-464	-473	-465
21	-460	-483	-479	-467	-461	-470	-479	-470
22	-469	-492	-489	-476	-470	-479	-488	-480
23	-461	-485	-481	-469	-462	-472	-481	-472
24	-456	-479	-475	-463	-457	-467	-475	-467

Πίνακας 9.12: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας E, (δοκίμια E9, ..., E16).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ E								
Χρόνος σε μήνες	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16
1	-372	-393	-371	-383	-377	-374	-388	-341
2	-368	-392	-381	-326	-425	-396	-396	-397
3	-324	-323	-352	-335	-331	-343	-349	-375
4	-355	-400	-369	-363	-362	-404	-394	-340
5	-270	-322	-298	-321	-311	-324	-322	-318
6	-385	-378	-388	-383	-392	-379	-393	-393
7	-363	-357	-366	-361	-370	-357	-371	-371
8	-379	-372	-382	-376	-386	-373	-387	-387
9	-367	-361	-370	-365	-374	-361	-374	-375
10	-340	-334	-343	-338	-346	-334	-347	-347
11	-384	-378	-387	-382	-392	-378	-392	-393
12	-420	-413	-423	-417	-428	-413	-429	-429
13	-452	-445	-456	-449	-461	-445	-462	-462
14	-456	-449	-460	-453	-465	-449	-466	-466
15	-464	-457	-468	-461	-473	-457	-474	-475
16	-472	-464	-476	-469	-481	-465	-482	-483
17	-465	-457	-469	-462	-474	-458	-475	-476
18	-446	-439	-450	-444	-455	-439	-456	-456
19	-452	-444	-456	-449	-461	-444	-461	-462
20	-459	-452	-463	-456	-468	-452	-469	-470
21	-465	-457	-469	-462	-474	-458	-475	-475
22	-474	-466	-478	-471	-483	-467	-484	-485
23	-467	-459	-470	-464	-476	-459	-476	-477
24	-461	-454	-465	-459	-470	-454	-471	-472

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μέσοι όροι των μετρήσεων του δυναμικού διάβρωσης σε mV όλων των ομάδων.

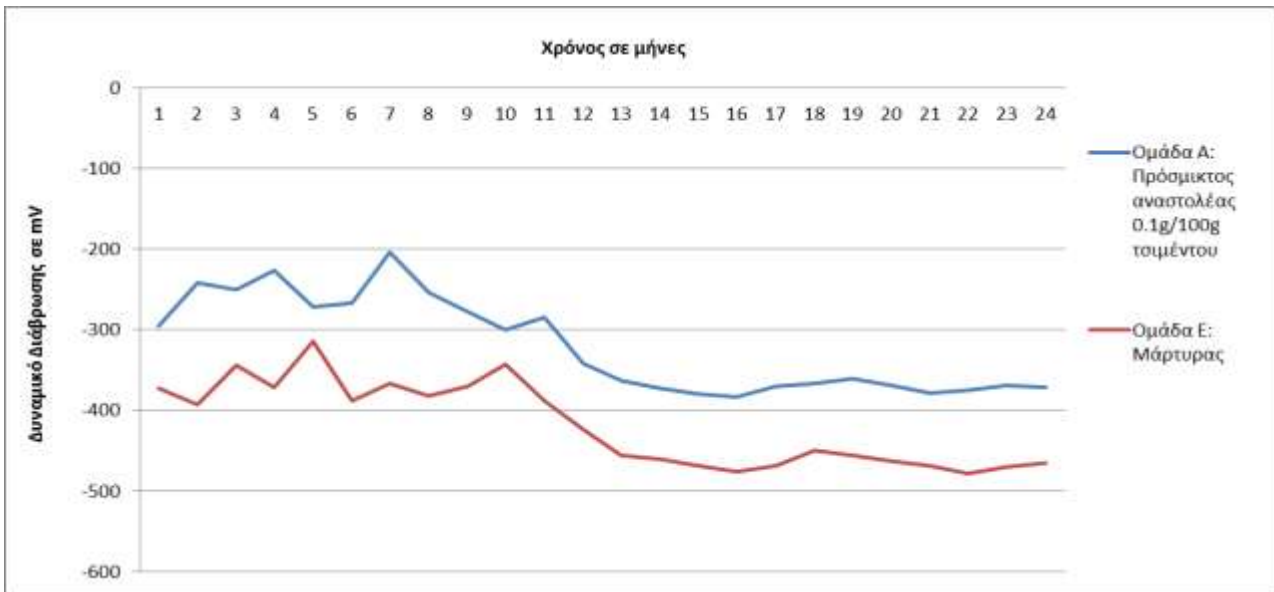
Πίνακας 9.13: Μέσοι όροι δυναμικού διάβρωσης σε mV των ομάδων A, B και E.

Μέσοι Όροι Μέτρησης Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό)			
	Ομάδα A:	Ομάδα B:	Ομάδα E:
Χρόνος σε μήνες	Πρόσμικτος αναστολέας 0,1g/100g τσιμέντου	Πρόσμικτος αναστολέας 0,4g/100g τσιμέντου	Μάρτυρας
1	-295	-279	-373
2	-242	-284	-392
3	-250	-240	-344
4	-227	-289	-371
5	-272	-262	-315
6	-267	-286	-388
7	-204	-266	-366
8	-254	-244	-382
9	-277	-253	-370
10	-300	-282	-343
11	-284	-286	-387
12	-341	-369	-423
13	-363	-378	-456
14	-372	-363	-460
15	-379	-368	-468
16	-384	-361	-476
17	-370	-356	-469
18	-366	-344	-450
19	-360	-350	-456
20	-369	-354	-463
21	-378	-359	-469
22	-375	-353	-478
23	-369	-342	-471
24	-371	-352	-465

Πίνακας 9.14: Μέσοι όροι δυναμικού διάβρωσης σε mV των ομάδων Γ και Δ.

Μέσοι Όροι Μέτρησης Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό)				
Χρόνος σε μήνες	Ομάδα Γ		Ομάδα Δ	
	Ομάδα Γ1: Χωρίς αναστολέα	Ομάδα Γ2: Πρόσμικτος αναστολέας 0,1g/100g τσιμέντου	Ομάδα Δ1: Χωρίς αναστολέα	Ομάδα Δ2: Πρόσμικτος αναστολέας 0,4g/100g τσιμέντου
1	-270	-174	-163	-192
2	-227	-175	-214	-178
3	-205	-153	-203	-148
4	-225	-176	-231	-169
5	-275	-217	-261	-171
6	-306	-229	-278	-197
7	-312	-298	-287	-280
8	-315	-291	-294	-288
9	-324	-287	-300	-281
10	-328	-300	-330	-275
11	-384	-310	-344	-279
12	-445	-405	-427	-384
13	-430	-409	-424	-389
14	-443	-387	-420	-390
15	-454	-418	-425	-400
16	-447	-430	-417	-403
17	-459	-404	-427	-299
18	-465	-412	-421	-391
19	-457	-414	-430	-384
20	-452	-407	-423	-397
21	-455	-418	-454	-383
22	-458	-427	-444	-379
23	-454	-432	-440	-382
24	-451	-426	-439	-376

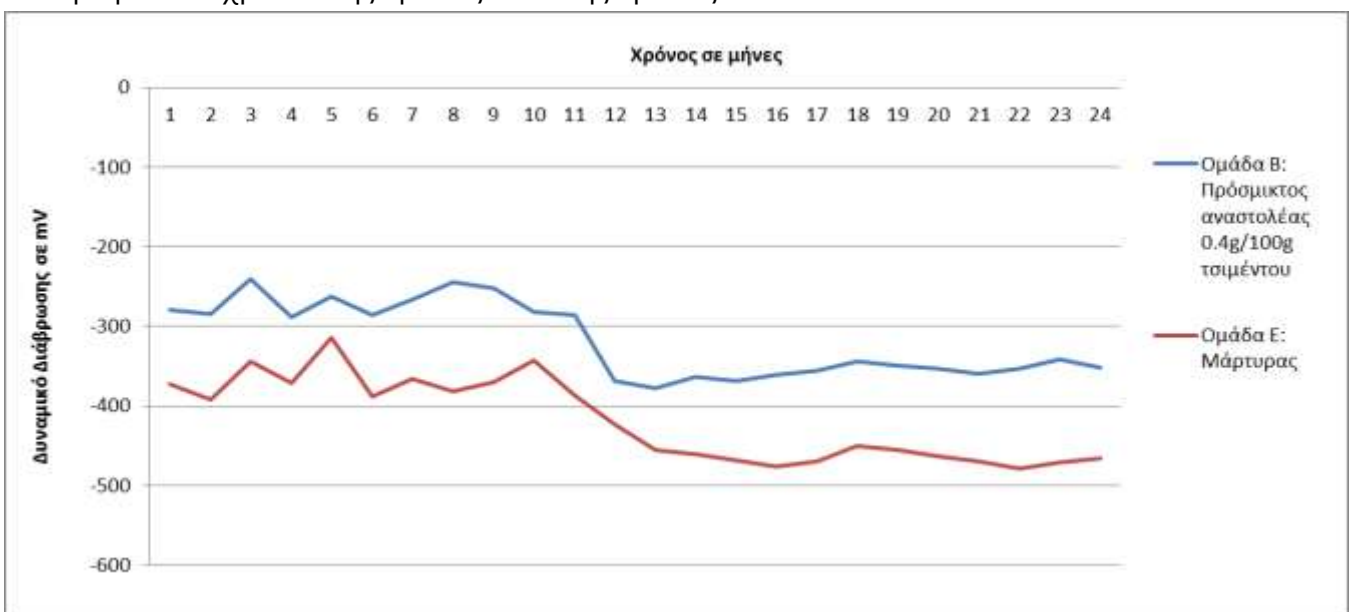
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται το Δυναμικό Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας A και της ομάδας E.



Διάγραμμα 9.1: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας A και της ομάδας E.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ομάδα A που περιέχει τον αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα E που δεν περιέχει αναστολέα. Παρατηρείται ότι ο αναστολέας προστατεύει μέχρι έναν βαθμό τον οπλισμό που βρίσκεται εγκιβωτισμένος σε κονίαμα.

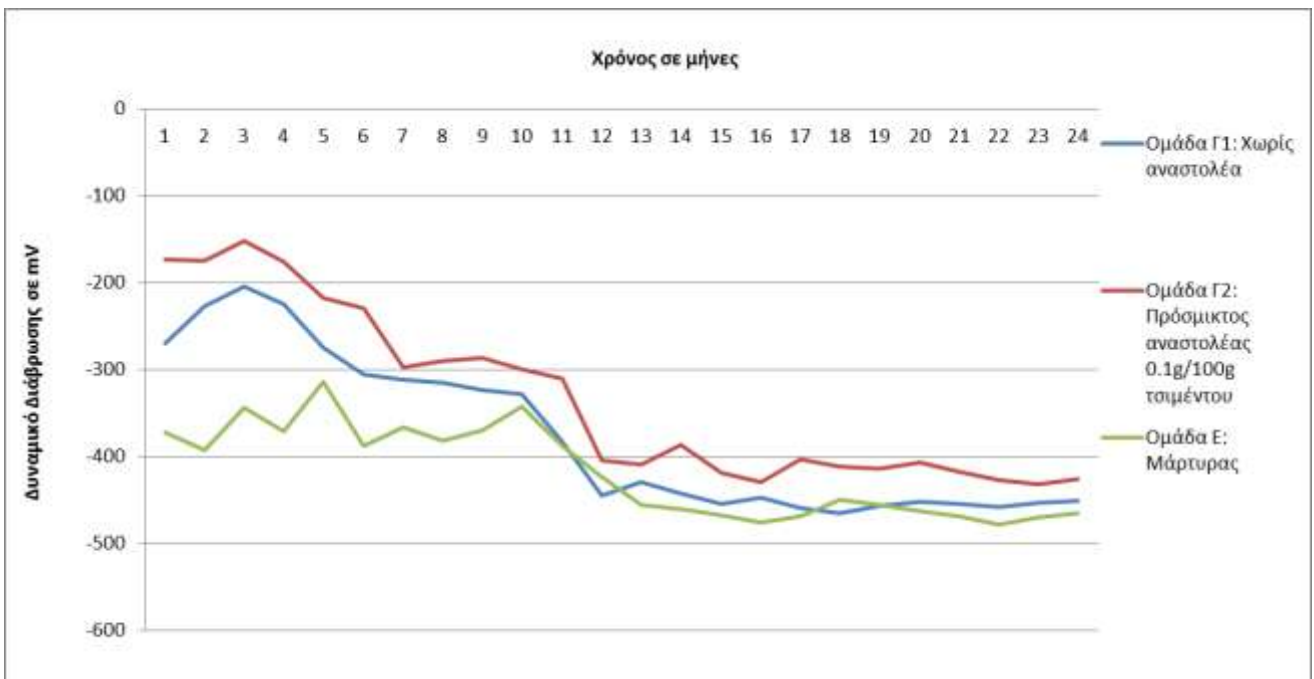
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται το Δυναμικό Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας B και της ομάδας E.



Διάγραμμα 9.2: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Β και της ομάδας Ε.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ομάδα Β που περιέχει τον αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,4g/100g τσιμέντου έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Ε που δεν περιέχει αναστολέα. Παρατηρείται ότι ο αναστολέας προστατεύει μέχρι έναν βαθμό τον οπλισμό που βρίσκεται εγκιβωτισμένους σε κονίαμα.

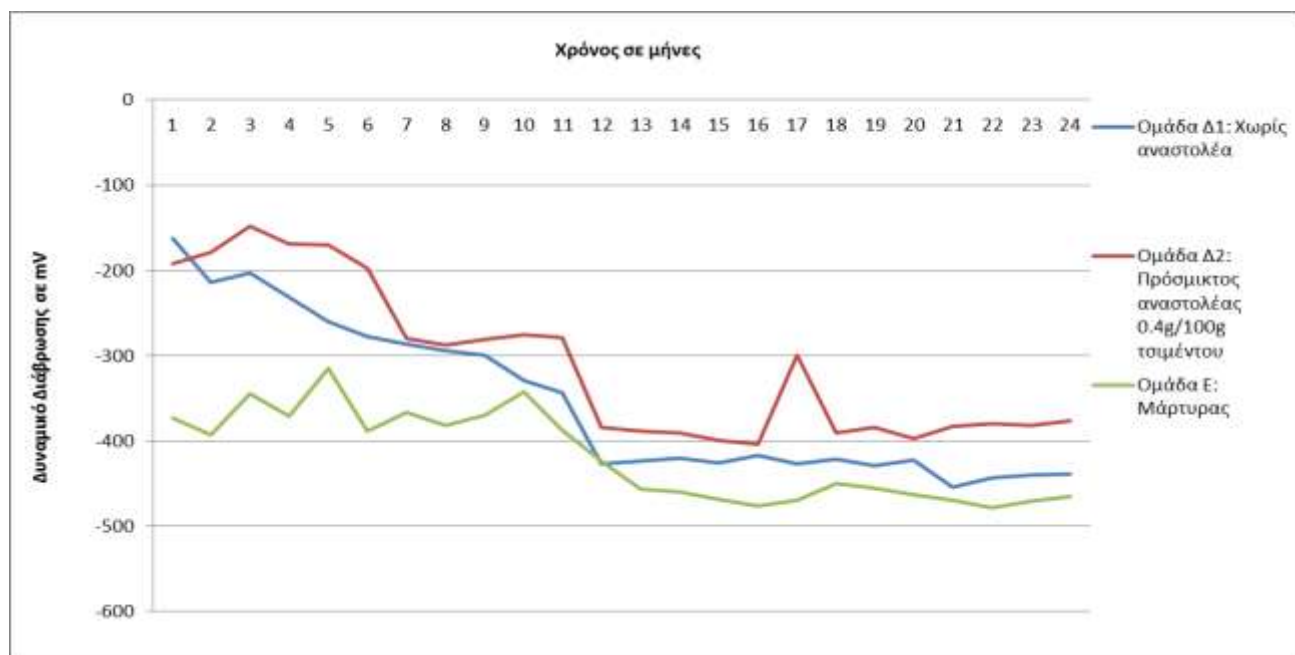
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται το Δυναμικό Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Γ₁, Γ₂ και της ομάδας Ε.



Διάγραμμα 9.3: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Γ₁, Γ₂ και της ομάδας Ε.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ομάδα Γ, η οποία αποτελείται από δοκίμια όπου το μισό δοκίμιο δεν έχει αναστολέα (Γ₁) και το άλλο μισό περιέχει αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου (Γ₂) έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Ε που δεν περιέχει αναστολέα. Το τμήμα της ομάδας των δοκιμών που έχουν αναστολέα (Γ₂) συμπεριφέρεται καλύτερα από το τμήμα της ομάδας των δοκιμών που δεν έχουν αναστολέα διάβρωσης (Γ₁). Το τμήμα της ομάδας των δοκιμών που δεν έχουν αναστολέα διάβρωσης (Γ₁) αλλά αποτελούν τμήμα δοκιμίου όπου έχει αναστολέα διάβρωσης έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα των δοκιμών που δεν έχουν καθόλου αναστολέα διάβρωσης (Ε) λόγω της διάχυσης του αναστολέα από το ένα τμήμα στο άλλο.

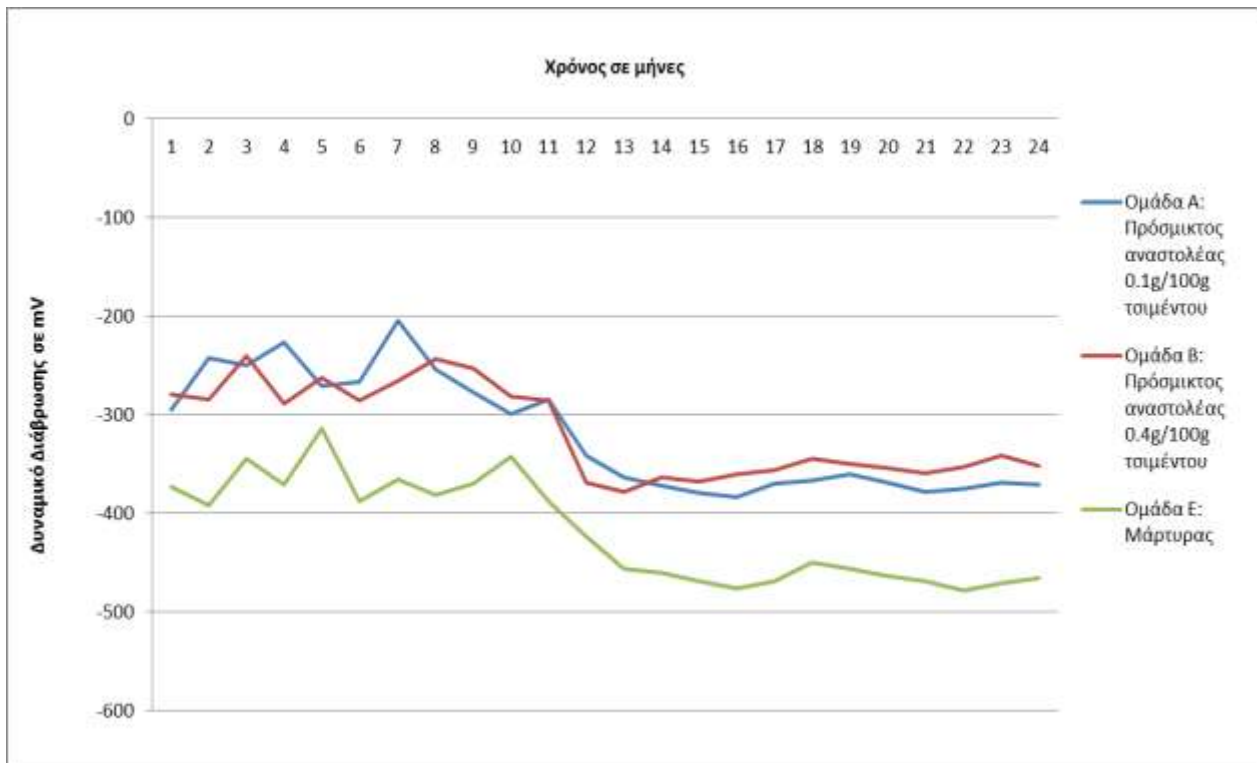
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται το Δυναμικό Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Δ1, Δ2 και της ομάδας Ε.



Διάγραμμα 9.4: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Δ1, Δ2 και της ομάδας Ε.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ομάδα Δ, η οποία αποτελείται από δοκίμια όπου το μισό δοκίμιο δεν έχει αναστολέα (Δ1) και το άλλο μισό περιέχει αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,4g/100g τσιμέντου (Δ2) έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Ε που δεν περιέχει αναστολέα. Το τμήμα της ομάδας των δοκιμίων που έχουν αναστολέα (Δ2) συμπεριφέρεται καλύτερα από το τμήμα της ομάδας των δοκιμίων που δεν έχουν αναστολέα διάβρωσης (Δ1) και το τμήμα της ομάδας των δοκιμίων που δεν έχουν αναστολέα διάβρωσης (Δ1) αλλά αποτελούν τμήμα δοκιμίου όπου έχει αναστολέα διάβρωσης έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα των δοκιμίων που δεν έχουν καθόλου αναστολέα διάβρωσης (Ε) λόγω της διάχυσης του αναστολέα από το ένα τμήμα στο άλλο.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται το Δυναμικό Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Α, Β και της ομάδας Ε.

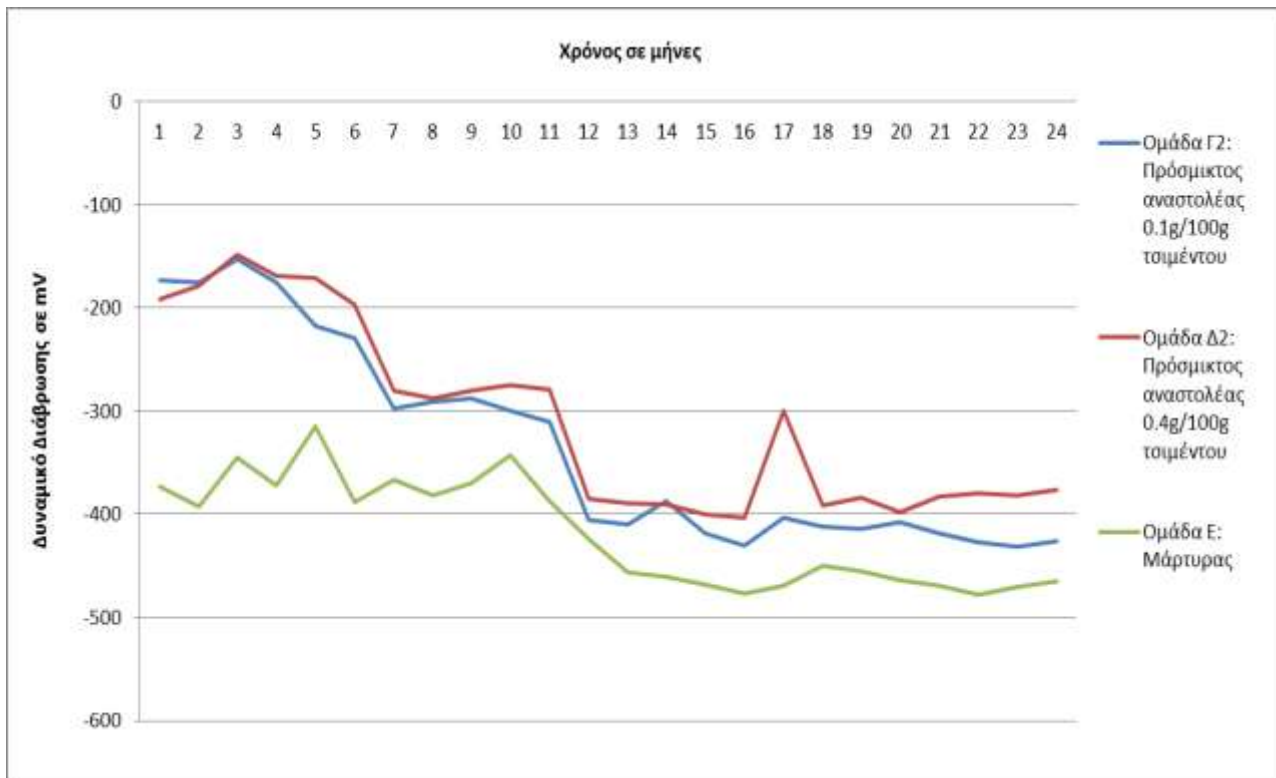


Διάγραμμα 9.5: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Α, Β και της ομάδας Ε.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ομάδα Β που περιέχει τον αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,4g/100g τσιμέντου έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Α που περιέχει τον αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου και αντίστοιχα η ομάδα Α έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Ε που δεν περιέχει αναστολέα.

Στους πρώτους μήνες παρατηρείται ότι η ομάδα Α έχει αρνητικότερες τιμές από την ομάδα Β, στην πάροδο όμως του χρόνου παρατηρείται ότι η ομάδα Β συμπεριφέρεται καλύτερα. Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι οι τιμές του δυναμικού διάβρωσης για την ομάδα Α και Β κυμαίνονται από -250 mV έως -350 mV περίπου, το οποίο σημαίνει ότι ο οπλισμός έχει την τάση να διαβρωθεί. Ενώ οι τιμές του δυναμικού διάβρωσης για την ομάδα Ε κυμαίνονται από -350 mV έως -500 mV, το οποίο σημαίνει ότι ο οπλισμός μας στην πάροδο του χρόνου διαβρώνεται. Ο αναστολέας μπορεί να προστατέψει μέχρι έναν βαθμό τον οπλισμό που βρίσκεται εγκιβωτισμένος σε κονίαμα.

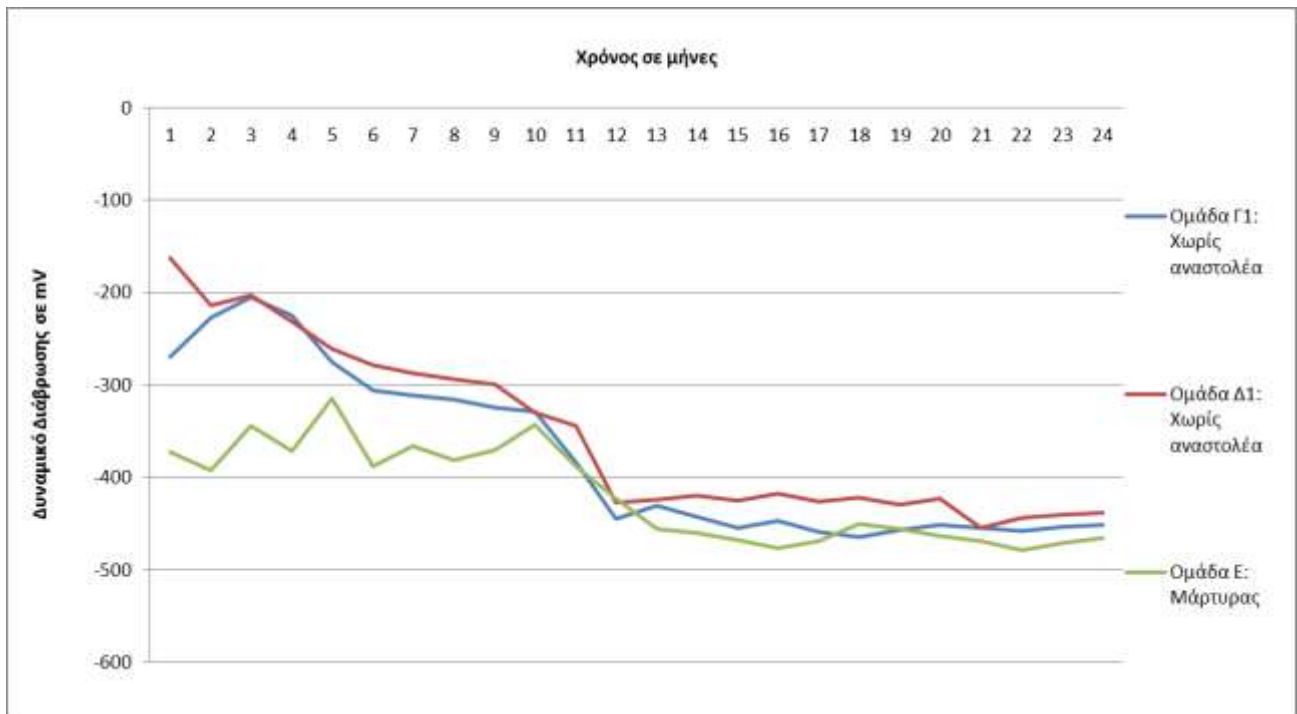
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται το Δυναμικό Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Γ₂, Δ₂ και της ομάδας Ε.



Διάγραμμα 9.6: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσε του χρόνου της ομάδας Γ2, Δ2 και της ομάδας Ε.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το τμήμα της ομάδας Δ2 που περιέχει τον αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,4g/100g τσιμέντου έχει καλύτερη συμπεριφορά από το τμήμα της ομάδας Γ2 που περιέχει τον αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου και αντίστοιχα η ομάδα Γ2 έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Ε που δεν περιέχει αναστολέα.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται το Δυναμικό Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσε του χρόνου της ομάδας Γ1, Δ1 και της ομάδας Ε.



Διάγραμμα 9.7: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου της ομάδας Γ1, Δ1 και της ομάδας Ε.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το τμήμα της ομάδας Δ1 έχει καλύτερη συμπεριφορά από το τμήμα της ομάδας Γ1 και το τμήμα της ομάδας Γ1 έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Ε. Καμία από τις παραπάνω ομάδες δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης αλλά το παραπάνω αποτέλεσμα οφείλεται στην διάχυση του αναστολέα διάβρωσης από το ένα τμήμα στο άλλο για τις ομάδες Γ και Δ όπου αποτελούν τμήμα δοκιμίου όπου έχει αναστολέα διάβρωσης και αντίστοιχα η ομάδα με το μεγαλύτερο ποσοστό αναστολέα διάβρωσης έχει και καλύτερη συμπεριφορά.

9.4.1.2 Δοκίμια με ψεκαζόμενο και πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης στα ασβεστολιθικά τσιμέντα – Δοκίμια πίνακα 9.2

Στην περίπτωση αυτή εξετάστηκαν 11 ομάδες: CEM I, LC1, LC2, CEM I + C.I.(additive), LC1 + C.I.(additive), LC2+ C.I.(additive), CEM I + C.I.(sprayed), LC1 + C.I.(sprayed), LC2+ C.I.(sprayed), SR και SR + C.I.(sprayed). Τα δοκίμια των ομάδων CEM I + C.I.(additive), LC1 + C.I.(additive), LC2+ C.I.(additive) περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο ενώ τα δοκίμια των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC1 + C.I.(sprayed), LC2+ C.I.(sprayed) και SR + C.I.(sprayed) περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως ψεκαζόμενο. Τα δοκίμια των ομάδων CEM I, LC1, LC2 και SR δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης και χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρο σύγκρισης με τα δοκίμια με τον αναστολέα διάβρωσης. Παρακάτω θα ακολουθήσουν οι μετρήσεις κάθε ομάδας ως προς το Δυναμικό Διάβρωσης στον οπλισμό.

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της ομάδας CEM₁.

Πίνακας 9.15: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας CEM I, (δοκίμια 1, ...,6).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ CEM I						
Χρόνος σε μήνες	1	2	3	4	5	6
1	-367	-360	-364	-351	-349	-357
2	-368	-361	-365	-351	-349	-357
3	-379	-371	-376	-362	-360	-368
4	-348	-341	-345	-332	-331	-338
5	-354	-347	-351	-338	-336	-343
6	-371	-364	-368	-354	-353	-360
7	-375	-368	-372	-358	-356	-364
8	-387	-379	-383	-369	-367	-375
9	-398	-390	-395	-380	-378	-387
10	-433	-424	-429	-413	-411	-420
11	-427	-419	-424	-407	-406	-415
12	-412	-404	-408	-393	-391	-400
13	-409	-401	-406	-390	-389	-397
14	-399	-391	-395	-380	-379	-387
15	-410	-401	-406	-391	-389	-398
16	-403	-394	-399	-384	-382	-391
17	-408	-400	-405	-389	-388	-396
18	-422	-413	-418	-403	-401	-410
19	-405	-396	-401	-386	-384	-393
20	-419	-411	-416	-400	-398	-407
21	-426	-417	-422	-406	-405	-413
22	-415	-407	-411	-396	-394	-403
23	-413	-405	-409	-394	-392	-401
24	-418	-409	-414	-398	-397	-405

Πίνακας 9.16: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας CEM I, (δοκίμια 7, ...,12).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ CEM I						
Χρόνος σε μήνες	7	8	9	10	11	12
1	-350	-349	-341	-360	-340	-367
2	-350	-350	-341	-360	-340	-367
3	-361	-360	-352	-371	-351	-378
4	-331	-331	-323	-341	-322	-347
5	-337	-337	-328	-347	-327	-353
6	-353	-353	-344	-364	-343	-370
7	-357	-357	-348	-368	-347	-374
8	-368	-368	-359	-379	-358	-386
9	-379	-379	-370	-390	-369	-397
10	-412	-412	-402	-424	-401	-432
11	-406	-406	-396	-418	-395	-426
12	-392	-392	-382	-403	-381	-411
13	-389	-389	-380	-401	-379	-408
14	-379	-379	-370	-390	-369	-398
15	-390	-390	-380	-401	-379	-409
16	-383	-383	-373	-394	-372	-402
17	-388	-388	-379	-400	-378	-407
18	-402	-401	-392	-413	-390	-421
19	-385	-385	-375	-396	-374	-404
20	-399	-399	-389	-410	-388	-418
21	-405	-405	-395	-417	-394	-425
22	-395	-395	-385	-406	-384	-414
23	-393	-393	-383	-404	-382	-412
24	-397	-397	-387	-409	-386	-417

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της ομάδας LC1.

Πίνακας 9.17: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC1, (δοκίμια 13, ...,18).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ LC 1						
Χρόνος σε μήνες	13	14	15	16	17	18
1	-411	-402	-407	-392	-390	-399
2	-431	-422	-427	-411	-409	-418
3	-449	-440	-445	-428	-426	-435
4	-471	-462	-467	-450	-448	-457
5	-483	-473	-478	-460	-458	-468
6	-514	-504	-510	-491	-489	-499
7	-554	-543	-549	-529	-526	-538
8	-579	-567	-574	-552	-550	-562
9	-582	-571	-577	-555	-553	-565
10	-590	-578	-585	-563	-560	-573
11	-577	-565	-572	-551	-548	-560
12	-559	-548	-554	-533	-531	-543
13	-552	-541	-548	-527	-525	-536
14	-459	-449	-455	-437	-435	-445
15	-484	-474	-480	-462	-460	-470
16	-474	-464	-470	-452	-450	-460
17	-488	-479	-484	-466	-464	-474
18	-468	-459	-464	-447	-445	-455
19	-509	-499	-505	-486	-484	-494
20	-499	-489	-495	-476	-474	-484
21	-509	-499	-505	-486	-483	-494
22	-505	-494	-500	-481	-479	-490
23	-515	-504	-510	-491	-489	-500
24	-502	-492	-498	-479	-477	-487

Πίνακας 9.18: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC1, (δοκίμια 19, ...,24).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ LC 1						
Χρόνος σε μήνες	19	20	21	22	23	24
1	-391	-391	-401	-402	-420	-399
2	-410	-410	-421	-422	-441	-419
3	-427	-427	-438	-439	-459	-436
4	-448	-448	-460	-462	-482	-458
5	-459	-459	-471	-472	-493	-469
6	-489	-489	-502	-504	-526	-500
7	-527	-527	-541	-543	-567	-538
8	-551	-551	-565	-567	-592	-563
9	-554	-554	-569	-570	-595	-566
10	-561	-561	-576	-578	-603	-573
11	-549	-549	-564	-565	-590	-561
12	-532	-532	-546	-547	-572	-543
13	-526	-525	-539	-541	-565	-537
14	-436	-436	-425	-449	-424	-487
15	-461	-460	-449	-474	-448	-514
16	-451	-451	-440	-464	-438	-503
17	-465	-465	-453	-478	-452	-519
18	-446	-445	-435	-459	-433	-497
19	-485	-485	-473	-499	-471	-541
20	-475	-474	-463	-489	-462	-530
21	-484	-484	-472	-498	-471	-541
22	-480	-480	-468	-494	-467	-536
23	-490	-490	-478	-504	-476	-547
24	-478	-478	-466	-492	-464	-533

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της ομάδας LC2.

Πίνακας 9.19: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC2, (δοκίμια 25, ...,30).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ LC 2						
Χρόνος σε μήνες	25	26	27	28	29	30
1	-415	-406	-411	-396	-394	-403
2	-459	-449	-455	-437	-435	-445
3	-474	-465	-470	-453	-450	-460
4	-500	-490	-496	-477	-475	-485
5	-482	-472	-478	-460	-458	-468
6	-477	-467	-472	-455	-453	-462
7	-490	-481	-486	-468	-466	-476
8	-470	-461	-466	-449	-447	-456
9	-462	-453	-458	-441	-439	-448
10	-473	-464	-469	-451	-449	-459
11	-494	-484	-490	-472	-470	-480
12	-446	-437	-442	-425	-424	-433
13	-439	-430	-435	-419	-417	-426
14	-429	-420	-425	-409	-407	-416
15	-434	-425	-430	-414	-412	-421
16	-428	-419	-424	-408	-406	-415
17	-431	-422	-427	-411	-409	-418
18	-435	-427	-432	-415	-413	-423
19	-426	-418	-423	-407	-405	-414
20	-495	-485	-490	-472	-470	-480
21	-458	-449	-454	-437	-435	-445
22	-514	-503	-509	-490	-488	-498
23	-497	-487	-493	-474	-472	-483
24	-502	-492	-498	-479	-477	-488

Πίνακας 9.20: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC2, (δοκίμια 31, ...,36).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ LC 2						
Χρόνος σε μήνες	31	32	33	34	35	36
1	-395	-395	-385	-406	-384	-420
2	-436	-436	-425	-449	-424	-487
3	-451	-451	-440	-465	-439	-499
4	-476	-475	-464	-490	-462	-507
5	-459	-458	-447	-472	-446	-489
6	-453	-453	-442	-467	-441	-483
7	-467	-466	-455	-480	-454	-497
8	-447	-447	-436	-461	-435	-477
9	-440	-440	-429	-453	-428	-468
10	-450	-450	-439	-463	-438	-480
11	-470	-470	-459	-484	-457	-501
12	-424	-424	-414	-437	-413	-452
13	-418	-418	-407	-430	-406	-445
14	-408	-408	-398	-420	-397	-435
15	-413	-413	-403	-425	-402	-440
16	-407	-407	-397	-419	-396	-434
17	-410	-410	-400	-422	-398	-436
18	-414	-414	-404	-426	-403	-441
19	-405	-405	-395	-417	-394	-432
20	-471	-470	-459	-484	-457	-501
21	-436	-436	-425	-449	-424	-464
22	-489	-488	-476	-503	-475	-521
23	-473	-473	-461	-487	-460	-504
24	-478	-478	-466	-492	-465	-509

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της ομάδας CEM I + C.I.(additive).

Πίνακας 9.21: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας CEM I + C.I.(additive), (δοκίμια 37, ...,42).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - Ομάδα CEM I + C.I.(additive)						
Χρόνος σε μήνες	37	38	39	40	41	42
1	-411	-402	-407	-392	-390	-399
2	-393	-385	-390	-375	-373	-382
3	-385	-377	-382	-368	-366	-374
4	-415	-406	-411	-396	-394	-403
5	-394	-386	-391	-376	-375	-383
6	-430	-422	-427	-411	-409	-418
7	-421	-413	-418	-402	-400	-409
8	-418	-410	-415	-399	-397	-406
9	-423	-414	-419	-403	-401	-410
10	-446	-437	-442	-425	-423	-432
11	-453	-444	-449	-432	-430	-440
12	-428	-419	-424	-408	-406	-415
13	-404	-396	-400	-385	-384	-392
14	-407	-399	-404	-389	-387	-395
15	-384	-376	-381	-366	-365	-372
16	-387	-379	-384	-369	-368	-376
17	-385	-377	-381	-367	-365	-373
18	-388	-380	-385	-370	-368	-376
19	-373	-365	-370	-356	-354	-362
20	-383	-375	-379	-365	-363	-371
21	-406	-397	-402	-387	-385	-394
22	-379	-372	-376	-362	-360	-368
23	-397	-389	-393	-378	-377	-385
24	-393	-385	-389	-375	-373	-381

Πίνακας 9.22: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας CEM I + C.I.(additive), (δοκίμια 43, ...,48).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - Ομάδα CEM I + C.I.(additive)						
Χρόνος σε μήνες	43	44	45	46	47	48
1	-391	-391	-381	-402	-380	-418
2	-374	-374	-365	-385	-364	-400
3	-367	-366	-357	-377	-356	-392
4	-395	-395	-385	-406	-384	-422
5	-375	-375	-366	-386	-365	-401
6	-410	-409	-399	-422	-398	-438
7	-401	-401	-391	-413	-390	-428
8	-398	-398	-388	-410	-387	-426
9	-402	-402	-392	-414	-391	-430
10	-424	-424	-413	-436	-412	-453
11	-431	-431	-420	-444	-419	-461
12	-407	-407	-397	-419	-396	-435
13	-384	-384	-375	-396	-374	-411
14	-388	-388	-378	-399	-377	-414
15	-365	-365	-356	-376	-355	-390
16	-368	-368	-359	-379	-358	-394
17	-366	-366	-357	-377	-356	-391
18	-369	-369	-360	-380	-359	-394
19	-355	-355	-346	-365	-345	-379
20	-364	-364	-355	-375	-354	-389
21	-386	-386	-376	-397	-375	-413
22	-361	-361	-352	-372	-351	-386
23	-377	-377	-368	-388	-367	-403
24	-374	-374	-364	-385	-363	-399

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της ομάδας LC 1 + C.I.(additive).

Πίνακας 9.23: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 1 + C.I.(additive), (δοκίμια 49, ...,54).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - Ομάδα LC 1 + C.I.(additive)						
Χρόνος σε μήνες	49	50	51	52	53	54
1	-286	-280	-283	-273	-272	-277
2	-415	-406	-411	-396	-394	-403
3	-471	-461	-467	-449	-447	-457
4	-566	-554	-561	-540	-537	-549
5	-580	-568	-575	-553	-551	-563
6	-577	-565	-572	-550	-548	-560
7	-574	-562	-569	-548	-545	-557
8	-566	-555	-561	-540	-538	-549
9	-554	-542	-549	-528	-526	-537
10	-545	-534	-541	-520	-518	-529
11	-570	-558	-565	-543	-541	-553
12	-533	-522	-528	-508	-506	-517
13	-541	-530	-536	-516	-513	-525
14	-525	-514	-520	-501	-498	-509
15	-543	-532	-539	-518	-516	-527
16	-474	-464	-490	-472	-470	-480
17	-503	-493	-520	-500	-498	-509
18	-479	-469	-495	-476	-474	-484
19	-482	-472	-498	-479	-477	-488
20	-492	-482	-509	-489	-487	-498
21	-495	-484	-511	-492	-490	-500
22	-503	-492	-519	-500	-498	-509
23	-488	-478	-504	-485	-483	-494
24	-482	-472	-498	-479	-477	-487

Πίνακας 9.24: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 1 + C.I.(additive), (δοκίμια 55, ...,60).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - Ομάδα LC 1 + C.I.(additive)						
Χρόνος σε μήνες	55	56	57	58	59	60
1	-272	-272	-265	-280	-264	-283
2	-395	-395	-385	-406	-384	-411
3	-448	-448	-437	-461	-435	-467
4	-538	-538	-525	-554	-523	-561
5	-552	-552	-538	-568	-537	-575
6	-549	-549	-535	-565	-534	-572
7	-546	-546	-533	-562	-531	-569
8	-539	-538	-525	-554	-524	-561
9	-527	-527	-514	-542	-512	-549
10	-519	-519	-506	-534	-504	-541
11	-542	-542	-529	-558	-527	-565
12	-507	-506	-494	-521	-493	-528
13	-514	-514	-502	-529	-500	-536
14	-499	-499	-513	-514	-537	-510
15	-517	-517	-531	-532	-556	-528
16	-470	-470	-459	-484	-457	-453
17	-499	-499	-487	-514	-485	-481
18	-475	-475	-463	-489	-462	-457
19	-478	-478	-466	-492	-465	-461
20	-488	-488	-476	-502	-475	-470
21	-491	-490	-478	-505	-477	-472
22	-499	-498	-486	-513	-485	-480
23	-484	-484	-472	-498	-471	-466
24	-478	-478	-466	-492	-465	-460

Παράτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της ομάδας LC 2 + C.I.(additive).

Πίνακας 9.25: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 2 + C.I.(additive), (δοκίμια 61, ...,66).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - Ομάδα LC 2 + C.I.(additive)						
Χρόνος σε μήνες	61	62	63	64	65	66
1	-337	-329	-334	-331	-330	-337
2	-419	-409	-415	-412	-410	-419
3	-457	-446	-453	-449	-447	-457
4	-458	-447	-454	-450	-448	-458
5	-468	-457	-464	-460	-457	-467
6	-463	-452	-459	-455	-453	-463
7	-493	-481	-489	-484	-482	-493
8	-505	-493	-501	-496	-494	-505
9	-495	-483	-490	-486	-484	-494
10	-505	-493	-500	-496	-494	-504
11	-529	-517	-525	-520	-518	-529
12	-450	-440	-446	-442	-440	-450
13	-485	-473	-480	-476	-474	-484
14	-467	-456	-463	-459	-457	-467
15	-462	-451	-458	-454	-452	-462
16	-455	-444	-451	-447	-445	-455
17	-485	-474	-481	-477	-475	-485
18	-501	-489	-496	-492	-489	-500
19	-500	-488	-495	-491	-489	-499
20	-485	-474	-481	-477	-475	-485
21	-484	-472	-479	-475	-473	-483
22	-489	-477	-484	-480	-478	-488
23	-482	-470	-478	-473	-471	-481
24	-491	-480	-487	-483	-480	-491

Πίνακας 9.26: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 2 + C.I.(additive), (δοκίμια 67, ...,72).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - Ομάδα LC 2 + C.I.(additive)						
Χρόνος σε μήνες	67	68	69	70	71	72
1	-330	-330	-322	-330	-321	-326
2	-411	-410	-400	-410	-399	-405
3	-448	-448	-437	-447	-435	-442
4	-449	-449	-438	-449	-437	-443
5	-458	-458	-447	-458	-446	-452
6	-453	-453	-442	-453	-441	-447
7	-483	-483	-471	-483	-470	-476
8	-495	-495	-483	-494	-481	-488
9	-485	-485	-473	-484	-471	-478
10	-495	-494	-482	-494	-481	-488
11	-519	-518	-506	-518	-504	-512
12	-441	-441	-430	-441	-429	-435
13	-475	-475	-463	-474	-462	-468
14	-458	-458	-446	-457	-445	-451
15	-453	-453	-441	-452	-440	-446
16	-446	-446	-435	-446	-434	-440
17	-475	-475	-464	-475	-462	-469
18	-490	-490	-478	-490	-477	-484
19	-490	-489	-477	-489	-476	-483
20	-476	-475	-464	-475	-462	-469
21	-474	-474	-462	-473	-461	-467
22	-479	-479	-467	-478	-466	-472
23	-472	-472	-460	-472	-459	-466
24	-481	-481	-469	-481	-468	-475

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της ομάδας CEM I + C.I.(sprayed).

Πίνακας 9.27: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας CEM I + C.I.(sprayed), (δοκίμια 73, ...,78).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - Ομάδα CEM I + C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	73	74	75	76	77	78
1	-595	-602	-782	-767	-756	-771
2	-589	-597	-775	-760	-749	-764
3	-619	-627	-814	-798	-787	-803
4	-579	-587	-762	-747	-736	-751
5	-586	-594	-771	-756	-745	-760
6	-544	-551	-715	-702	-692	-706
7	-493	-499	-649	-636	-627	-640
8	-519	-525	-682	-669	-659	-673
9	-533	-540	-701	-687	-678	-691
10	-523	-530	-688	-675	-665	-679
11	-522	-528	-686	-673	-663	-676
12	-507	-513	-666	-653	-644	-657
13	-544	-551	-715	-701	-691	-705
14	-475	-481	-624	-612	-604	-616
15	-481	-487	-632	-620	-611	-624
16	-520	-527	-684	-671	-661	-675
17	-549	-556	-722	-708	-698	-712
18	-489	-495	-643	-630	-621	-634
19	-548	-555	-721	-707	-697	-711
20	-477	-483	-627	-615	-607	-619
21	-443	-449	-583	-572	-564	-575
22	-536	-543	-704	-691	-681	-695
23	-525	-531	-690	-677	-667	-680
24	-549	-556	-722	-708	-698	-712

Πίνακας 9.28: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας CEM I + C.I.(sprayed), (δοκίμια 79, ...,84).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - Ομάδα CEM I + C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	79	80	81	82	83	84
1	-648	-716	-742	-710	-742	-725
2	-643	-709	-736	-703	-736	-719
3	-675	-745	-773	-739	-773	-755
4	-632	-697	-723	-691	-723	-706
5	-639	-705	-732	-700	-732	-715
6	-593	-655	-679	-649	-679	-663
7	-538	-594	-616	-589	-616	-601
8	-566	-624	-648	-619	-647	-632
9	-581	-642	-666	-636	-665	-650
10	-571	-630	-653	-625	-653	-638
11	-569	-628	-651	-622	-651	-636
12	-552	-610	-633	-605	-632	-618
13	-593	-655	-679	-649	-679	-663
14	-518	-571	-593	-567	-593	-579
15	-524	-579	-601	-574	-600	-586
16	-567	-626	-649	-621	-649	-634
17	-599	-661	-686	-656	-686	-670
18	-533	-588	-610	-583	-610	-596
19	-598	-660	-684	-654	-684	-668
20	-520	-574	-596	-569	-596	-582
21	-483	-533	-554	-529	-553	-540
22	-584	-645	-669	-639	-669	-653
23	-572	-631	-655	-626	-655	-640
24	-599	-661	-685	-655	-685	-669

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της ομάδας LC 1 + C.I.(sprayed).

Πίνακας 9.29: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 1 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 85, ...,90).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - Ομάδα LC 1 + C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	85	86	87	88	89	90
1	-573	-522	-524	-541	-492	-491
2	-628	-572	-574	-593	-540	-538
3	-719	-656	-658	-680	-618	-616
4	-679	-619	-621	-641	-583	-581
5	-729	-664	-667	-689	-626	-624
6	-743	-677	-680	-702	-638	-636
7	-627	-572	-574	-593	-539	-537
8	-674	-614	-617	-637	-579	-577
9	-606	-553	-555	-573	-521	-519
10	-687	-626	-629	-649	-590	-588
11	-730	-665	-668	-690	-627	-625
12	-675	-615	-618	-638	-580	-578
13	-777	-708	-711	-734	-667	-665
14	-736	-671	-674	-696	-633	-631
15	-728	-663	-666	-687	-625	-623
16	-698	-636	-638	-659	-600	-598
17	-678	-618	-620	-641	-583	-581
18	-669	-610	-612	-632	-575	-573
19	-653	-595	-597	-617	-561	-559
20	-630	-575	-577	-596	-542	-540
21	-619	-564	-567	-585	-532	-530
22	-514	-468	-470	-485	-441	-440
23	-572	-522	-524	-541	-492	-490
24	-518	-473	-474	-490	-446	-444

Πίνακας 9.30: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 1 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 91, ...,96).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - Ομάδα LC 1 + C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	91	92	93	94	95	96
1	-538	-485	-519	-534	-532	-560
2	-589	-531	-569	-585	-583	-613
3	-675	-609	-651	-670	-668	-703
4	-637	-574	-615	-632	-631	-663
5	-684	-617	-660	-679	-677	-712
6	-697	-629	-673	-692	-690	-726
7	-589	-531	-568	-584	-583	-613
8	-633	-570	-610	-628	-626	-658
9	-569	-513	-549	-565	-563	-592
10	-645	-581	-622	-640	-638	-671
11	-685	-618	-661	-680	-678	-713
12	-634	-571	-611	-629	-627	-660
13	-729	-657	-703	-724	-722	-759
14	-691	-623	-667	-686	-684	-719
15	-683	-616	-659	-678	-676	-711
16	-655	-591	-632	-650	-648	-682
17	-636	-574	-614	-632	-630	-662
18	-628	-566	-606	-623	-622	-654
19	-613	-552	-591	-608	-606	-638
20	-592	-534	-571	-587	-586	-616
21	-581	-524	-561	-577	-575	-605
22	-482	-435	-465	-478	-477	-502
23	-537	-484	-518	-533	-532	-559
24	-487	-439	-470	-483	-482	-507

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της ομάδας LC 2+ C.I.(sprayed).

Πίνακας 9.31: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 2 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 97, ...,102).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό)- Ομάδα LC 2+ C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	97	98	99	100	101	102
1	-462	-284	-556	-466	-536	-483
2	-420	-258	-505	-423	-487	-439
3	-529	-325	-637	-534	-615	-554
4	-519	-319	-625	-523	-602	-543
5	-554	-341	-667	-559	-644	-580
6	-553	-340	-665	-558	-642	-579
7	-638	-392	-769	-644	-741	-668
8	-649	-399	-782	-655	-754	-680
9	-706	-434	-849	-712	-819	-739
10	-679	-417	-817	-685	-788	-711
11	-672	-413	-809	-678	-780	-704
12	-666	-409	-801	-672	-773	-697
13	-767	-471	-923	-774	-890	-803
14	-696	-428	-838	-702	-808	-728
15	-682	-419	-820	-687	-791	-714
16	-660	-406	-795	-666	-767	-691
17	-633	-389	-762	-638	-734	-662
18	-631	-387	-759	-636	-732	-660
19	-619	-380	-745	-624	-718	-648
20	-603	-371	-726	-609	-701	-632
21	-619	-380	-745	-624	-719	-648
22	-676	-416	-814	-682	-785	-708
23	-659	-405	-793	-665	-765	-690
24	-547	-336	-659	-552	-635	-573

Πίνακας 9.32: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας LC 2 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 103, ...,108).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό)- Ομάδα LC 2+ C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	103	104	105	106	107	108
1	-448	-438	-453	-511	-445	-462
2	-407	-398	-412	-465	-405	-420
3	-513	-502	-520	-586	-510	-530
4	-503	-492	-510	-574	-500	-520
5	-538	-526	-545	-614	-535	-555
6	-536	-524	-543	-612	-533	-554
7	-619	-605	-627	-707	-616	-640
8	-630	-616	-638	-719	-626	-651
9	-684	-669	-693	-781	-680	-707
10	-658	-644	-667	-751	-655	-680
11	-652	-637	-660	-744	-648	-673
12	-646	-631	-654	-737	-642	-667
13	-744	-727	-753	-849	-740	-768
14	-675	-660	-683	-770	-671	-697
15	-661	-646	-669	-754	-657	-683
16	-640	-626	-649	-731	-637	-662
17	-613	-600	-621	-700	-610	-634
18	-611	-598	-619	-698	-608	-632
19	-600	-587	-608	-685	-597	-620
20	-585	-572	-593	-668	-582	-604
21	-600	-587	-608	-685	-597	-620
22	-656	-641	-664	-749	-652	-677
23	-639	-625	-647	-729	-635	-660
24	-531	-519	-537	-606	-528	-548

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της ομάδας SR.

Πίνακας 9.33: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας SR, (δοκίμια 109, ...,114).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον σπλισμό) - Ομάδα SR						
Χρόνος σε μήνες	109	110	111	112	113	114
1	-522	-470	-531	-510	-510	-458
2	-521	-469	-530	-508	-509	-456
3	-607	-546	-617	-593	-593	-532
4	-592	-533	-602	-578	-579	-519
5	-610	-549	-620	-595	-596	-534
6	-595	-536	-605	-581	-582	-522
7	-616	-554	-627	-601	-602	-540
8	-624	-562	-635	-609	-610	-547
9	-678	-610	-689	-662	-662	-594
10	-650	-585	-661	-635	-636	-570
11	-693	-624	-705	-676	-677	-607
12	-685	-617	-697	-669	-670	-601
13	-772	-695	-785	-754	-755	-677
14	-713	-642	-725	-696	-697	-625
15	-722	-650	-734	-705	-706	-633
16	-642	-578	-653	-627	-627	-562
17	-710	-639	-723	-694	-694	-623
18	-675	-608	-687	-659	-660	-592
19	-632	-568	-642	-617	-617	-553
20	-573	-516	-583	-560	-561	-502
21	-578	-520	-587	-564	-565	-506
22	-661	-595	-672	-645	-646	-579
23	-561	-505	-571	-548	-549	-492
24	-561	-505	-571	-548	-549	-492

Πίνακας 9.34: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας SR, (δοκίμια 115, ...,120).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - Ομάδα SR						
Χρόνος σε μήνες	115	116	117	118	119	120
1	-532	-475	-478	-487	-511	-517
2	-530	-474	-477	-486	-510	-515
3	-618	-553	-556	-566	-594	-600
4	-603	-539	-542	-552	-580	-586
5	-621	-555	-558	-569	-597	-603
6	-606	-542	-545	-555	-583	-589
7	-627	-561	-564	-575	-603	-610
8	-635	-568	-571	-582	-611	-617
9	-690	-617	-620	-632	-664	-670
10	-662	-592	-595	-607	-637	-643
11	-705	-631	-634	-646	-678	-685
12	-698	-624	-627	-640	-671	-678
13	-786	-703	-707	-720	-756	-764
14	-726	-649	-653	-666	-698	-706
15	-735	-657	-661	-674	-707	-714
16	-654	-584	-588	-599	-628	-635
17	-723	-647	-650	-663	-696	-703
18	-688	-615	-618	-630	-661	-668
19	-643	-575	-578	-589	-618	-625
20	-584	-522	-525	-535	-561	-567
21	-588	-526	-529	-539	-566	-572
22	-673	-602	-605	-617	-647	-654
23	-572	-511	-514	-524	-550	-555
24	-571	-511	-514	-524	-549	-555

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης σε mV της ομάδας SR + C.I.(sprayed).

Πίνακας 9.35: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας SR + C.I.(sprayed), (δοκίμια 121, ...,126).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - Ομάδα SR + C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	121	122	123	124	125	126
1	-583	-537	-510	-442	-566	-462
2	-607	-560	-532	-461	-590	-481
3	-725	-668	-635	-550	-704	-574
4	-721	-665	-631	-547	-701	-572
5	-650	-600	-569	-494	-632	-516
6	-731	-675	-640	-555	-710	-580
7	-751	-692	-657	-570	-729	-595
8	-781	-721	-684	-593	-759	-619
9	-791	-730	-693	-600	-768	-627
10	-766	-706	-670	-581	-744	-607
11	-804	-741	-704	-610	-781	-637
12	-781	-720	-684	-593	-759	-619
13	-914	-843	-800	-694	-888	-725
14	-842	-777	-738	-639	-818	-668
15	-778	-718	-681	-591	-756	-617
16	-772	-712	-676	-586	-749	-612
17	-752	-694	-658	-571	-730	-596
18	-725	-669	-635	-551	-705	-575
19	-704	-649	-616	-534	-684	-558
20	-715	-659	-626	-543	-695	-567
21	-622	-574	-545	-472	-605	-493
22	-569	-525	-499	-432	-553	-451
23	-651	-601	-570	-495	-633	-516
24	-567	-523	-496	-430	-551	-449

Πίνακας 9.36: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας SR + C.I.(sprayed), (δοκίμια 127, ...,132).

Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό) - Ομάδα SR + C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	127	128	129	130	131	132
1	-574	-477	-539	-486	-566	-557
2	-598	-497	-562	-506	-590	-580
3	-714	-593	-670	-604	-704	-692
4	-710	-590	-667	-601	-701	-689
5	-641	-532	-602	-542	-632	-621
6	-720	-598	-676	-610	-711	-699
7	-739	-614	-694	-626	-730	-717
8	-770	-639	-723	-651	-759	-746
9	-779	-647	-732	-660	-769	-756
10	-754	-626	-708	-638	-744	-731
11	-792	-657	-743	-670	-781	-768
12	-769	-639	-722	-651	-759	-746
13	-900	-748	-845	-762	-888	-873
14	-830	-689	-779	-702	-819	-805
15	-766	-636	-720	-649	-756	-743
16	-760	-631	-714	-643	-750	-737
17	-741	-615	-695	-627	-731	-718
18	-715	-594	-671	-605	-705	-693
19	-693	-576	-651	-587	-684	-672
20	-704	-585	-661	-596	-695	-683
21	-613	-509	-576	-519	-605	-595
22	-561	-466	-527	-475	-554	-544
23	-642	-533	-603	-543	-633	-622
24	-559	-464	-524	-473	-551	-542

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μέσοι όροι των μετρήσεων του δυναμικού διάβρωσης σε mV όλων των ομάδων.

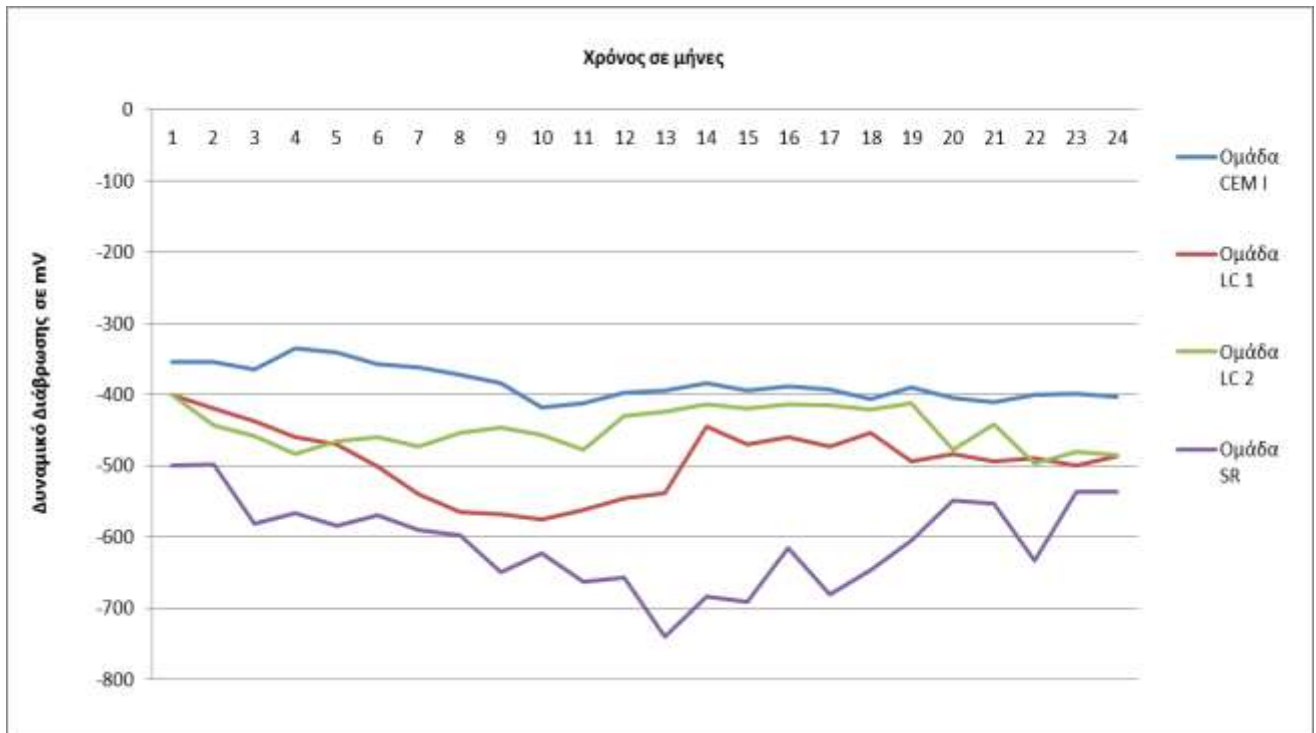
Πίνακας 9.37: Μέσοι όροι δυναμικού διάβρωσης σε mV των ομάδων CEM I, LC 1, LC2, CEM I + C.I.(additive), LC 1 + C.I.(additive) και LC2 + C.I.(additive).

Μέσοι Όροι Μέτρησης Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό)						
Χρόνος σε μήνες	Ομάδα CEM I	Ομάδα LC 1	Ομάδα LC 2	Ομάδα CEM I + C.I.(additive)	Ομάδα LC 1 + C.I.(additive)	Ομάδα LC 2 + C.I.(additive)
1	-355	-400	-401	-397	-276	-330
2	-355	-420	-443	-380	-400	-410
3	-366	-437	-458	-372	-454	-447
4	-336	-459	-483	-401	-546	-448
5	-341	-470	-466	-381	-559	-458
6	-358	-501	-460	-416	-556	-453
7	-362	-540	-474	-407	-554	-482
8	-373	-564	-454	-404	-546	-494
9	-384	-568	-446	-408	-534	-484
10	-418	-575	-457	-431	-526	-494
11	-412	-563	-478	-438	-549	-518
12	-397	-545	-431	-413	-513	-441
13	-395	-538	-424	-390	-521	-474
14	-385	-445	-414	-394	-512	-457
15	-395	-470	-420	-371	-530	-452
16	-388	-460	-413	-374	-470	-445
17	-394	-474	-416	-372	-499	-475
18	-407	-454	-421	-375	-475	-490
19	-390	-494	-412	-360	-478	-489
20	-404	-484	-478	-370	-488	-475
21	-411	-494	-443	-392	-490	-473
22	-400	-490	-496	-367	-498	-478
23	-398	-499	-481	-383	-484	-471
24	-403	-487	-485	-380	-478	-481

Πίνακας 9.38: Μέσοι όροι δυναμικού διάβρωσης σε mV των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC 1 + C.I.(sprayed), LC2 + C.I.(sprayed), SR και SR + C.I.(sprayed) .

Μέσοι Όροι Μέτρησης Δυναμικού Διάβρωσης σε mV (στον οπλισμό)					
Χρόνος σε μήνες	Ομάδα CEM I + C.I.(sprayed)	Ομάδα LC 1 + C.I.(sprayed)	Ομάδα LC 2 + C.I.(sprayed)	Ομάδα SR	Ομάδα SR + C.I.(sprayed)
1	-713	-526	-462	-500	-525
2	-707	-576	-420	-499	-547
3	-742	-660	-530	-581	-653
4	-695	-623	-519	-567	-650
5	-703	-669	-555	-584	-586
6	-652	-682	-553	-570	-659
7	-591	-576	-639	-590	-676
8	-622	-619	-650	-598	-704
9	-639	-557	-706	-649	-713
10	-627	-631	-679	-623	-690
11	-625	-670	-672	-664	-724
12	-607	-620	-666	-656	-704
13	-652	-713	-768	-739	-823
14	-569	-676	-696	-683	-759
15	-577	-668	-682	-691	-701
16	-624	-640	-661	-615	-695
17	-659	-622	-633	-680	-677
18	-586	-614	-631	-647	-654
19	-657	-599	-619	-605	-634
20	-572	-579	-604	-549	-644
21	-532	-568	-619	-553	-561
22	-642	-471	-677	-633	-513
23	-629	-525	-659	-538	-587
24	-658	-476	-547	-537	-511

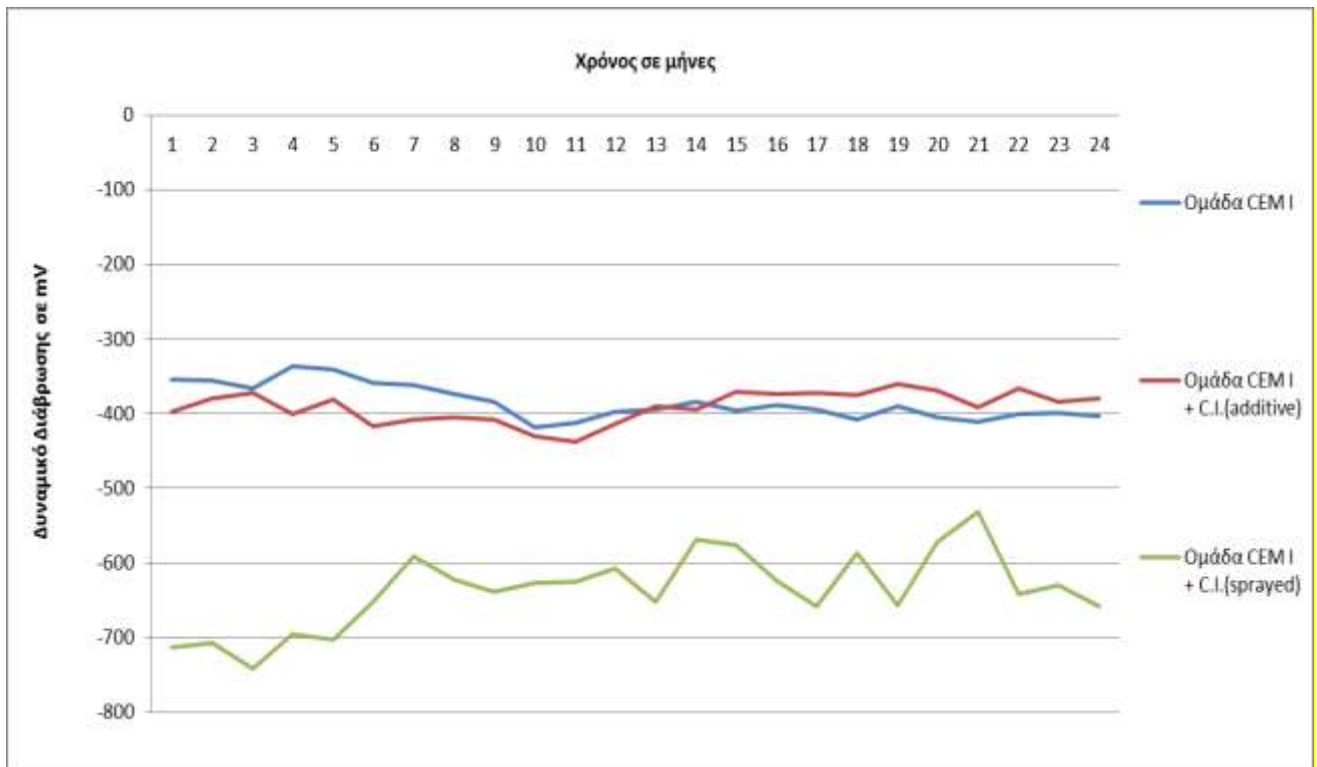
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται το Δυναμικό Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου των ομάδων CEM I, LC1, LC2 και SR.



Διάγραμμα 9.8: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου των ομάδων CEM I, LC1, LC2 και SR.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ομάδα CEM I έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα LC2 και η ομάδα LC2 έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα LC1 και η ομάδα LC1 έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα SR.

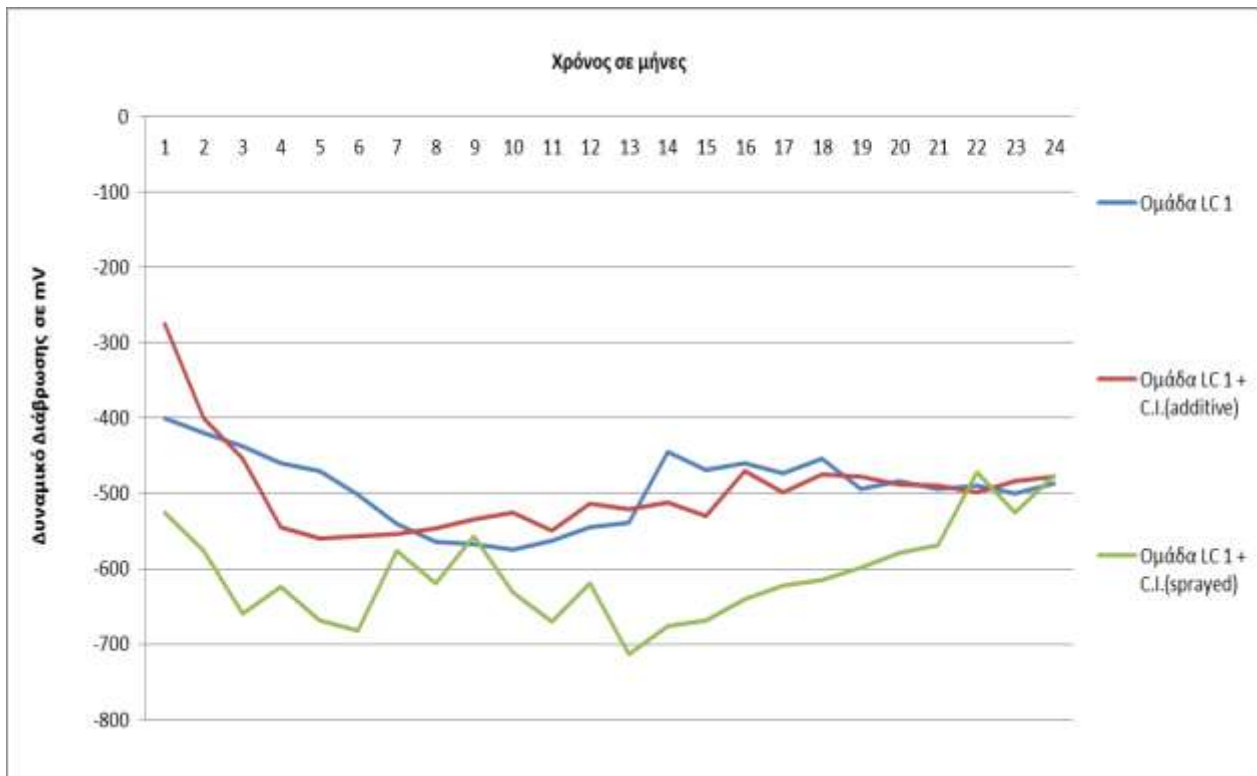
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται το Δυναμικό Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου των ομάδων CEM I, CEM I + C.I. (additive) και CEM I + C.I. (sprayed).



Διάγραμμα 9.9: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων CEM I, CEM I + C.I. (additive) και CEM I + C.I. (sprayed).

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ομάδα CEM I + C.I.(additive) που περιέχει τον αναστολέα ως πρόσμικτο έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα CEM I + C.I. (sprayed) που περιέχει τον αναστολέα ως ψεκαζόμενο και από την ομάδα CEM I που δεν περιέχει αναστολέα. Παρατηρούμε όμως ότι η ομάδα CEM I + C.I. (sprayed) που περιέχει τον αναστολέα ως ψεκαζόμενο δεν έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα CEM I που δεν περιέχει αναστολέα. Επίσης, όσον αφορά τις ομάδες CEM I + C.I.(additive) και CEM I, τους πρώτους μήνες παρατηρείται ότι δεν έχει αρχίσει η δράση του αναστολέα διάβρωσης ενώ μετά τον 14^ο μήνα παρατηρείται μια σταθεροποίηση του δυναμικού και ο αναστολέας προστατεύει μέχρι έναν βαθμό τον οπλισμό που βρίσκεται εγκιβωτισμένος σε κονίαμα.

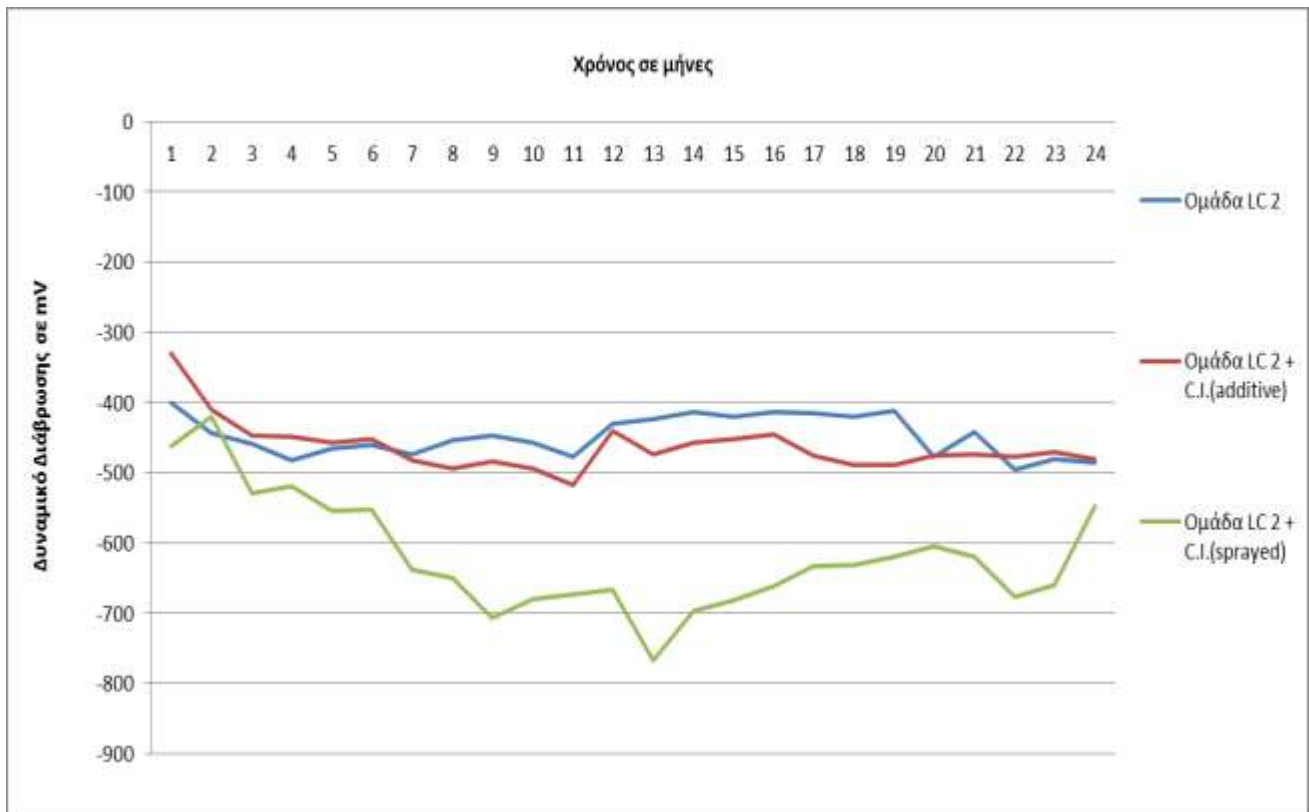
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται το Δυναμικό Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων LC1, LC1 + C.I. (additive) και LC1 + C.I. (sprayed).



Διάγραμμα 9.10: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου των ομάδων LC1, LC1 + C.I. (additive) και LC1 + C.I. (sprayed).

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ομάδα LC1 + C.I.(additive) που περιέχει τον αναστολέα ως πρόσμικτο έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα LC1 + C.I. (sprayed) που περιέχει τον αναστολέα ως ψεκαζόμενο και αντίστοιχα η ομάδα LC1 + C.I. (sprayed) που περιέχει τον αναστολέα ως ψεκαζόμενο τείνει να έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα LC1 που δεν περιέχει αναστολέα τους τελευταίους μήνες. Όσον αφορά τις ομάδες LC1 + C.I.(additive) και LC1, τους πρώτους μήνες παρατηρείται ότι δεν έχει αρχίσει η δράση του αναστολέα διάβρωσης ενώ κατά τους τελευταίους μήνες παρατηρείται μια σταθεροποίηση του δυναμικού και ο αναστολέας προστατεύει μέχρι έναν βαθμό τον οπλισμό που βρίσκεται εγκιβωτισμένος σε κονίαμα.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται το Δυναμικό Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου των ομάδων LC2, LC2 + C.I. (additive) και LC2 + C.I. (sprayed).

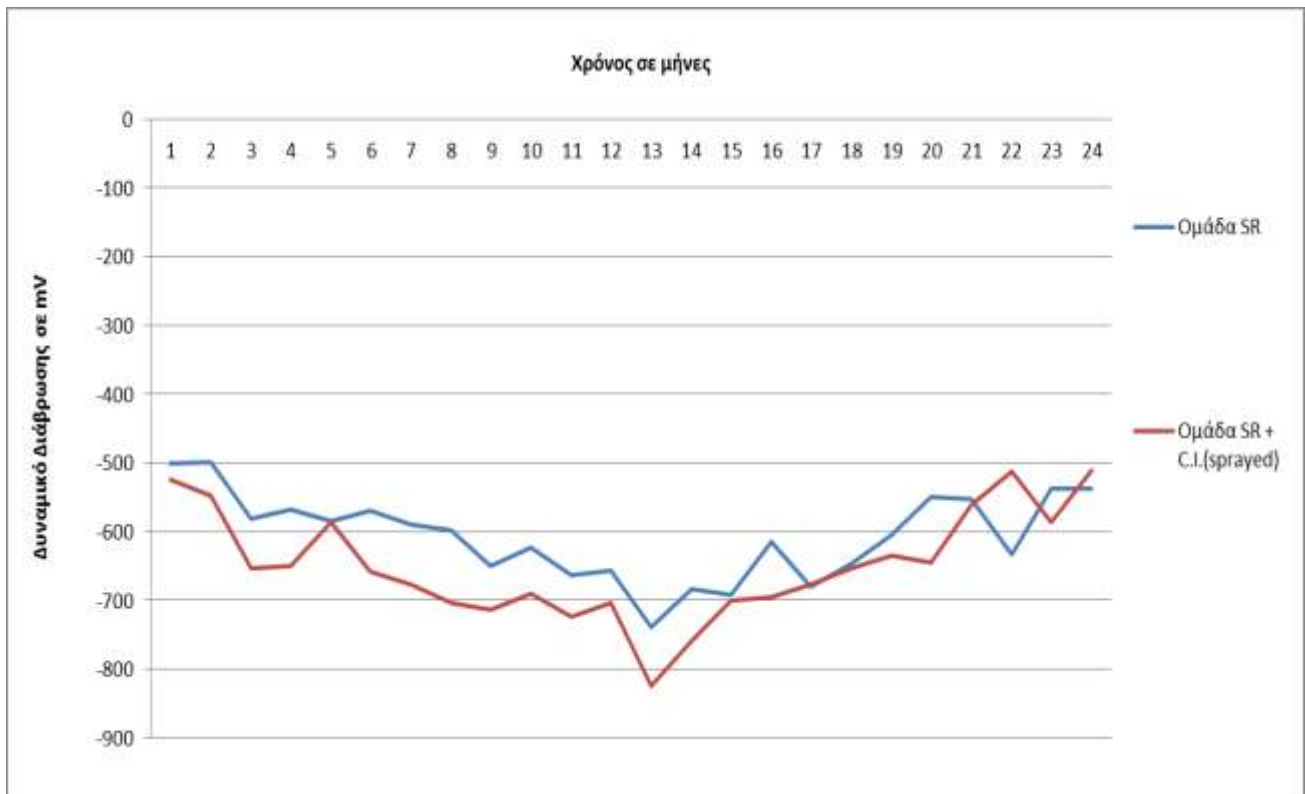


Διάγραμμα 9.11: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων LC2, LC2 + C.I. (additive) και LC2 + C.I. (sprayed).

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ομάδα LC2 + C.I.(additive) που περιέχει τον αναστολέα ως πρόσμικτο έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα LC2 + C.I. (sprayed) που περιέχει τον αναστολέα ως ψεκαζόμενο και από την ομάδα LC2 που δεν περιέχει αναστολέα.

Παρατηρούμε όμως ότι η ομάδα LC2 + C.I. (sprayed) που περιέχει τον αναστολέα ως ψεκαζόμενο δεν έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα LC2 που δεν περιέχει αναστολέα. Επίσης, όσον αφορά τις ομάδες LC2 + C.I.(additive) και LC2, τους πρώτους μήνες παρατηρείται ότι δεν έχει αρχίσει η δράση του αναστολέα διάβρωσης ενώ κατά τους τελευταίους μήνες παρατηρείται μια σταθεροποίηση του δυναμικού και ο αναστολέας προστατεύει μέχρι έναν βαθμό τον οπλισμό που βρίσκεται εγκιβωτισμένος σε κονίαμα.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται το Δυναμικό Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων SR και SR + C.I. (sprayed).



Διάγραμμα 9.12: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου των ομάδων SR και SR + C.I. (sprayed).

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ομάδα SR + C.I. (sprayed) που περιέχει τον αναστολέα ως ψεκαζόμενο έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα SR που δεν περιέχει αναστολέα. Τους πρώτους μήνες παρατηρείται ότι δεν έχει αρχίσει η δράση του αναστολέα διάβρωσης ενώ κατά τους τελευταίους μήνες παρατηρείται μια σταθεροποίηση του δυναμικού και ο αναστολέας προστατεύει μέχρι έναν βαθμό τον οπλισμό που βρίσκεται εγκιβωτισμένος σε κονίαμα.

9.4.2 Μετρήσεις αντίστασης γραμμικής πόλωσης

9.4.2.1 Δοκίμια με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης – Δοκίμια πίνακα 9.1

Στην περίπτωση αυτή εξετάστηκαν 5 ομάδες: Α, Β, Γ, Δ και Ε. Τα δοκίμια της ομάδας Α και Β περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητες 0,1g/100g τσιμέντου και 0,4g/100g τσιμέντου αντίστοιχα, τα δοκίμια της ομάδας Γ περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου αλλά στο μισό δοκίμιο, το άλλο μισό δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης. Και τα δοκίμια της ομάδας Δ είναι κατασκευασμένα όπως τα δοκίμια της ομάδας Γ απλά περιέχουν 0,4g/100g τσιμέντου περιεκτικότητα αναστολέα διάβρωσης. Τα δοκίμια της ομάδας Ε δεν περιέχουν αναστολέα, είναι τα δοκίμια όπου χρησιμοποιήθηκαν ως

μέτρο σύγκρισης. Παρακάτω θα ακολουθήσουν οι μετρήσεις κάθε ομάδας ως προς την Αντίσταση Γραμμικής Πόλωσης στον οπλισμό.

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της ομάδας Α.

Πίνακας 9.39: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας Α, (δοκίμια Α₁, ..., Α₈).

Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Α								
Χρόνος σε μήνες	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈
1	64.158	58.421	65.074	68.433	54.044	54.816	60.874	59.028
2	382.571	348.363	388.032	408.063	322.260	326.863	362.991	351.980
3	278.823	253.892	282.804	297.402	234.867	238.223	264.553	256.528
4	410.500	373.795	416.360	437.854	345.786	350.726	389.491	377.676
5	220.489	200.773	223.636	235.181	185.729	188.382	209.204	202.858
6	194.177	176.814	196.949	207.116	163.566	165.902	184.239	178.650
7	228.459	208.031	231.720	243.682	192.443	195.192	216.766	210.191
8	260.001	236.752	263.712	277.326	219.012	222.141	246.694	239.210
9	229.267	208.766	232.539	244.544	193.123	195.882	217.533	210.934
10	259.144	235.972	262.843	276.412	218.290	221.409	245.881	238.422
11	240.475	218.972	243.908	256.499	202.565	205.458	228.167	221.246
12	253.277	230.630	256.893	270.154	213.349	216.396	240.315	233.025
13	246.871	224.797	250.395	263.321	207.952	210.923	234.236	227.131
14	241.890	220.260	245.343	258.008	203.756	206.667	229.510	222.547
15	231.181	210.509	234.481	246.585	194.736	197.518	219.349	212.695
16	219.631	199.992	222.766	234.266	185.006	187.649	208.390	202.069
17	242.360	220.689	245.820	258.510	204.153	207.069	229.956	222.981
18	218.914	199.339	222.039	233.501	184.402	187.037	207.710	201.409
19	210.235	191.437	213.236	224.244	177.092	179.622	199.475	193.424
20	206.497	188.033	209.445	220.257	173.943	176.428	195.929	189.985
21	187.755	170.967	190.435	200.266	158.156	160.415	178.146	172.742
22	207.434	188.886	210.395	221.256	174.732	177.229	196.818	190.847
23	194.582	177.183	197.359	207.547	163.906	166.248	184.623	179.022
24	199.902	182.027	202.756	213.222	168.388	170.793	189.671	183.917

Πίνακας 9.4ο: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας A, (δοκίμια A₉, ..., A₁₆).

Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Α								
Χρόνος σε μήνες	A ₉	A ₁₀	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₁₅	A ₁₆
1	63.197	59.295	63.010	68.343	59.221	69.168	62.744	63.791
2	376.841	353.573	375.722	407.527	353.133	412.443	374.138	380.384
3	274.647	257.689	273.832	297.011	257.368	300.594	272.677	277.230
4	404.352	379.385	403.151	437.278	378.913	442.553	401.452	408.154
5	217.186	203.776	216.541	234.871	203.522	237.705	215.629	219.228
6	191.269	179.459	190.701	206.844	179.236	209.339	189.897	193.067
7	225.037	211.142	224.369	243.361	210.879	246.297	223.423	227.153
8	256.106	240.293	255.346	276.961	239.994	280.302	254.270	258.514
9	225.833	211.889	225.162	244.222	211.625	247.168	224.213	227.956
10	255.262	239.501	254.505	276.048	239.203	279.379	253.432	257.663
11	236.873	222.248	236.170	256.162	221.971	259.252	235.174	239.100
12	249.484	234.079	248.743	269.799	233.788	273.054	247.694	251.830
13	243.173	228.159	242.452	262.975	227.875	266.147	241.430	245.460
14	238.266	223.555	237.559	257.668	223.276	260.777	236.558	240.507
15	227.718	213.658	227.042	246.261	213.392	249.232	226.085	229.859
16	216.341	202.983	215.699	233.958	202.730	236.780	214.789	218.375
17	238.730	223.990	238.022	258.170	223.711	261.284	237.018	240.975
18	215.635	202.320	214.995	233.194	202.069	236.007	214.088	217.662
19	207.086	194.300	206.472	223.949	194.058	226.651	205.601	209.034
20	203.404	190.845	202.800	219.967	190.607	222.621	201.945	205.317
21	184.943	173.524	184.394	200.002	173.308	202.415	183.616	186.682
22	204.327	191.711	203.720	220.965	191.472	223.631	202.862	206.248
23	191.667	179.833	191.098	207.274	179.609	209.775	190.292	193.469
24	196.908	184.750	196.323	212.942	184.520	215.511	195.496	198.759

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της ομάδας Β.

Πίνακας 9.41: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας Β, (δοκίμια Β1, ..., Β8).

Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Β								
Χρόνος σε μήνες	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
1	92.461	83.400	95.101	99.843	84.054	80.468	94.594	74.089
2	423.367	381.878	435.455	457.166	384.872	368.452	433.131	339.241
3	269.377	242.979	277.069	290.883	244.884	234.437	275.590	215.851
4	492.629	444.352	506.694	531.957	447.836	428.731	503.990	394.741
5	306.690	276.635	315.446	331.174	278.804	266.909	313.763	245.749
6	220.014	198.453	226.295	237.578	200.009	191.476	225.088	176.296
7	254.339	229.414	261.600	274.643	231.213	221.349	260.204	203.800
8	288.794	260.493	297.040	311.850	262.535	251.335	295.455	231.409
9	254.368	229.440	261.630	274.675	231.239	221.374	260.234	203.824
10	298.996	269.695	307.532	322.866	271.809	260.213	305.891	239.583
11	273.541	246.734	281.351	295.378	248.669	238.060	279.849	219.186
12	284.304	256.443	292.421	307.001	258.453	247.427	290.861	227.811
13	294.322	265.479	302.725	317.819	267.560	256.146	301.110	235.838
14	266.995	240.830	274.618	288.310	242.718	232.363	273.153	213.941
15	259.571	234.134	266.982	280.294	235.969	225.903	265.558	207.993
16	245.604	221.536	252.616	265.212	223.272	213.747	251.269	196.801
17	222.745	200.917	229.105	240.528	202.492	193.854	227.883	178.485
18	245.053	221.039	252.050	264.617	222.771	213.268	250.705	196.360
19	232.152	209.402	238.780	250.686	211.043	202.040	237.506	186.022
20	228.985	206.545	235.522	247.265	208.164	199.283	234.266	183.484
21	222.822	200.986	229.184	240.610	202.561	193.920	227.961	178.546
22	224.774	202.747	231.192	242.719	204.336	195.619	229.958	180.110
23	234.710	211.709	241.411	253.448	213.369	204.266	240.123	188.072
24	227.963	205.623	234.471	246.162	207.235	198.394	233.220	182.665

Πίνακας 9.42: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας B, (δοκίμια B9, ..., B16).

Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Β								
Χρόνος σε μήνες	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16
1	75.853	84.091	92.278	81.617	98.698	94.871	82.573	86.208
2	347.321	385.041	422.530	373.712	451.925	434.402	378.088	394.736
3	220.992	244.992	268.845	237.784	287.548	276.399	240.568	251.161
4	404.142	448.033	491.655	434.851	525.859	505.470	439.943	459.314
5	251.602	278.926	306.084	270.720	327.377	314.684	273.889	285.949
6	180.495	200.097	219.579	194.209	234.855	225.749	196.483	205.135
7	208.654	231.314	253.836	224.509	271.495	260.968	227.137	237.139
8	236.921	262.651	288.224	254.923	308.275	296.322	257.908	269.264
9	208.678	231.341	253.865	224.534	271.526	260.998	227.163	237.166
10	245.290	271.929	298.405	263.928	319.164	306.789	267.018	278.776
11	224.407	248.778	273.000	241.459	291.992	280.671	244.286	255.042
12	233.237	258.567	283.742	250.959	303.481	291.714	253.898	265.077
13	241.456	267.678	293.740	259.803	314.175	301.994	262.844	274.418
14	219.037	242.825	266.467	235.681	285.005	273.954	238.440	248.939
15	212.947	236.073	259.058	229.127	277.081	266.337	231.810	242.017
16	201.488	223.371	245.119	216.799	262.171	252.006	219.337	228.995
17	182.736	202.581	222.305	196.621	237.771	228.552	198.923	207.682
18	201.036	222.870	244.569	216.312	261.583	251.441	218.845	228.481
19	190.453	211.136	231.693	204.924	247.812	238.203	207.324	216.453
20	187.854	208.256	228.532	202.128	244.431	234.953	204.495	213.499
21	182.798	202.651	222.381	196.688	237.852	228.630	198.991	207.753
22	184.400	204.426	224.330	198.412	239.936	230.633	200.735	209.574
23	192.551	213.463	234.246	207.182	250.543	240.828	209.608	218.838
24	187.016	207.326	227.512	201.226	243.340	233.905	203.582	212.547

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της υποομάδας Γ1 της ομάδας Γ.

Πίνακας 9.43: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της υποομάδας Γ1.

Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Γ1								
Χρόνος σε μήνες	Γ1	Γ2	Γ5	Γ6	Γ9	Γ10	Γ13	Γ14
1	127.755	127.967	120.435	119.266	108.156	126.415	108.146	122.638
2	122.004	122.206	115.014	113.897	103.287	120.724	103.277	117.117
3	50.056	50.139	47.188	46.730	42.377	49.531	42.373	48.051
4	254.152	254.572	239.590	237.264	215.162	251.486	215.141	243.972
5	104.931	105.105	98.919	97.958	88.833	103.830	88.825	100.728
6	109.644	109.825	103.362	102.358	92.823	108.494	92.814	105.252
7	90.114	90.263	84.951	84.126	76.290	89.169	76.283	86.505
8	94.308	94.464	88.904	88.041	79.840	93.319	79.832	90.531
9	97.052	97.212	91.491	90.603	82.163	96.034	82.155	93.165
10	112.417	112.603	105.976	104.947	95.171	111.238	95.162	107.914
11	106.982	107.159	100.852	99.873	90.569	105.860	90.561	102.697
12	108.056	108.235	101.865	100.876	91.479	106.923	91.471	103.729
13	100.621	100.787	94.856	93.935	85.184	99.566	85.176	96.591
14	91.137	91.288	85.916	85.081	77.156	90.181	77.148	87.487
15	95.046	95.203	89.600	88.730	80.465	94.049	80.457	91.239
16	102.525	102.694	96.651	95.712	86.796	101.450	86.788	98.418
17	108.002	108.181	101.814	100.825	91.433	106.869	91.424	103.676
18	112.410	112.596	105.970	104.941	95.165	111.231	95.156	107.908
19	105.593	105.768	99.543	98.576	89.394	104.485	89.385	101.364
20	96.021	96.180	90.519	89.640	81.290	95.014	81.282	92.175
21	110.459	110.641	104.130	103.119	93.513	109.300	93.504	106.034
22	117.361	117.556	110.637	109.563	99.357	116.130	99.347	112.661
23	99.809	99.974	94.090	93.177	84.497	98.762	84.489	95.811
24	110.240	110.423	103.924	102.915	93.328	109.084	93.319	105.825

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της υποομάδας Γ2 της ομάδας Γ.

Πίνακας 9.44: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της υποομάδας Γ2.

Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Γ2								
Χρόνος σε μήνες	Γ3	Γ4	Γ7	Γ8	Γ11	Γ12	Γ15	Γ16
1	44.158	38.421	48.074	48.433	44.044	48.816	48.874	39.993
2	225.487	196.193	245.483	247.318	224.903	249.271	249.571	204.217
3	156.539	136.202	170.421	171.694	156.133	173.050	173.258	141.773
4	281.328	244.779	306.276	308.564	280.599	311.001	311.376	254.790
5	152.168	132.399	165.662	166.900	151.774	168.218	168.421	137.814
6	138.982	120.926	151.307	152.437	138.622	153.641	153.826	125.872
7	147.972	128.748	161.094	162.298	147.589	163.580	163.777	134.014
8	139.409	121.297	151.771	152.906	139.048	154.113	154.299	126.258
9	146.650	127.598	159.655	160.848	146.271	162.119	162.314	132.817
10	152.564	132.743	166.093	167.334	152.169	168.656	168.859	138.172
11	155.935	135.677	169.763	171.032	155.531	172.383	172.590	141.226
12	160.037	139.246	174.229	175.531	159.623	176.917	177.130	144.941
13	149.484	130.064	162.740	163.956	149.097	165.251	165.450	135.383
14	141.268	122.915	153.795	154.944	140.902	156.168	156.356	127.942
15	169.247	147.259	184.255	185.632	168.808	187.098	187.323	153.281
16	159.871	139.101	174.048	175.349	159.457	176.734	176.947	144.790
17	154.848	134.730	168.579	169.839	154.446	171.180	171.386	140.241
18	148.070	128.834	161.201	162.406	147.687	163.688	163.885	134.103
19	153.028	133.147	166.598	167.843	152.631	169.168	169.372	138.592
20	159.378	138.672	173.511	174.807	158.965	176.188	176.400	144.343
21	161.124	140.192	175.413	176.723	160.707	178.119	178.334	145.925
22	156.923	136.536	170.839	172.116	156.517	173.475	173.684	142.121
23	162.212	141.138	176.597	177.917	161.792	179.322	179.538	146.911
24	153.503	133.560	167.115	168.364	153.105	169.694	169.898	139.023

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της υποομάδας Δ_1 της ομάδας Δ .

Πίνακας 9.45: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της υποομάδας Δ_1 .

Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Δ_1								
Χρόνος σε μήνες	Δ_1	Δ_2	Δ_5	Δ_6	Δ_9	Δ_{10}	Δ_{13}	Δ_{14}
1	143.503	133.560	137.115	138.364	143.105	139.694	143.788	145.407
2	160.262	149.158	153.128	154.523	159.817	156.008	160.580	162.388
3	126.687	117.910	121.048	122.151	126.336	123.324	126.939	128.368
4	269.511	250.839	257.515	259.860	268.765	262.358	270.047	273.087
5	168.774	157.081	161.262	162.730	168.307	164.294	169.109	171.013
6	124.270	115.660	118.738	119.820	123.925	120.971	124.517	125.918
7	95.202	88.606	90.965	91.793	94.939	92.675	95.392	96.465
8	101.421	94.394	96.906	97.789	101.140	98.729	101.622	102.766
9	113.302	105.452	108.259	109.245	112.988	110.295	113.527	114.805
10	104.834	97.571	100.168	101.080	104.544	102.052	105.043	106.225
11	98.359	91.544	93.980	94.836	98.086	95.748	98.554	99.663
12	107.880	100.406	103.078	104.017	107.581	105.017	108.095	109.312
13	117.186	109.067	111.970	112.990	116.862	114.076	117.419	118.741
14	123.881	115.298	118.367	119.445	123.538	120.593	124.127	125.525
15	121.157	112.763	115.764	116.818	120.821	117.941	121.398	122.764
16	128.303	119.414	122.592	123.709	127.948	124.898	128.558	130.005
17	119.307	111.041	113.996	115.034	118.976	116.140	119.544	120.889
18	122.083	113.625	116.649	117.711	121.745	118.842	122.325	123.702
19	129.437	120.469	123.676	124.802	129.078	126.001	129.694	131.154
20	131.453	122.345	125.602	126.746	131.089	127.964	131.714	133.197
21	126.270	117.522	120.650	121.749	125.920	122.919	126.521	127.945
22	129.132	120.185	123.384	124.508	128.774	125.704	129.388	130.845
23	132.475	123.296	126.578	127.731	132.108	128.958	132.738	134.232
24	135.542	126.151	129.509	130.688	135.166	131.944	135.811	137.340

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της υποομάδας Δ_2 της ομάδας Δ .

Πίνακας 9.46: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της υποομάδας Δ_2 .

Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ Δ_2								
Χρόνος σε μήνες	Δ_3	Δ_4	Δ_7	Δ_8	Δ_{11}	Δ_{12}	Δ_{15}	Δ_{16}
1	74.158	68.421	65.074	68.433	74.044	74.816	72.874	73.402
2	312.859	288.656	274.535	288.706	312.376	315.633	307.443	309.668
3	200.922	185.379	176.310	185.411	200.612	202.704	197.444	198.873
4	338.870	312.655	297.359	312.709	338.347	341.875	333.004	335.413
5	197.617	182.330	173.410	182.361	197.312	199.370	194.197	195.602
6	167.523	154.564	147.002	154.591	167.265	169.009	164.623	165.814
7	177.314	163.597	155.593	163.625	177.040	178.886	174.245	175.505
8	188.231	173.669	165.173	173.699	187.940	189.900	184.972	186.311
9	162.839	150.242	142.892	150.268	162.588	164.283	160.021	161.178
10	169.796	156.661	148.997	156.688	169.534	171.302	166.857	168.064
11	181.299	167.274	159.091	167.303	181.019	182.907	178.161	179.450
12	177.429	163.703	155.694	163.731	177.155	179.002	174.358	175.619
13	165.610	152.798	145.323	152.825	165.354	167.078	162.743	163.920
14	169.224	156.133	148.495	156.160	168.963	170.725	166.295	167.498
15	176.289	162.652	154.695	162.680	176.018	177.853	173.238	174.491
16	186.151	171.751	163.348	171.781	185.864	187.802	182.929	184.252
17	173.814	160.368	152.523	160.396	173.546	175.356	170.806	172.042
18	179.971	166.049	157.925	166.078	179.694	181.567	176.856	178.136
19	185.831	171.455	163.068	171.485	185.545	187.479	182.615	183.936
20	187.802	173.274	164.797	173.304	187.512	189.467	184.551	185.886
21	189.382	174.732	166.184	174.762	189.090	191.062	186.104	187.451
22	186.560	172.127	163.707	172.157	186.272	188.214	183.330	184.657
23	183.160	168.991	160.724	169.021	182.878	184.785	179.990	181.292
24	182.457	168.343	160.107	168.372	182.176	184.075	179.299	180.596

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της ομάδας E.

Πίνακας 9.47: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας E, (δοκίμια E_1, \dots, E_8).

Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ E								
Χρόνος σε μήνες	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
1	12.461	13.400	15.101	12.843	14.054	10.468	14.594	14.089
2	7.241	7.787	8.775	7.463	8.167	6.083	8.480	8.187
3	9.564	10.285	11.590	9.857	10.787	8.034	11.201	10.813
4	27.779	29.873	33.664	28.630	31.330	23.336	32.533	31.407
5	44.451	47.800	53.867	45.811	50.133	37.341	52.057	50.256
6	29.351	31.563	35.569	30.250	33.103	24.657	34.374	33.184
7	33.958	36.516	41.151	34.997	38.298	28.526	39.769	38.392
8	47.322	50.888	57.348	48.771	53.372	39.754	55.421	53.503
9	20.191	21.713	24.469	20.810	22.772	16.962	23.647	22.828
10	22.132	23.800	26.821	22.810	24.961	18.592	25.919	25.023
11	20.220	21.744	24.504	20.839	22.805	16.986	23.680	22.861
12	15.956	17.158	19.336	16.445	17.996	13.404	18.687	18.040
13	12.054	12.962	14.607	12.423	13.594	10.126	14.116	13.628
14	8.322	8.949	10.085	8.577	9.386	6.991	9.746	9.409
15	17.551	18.873	21.269	18.088	19.794	14.744	20.554	19.843
16	21.104	22.694	25.575	21.750	23.802	17.729	24.715	23.860
17	25.713	27.651	31.161	26.501	29.000	21.601	30.114	29.072
18	17.853	19.198	21.635	18.400	20.135	14.998	20.908	20.185
19	23.312	25.069	28.251	24.026	26.292	19.583	27.301	26.357
20	30.071	32.338	36.442	30.992	33.915	25.262	35.217	33.999
21	25.376	27.288	30.752	26.153	28.620	21.317	29.718	28.690
22	32.937	35.419	39.914	33.945	37.147	27.669	38.573	37.238
23	30.930	33.261	37.483	31.877	34.884	25.983	36.223	34.970
24	34.012	36.575	41.217	35.053	38.359	28.572	39.832	38.454

Πίνακας 9.48: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας E, (δοκίμια E₉, ..., E₁₆).

Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ E								
Χρόνος σε μήνες	E ₉	E ₁₀	E ₁₁	E ₁₂	E ₁₃	E ₁₄	E ₁₅	E ₁₆
1	15.853	14.091	12.278	11.617	14.698	14.871	12.573	13.273
2	9.212	8.188	7.135	6.751	8.541	8.642	7.306	7.713
3	12.167	10.815	9.424	8.916	11.281	11.414	9.649	10.187
4	35.341	31.413	27.372	25.897	32.766	33.152	28.028	29.590
5	56.550	50.265	43.799	41.439	52.430	53.048	44.848	47.348
6	37.341	33.190	28.921	27.362	34.620	35.028	29.613	31.264
7	43.201	38.399	33.460	31.657	40.054	40.525	34.261	36.171
8	60.204	53.512	46.629	44.116	55.818	56.475	47.745	50.407
9	25.688	22.832	19.895	18.823	23.816	24.097	20.372	21.507
10	28.157	25.027	21.808	20.633	26.105	26.413	22.330	23.575
11	25.724	22.865	19.924	18.850	23.850	24.131	20.401	21.538
12	20.299	18.043	15.722	14.875	18.820	19.042	16.099	16.996
13	15.335	13.630	11.877	11.237	14.217	14.385	12.161	12.839
14	10.587	9.411	8.200	7.758	9.816	9.932	8.396	8.864
15	22.328	19.846	17.294	16.362	20.702	20.945	17.708	18.695
16	26.849	23.864	20.794	19.674	24.892	25.185	21.292	22.479
17	32.713	29.077	25.336	23.971	30.329	30.687	25.943	27.389
18	22.713	20.188	17.591	16.643	21.058	21.306	18.013	19.017
19	29.658	26.361	22.970	21.733	27.497	27.821	23.520	24.831
20	38.257	34.005	29.631	28.034	35.470	35.887	30.340	32.032
21	32.283	28.695	25.004	23.657	29.931	30.284	25.603	27.030
22	41.902	37.245	32.454	30.705	38.849	39.307	33.231	35.084
23	39.350	34.976	30.477	28.835	36.483	36.912	31.207	32.946
24	43.270	38.460	33.513	31.707	40.117	40.590	34.316	36.229

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μέσοι όροι των μετρήσεων του δυναμικού διάβρωσης σε mV όλων των ομάδων.

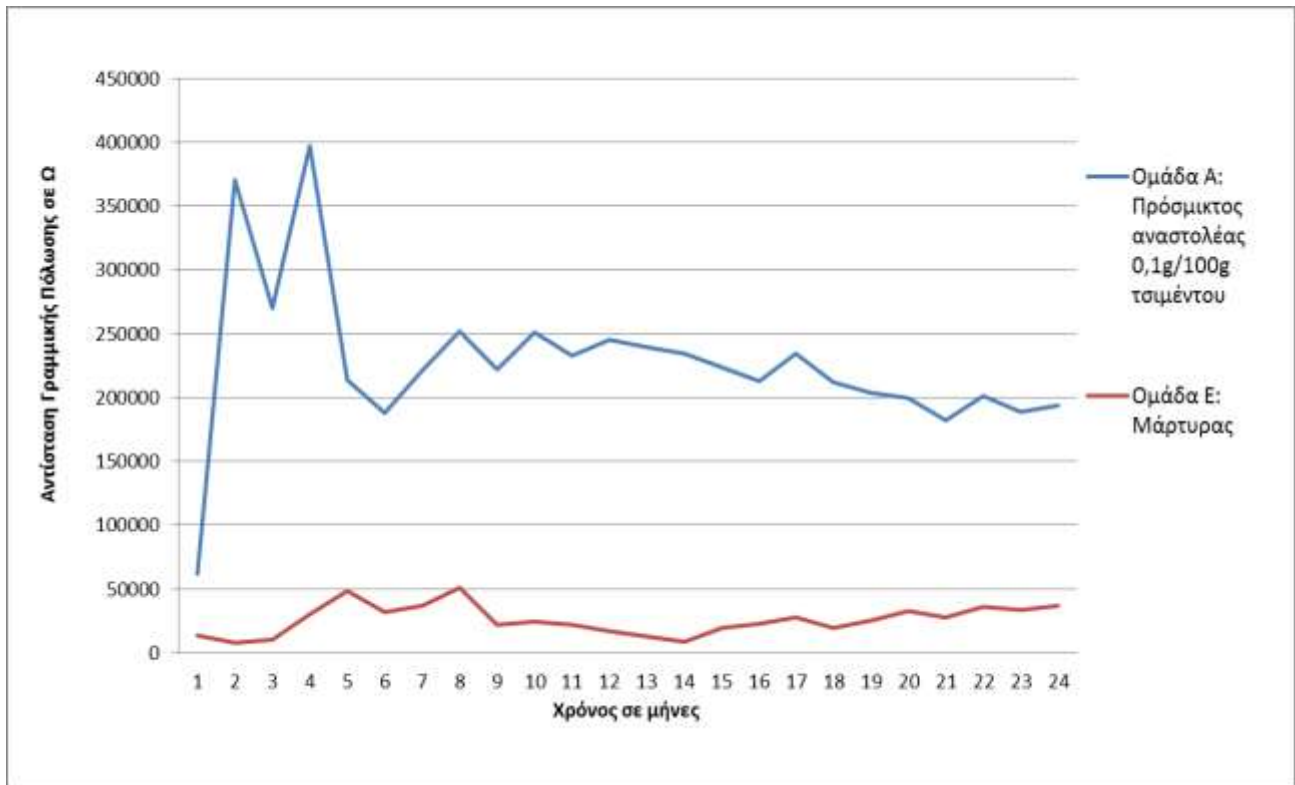
Πίνακας 9.49: Μέσοι όροι αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) των ομάδων A, B και E.

Μέσοι Όροι Μέτρησης αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό)			
	Ομάδα A:	Ομάδα B:	Ομάδα E:
Χρόνος σε μήνες	Πρόσμικτος αναστολέας 0,1g/100g τσιμέντου	Πρόσμικτος αναστολέας 0,4g/100g τσιμέντου	Μάρτυρας
1	62.101	87.512	13.517
2	370.305	400.707	7.855
3	269.884	254.960	10.374
4	397.339	466.262	30.132
5	213.420	290.275	48.215
6	187.952	208.238	31.837
7	221.134	240.726	36.834
8	251.665	273.337	51.330
9	221.916	240.754	21.901
10	250.835	282.993	24.006
11	232.765	258.900	21.933
12	245.157	269.087	17.307
13	238.956	278.569	13.074
14	234.134	252.705	9.027
15	223.769	245.678	19.037
16	212.589	232.459	22.891
17	234.590	210.824	27.891
18	211.895	231.937	19.365
19	203.495	219.727	25.286
20	199.876	216.729	32.618
21	181.735	210.896	27.525
22	200.783	212.744	35.726
23	188.343	222.148	33.550
24	193.493	215.762	36.892

Πίνακας 9.5ο: Μέσοι όροι αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) των ομάδων Γ και Δ.

Μέσοι Όροι Μέτρησης αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό)				
Χρόνος σε μήνες	Ομάδα Γ		Ομάδα Δ	
	Ομάδα Γ1: Χωρίς αναστολέα	Ομάδα Γ2: Πρόσμικτος αναστολέας 0,1g/100g τσιμέντου	Ομάδα Δ1: Χωρίς αναστολέα	Ομάδα Δ2: Πρόσμικτος αναστολέας 0,4g/100g τσιμέντου
1	120.097	45.102	140.567	71.403
2	114.691	230.305	156.983	301.234
3	47.056	159.884	124.095	193.457
4	238.917	287.339	263.998	326.279
5	98.641	155.420	165.321	190.275
6	103.072	141.952	121.727	161.299
7	84.713	151.134	93.255	170.726
8	88.655	142.388	99.346	181.237
9	91.234	149.784	110.984	156.789
10	105.678	155.824	102.690	163.487
11	100.569	159.267	96.346	174.563
12	101.579	163.457	105.673	170.836
13	94.589	152.678	114.789	159.456
14	85.674	144.286	121.347	162.937
15	89.349	172.863	118.678	169.739
16	96.379	163.287	125.678	179.235
17	101.528	158.156	116.866	167.356
18	105.672	151.234	119.585	173.284
19	99.263	156.297	126.789	178.927
20	90.265	162.783	128.764	180.824
21	103.838	164.567	123.687	182.346
22	110.326	160.276	126.490	179.628
23	93.826	165.678	129.764	176.355
24	103.632	156.783	132.769	175.678

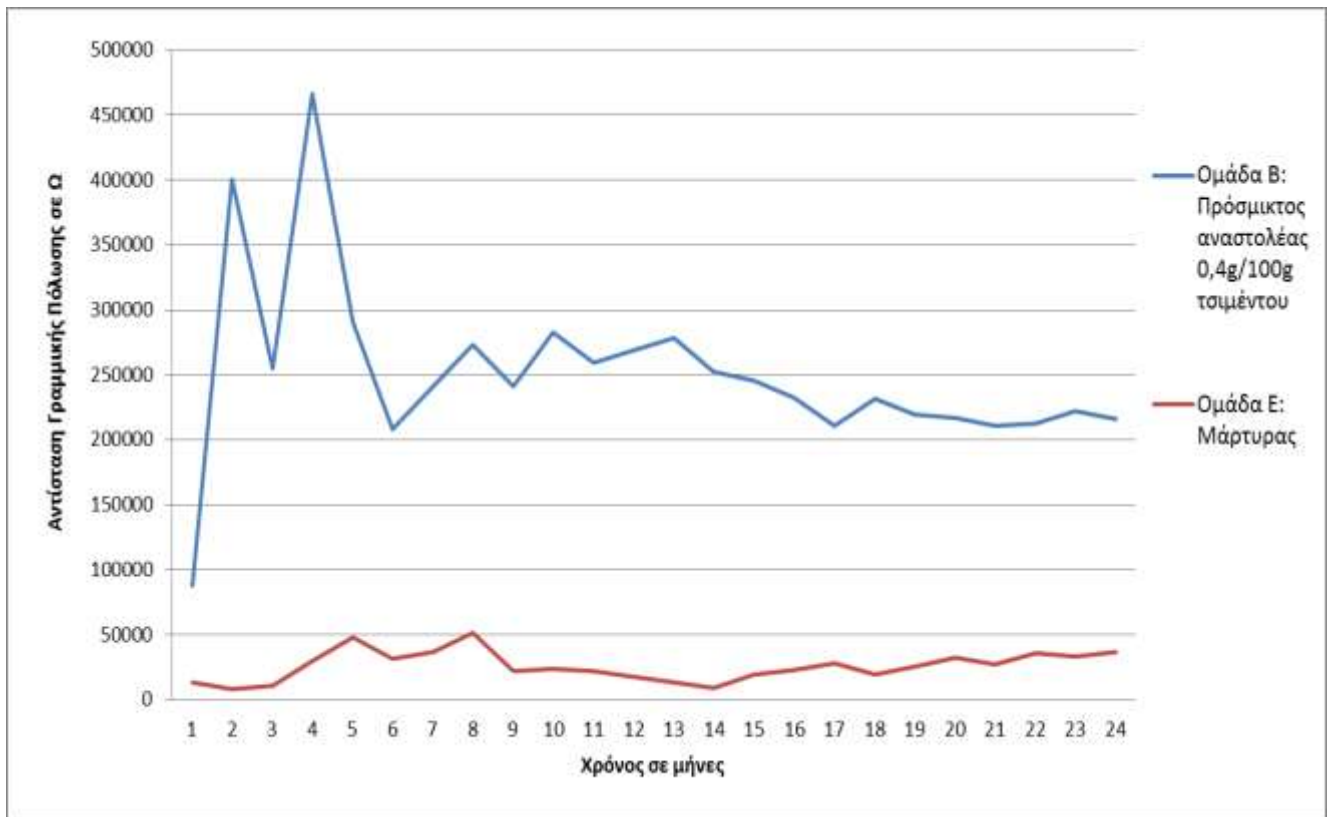
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η αντίσταση γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Α και Ε.



Διάγραμμα 9.12: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Α και Ε.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ομάδα Α που περιέχει τον αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Ε που δεν περιέχει αναστολέα. Παρατηρείται ότι ο αναστολέας προστατεύει μέχρι έναν βαθμό τον οπλισμό που βρίσκεται εγκιβωτισμένος σε κονίαμα.

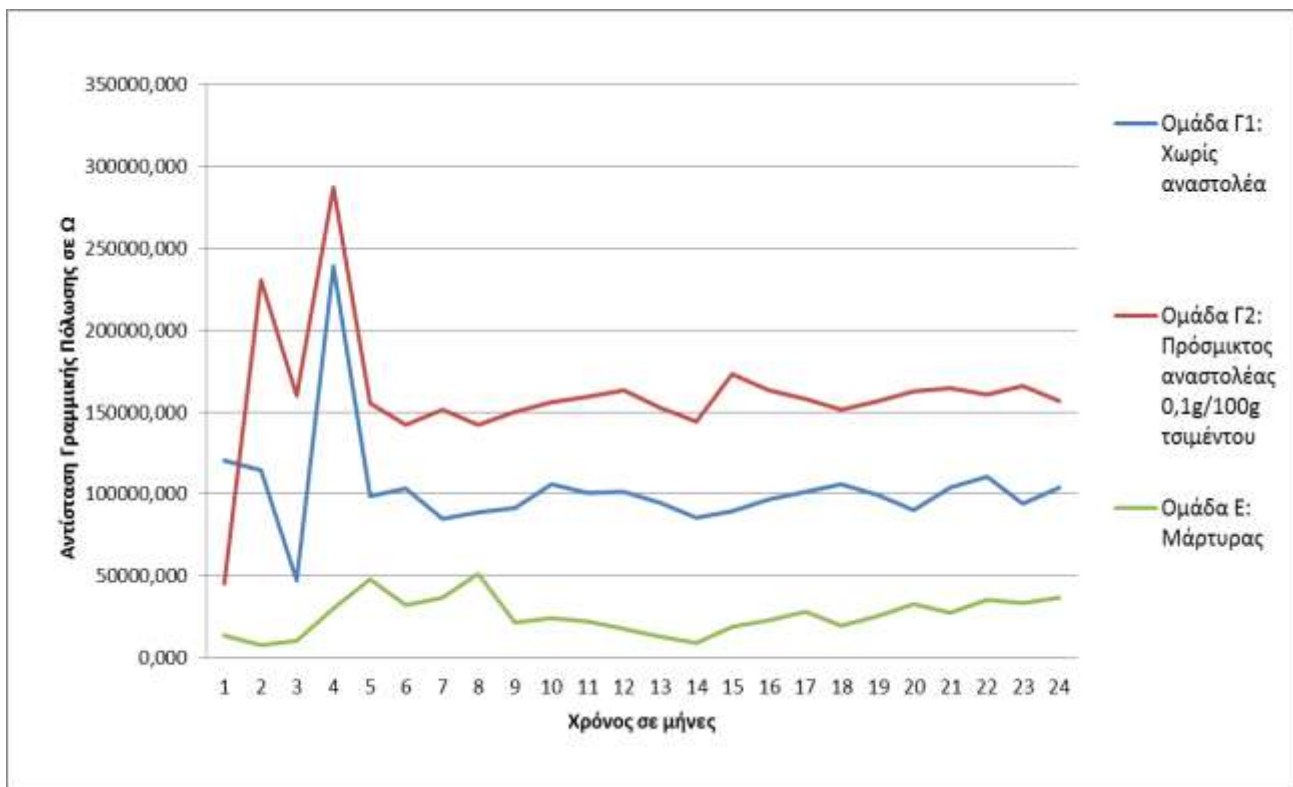
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η αντίσταση γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Β και της ομάδας Ε.



Διάγραμμα 9.13: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου της ομάδας Β και της ομάδας Ε.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ομάδα Β που περιέχει τον αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,4g/100g τσιμέντου έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Ε που δεν περιέχει αναστολέα. Παρατηρείται ότι ο αναστολέας προστατεύει μέχρι έναν βαθμό τον οπλισμό που βρίσκεται εγκιβωτισμένος σε κονίαμα.

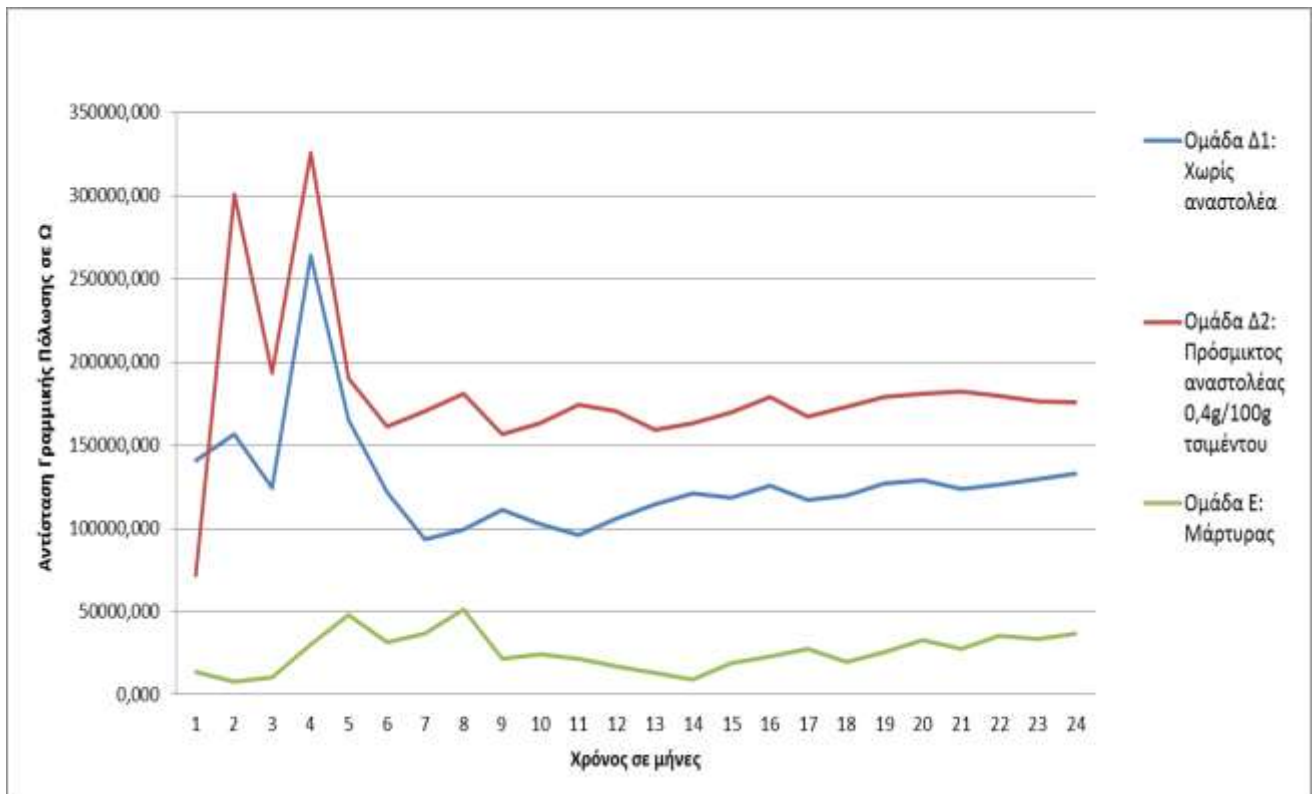
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η αντίσταση γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου της ομάδας Γ₁, Γ₂ και της ομάδας Ε.



Διάγραμμα 9.14: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσε του χρόνου της ομάδας Γ1, Γ2 και της ομάδας Ε.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ομάδα Γ, η οποία αποτελείται από δοκίμια όπου το μισό δοκίμιο δεν έχει αναστολέα (Γ1) και το άλλο μισό περιέχει αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου (Γ2) έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Ε που δεν περιέχει αναστολέα. Το τμήμα της ομάδας των δοκιμίων που έχουν αναστολέα (Γ2) συμπεριφέρεται καλύτερα από το τμήμα της ομάδας των δοκιμίων που δεν έχουν αναστολέα διάβρωσης (Γ1) και το τμήμα της ομάδας των δοκιμίων που δεν έχουν αναστολέα διάβρωσης (Γ1) αλλά αποτελεί τμήμα δοκιμίου όπου έχει αναστολέα διάβρωσης έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα των δοκιμίων που δεν έχουν καθόλου αναστολέα διάβρωσης (Ε) λόγω της διάχυσης του αναστολέα από το ένα τμήμα στο άλλο.

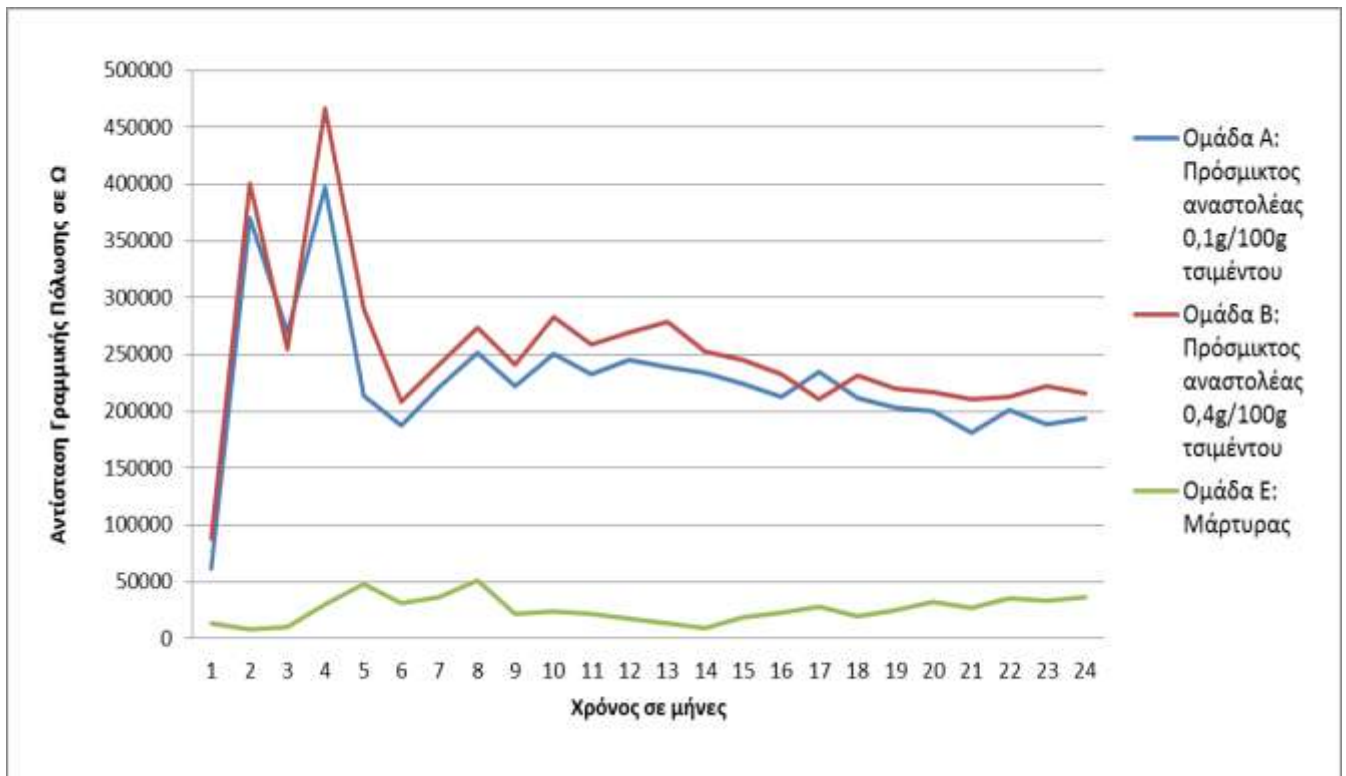
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η αντίσταση γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσε του χρόνου της ομάδας Δ1, Δ2 και της ομάδας Ε.



Διάγραμμα 9.15: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Δ1, Δ2 και της ομάδας E.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ομάδα Δ, η οποία αποτελείται από δοκίμια όπου το μισό δοκίμιο δεν έχει αναστολέα (Δ1) και το άλλο μισό περιέχει αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,4g/100g τσιμέντου (Δ2) έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα E που δεν περιέχει αναστολέα. Το τμήμα της ομάδας των δοκιμών που έχουν αναστολέα (Δ2) συμπεριφέρεται καλύτερα από το τμήμα της ομάδας των δοκιμών που δεν έχουν αναστολέα διάβρωσης (Δ1) και το τμήμα της ομάδας των δοκιμών που δεν έχουν αναστολέα διάβρωσης (Δ1) αλλά αποτελεί τμήμα δοκιμίου όπου έχει αναστολέα διάβρωσης έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα των δοκιμών που δεν έχουν καθόλου αναστολέα διάβρωσης (E) λόγω της διάχυσης του αναστολέα από το ένα τμήμα στο άλλο.

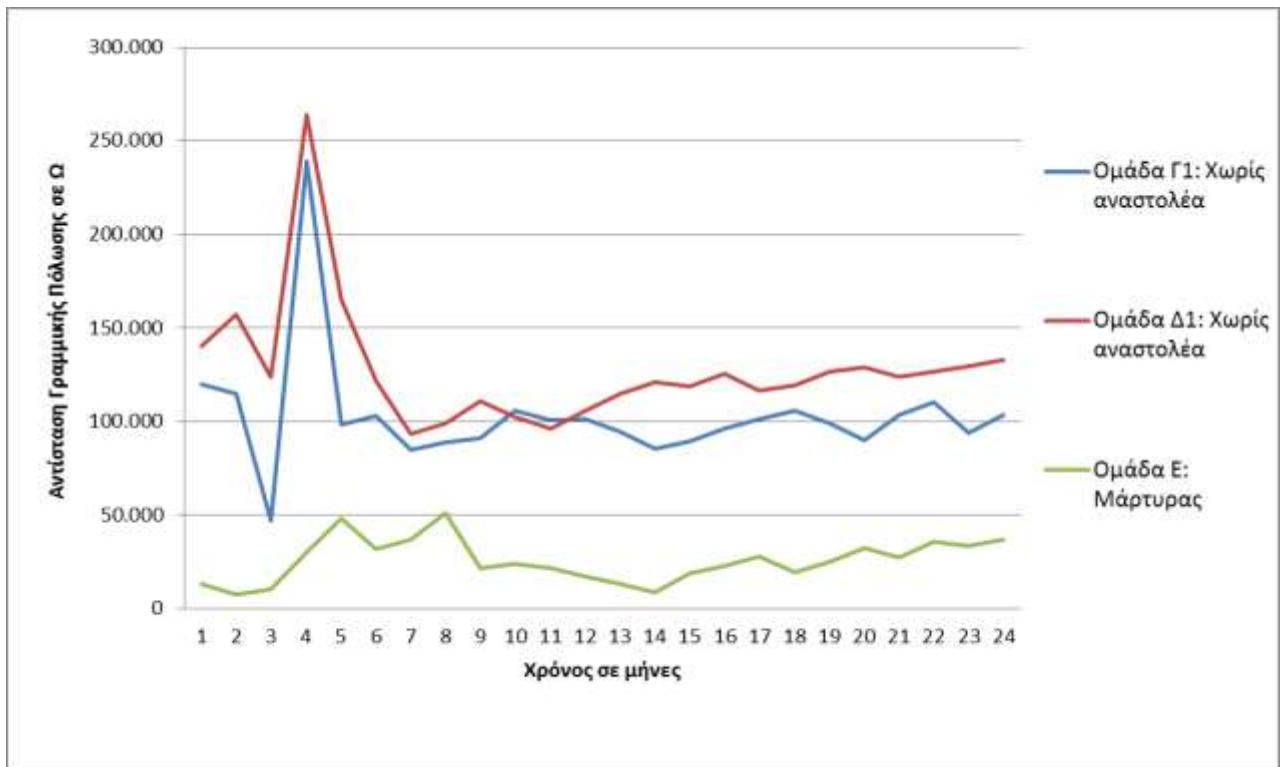
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η αντίσταση γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας A, B και της ομάδας E.



Διάγραμμα 9.16: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Α, Β και της ομάδας Ε.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η ομάδα Β που περιέχει τον αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,4g/100g τσιμέντου έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Α που περιέχει τον αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου και αντίστοιχα η ομάδα Α έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Ε που δεν περιέχει αναστολέα.

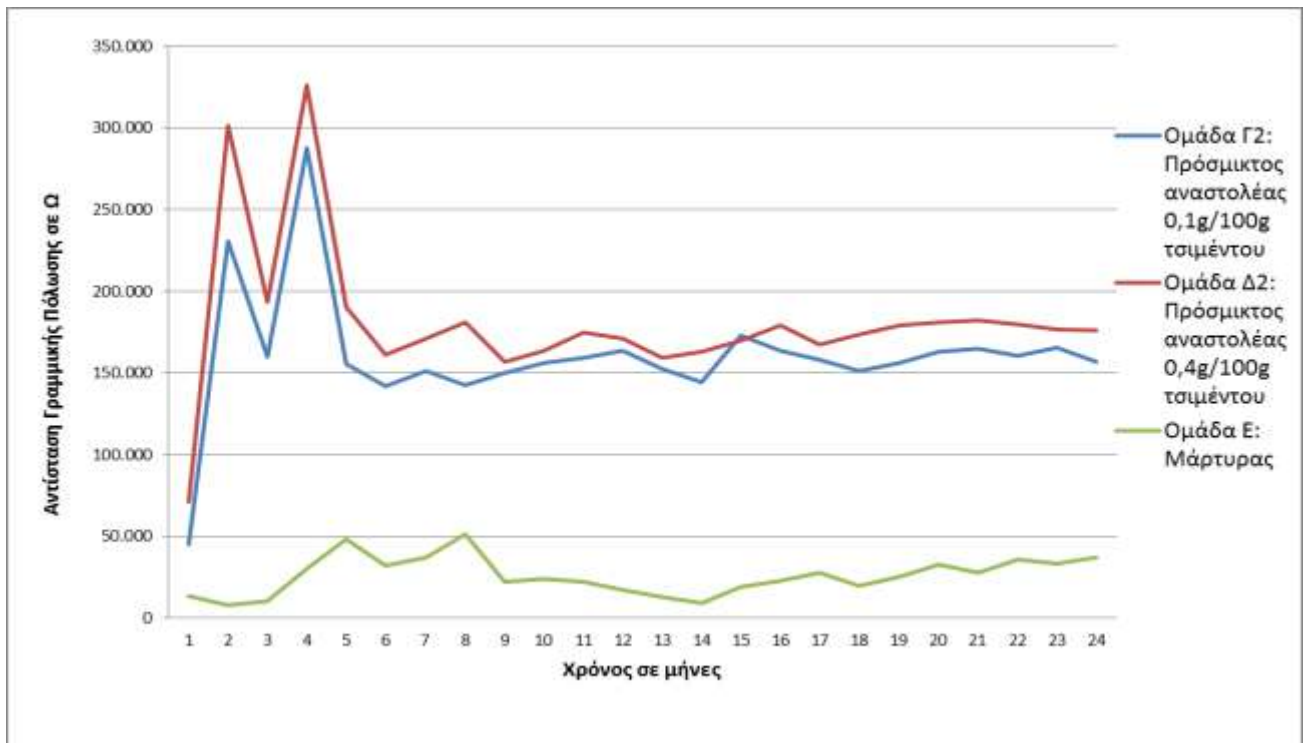
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η αντίσταση γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου της ομάδας Γ₁, Δ₁ και της ομάδας Ε.



Διάγραμμα 9.17: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσε του χρόνου της ομάδας Γ1, Δ1 και της ομάδας Ε.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το τμήμα της ομάδας Δ1 έχει καλύτερη συμπεριφορά από το τμήμα της ομάδας Γ1 και το τμήμα της ομάδας Γ1 έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Ε. Καμία από τις παραπάνω ομάδες δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης, όμως οι ομάδες Γ1 και Δ1 αποτελούν τμήμα δοκιμίου όπου έχει αναστολέα διάβρωσης. Συνεπώς, το παραπάνω αποτέλεσμα οφείλεται στην διάχυση του αναστολέα διάβρωσης από το ένα τμήμα στο άλλο για τις ομάδες Γ και Δ όπου και αντίστοιχα η ομάδα με το μεγαλύτερο ποσοστό αναστολέα διάβρωσης έχει και καλύτερη συμπεριφορά.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η αντίσταση γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσε του χρόνου της ομάδας Γ2, Δ2 και της ομάδας Ε.



Διάγραμμα 9.18: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου της ομάδας Γ2, Δ2 και της ομάδας Ε.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το τμήμα της ομάδας Δ2 που περιέχει τον αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,4g/100g τσιμέντου έχει καλύτερη συμπεριφορά από το τμήμα της ομάδας Γ2 που περιέχει τον αναστολέα σαν πρόσμικτο σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου και αντίστοιχα η ομάδα Γ2 έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Ε που δεν περιέχει αναστολέα.

9.4.2.2 Δοκίμια με ψεκαζόμενο και πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης στα ασβεστολιθικά τσιμέντα – Δοκίμια πίνακα 9.2

Στην περίπτωση αυτή εξετάστηκαν 11 ομάδες: CEM I, LC1, LC2, CEM I + C.I.(additive), LC1 + C.I.(additive), LC2+ C.I.(additive), CEM I + C.I.(sprayed), LC1 + C.I.(sprayed), LC2+ C.I.(sprayed), SR και SR + C.I.(sprayed). Τα δοκίμια των ομάδων CEM I + C.I.(additive), LC1 + C.I.(additive), LC2+ C.I.(additive) περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο ενώ τα δοκίμια των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC1 + C.I.(sprayed), LC2+ C.I.(sprayed) και SR + C.I.(sprayed) περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως ψεκαζόμενο. Τα δοκίμια των ομάδων CEM I, LC1, LC2 και SR δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης και χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρο σύγκρισης με τα δοκίμια με τον αναστολέα διάβρωσης. Παρακάτω θα ακολουθήσουν οι μετρήσεις κάθε ομάδας ως προς την Αντίσταση Γραμμικής Πόλωσης στον οπλισμό.

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της ομάδας CEM1.

Πίνακας 9.51: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας CEM I, (δοκίμια 1, ...,6).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ CEM I						
Χρόνος σε μήνες	1	2	3	4	5	6
1	27.285	29.342	19.928	25.931	26.394	22.921
2	17.655	18.985	12.894	16.779	17.078	14.831
3	38.263	41.146	27.945	36.364	37.013	32.143
4	22.472	24.165	16.413	21.357	21.738	18.878
5	23.990	25.798	17.521	22.799	23.206	20.153
6	23.305	25.061	17.021	22.149	22.544	19.578
7	24.111	25.928	17.610	22.914	23.323	20.255
8	20.473	22.015	14.952	19.456	19.804	17.198
9	21.257	22.859	15.525	20.202	20.563	17.857
10	21.763	23.403	15.895	20.683	21.052	18.282
11	24.887	26.762	18.176	23.652	24.074	20.907
12	26.806	28.826	19.578	25.475	25.930	22.519
13	27.992	30.101	20.444	26.602	27.077	23.515
14	31.149	33.496	22.750	29.603	30.131	26.167
15	30.303	32.587	22.132	28.799	29.313	25.456
16	25.057	26.945	18.300	23.813	24.238	21.049
17	29.530	31.755	21.567	28.064	28.565	24.807
18	55.458	59.637	40.504	52.706	53.646	46.588
19	68.319	73.467	49.897	64.928	66.087	57.392
20	47.905	51.516	34.988	45.528	46.340	40.244
21	56.599	60.865	41.338	53.790	54.750	47.547
22	52.696	56.667	38.487	50.081	50.974	44.268
23	55.091	59.243	40.236	52.357	53.291	46.280
24	57.487	61.819	41.986	54.633	55.609	48.292

Πίνακας 9.52: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας CEM I, (δοκίμια 7, ...,12).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ CEM I						
Χρόνος σε μήνες	7	8	9	10	11	12
1	25.386	19.901	23.765	24.285	26.885	25.437
2	16.426	12.877	15.377	15.714	17.396	16.459
3	35.599	27.907	33.326	34.056	37.702	35.671
4	20.908	16.390	19.572	20.001	22.143	20.950
5	22.320	17.497	20.894	21.352	23.638	22.365
6	21.683	16.998	20.298	20.743	22.964	21.726
7	22.432	17.585	21.000	21.460	23.758	22.478
8	19.047	14.932	17.831	18.222	20.172	19.086
9	19.777	15.504	18.514	18.920	20.946	19.817
10	20.248	15.873	18.955	19.370	21.444	20.289
11	23.154	18.151	21.676	22.151	24.522	23.201
12	24.940	19.551	23.347	23.859	26.413	24.990
13	26.043	20.416	24.380	24.914	27.581	26.095
14	28.980	22.719	27.130	27.724	30.692	29.039
15	28.193	22.102	26.393	26.971	29.859	28.250
16	23.312	18.275	21.823	22.302	24.689	23.359
17	27.474	21.538	25.719	26.283	29.097	27.529
18	51.597	40.449	48.302	49.361	54.645	51.701
19	63.562	49.828	59.503	60.807	67.317	63.690
20	44.570	34.940	41.724	42.638	47.203	44.660
21	52.659	41.281	49.296	50.376	55.770	52.765
22	49.027	38.434	45.896	46.902	51.923	49.126
23	51.256	40.181	47.982	49.034	54.284	51.359
24	53.484	41.928	50.069	51.166	56.644	53.592

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της ομάδας LC1.

Πίνακας 9.53: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC1, (δοκίμια 13, ...,18).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ LC 1						
Χρόνος σε μήνες	13	14	15	16	17	18
1	19.898	21.397	14.532	18.910	19.248	16.715
2	9.718	10.450	7.097	9.236	9.400	8.164
3	20.298	21.827	14.825	19.290	19.635	17.051
4	8.326	8.953	6.081	7.912	8.054	6.994
5	8.892	9.562	6.494	8.450	8.601	7.470
6	12.461	13.400	9.101	11.843	12.054	10.468
7	9.926	10.674	7.249	9.433	9.601	8.338
8	10.205	10.974	7.453	9.698	9.871	8.573
9	9.470	10.183	6.916	9.000	9.160	7.955
10	11.731	12.616	8.568	11.149	11.348	9.855
11	13.578	14.601	9.917	12.904	13.134	11.406
12	14.204	15.274	10.374	13.499	13.740	11.932
13	15.095	16.233	11.025	14.346	14.602	12.681
14	23.178	24.925	16.928	22.028	22.421	19.471
15	17.844	19.189	13.033	16.958	17.261	14.990
16	19.683	21.166	14.376	18.706	19.040	16.535
17	20.913	22.488	15.274	19.875	20.229	17.568
18	37.051	39.843	27.060	35.212	35.840	31.125
19	18.778	20.193	13.715	17.846	18.164	15.775
20	42.413	45.609	30.976	40.308	41.027	35.630
21	42.048	45.217	30.710	39.961	40.674	35.323
22	46.538	50.045	33.989	44.229	45.018	39.095
23	20.844	22.415	15.224	19.810	20.164	17.511
24	32.799	35.271	23.955	31.171	31.727	27.553

Πίνακας 9.54: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC1, (δοκίμια 19, ..., 24).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ LC 1						
Χρόνος σε μήνες	19	20	21	22	23	24
1	18.513	14.513	17.330	17.710	19.606	18.550
2	9.041	7.088	8.464	8.649	9.575	9.059
3	18.885	14.804	17.679	18.066	20.000	18.923
4	7.746	6.072	7.251	7.410	8.204	7.762
5	8.273	6.485	7.744	7.914	8.761	8.289
6	11.594	9.089	10.853	11.091	12.278	11.617
7	9.235	7.239	8.645	8.834	9.780	9.253
8	9.494	7.443	8.888	9.083	10.055	9.513
9	8.810	6.907	8.248	8.428	9.331	8.828
10	10.915	8.556	10.218	10.442	11.560	10.937
11	12.633	9.903	11.826	12.085	13.379	12.658
12	13.215	10.360	12.371	12.642	13.996	13.242
13	14.044	11.010	13.147	13.436	14.874	14.073
14	21.565	16.905	20.187	20.630	22.839	21.608
15	16.602	13.015	15.542	15.882	17.583	16.635
16	18.313	14.356	17.143	17.519	19.395	18.350
17	19.457	15.253	18.214	18.613	20.606	19.496
18	34.471	27.023	32.270	32.977	36.507	34.540
19	17.471	13.696	16.355	16.713	18.503	17.506
20	39.460	30.934	36.940	37.750	41.791	39.539
21	39.121	30.668	36.622	37.425	41.431	39.199
22	43.298	33.943	40.533	41.422	45.856	43.385
23	19.393	15.203	18.155	18.553	20.539	19.432
24	30.516	23.922	28.567	29.193	32.318	30.577

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της ομάδας LC2.

Πίνακας 9.55: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC2, (δοκίμια 25, ...,30).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ LC 2						
Χρόνος σε μήνες	25	26	27	28	29	30
1	23.990	25.798	17.521	22.799	23.206	20.153
2	20.043	21.553	14.638	19.048	19.388	16.837
3	27.634	29.716	20.182	26.262	26.731	23.214
4	15.903	17.101	11.615	15.114	15.383	13.360
5	16.627	17.880	12.144	15.802	16.084	13.968
6	13.861	14.905	10.123	13.173	13.408	11.644
7	19.671	21.153	14.367	18.694	19.028	16.525
8	14.181	15.249	10.357	13.477	13.718	11.913
9	12.856	13.825	9.389	12.218	12.436	10.800
10	16.655	17.910	12.164	15.829	16.111	13.992
11	14.412	15.498	10.526	13.696	13.941	12.107
12	17.321	18.626	12.651	16.461	16.755	14.551
13	16.650	17.905	12.160	15.824	16.106	13.987
14	21.076	22.664	15.393	20.029	20.387	17.705
15	21.860	23.507	15.966	20.775	21.146	18.364
16	19.149	20.592	13.985	18.198	18.523	16.086
17	20.346	21.879	14.859	19.336	19.681	17.092
18	35.608	38.291	26.006	33.841	34.445	29.913
19	37.923	40.781	27.698	36.041	36.685	31.858
20	28.983	31.167	21.168	27.544	28.036	24.347
21	29.093	31.285	21.248	27.649	28.142	24.440
22	37.218	40.023	27.182	35.371	36.002	31.265
23	38.571	41.478	28.171	36.657	37.311	32.402
24	46.920	50.456	34.269	44.592	45.388	39.416

Πίνακας 9.56: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC2, (δοκίμια 31, ...,36).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - ΟΜΑΔΑ LC 2						
Χρόνος σε μήνες	31	32	33	34	35	36
1	22.320	17.497	20.894	21.352	23.638	22.592
2	18.647	14.618	17.456	17.839	19.749	18.875
3	25.710	20.155	24.068	24.595	27.229	26.024
4	14.796	11.599	13.851	14.154	15.670	14.976
5	15.469	12.127	14.482	14.799	16.383	15.658
6	12.896	10.109	12.072	12.337	13.658	13.053
7	18.301	14.347	17.133	17.508	19.382	18.525
8	13.194	10.343	12.351	12.622	13.973	13.355
9	11.961	9.377	11.197	11.443	12.668	12.107
10	15.496	12.148	14.506	14.824	16.411	15.685
11	13.408	10.511	12.552	12.827	14.200	13.572
12	16.115	12.633	15.086	15.417	17.067	16.312
13	15.491	12.144	14.501	14.819	16.406	15.680
14	19.608	15.372	18.356	18.758	20.767	19.848
15	20.338	15.944	19.039	19.457	21.540	20.587
16	17.816	13.966	16.678	17.043	18.868	18.033
17	18.929	14.839	17.720	18.109	20.047	19.160
18	33.129	25.971	31.013	31.693	35.086	33.533
19	35.283	27.660	33.030	33.754	37.368	35.714
20	26.965	21.139	25.243	25.796	28.558	27.294
21	27.068	21.219	25.339	25.894	28.666	27.398
22	34.627	27.145	32.415	33.126	36.672	35.050
23	35.886	28.132	33.594	34.330	38.006	36.324
24	43.654	34.222	40.866	41.762	46.233	44.187

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της ομάδας CEM I + C.I.(additive).

Πίνακας 9.57: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας CEM I + C.I.(additive), (δοκίμια 37, ...,42).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα CEM I + C.I.(additive)						
Χρόνος σε μήνες	37	38	39	40	41	42
1	21.478	20.962	19.825	22.157	21.379	18.790
2	19.335	18.870	17.848	19.946	19.246	16.915
3	25.794	25.174	23.809	26.609	25.676	22.566
4	18.792	18.340	17.346	19.386	18.706	16.440
5	22.227	21.692	20.516	22.929	22.124	19.445
6	20.666	20.169	19.076	21.319	20.571	18.079
7	25.073	24.470	23.144	25.866	24.958	21.935
8	22.092	21.560	20.392	22.790	21.990	19.327
9	26.093	25.465	24.085	26.917	25.972	22.827
10	27.876	27.205	25.731	28.757	27.747	24.387
11	33.172	32.375	30.620	34.221	33.020	29.020
12	42.582	41.558	39.306	43.928	42.386	37.253
13	47.608	46.463	43.944	49.112	47.388	41.649
14	47.532	46.389	43.874	49.034	47.313	41.583
15	57.149	55.774	52.751	58.954	56.885	49.995
16	56.232	54.879	51.905	58.009	55.973	49.193
17	59.748	58.311	55.151	61.636	59.473	52.270
18	41.716	40.712	38.506	43.034	41.523	36.494
19	56.969	55.599	52.585	58.769	56.706	49.838
20	52.287	51.029	48.263	53.939	52.046	45.742
21	73.807	72.032	68.127	76.139	73.467	64.569
22	65.964	64.377	60.888	68.048	65.660	57.707
23	60.130	58.684	55.503	62.030	59.853	52.604
24	62.744	61.235	57.916	64.727	62.455	54.891

Πίνακας 9.58: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας CEM I + C.I.(additive), (δοκίμια 43, ...,48).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα CEM I + C.I.(additive)						
Χρόνος σε μήνες	43	44	45	46	47	48
1	21.003	16.403	19.296	21.502	21.547	22.554
2	18.907	14.766	17.371	19.357	19.398	20.304
3	25.223	19.699	23.174	25.822	25.877	27.086
4	18.376	14.351	16.883	18.813	18.853	19.734
5	21.735	16.974	19.969	22.251	22.298	23.340
6	20.209	15.782	18.567	20.689	20.733	21.701
7	24.518	19.148	22.526	25.101	25.154	26.329
8	21.603	16.871	19.848	22.116	22.163	23.199
9	25.515	19.927	23.442	26.121	26.177	27.400
10	27.259	21.288	25.044	27.906	27.965	29.272
11	32.438	25.333	29.803	33.209	33.279	34.834
12	41.640	32.520	38.257	42.629	42.719	44.716
13	46.554	36.357	42.772	47.660	47.761	49.993
14	46.480	36.300	42.704	47.584	47.685	49.913
15	55.884	43.644	51.343	57.211	57.333	60.011
16	54.987	42.944	50.520	56.293	56.413	59.049
17	58.426	45.629	53.679	59.814	59.941	62.741
18	40.792	31.858	37.478	41.761	41.850	43.805
19	55.708	43.506	51.182	57.031	57.152	59.823
20	51.130	39.931	46.976	52.344	52.455	54.906
21	72.173	56.365	66.310	73.887	74.044	77.504
22	64.504	50.376	59.263	66.036	66.176	69.268
23	58.799	45.921	54.022	60.196	60.324	63.142
24	61.356	47.917	56.371	62.813	62.946	65.888

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της ομάδας LC 1 + C.I.(additive).

Πίνακας 9.59: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 1 + C.I.(additive), (δοκίμια 49, ...,54).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα LC 1 + C.I.(additive)						
Χρόνος σε μήνες	49	50	51	52	53	54
1	37.985	42.655	36.147	35.964	36.658	33.852
2	11.681	13.117	11.116	11.059	11.272	10.410
3	15.728	17.661	14.967	14.891	15.178	14.017
4	10.195	11.448	9.701	9.652	9.838	9.085
5	11.633	13.063	11.070	11.014	11.227	10.367
6	8.887	9.979	8.457	8.414	8.576	7.920
7	11.488	12.901	10.933	10.877	11.087	10.238
8	10.562	11.860	10.051	10.000	10.193	9.413
9	10.588	11.890	10.076	10.025	10.218	9.436
10	11.745	13.188	11.176	11.120	11.334	10.467
11	10.925	12.268	10.397	10.344	10.543	9.736
12	22.651	25.436	21.556	21.446	21.860	20.187
13	20.005	22.464	19.037	18.941	19.306	17.828
14	20.530	23.054	19.537	19.438	19.813	18.296
15	29.588	33.226	28.157	28.014	28.554	26.369
16	14.053	15.781	13.373	13.305	13.562	12.524
17	33.533	37.655	31.910	31.748	32.361	29.884
18	35.505	39.870	33.787	33.616	34.264	31.642
19	37.478	42.085	35.664	35.483	36.168	33.400
20	24.683	27.718	23.489	23.370	23.821	21.997
21	44.510	49.982	42.357	42.141	42.954	39.667
22	25.869	29.050	24.618	24.493	24.965	23.055
23	27.045	30.370	25.737	25.606	26.100	24.103
24	33.877	38.042	32.238	32.075	32.693	30.191

Πίνακας 9.6ο: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 1 + C.I.(additive), (δοκίμια 55, ...,60).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα LC 1 + C.I.(additive)						
Χρόνος σε μήνες	55	56	57	58	59	60
1	34.328	29.238	34.012	33.970	32.400	34.628
2	10.556	8.991	10.459	10.446	9.963	10.648
3	14.214	12.106	14.083	14.066	13.416	14.338
4	9.213	7.847	9.128	9.117	8.696	9.294
5	10.513	8.954	10.416	10.403	9.923	10.605
6	8.031	6.840	7.957	7.948	7.580	8.102
7	10.382	8.843	10.287	10.274	9.799	10.473
8	9.545	8.130	9.457	9.446	9.009	9.629
9	9.569	8.150	9.481	9.469	9.031	9.652
10	10.614	9.040	10.516	10.503	10.018	10.707
11	9.873	8.409	9.782	9.770	9.319	9.960
12	20.471	17.435	20.282	20.257	19.321	20.650
13	18.079	15.398	17.913	17.891	17.064	18.237
14	18.553	15.802	18.383	18.360	17.512	18.716
15	26.740	22.775	26.493	26.461	25.238	26.973
16	12.700	10.817	12.583	12.568	11.987	12.811
17	30.304	25.810	30.025	29.988	28.603	30.569
18	32.087	27.329	31.791	31.752	30.285	32.367
19	33.869	28.847	33.558	33.516	31.968	34.166
20	22.307	18.999	22.101	22.074	21.054	22.502
21	40.224	34.260	39.854	39.805	37.966	40.576
22	23.379	19.912	23.164	23.135	22.066	23.583
23	24.441	20.817	24.217	24.187	23.069	24.655
24	30.615	26.076	30.334	30.296	28.896	30.883

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της ομάδας LC 2 + C.I.(additive).

Πίνακας 9.61: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 2 + C.I.(additive), (δοκίμια 61, ...,66).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα LC 2 + C.I.(additive)						
Χρόνος σε μήνες	61	62	63	64	65	66
1	19.979	19.103	18.314	20.016	18.977	18.936
2	14.974	14.317	13.726	15.001	14.222	14.192
3	32.107	30.700	29.432	32.166	30.496	30.431
4	15.329	14.657	14.051	15.357	14.560	14.529
5	27.430	26.228	25.144	27.480	26.054	25.999
6	12.541	11.992	11.496	12.564	11.912	11.887
7	15.737	15.047	14.426	15.766	14.948	14.916
8	12.738	12.180	11.677	12.761	12.099	12.073
9	24.310	23.244	22.284	24.354	23.090	23.041
10	20.060	19.181	18.388	20.096	19.053	19.013
11	20.620	19.717	18.902	20.658	19.586	19.544
12	26.775	25.601	24.544	26.824	25.432	25.377
13	24.787	23.701	22.722	24.832	23.544	23.493
14	28.471	27.224	26.099	28.523	27.043	26.985
15	63.045	60.282	57.792	63.161	59.883	59.755
16	41.766	39.936	38.286	41.842	39.671	39.586
17	37.948	36.285	34.786	38.017	36.044	35.967
18	23.834	22.789	21.848	23.878	22.638	22.590
19	51.147	48.906	46.886	51.241	48.582	48.478
20	26.482	25.322	24.275	26.531	25.154	25.100
21	37.277	35.643	34.171	37.345	35.407	35.332
22	39.052	37.341	35.798	39.124	37.093	37.014
23	25.580	24.459	23.449	25.627	24.297	24.245
24	36.403	34.808	33.370	36.469	34.577	34.503

Πίνακας 9.62: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 2 + C.I.(additive), (δοκίμια 67, ...,72).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα LC 2 + C.I.(additive)						
Χρόνος σε μήνες	67	68	69	70	71	72
1	18.975	16.123	17.197	19.479	18.968	18.816
2	14.221	12.084	12.889	14.599	14.216	14.102
3	30.493	25.910	27.637	31.303	30.482	30.238
4	14.558	12.370	13.194	14.945	14.553	14.436
5	26.051	22.136	23.611	26.743	26.042	25.833
6	11.911	10.121	10.795	12.227	11.907	11.811
7	14.946	12.700	13.546	15.343	14.941	14.821
8	12.098	10.280	10.965	12.419	12.093	11.996
9	23.088	19.618	20.925	23.701	23.079	22.894
10	19.051	16.188	17.267	19.558	19.045	18.892
11	19.584	16.641	17.749	20.104	19.577	19.420
12	25.429	21.607	23.047	26.105	25.420	25.216
13	23.541	20.003	21.336	24.167	23.533	23.344
14	27.040	22.976	24.507	27.759	27.030	26.814
15	59.876	50.877	54.268	61.467	59.855	59.374
16	39.666	33.705	35.951	40.721	39.652	39.334
17	36.040	30.624	32.665	36.998	36.027	35.738
18	22.636	19.234	20.516	23.237	22.628	22.446
19	48.576	41.276	44.027	49.867	48.559	48.170
20	25.151	21.371	22.795	25.819	25.142	24.940
21	35.403	30.083	32.087	36.344	35.390	35.107
22	37.089	31.515	33.615	38.075	37.076	36.778
23	24.294	20.643	22.019	24.940	24.286	24.091
24	34.573	29.377	31.335	35.492	34.561	34.283

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της ομάδας CEM I + C.I.(sprayed).

Πίνακας 9.63: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας CEM I + C.I.(sprayed), (δοκίμια 73, ...,78).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα CEM I + C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	73	74	75	76	77	78
1	3.417	5.450	2.987	3.236	2.400	2.164
2	19.260	30.718	16.838	18.237	13.529	12.195
3	25.693	40.979	22.463	24.328	18.049	16.268
4	18.719	29.855	16.365	17.724	13.149	11.852
5	22.140	35.311	19.356	20.963	15.552	14.018
6	17.585	15.832	17.997	19.492	15.460	16.034
7	29.475	39.834	31.835	29.648	27.544	25.814
8	52.005	45.097	49.239	60.836	55.458	53.933
9	15.990	14.453	13.723	14.610	12.257	16.457
10	21.810	24.785	19.068	20.651	19.321	18.810
11	22.895	36.517	20.017	21.679	16.083	14.497
12	42.416	67.650	47.083	40.162	39.796	46.857
13	47.421	75.634	41.459	44.902	33.312	40.026
14	42.346	35.514	41.393	44.831	33.259	29.978
15	56.925	90.791	69.768	63.901	59.988	66.044
16	56.011	49.335	48.969	43.036	39.346	35.465
17	71.892	114.664	62.854	68.073	50.502	45.521
18	37.316	59.516	32.624	35.333	26.213	23.628
19	72.782	116.082	63.631	68.915	51.127	46.084
20	54.894	87.553	47.993	51.978	38.562	34.758
21	60.072	95.811	52.519	56.881	42.199	38.036
22	60.384	96.309	52.792	57.176	42.418	38.234
23	68.692	109.560	60.056	65.043	48.254	43.495
24	66.707	106.394	58.320	63.163	46.860	42.238

Πίνακας 9.64: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας CEM I + C.I.(sprayed), (δοκίμια 79, ...,84).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα CEM I + C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	79	80	81	82	83	84
1	2.164	4.041	3.088	4.464	2.649	3.063
2	12.195	22.778	17.404	25.160	14.933	17.261
3	16.268	30.387	23.217	33.565	19.921	23.027
4	11.852	22.138	16.915	24.453	14.513	16.776
5	14.018	26.184	20.006	28.922	17.166	19.842
6	16.034	15.346	18.601	16.891	15.960	15.449
7	25.814	29.538	30.568	32.626	29.364	30.384
8	53.933	50.025	49.885	48.747	47.062	49.722
9	16.457	13.738	13.486	13.953	12.151	13.294
10	18.810	25.794	19.708	28.491	29.910	24.547
11	14.497	27.078	20.689	29.909	17.752	20.520
12	46.857	50.164	48.328	55.410	52.886	48.015
13	40.026	56.084	42.851	61.949	46.768	42.501
14	29.978	35.995	42.783	31.850	36.709	42.433
15	66.044	67.324	59.439	74.364	64.136	69.018
16	35.465	56.244	50.614	43.171	43.428	40.200
17	45.521	85.026	64.964	93.917	55.741	64.433
18	23.628	44.133	33.720	48.747	28.932	33.444
19	46.084	86.078	65.768	95.079	56.430	65.230
20	34.758	64.923	49.604	71.712	42.562	49.199
21	38.036	71.046	54.283	78.475	46.576	53.839
22	38.234	71.415	54.565	78.883	46.818	54.118
23	43.495	81.241	62.072	89.736	53.260	61.565
24	42.238	78.893	60.278	87.143	51.721	59.786

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της ομάδας LC 1 + C.I.(sprayed).

Πίνακας 9.65: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 1 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 85, ...,90).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα LC 1 + C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	85	86	87	88	89	90
1	38.263	36.146	27.945	29.364	37.013	32.143
2	19.260	30.718	16.838	18.237	13.529	12.195
3	25.693	40.979	22.463	24.328	18.049	16.268
4	18.719	29.855	16.365	17.724	13.149	11.852
5	22.140	35.311	19.356	20.963	15.552	14.018
6	20.585	32.832	17.997	19.492	14.460	13.034
7	24.975	39.834	21.835	23.648	17.544	15.814
8	22.005	35.097	19.239	20.836	15.458	13.933
9	25.990	41.453	22.723	24.610	18.257	16.457
10	21.810	34.785	19.068	20.651	15.321	13.810
11	22.895	36.517	20.017	21.679	16.083	14.497
12	42.416	67.650	37.083	40.162	29.796	26.857
13	47.421	75.634	41.459	44.902	33.312	30.026
14	47.346	75.514	41.393	44.831	33.259	29.978
15	56.925	90.791	49.768	53.901	39.988	36.044
16	56.011	89.335	48.969	53.036	39.346	35.465
17	71.892	114.664	62.854	68.073	50.502	45.521
18	37.316	59.516	32.624	35.333	26.213	23.628
19	72.782	116.082	63.631	68.915	51.127	46.084
20	54.894	87.553	47.993	51.978	38.562	34.758
21	60.072	95.811	52.519	56.881	42.199	38.036
22	60.384	96.309	52.792	57.176	42.418	38.234
23	68.692	109.560	60.056	65.043	48.254	43.495
24	66.707	106.394	58.320	63.163	46.860	42.238

Πίνακας 9.66: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 1 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 91, ...,96).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα LC 1 + C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	91	92	93	94	95	96
1	30.599	27.907	33.326	34.056	32.702	34.878
2	22.778	17.404	25.160	14.933	17.261	13.952
3	30.387	23.217	33.565	19.921	23.027	18.613
4	22.138	16.915	24.453	14.513	16.776	13.560
5	26.184	20.006	28.922	17.166	19.842	16.038
6	24.346	18.601	26.891	15.960	18.449	14.912
7	29.538	22.568	32.626	19.364	22.384	18.093
8	26.025	19.885	28.747	17.062	19.722	15.941
9	30.738	23.486	33.953	20.151	23.294	18.828
10	25.794	19.708	28.491	16.910	19.547	15.800
11	27.078	20.689	29.909	17.752	20.520	16.586
12	50.164	38.328	55.410	32.886	38.015	30.727
13	56.084	42.851	61.949	36.768	42.501	34.353
14	55.995	42.783	61.850	36.709	42.433	34.298
15	67.324	51.439	74.364	44.136	51.018	41.237
16	66.244	50.614	73.171	43.428	50.200	40.576
17	85.026	64.964	93.917	55.741	64.433	52.081
18	44.133	33.720	48.747	28.932	33.444	27.032
19	86.078	65.768	95.079	56.430	65.230	52.725
20	64.923	49.604	71.712	42.562	49.199	39.767
21	71.046	54.283	78.475	46.576	53.839	43.517
22	71.415	54.565	78.883	46.818	54.118	43.743
23	81.241	62.072	89.736	53.260	61.565	49.762
24	78.893	60.278	87.143	51.721	59.786	48.324

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της ομάδας LC 2+ C.I.(sprayed).

Πίνακας 9.67: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 2 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 97, ...,102).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα LC 2+ C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	97	98	99	100	101	102
1	18.946	17.497	15.932	17.910	18.764	17.963
2	13.165	12.159	11.071	12.446	13.039	12.483
3	11.427	10.553	9.609	10.802	11.317	10.834
4	8.866	8.188	7.456	8.381	8.780	8.406
5	35.568	32.848	29.911	33.624	35.226	33.724
6	16.232	14.991	13.650	15.345	16.076	15.390
7	10.191	9.412	8.570	9.634	10.093	9.663
8	12.785	11.807	10.751	12.086	12.662	12.122
9	24.398	22.533	20.518	23.065	24.164	23.133
10	20.133	18.593	16.931	19.032	19.939	19.089
11	20.695	19.113	17.404	19.564	20.497	19.622
12	26.872	24.818	22.598	25.404	26.614	25.479
13	24.877	22.975	20.921	23.518	24.638	23.587
14	44.053	40.685	37.046	41.645	43.629	41.768
15	29.716	27.444	24.989	28.091	29.430	28.175
16	55.923	51.647	47.029	52.866	55.386	53.023
17	42.654	39.392	35.869	40.322	42.244	40.442
18	22.492	20.772	18.915	21.263	22.276	21.326
19	63.666	58.798	53.540	60.186	63.054	60.365
20	27.271	25.186	22.934	25.781	27.009	25.857
21	33.684	31.109	28.327	31.843	33.360	31.938
22	37.289	34.438	31.358	35.251	36.931	35.356
23	28.740	26.543	24.169	27.169	28.464	27.250
24	31.894	29.456	26.821	30.151	31.588	30.241

Πίνακας 9.68: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας LC 2 + C.I.(sprayed), (δοκίμια 103, ...,108).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα LC 2+ C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	103	104	105	106	107	108
1	17.966	15.913	17.930	18.110	18.506	17.042
2	12.484	11.058	12.460	12.585	12.860	11.842
3	10.836	9.597	10.814	10.923	11.162	10.278
4	8.407	7.446	8.390	8.475	8.660	7.975
5	33.728	29.873	33.661	33.999	34.742	31.993
6	15.392	13.633	15.362	15.516	15.855	14.600
7	9.664	8.560	9.645	9.742	9.955	9.167
8	12.123	10.738	12.099	12.221	12.488	11.500
9	23.136	20.492	23.090	23.322	23.832	21.946
10	19.091	16.910	19.054	19.245	19.666	18.109
11	19.625	17.382	19.586	19.782	20.215	18.615
12	25.482	22.570	25.432	25.687	26.249	24.171
13	23.590	20.894	23.544	23.780	24.300	22.377
14	41.773	37.000	41.691	42.109	43.030	39.625
15	28.178	24.958	28.123	28.405	29.026	26.729
16	53.030	46.970	52.926	53.456	54.625	50.302
17	40.447	35.825	40.367	40.772	41.664	38.366
18	21.328	18.891	21.286	21.500	21.970	20.231
19	60.372	53.473	60.253	60.858	62.188	57.267
20	25.860	22.905	25.810	26.068	26.639	24.530
21	31.941	28.291	31.879	32.198	32.902	30.299
22	35.360	31.319	35.290	35.644	36.424	33.541
23	27.253	24.139	27.199	27.472	28.073	25.851
24	30.244	26.788	30.185	30.487	31.154	28.689

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της ομάδας SR.

Πίνακας 9.69: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας SR, (δοκίμια 109, ...,114).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα SR						
Χρόνος σε μήνες	109	110	111	112	113	114
1	16.887	17.880	14.568	17.802	18.219	15.935
2	2.418	2.560	2.086	2.549	2.608	2.281
3	4.865	5.151	4.197	5.129	5.249	4.591
4	6.967	7.377	6.010	7.345	7.517	6.575
5	12.882	13.640	11.113	13.580	13.898	12.156
6	8.946	9.472	7.718	9.431	9.652	8.442
7	8.583	9.088	7.405	9.048	9.261	8.100
8	7.711	8.165	6.652	8.129	8.320	7.277
9	8.691	9.202	7.497	9.162	9.377	8.201
10	14.187	15.021	12.238	14.955	15.306	13.387
11	9.948	10.533	8.582	10.487	10.733	9.387
12	15.781	16.710	13.614	16.637	17.027	14.892
13	14.496	15.348	12.505	15.281	15.640	13.679
14	18.871	19.981	16.279	19.893	20.360	17.808
15	15.050	15.935	12.983	15.865	16.237	14.202
16	20.443	21.646	17.636	21.551	22.056	19.291
17	17.943	18.998	15.479	18.915	19.359	16.932
18	22.716	24.053	19.597	23.947	24.509	21.437
19	20.748	21.968	17.899	21.872	22.385	19.579
20	21.747	23.027	18.761	22.926	23.463	20.522
21	24.161	25.582	20.843	25.470	26.067	22.800
22	27.571	29.192	23.784	29.065	29.746	26.017
23	17.014	18.015	14.677	17.936	18.356	16.055
24	38.475	40.738	33.191	40.560	41.510	36.307

Πίνακας 9.70: Δυναμικό Διάβρωσης της ομάδας SR, (δοκίμια 115, ...,120).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα SR						
Χρόνος σε μήνες	115	116	117	118	119	120
1	17.882	16.127	14.482	15.732	16.278	18.795
2	2.560	2.309	2.073	2.252	2.331	2.691
3	5.152	4.646	4.172	4.533	4.690	5.415
4	7.378	6.654	5.975	6.491	6.716	7.755
5	13.641	12.302	11.047	12.001	12.418	14.338
6	9.474	8.544	7.672	8.335	8.624	9.957
7	9.089	8.197	7.361	7.997	8.274	9.553
8	8.166	7.364	6.613	7.184	7.433	8.583
9	9.203	8.300	7.453	8.097	8.378	9.673
10	15.023	13.548	12.166	13.217	13.675	15.790
11	10.534	9.500	8.531	9.268	9.589	11.072
12	16.712	15.071	13.534	14.703	15.213	17.565
13	15.350	13.844	12.431	13.505	13.973	16.134
14	19.983	18.022	16.183	17.581	18.191	21.003
15	15.937	14.373	12.906	14.021	14.507	16.750
16	21.648	19.523	17.531	19.046	19.706	22.753
17	19.001	17.136	15.387	16.716	17.296	19.971
18	24.056	21.694	19.481	21.163	21.898	25.284
19	21.971	19.815	17.793	19.330	20.000	23.093
20	23.030	20.769	18.650	20.261	20.964	24.205
21	25.585	23.074	20.720	22.509	23.290	26.891
22	29.196	26.330	23.644	25.686	26.577	30.686
23	18.017	16.248	14.591	15.851	16.401	18.937
24	40.743	36.744	32.995	35.845	37.088	42.823

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μετρήσεις της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό της ομάδας SR + C.I.(sprayed).

Πίνακας 9.71: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας SR + C.I.(sprayed), (δοκίμια 121, ...,126).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα SR + C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	121	122	123	124	125	126
1	18.687	19.785	18.165	18.073	17.941	17.025
2	2.769	2.931	2.691	2.678	2.658	2.522
3	5.364	5.679	5.214	5.188	5.150	4.887
4	7.051	7.465	6.854	6.819	6.770	6.424
5	11.132	11.785	10.820	10.765	10.687	10.141
6	9.606	10.170	9.337	9.290	9.222	8.751
7	9.219	9.761	8.961	8.916	8.851	8.399
8	9.478	10.035	9.213	9.167	9.100	8.635
9	8.052	8.525	7.826	7.787	7.730	7.335
10	12.934	13.694	12.572	12.508	12.417	11.783
11	11.927	12.628	11.594	11.535	11.451	10.866
12	13.961	14.781	13.570	13.501	13.403	12.719
13	16.773	17.758	16.304	16.221	16.103	15.281
14	21.460	22.721	20.860	20.755	20.604	19.551
15	13.421	14.209	13.046	12.980	12.885	12.227
16	22.120	23.419	21.501	21.392	21.237	20.152
17	22.600	23.927	21.968	21.857	21.698	20.589
18	23.142	24.502	22.495	22.381	22.218	21.083
19	18.361	19.439	17.847	17.757	17.628	16.728
20	20.703	21.919	20.124	20.022	19.876	18.861
21	27.975	29.619	27.193	27.055	26.859	25.487
22	33.394	35.356	32.460	32.296	32.061	30.423
23	21.720	22.996	21.113	21.006	20.853	19.788
24	22.686	24.019	22.052	21.940	21.781	20.668

Πίνακας 9.72: Μέτρηση αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) της ομάδας SR + C.I.(sprayed), (δοκίμια 127, ...,132).

Μέτρηση Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) - Ομάδα SR + C.I.(sprayed)						
Χρόνος σε μήνες	127	128	129	130	131	132
1	16.559	18.571	19.524	17.277	19.307	18.423
2	2.453	2.751	2.893	2.560	2.860	2.730
3	4.753	5.331	5.604	4.959	5.542	5.288
4	6.248	7.007	7.367	6.519	7.285	6.951
5	9.863	11.062	11.630	10.292	11.501	10.974
6	8.512	9.546	10.036	8.881	9.924	9.470
7	8.169	9.162	9.632	8.524	9.525	9.089
8	8.399	9.419	9.903	8.763	9.793	9.344
9	7.134	8.002	8.412	7.444	8.319	7.938
10	11.460	12.853	13.513	11.958	13.363	12.751
11	10.569	11.853	12.462	11.027	12.323	11.759
12	12.370	13.874	14.586	12.907	14.423	13.763
13	14.862	16.668	17.524	15.507	17.329	16.536
14	19.016	21.327	22.421	19.841	22.172	21.157
15	11.892	13.338	14.022	12.408	13.866	13.231
16	19.600	21.982	23.110	20.451	22.853	21.807
17	20.025	22.459	23.612	20.894	23.349	22.280
18	20.506	22.998	24.179	21.396	23.910	22.815
19	16.269	18.247	19.183	16.976	18.970	18.101
20	18.345	20.574	21.630	19.141	21.389	20.410
21	24.789	27.801	29.228	25.865	28.903	27.580
22	29.590	33.186	34.889	30.874	34.501	32.922
23	19.246	21.585	22.693	20.081	22.441	21.413
24	20.102	22.545	23.702	20.974	23.438	22.366

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μέσοι όροι των μετρήσεων της αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω στον οπλισμό όλων των ομάδων.

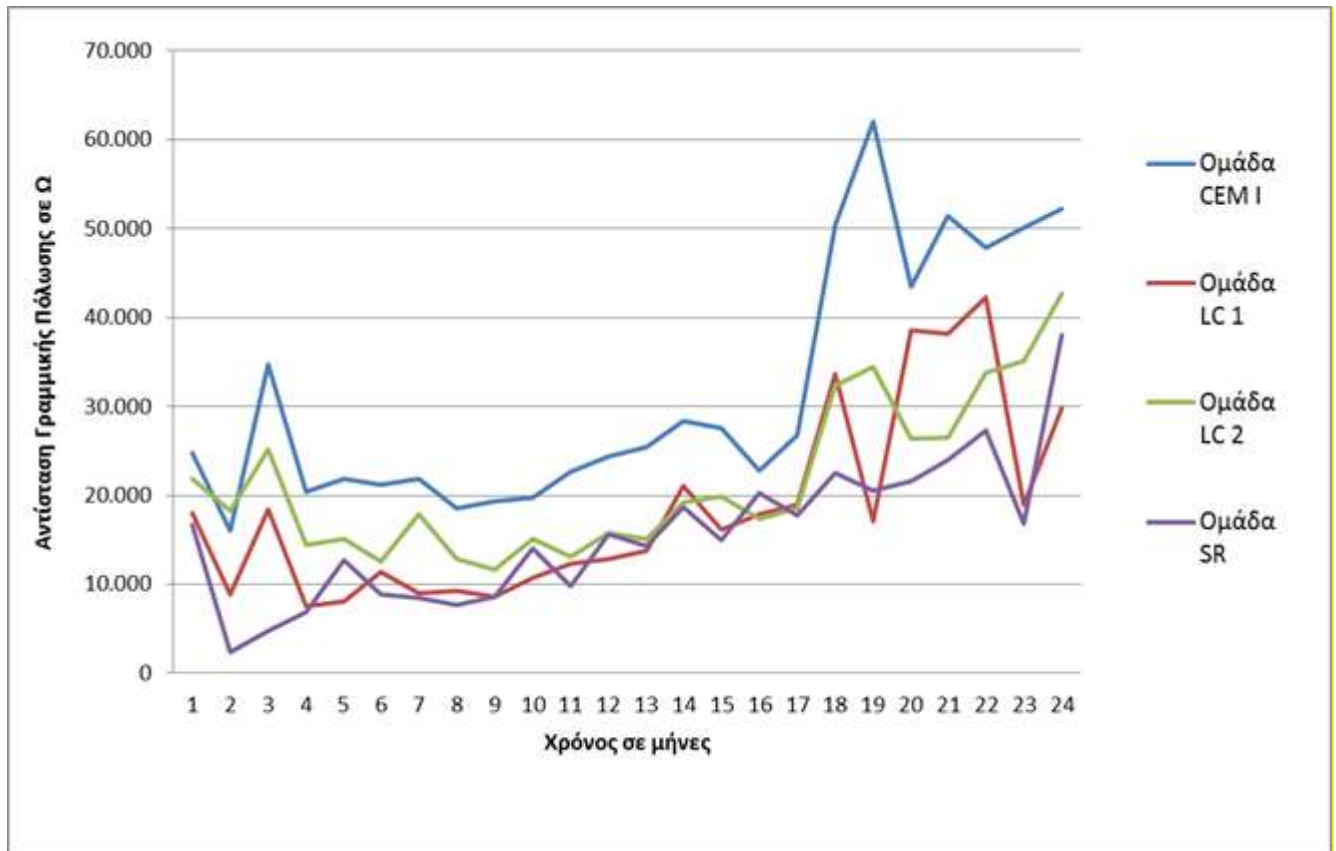
Πίνακας 9.73: Μέσοι όροι αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) των ομάδων CEM I, LC 1, LC2, CEM I + C.I.(additive), LC 1 + C.I.(additive) και LC2 + C.I.(additive) .

Μέσοι Όροι Μέτρησης Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό)						
Χρόνος σε μήνες	Ομάδα CEM I	Ομάδα LC 1	Ομάδα LC 2	Ομάδα CEM I + C.I.(additive)	Ομάδα LC 1 + C.I.(additive)	Ομάδα LC 2 + C.I.(additive)
1	24.788	18.077	21.814	20.575	35.153	18.740
2	16.039	8.829	18.224	18.522	10.810	14.045
3	34.761	18.440	25.127	24.709	14.555	30.116
4	20.416	7.564	14.460	18.002	9.435	14.378
5	21.795	8.078	15.119	21.292	10.766	25.729
6	21.172	11.321	12.603	19.797	8.224	11.764
7	21.904	9.017	17.886	24.019	10.632	14.761
8	18.599	9.271	12.894	21.163	9.775	11.948
9	19.312	8.603	11.690	24.995	9.799	22.802
10	19.772	10.658	15.144	26.703	10.869	18.816
11	22.609	12.335	13.104	31.777	10.111	19.342
12	24.353	12.904	15.750	40.791	20.963	25.115
13	25.430	13.714	15.139	45.605	18.514	23.250
14	28.298	21.057	19.163	45.533	18.999	26.706
15	27.530	16.211	19.877	54.745	27.382	59.136
16	22.764	17.882	17.412	53.866	13.005	39.176
17	26.827	18.999	18.500	57.235	31.033	35.595
18	50.383	33.660	32.377	39.961	32.858	22.356
19	62.066	17.059	34.483	54.572	34.683	47.976
20	43.521	38.531	26.353	50.087	22.843	24.840
21	51.420	38.200	26.453	70.702	41.191	34.966
22	47.874	42.279	33.841	63.189	23.941	36.631
23	50.050	18.937	35.072	57.601	25.029	23.994
24	52.226	29.797	42.664	60.105	31.351	34.146

Πίνακας 9.74: Μέσοι όροι αντίστασης γραμμικής πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό) των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC 1 + C.I.(sprayed), LC2 + C.I.(sprayed), SR και SR + C.I.(sprayed) .

Μέσοι Όροι Μέτρησης Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω (στον οπλισμό)					
Χρόνος σε μήνες	Ομάδα CEM I + C.I. (sprayed)	Ομάδα LC 1 + C.I.(sprayed)	Ομάδα LC 2 + C.I.(sprayed)	Ομάδα SR	Ομάδα SR + C.I.(sprayed)
1	3.286	32.862	17.707	16.716	18.278
2	18.522	18.522	12.304	2.393	2.708
3	24.709	24.709	10.680	4.816	5.247
4	18.002	18.002	8.286	6.897	6.897
5	21.292	21.292	33.241	12.751	10.888
6	16.939	19.797	15.170	8.856	9.396
7	30.425	24.019	9.525	8.496	9.017
8	50.393	21.163	10.948	7.633	9.271
9	14.047	24.995	20.802	8.603	7.875
10	23.495	20.975	17.816	14.043	12.651
11	22.018	22.018	17.342	9.847	11.666
12	49.374	40.791	23.115	15.621	13.655
13	47.876	45.605	20.250	14.349	16.405
14	37.621	45.533	41.171	18.680	20.990
15	67.307	54.745	27.772	14.897	13.127
16	45.954	53.866	52.265	20.236	21.635
17	69.139	69.139	39.864	17.761	22.105
18	35.887	35.887	21.021	22.486	22.635
19	69.994	69.994	59.502	20.538	17.959
20	52.792	52.792	25.488	21.527	20.250
21	57.771	57.771	31.481	23.916	27.363
22	58.071	58.071	34.850	27.291	32.663
23	66.061	66.061	26.860	16.841	21.245
24	64.152	64.152	29.808	38.085	22.189

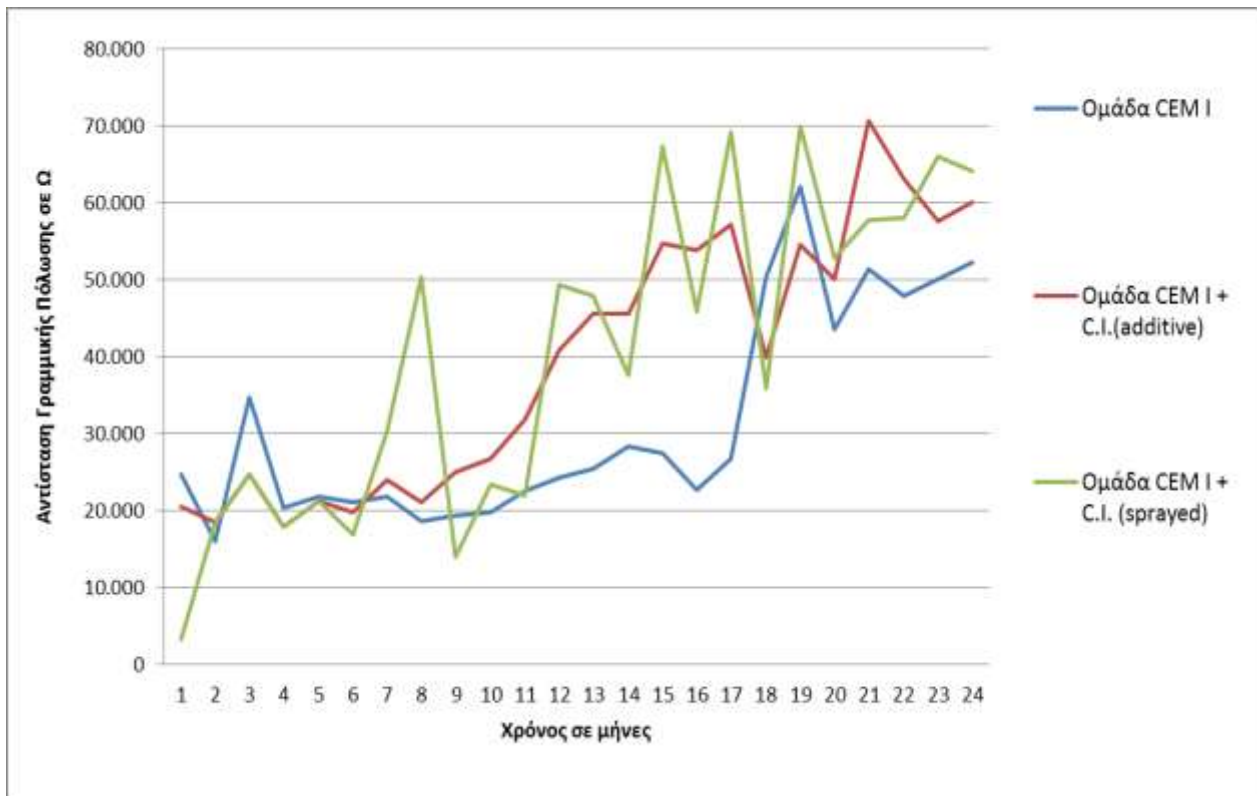
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η Αντίσταση Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου των ομάδων CEM I, LC1, LC2 και SR.



Διάγραμμα 9.19: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου των ομάδων CEM I, LC1, LC2 και SR.

Στο παραπάνω διάγραμμα όλες οι ομάδες δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης. Η ομάδα CEM I έχει καλύτερη συμπεριφορά από τις υπόλοιπες ομάδες, η ομάδα SR παρατηρείται να έχει την χειρότερη συμπεριφορά και οι ομάδες LC1 και LC2 έχουν παρόμοια συμπεριφορά και βρίσκονται ενδιάμεσα στις άλλες δύο ομάδες.

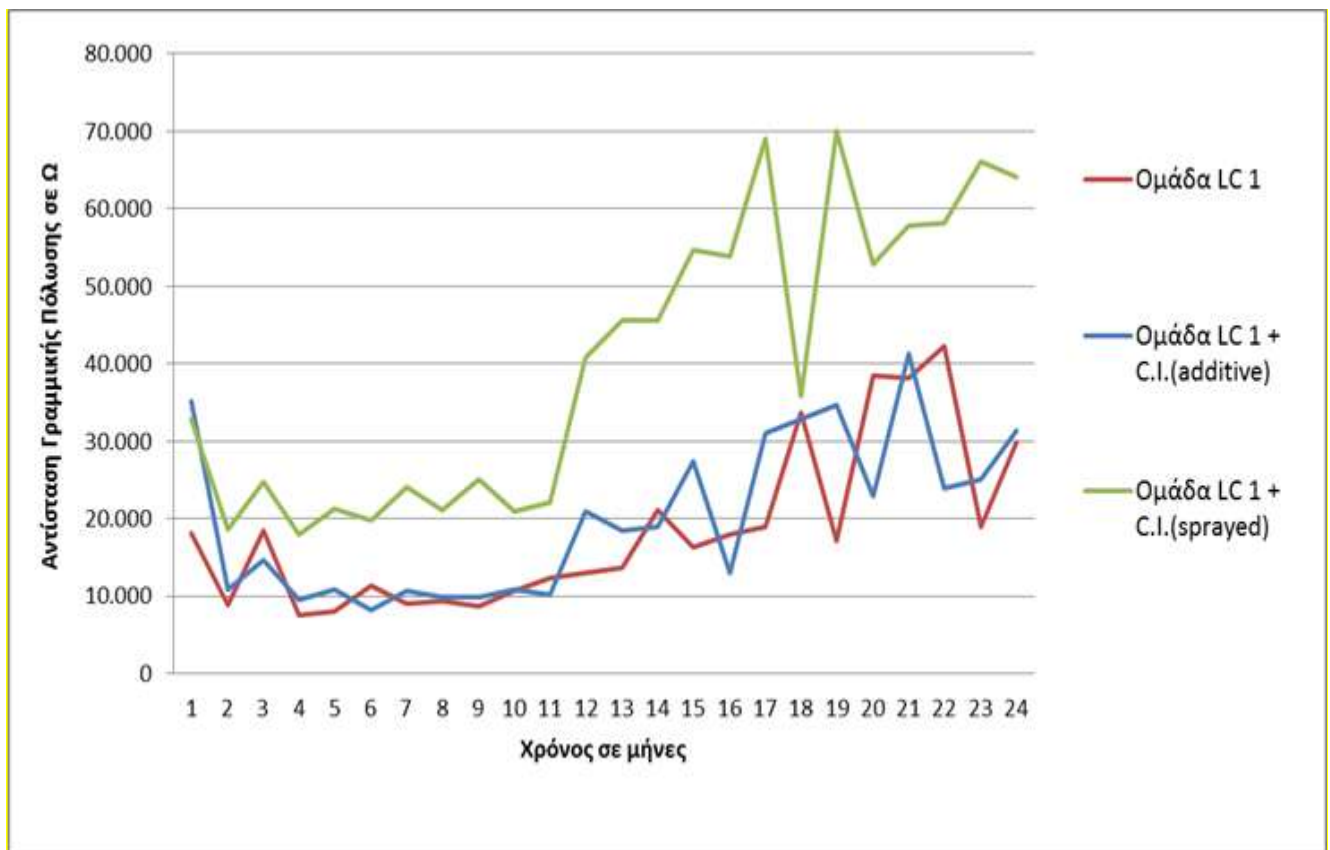
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η Αντίσταση Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου των ομάδων CEM I, CEM I + C.I. (additive) και CEM I + C.I. (sprayed).



Διάγραμμα 9.20: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσε του χρόνου των ομάδων CEM I, CEM I + C.I. (additive) και CEM I + C.I. (sprayed).

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι οι ομάδες CEM I + C.I.(additive) και CEM I + C.I. (sprayed) που περιέχουν τον αναστολέα ως πρόσμικτο και ως ψεκαζόμενο, αντίστοιχα έχουν καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα CEM I που δεν περιέχει αναστολέα. Τους πρώτους μήνες παρατηρείται ότι δεν έχει αρχίσει η δράση του αναστολέα διάβρωσης, μετά τον 6^ο μήνα αρχίζει ο αναστολέας να προστατεύει μέχρι έναν βαθμό τον οπλισμό που βρίσκεται εγκιβωτισμένος σε κονίαμα.

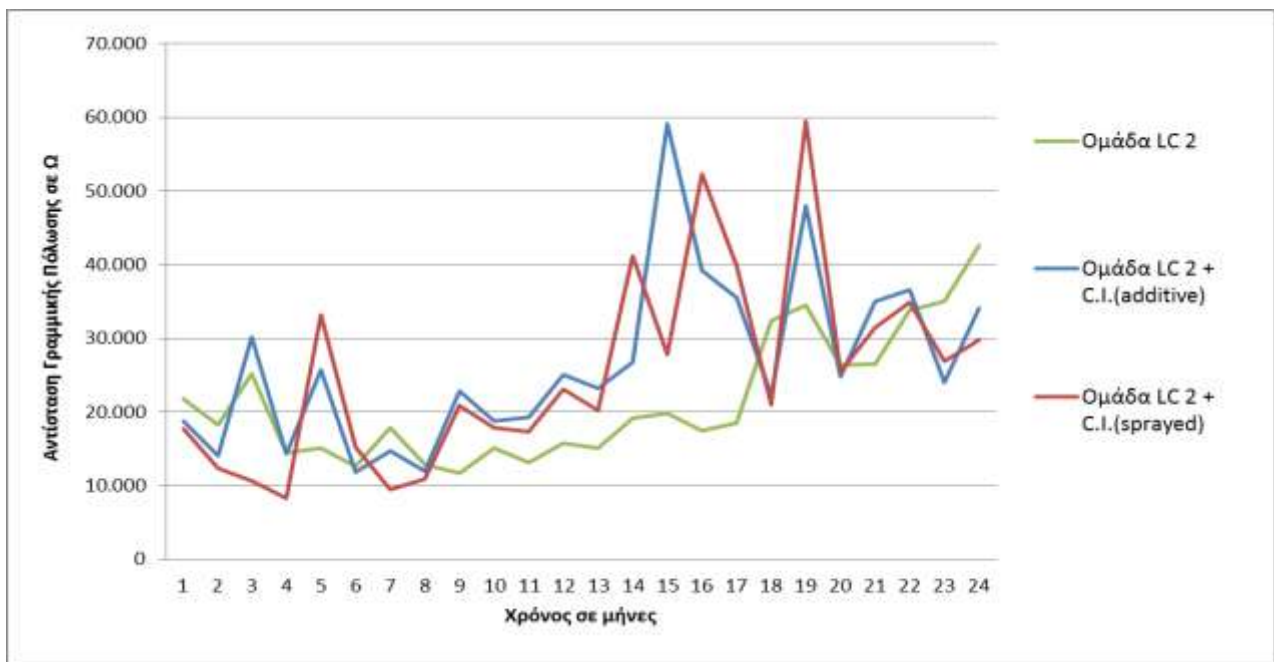
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η Αντίσταση Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσε του χρόνου των ομάδων LC1, LC1 + C.I. (additive) και LC1 + C.I. (sprayed).



Διάγραμμα 9.21: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσε του χρόνου των ομάδων LC₁, LC₁ + C.I. (additive) και LC₁ + C.I. (sprayed).

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι οι ομάδες LC 1 και LC 1 + C.I.(additive) έχουν παρόμοια συμπεριφορά ενώ η ομάδα και LC₁ + C.I. (sprayed) έχει την καλύτερη συμπεριφορά από τις άλλες ομάδες.

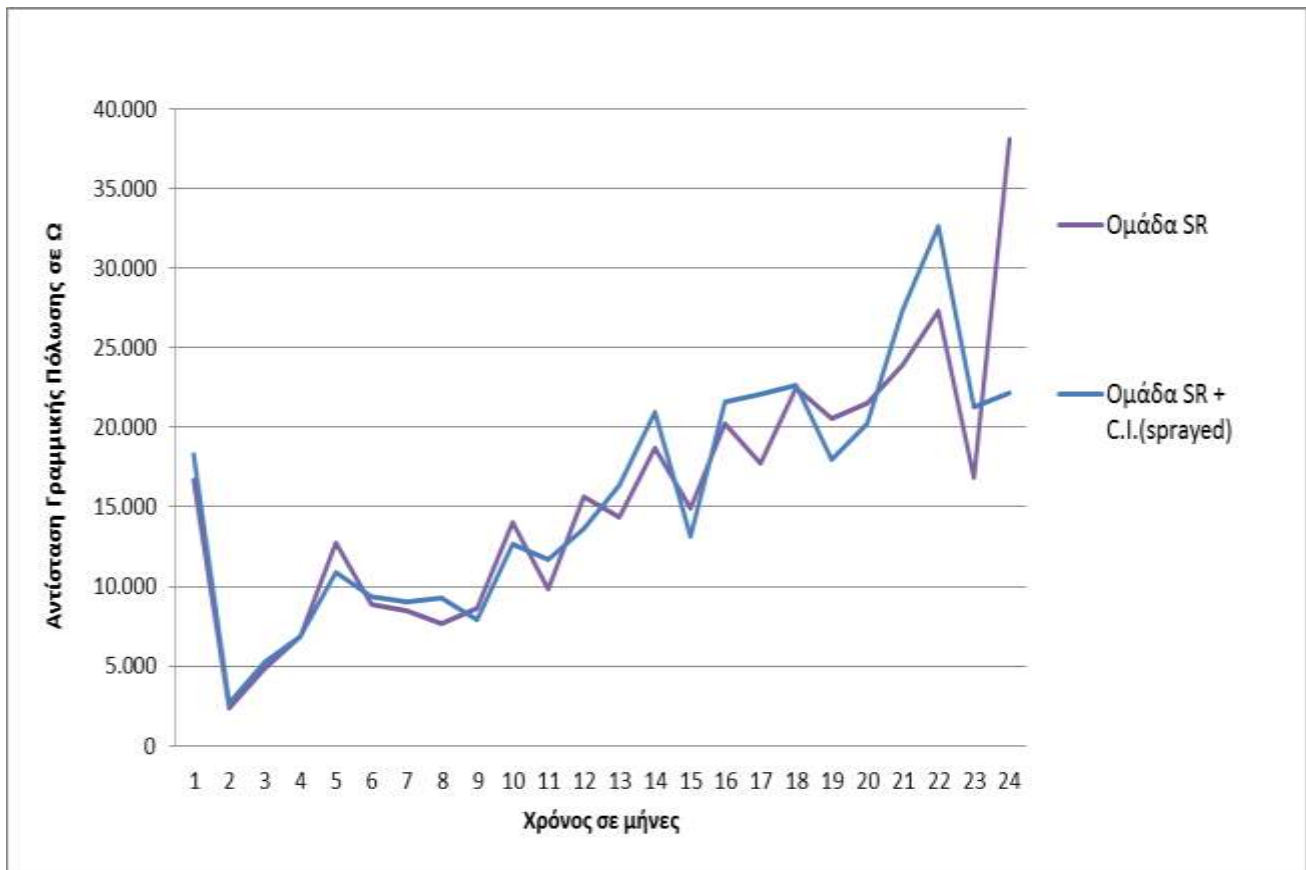
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η Αντίσταση Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσε του χρόνου των ομάδων LC₂, LC₂ + C.I. (additive) και LC₂ + C.I. (sprayed).



Διάγραμμα 9.22: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου των ομάδων LC2, LC2 + C.I. (additive) και LC2 + C.I. (sprayed).

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι οι ομάδες LC 2 + C.I.(additive) και LC 2 + C.I. (sprayed) που περιέχουν τον αναστολέα ως πρόσμικτο και ως ψεκαζόμενο, αντίστοιχα έχουν καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα LC 2 που δεν περιέχει αναστολέα. Τους πρώτους μήνες παρατηρείται ότι δεν έχει αρχίσει η δράση του αναστολέα διάβρωσης, μετά τον 8^ο μήνα αρχίζει ο αναστολέας να προστατεύει μέχρι έναν βαθμό τον οπλισμό που βρίσκεται εγκιβωτισμένος σε κονίαμα.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η Αντίσταση Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσεως του χρόνου των ομάδων SR και SR + C.I. (sprayed).



Διάγραμμα 9.23: Μέσοι Όροι Αντίστασης Γραμμικής Πόλωσης σε Ω στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων SR και SR + C.I. (sprayed).

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι οι δύο ομάδες με αναστολέα και χωρίς αναστολέα έχει παρόμοια συμπεριφορά και δεν είναι ξεκάθαρο ότι ο αναστολέας έχει θετική δράση.

Παρατηρείται ότι από την μέθοδο αντίστασης γραμμικής πόλωσης δεν είναι ξεκάθαρο η συμπεριφορά των ομάδων. Εν συνεχεία μετρήθηκε η ηλεκτροχημική απώλεια μάζας και η βαρυμετρική με σκοπό την καλύτερη επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

9.4.3 Υπολογισμός ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας

Η κλίση της καμπύλης στην αρχή των αξόνων, δηλαδή για $E = E_{corr}$, ονομάζεται αντίσταση πόλωσης R_p , και δίδεται από τη σχέση:

$$R_p = \frac{1}{I_{corr}} * \frac{(b_a * b_c)}{(b_a + b_c)} = \frac{B}{I_{corr}}$$

Όπου b_a , b_c , οι κλίσεις των ευθειών Tafel.

Κατόπιν υπολογίζεται το «ρεύμα διάβρωσης» του χάλυβα, I_{corr} από τη σχέση :

$$I_{corr} = B / R_p \quad (1)$$

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). Αναφέρονται οι τιμές $B=52$ mV για χάλυβα που ευρίσκεται στην παθητική κατάσταση (περιοχή δυναμικών μεταξύ E_p και E_{TP}) και $B=26$ mV για χάλυβα στην ενεργή κατάσταση (δυναμικά ηλεκτροθετικότερα του E_{TP} ή ηλεκτραρνητικότερα του E_p).

Ανάλογα όμως με το είδος του σκυροδέματος, οι τιμές της σταθεράς B διαφέρουν από τις προαναφερθείσες τιμές, συνήθως δε κυμαίνονται από 13 έως 52 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.

Αλλά και ο τρόπος συντήρησης του νωπού σκυροδέματος επηρεάζει την αντίσταση πόλωσης.

Στην παρούσα εργασία οι τιμές του i_{corr} υπολογίστηκαν θεωρώντας ότι ο χάλυβας ήταν στην ενεργή κατάσταση, δηλαδή για $B = 26$ mV.

9.4.3.1 Δοκίμια με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης – Δοκίμια πίνακα 9.1

Στην περίπτωση αυτή εξετάστηκαν 5 ομάδες: Α, Β, Γ, Δ και Ε. Τα δοκίμια της ομάδας Α και Β περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητες 0,1g/100g τσιμέντου και 0,4g/100g τσιμέντου αντίστοιχα, τα δοκίμια της ομάδας Γ περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου αλλά στο μισό δοκίμιο, το άλλο μισό δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης. Και τα δοκίμια της ομάδας Δ είναι κατασκευασμένα όπως τα δοκίμια της ομάδας Γ απλά περιέχουν 0,4g/100g τσιμέντου περιεκτικότητα αναστολέα διάβρωσης. Τα δοκίμια της ομάδας Ε δεν περιέχουν αναστολέα, είναι τα δοκίμια όπου χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρο σύγκρισης. Παρακάτω θα ακολουθήσουν οι μετρήσεις κάθε ομάδας ως προς την Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας στον οπλισμό.

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μέσοι όροι των μετρήσεων της Ηλεκτροχημικής Απώλειας Μάζας σε g στον οπλισμό όλων των ομάδων.

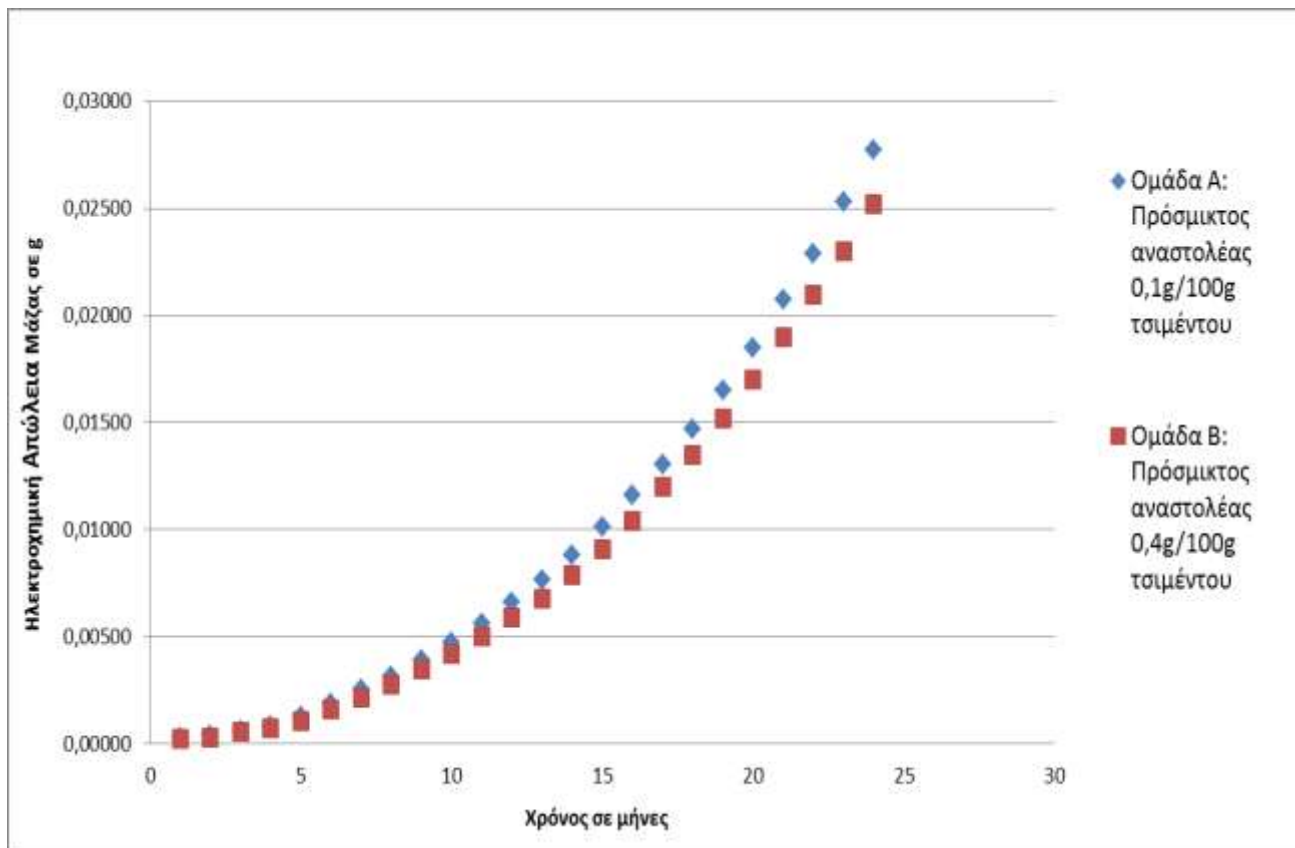
Πίνακας: 9.75: Μέσοι όροι Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων Α, Β και Ε.

Μέσοι Όροι Ηλεκτροχημικής Απώλειας Μάζας			
Χρόνος σε sec	Ομάδα Α:	Ομάδα Β:	Ομάδα Ε:
	Πρόσμικτος αναστολέας 0,1g/100g τσιμέντου	Πρόσμικτος αναστολέας 0,4g/100g τσιμέντου	Μάρτυρας
1	0,00031	0,00022	0,00145
2	0,00042	0,00032	0,00643
3	0,00064	0,00055	0,01208
4	0,00083	0,00072	0,01468
5	0,00129	0,00106	0,01670
6	0,00192	0,00162	0,02039
7	0,00254	0,00219	0,02411
8	0,00316	0,00276	0,02715
9	0,00395	0,00349	0,03519
10	0,00473	0,00418	0,04333
11	0,00565	0,00501	0,05314
12	0,00661	0,00588	0,06670
13	0,00768	0,00680	0,08614
14	0,00884	0,00788	0,11647
15	0,01016	0,00907	0,13188
16	0,01163	0,01042	0,14554
17	0,01304	0,01200	0,15746
18	0,01471	0,01351	0,17564
19	0,01653	0,01521	0,19033
20	0,01849	0,01701	0,20232
21	0,02075	0,01896	0,21724
22	0,02289	0,02098	0,22928
23	0,02528	0,02300	0,24269
24	0,02770	0,02518	0,25541

Πίνακας: 9.76: Μέσοι όροι Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων Γ και Δ.

Μέσοι Όροι Ηλεκτροχημικής Απώλειας Μάζας (στον οπλισμό) σε g				
Χρόνος σε sec	Ομάδα Γ		Ομάδα Δ	
	Ομάδα Γ1: Χωρίς αναστολέα	Ομάδα Γ2: Πρόσμικτος αναστολέας 0,1g/100g τσιμέντου	Ομάδα Δ1: Χωρίς αναστολέα	Ομάδα Δ2: Πρόσμικτος αναστολέας 0,4g/100g τσιμέντου
1	0,00016	0,00043	0,00014	0,00027
2	0,00050	0,00060	0,00039	0,00040
3	0,00175	0,00097	0,00086	0,00071
4	0,00208	0,00124	0,00116	0,00095
5	0,00307	0,00187	0,00175	0,00146
6	0,00421	0,00270	0,00271	0,00219
7	0,00582	0,00360	0,00418	0,00299
8	0,00759	0,00470	0,00575	0,00385
9	0,00952	0,00588	0,00734	0,00498
10	0,01137	0,00713	0,00924	0,00617
11	0,01351	0,00848	0,01148	0,00740
12	0,01582	0,00992	0,01370	0,00878
13	0,01850	0,01158	0,01591	0,01037
14	0,02170	0,01348	0,01817	0,01205
15	0,02498	0,01518	0,02064	0,01378
16	0,02823	0,01709	0,02313	0,01552
17	0,03150	0,01920	0,02597	0,01751
18	0,03483	0,02152	0,02892	0,01954
19	0,03858	0,02390	0,03185	0,02162
20	0,04291	0,02630	0,03488	0,02378
21	0,04686	0,02880	0,03820	0,02603
22	0,05076	0,03148	0,04161	0,02843
23	0,05556	0,03420	0,04507	0,03098
24	0,06008	0,03719	0,04861	0,03365

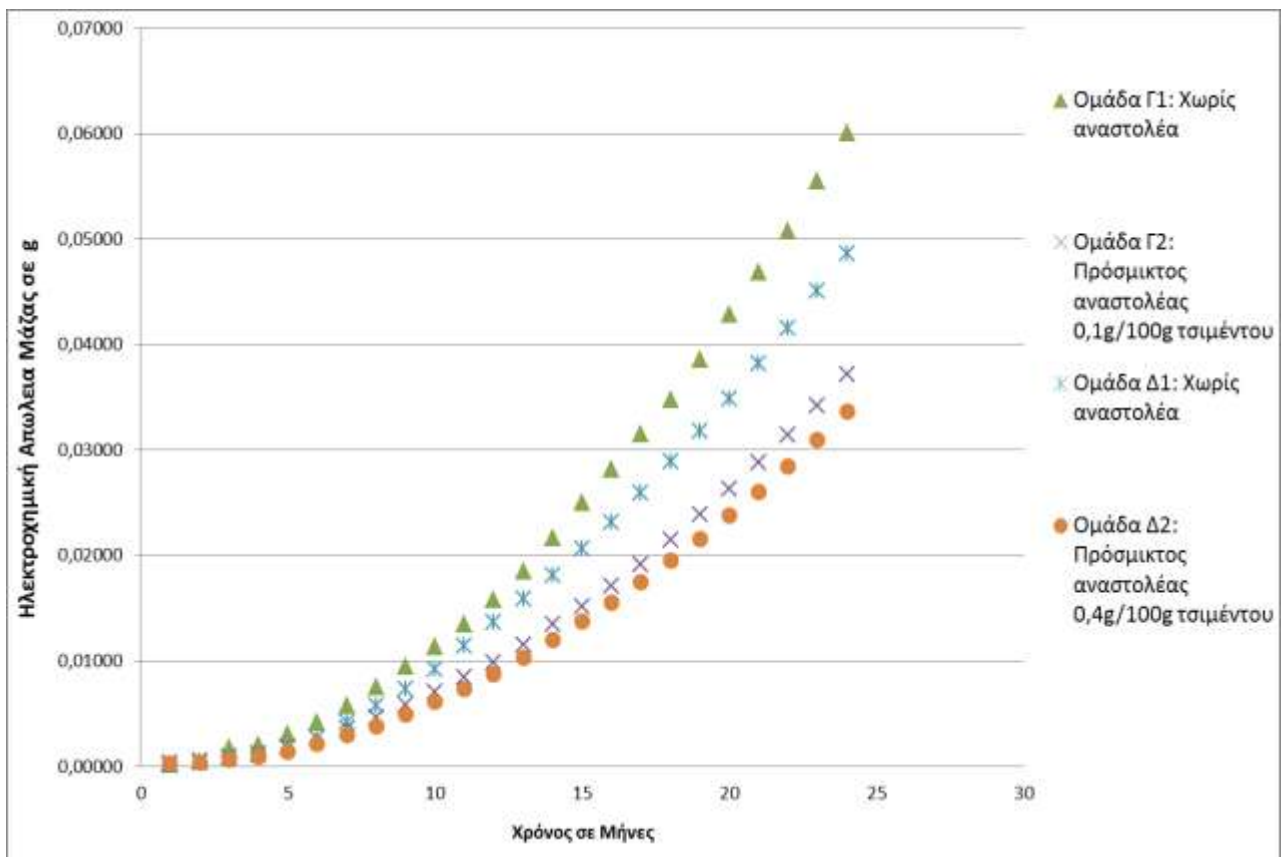
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων Α και Β.



Διάγραμμα 9.24: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων Α και Β.

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι μετρήσεις ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας για τις ομάδες Α και Β, όπου περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου και 0,4g/100g τσιμέντου αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι η ομάδα με την μεγαλύτερη ποσότητα αναστολέα διάβρωσης έχει την μικρότερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων Γ και Δ.



Διάγραμμα 9.25: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων Γ και Δ.

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι μετρήσεις ηλεκτροχημικής απώλειας για τις ομάδες Γ και Δ, όπου περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου αλλά στο μισό δοκίμιο, το άλλο μισό δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης, αντίστοιχα και η ομάδα Δ με την μόνη διαφορά ότι περιέχει 0,4g/100g τσιμέντου περιεκτικότητα αναστολέα διάβρωσης. Παρατηρούμε ότι η ομάδα Δ2 με την μεγαλύτερη ποσότητα αναστολέα διάβρωσης έχει την μικρότερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας, ακολουθεί η ομάδα Γ2, εν συνεχεία η ομάδα Δ1 και τέλος η ομάδα Γ1.

9.4.3.2 Δοκίμια με ψεκαζόμενο και πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης στα ασβεστολιθικά τσιμέντα – Δοκίμια πίνακα 9.2

Στην περίπτωση αυτή εξετάστηκαν 11 ομάδες: CEM I, LC1, LC2, CEM I + C.I.(additive), LC1 + C.I.(additive), LC2+ C.I.(additive), CEM I + C.I.(sprayed), LC1 + C.I(sprayed), LC2+ C.I(sprayed), SR και SR + C.I.(sprayed). Τα δοκίμια των ομάδων CEM I + C.I.(additive), LC1 + C.I.(additive), LC2+ C.I.(additive) περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο ενώ τα δοκίμια των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC1 + C.I(sprayed), LC2+ C.I(sprayed) και SR + C.I.(sprayed) περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως ψεκαζόμενο. Τα δοκίμια των ομάδων CEM I, LC1, LC2 και SR δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης και χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρο σύγκρισης με τα δοκίμια με τον

αναστολέα διάβρωσης. Παρακάτω θα ακολουθήσουν οι μετρήσεις κάθε ομάδας ως προς την Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας στον οπλισμό.

Παρακάτω φαίνονται σε πίνακα οι μέσοι όροι των μετρήσεων της Ηλεκτροχημικής Απώλειας Μάζας σε g στον οπλισμό όλων των ομάδων.

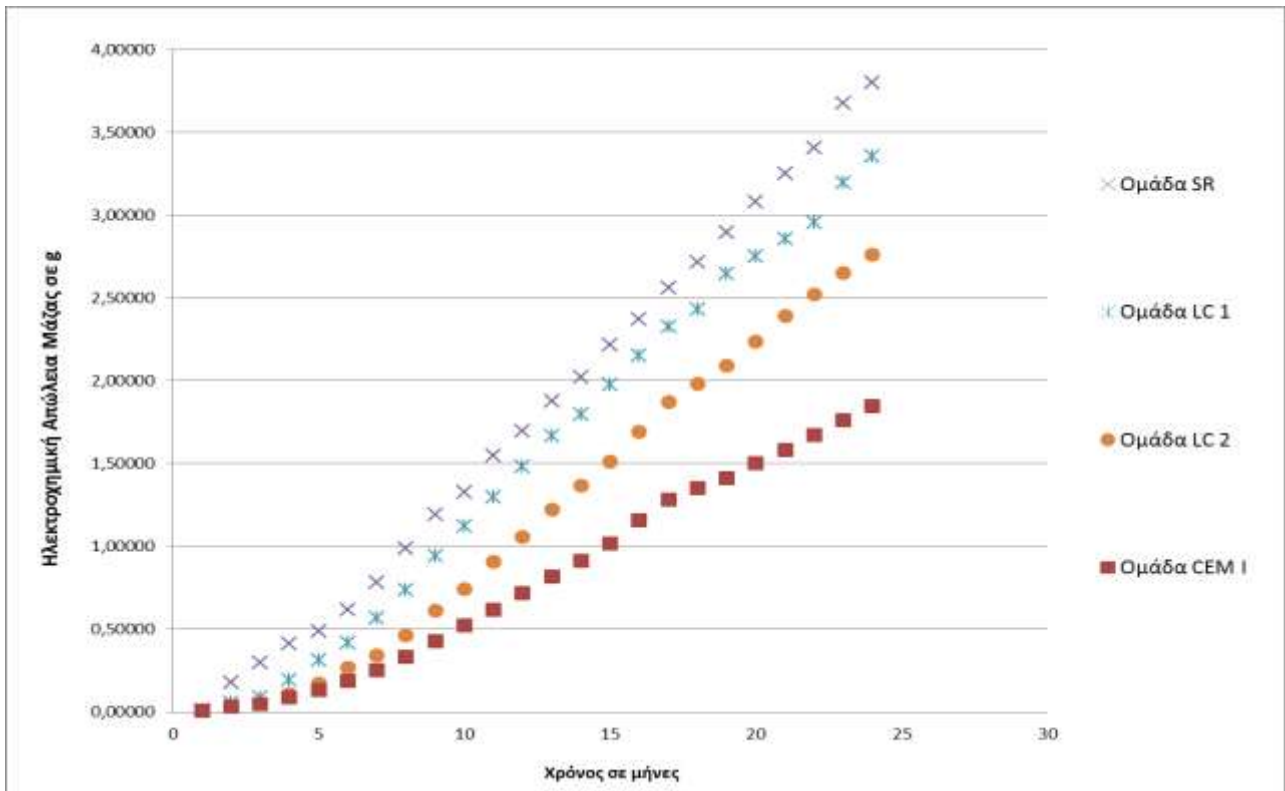
Πίνακας: 9.77: Μέσοι όροι Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I, LC 1, LC2, CEM I + C.I.(additive), LC 1 + C.I.(additive) και LC 2 + C.I.(additive) .

Μέσοι Όροι Ηλεκτροχημικής Απώλειας Μάζας σε g						
Χρόνος σε μήνες	Ομάδα CEM I	Ομάδα LC 1	Ομάδα LC 2	Ομάδα CEM I + C.I.(additive)	Ομάδα LC 1 + C.I.(additive)	Ομάδα LC 2 + C.I.(additive)
1	0,00789	0,01082	0,00896	0,00950	0,00556	0,01043
2	0,03227	0,05511	0,03042	0,03062	0,04174	0,03828
3	0,04915	0,08693	0,05377	0,05436	0,08204	0,05776
4	0,08746	0,19034	0,10786	0,09781	0,16495	0,11216
5	0,13232	0,31137	0,17253	0,14373	0,25577	0,15016
6	0,18773	0,41501	0,26562	0,20299	0,39842	0,24989
7	0,25022	0,56681	0,34215	0,25998	0,52717	0,34262
8	0,33433	0,73554	0,46347	0,33390	0,68721	0,47354
9	0,42546	0,94011	0,61402	0,40431	0,86681	0,55072
10	0,52436	1,12358	0,74314	0,47754	1,04672	0,65465
11	0,61950	1,29796	0,90728	0,54523	1,25946	0,76585
12	0,71585	1,47980	1,05627	0,60275	1,37140	0,85929
13	0,81581	1,66516	1,22418	0,65849	1,50871	0,96862
14	0,91255	1,79517	1,36703	0,71862	1,65279	1,07113
15	1,01910	1,97610	1,51460	0,77220	1,75991	1,12073
16	1,15654	2,15107	1,69429	0,83028	2,00048	1,20059
17	1,28045	2,32604	1,87398	0,88836	2,10760	1,29398
18	1,35031	2,43061	1,98269	0,97644	2,21472	1,45142
19	1,41017	2,64839	2,09043	1,04452	2,32184	1,52886
20	1,50003	2,74989	2,23883	1,12260	2,49305	1,68630
21	1,57989	2,85739	2,39406	1,18068	2,59274	1,80374
22	1,66975	2,95913	2,52118	1,24876	2,77243	1,92118
23	1,75961	3,19663	2,64942	1,32684	2,95212	2,10862
24	1,84947	3,35413	2,75942	1,40492	3,10181	2,24606

Πίνακας: 9.78: Μέσοι όροι Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC 1 + C.I.(sprayed), LC2 + C.I.(sprayed), SR και SR + C.I.(sprayed) .

Μέσοι Όροι Ηλεκτροχημικής Απώλειας Μάζας σε g					
Χρόνος σε μήνες	Ομάδα CEM I + C.I. (sprayed)	Ομάδα LC 1 + C.I.(sprayed)	Ομάδα LC 2 + C.I.(sprayed)	Ομάδα SR	Ομάδα SR + C.I.(sprayed)
1	0,05950	0,01056	0,01104	0,01170	0,01070
2	0,08062	0,04741	0,04283	0,17511	0,15511
3	0,10436	0,13820	0,09776	0,29693	0,26693
4	0,14781	0,23649	0,19216	0,41034	0,38034
5	0,19373	0,32558	0,22157	0,48701	0,47014
6	0,26299	0,47984	0,29891	0,61950	0,59501
7	0,30798	0,59717	0,44262	0,78061	0,74681
8	0,33903	0,78721	0,57354	0,98554	0,91554
9	0,46431	0,96681	0,65072	1,19011	1,13901
10	0,54754	1,14672	0,75465	1,32936	1,29358
11	0,64523	1,35946	0,86585	1,54780	1,47796
12	0,69275	1,47140	0,95929	1,69801	1,64980
13	0,74585	1,60871	1,06862	1,87516	1,80475
14	0,81862	1,75279	1,13511	2,02172	1,93517
15	0,86220	1,85991	1,24073	2,21861	2,15861
16	0,93028	2,10048	1,30059	2,37322	2,30322
17	0,97836	2,19760	1,38398	2,56038	2,45360
18	1,07644	2,31472	1,55142	2,71691	2,60910
19	1,12952	2,40684	1,61386	2,89781	2,81598
20	1,20360	2,57405	1,76730	3,07948	3,00911
21	1,27468	2,68674	1,89774	3,25118	3,15918
22	1,34876	2,87243	2,02118	3,40881	3,29089
23	1,41684	3,03212	2,18862	3,67586	3,50259
24	1,48999	3,19681	2,34606	3,79908	3,71408

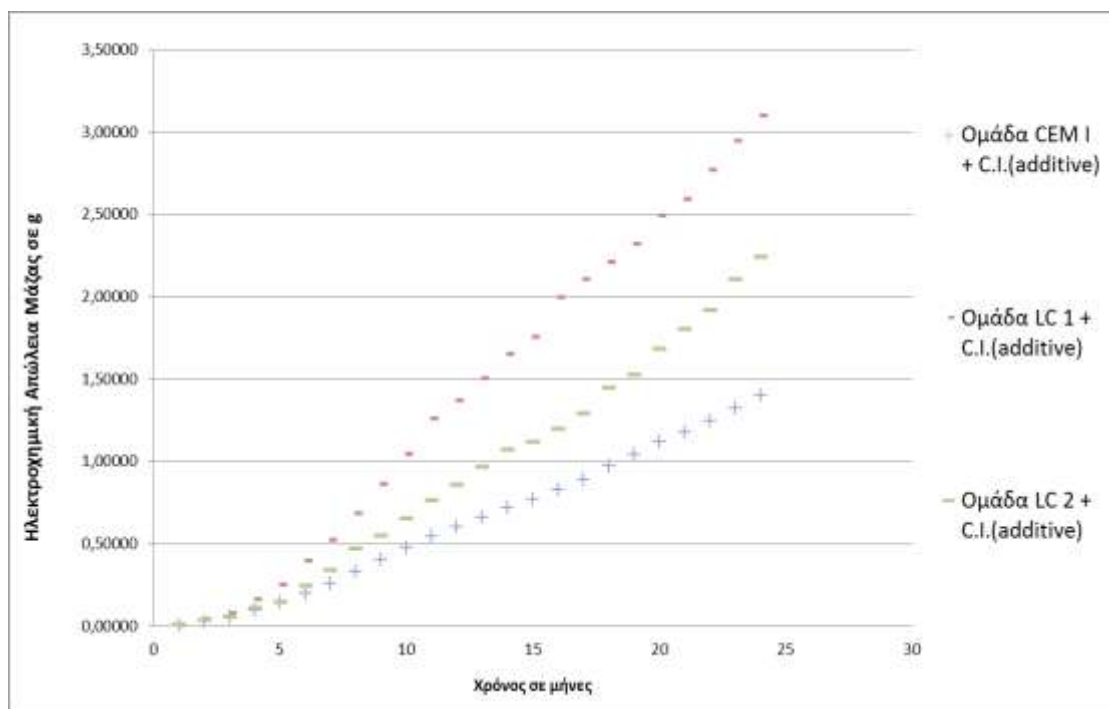
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων CEM I, LC 1, LC2 και SR.



Διάγραμμα 9.26: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I, LC 1, LC2 και SR.

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι μετρήσεις ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας για τις ομάδες CEM I, LC 1, LC2 και SR, όπου δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης. Παρατηρούμε ότι η ομάδα SR έχει την μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας, μετά ακολουθεί η LC1, η LC2 και τέλος CEM I. Παρατηρούμε ότι οι ομάδες των ασβεστολιθικών βρίσκονται ανάμεσα στις δύο άλλες ομάδες ως προς την συμπεριφορά τους στη διάβρωση.

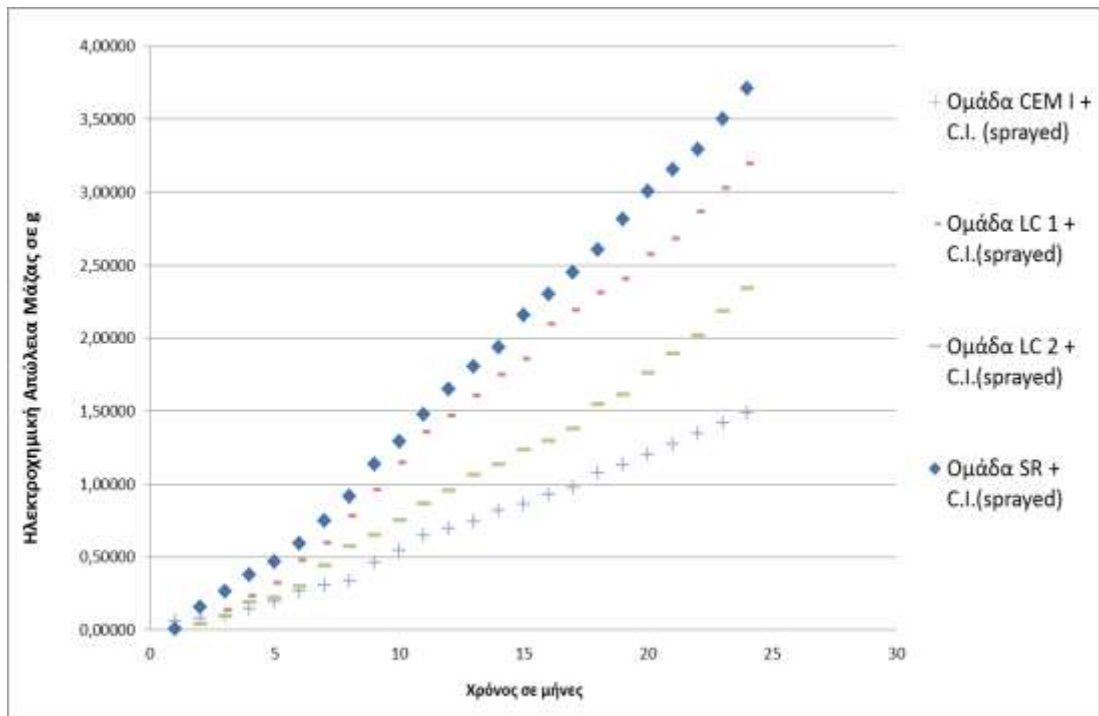
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων CEM I + C.I.(additive), LC 1 + C.I.(additive) και LC 2 + C.I.(additive).



Διάγραμμα 9.27: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I + C.I.(additive), LC 1 + C.I.(additive) και LC 2 + C.I.(additive).

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι μετρήσεις ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας για τις ομάδες CEM I + C.I.(additive), LC 1 + C.I.(additive) και LC 2 + C.I.(additive), όπου περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο. Παρατηρούμε ότι η ομάδα LC 1 + C.I.(additive) έχει την μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας, μετά ακολουθεί η LC 2 + C.I.(additive) και τέλος CEM I + C.I.(additive). Παρατηρούμε ότι η ομάδα CEM I συμπεριφέρεται καλύτερα από τις ομάδες των ασβεστολιθικών. Επίσης, παρατηρούμε ότι η ομάδα των ασβεστολιθικών με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο (LC 2) έχει μικρότερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας από την ομάδα LC 1.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC 1 + C.I.(sprayed), LC2 + C.I.(sprayed) και SR + C.I.(sprayed) .



Διάγραμμα 9.28: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC 1 + C.I.(sprayed), LC 2 + C.I.(sprayed) και SR + C.I.(sprayed) .

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι μετρήσεις ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας για τις ομάδες CEM I + C.I.(sprayed), LC 1 + C.I.(sprayed), LC2 + C.I.(sprayed) και SR + C.I.(sprayed), όπου περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως ξεκαζόμενα. Παρατηρούμε ότι η ομάδα SR + C.I.(sprayed) έχει την μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας, μετά ακολουθεί η LC 1 + C.I.(sprayed), εν συνεχεία η LC 2 + C.I.(sprayed) και τέλος CEM I + C.I.(sprayed). Παρατηρούμε ότι η ομάδα CEM I συμπεριφέρεται καλύτερα από τις ομάδες των ασβεστολιθικών και η SR συμπεριφέρεται χειρότερα από όλες τις ομάδες. Επίσης, παρατηρούμε ότι η ομάδα των ασβεστολιθικών με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο (LC 2) έχει μικρότερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας από την ομάδα LC 1.

9.4.4 Υπολογισμός βαρυμετρικής απώλειας μάζας

9.4.4.1 Δοκίμια με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης – Δοκίμια πίνακα 9.1

Στην περίπτωση αυτή εξετάστηκαν 5 ομάδες: Α, Β, Γ, Δ και Ε. Τα δοκίμια της ομάδας Α και Β περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητες 0,1g/100g τσιμέντου και 0,4g/100g τσιμέντου αντίστοιχα, τα δοκίμια της ομάδας Γ περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου αλλά στο μισό δοκίμιο, το άλλο μισό δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης. Και τα δοκίμια της ομάδας Δ είναι κατασκευασμένα όπως τα δοκίμια της ομάδας Γ απλά περιέχουν 0,4g/100g τσιμέντου περιεκτικότητα αναστολέα διάβρωσης. Τα δοκίμια της ομάδας Ε δεν περιέχουν αναστολέα, είναι τα δοκίμια όπου χρησιμοποιήθηκαν ως

μέτρο σύγκρισης. Παρακάτω θα ακολουθήσουν οι μετρήσεις κάθε ομάδας ως προς την Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας στον οπλισμό.

Πίνακας: 9.79: Μέσοι όροι Βαρυμετρικής Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό της ομάδας E.

Μέσοι Όροι Βαρυμετρικής Απώλεια Μάζας			
Ομάδα E:			
Μάρτυρας			
Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔM (Αρχική - Τελική)
E1	63,909	63,610	0,299
E2	60,895	60,590	0,305
E3	66,782	66,512	0,270
E4	64,218	63,919	0,299
E5	57,191	56,879	0,312
E6	57,828	57,517	0,311
E7	69,957	69,570	0,387
E8	62,002	61,569	0,433
E9	65,775	65,509	0,265
E10	64,519	64,247	0,272
E11	65,988	65,600	0,388
E12	63,010	62,718	0,292
E13	71,991	71,658	0,333
E14	65,909	65,458	0,451
E15	61,009	60,568	0,441
E16	61,345	61,085	0,261
Μέσος όρος			0,332

Πίνακας: 9.75: Μέσοι όροι Βαρυμετρικής Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων Α και Β.

Μέσοι Όροι Βαρυμετρικής Απώλειας Μάζας							
Ομάδα Α:				Ομάδα Β:			
Πρόσμικτος αναστολέας 0,1g/100g τσιμέντου				Πρόσμικτος αναστολέας 0,4g/100g τσιμέντου			
Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)	Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)
A1	65,458	65,237	0,222	B1	60,895	60,701	0,194
A2	67,153	66,918	0,236	B2	66,782	66,630	0,152
A3	62,445	62,229	0,215	B3	66,892	66,714	0,179
A4	61,061	60,856	0,205	B4	69,296	69,078	0,217
A5	61,145	60,885	0,260	B5	69,107	68,952	0,155
A6	69,296	69,041	0,255	B6	62,336	62,153	0,183
A7	69,107	68,841	0,266	B7	69,101	68,935	0,166
A8	61,670	61,474	0,197	B8	59,643	59,484	0,159
A9	59,972	59,786	0,185	B9	59,923	59,737	0,185
A10	57,191	57,012	0,179	B10	65,668	65,473	0,195
A11	57,828	57,653	0,175	B11	56,220	56,010	0,210
A12	69,957	69,761	0,195	B12	64,732	64,519	0,214
A13	62,002	61,839	0,163	B13	67,201	66,998	0,202
A14	64,596	64,443	0,153	B14	64,987	64,784	0,203
A15	61,061	60,865	0,195	B15	62,904	62,718	0,185
A16	64,732	64,518	0,215	B16	56,823	56,672	0,151
Μέσος όρος			0,207				0,184

Πίνακας: 9.76: Μέσοι όροι Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό της ομάδας Γ.

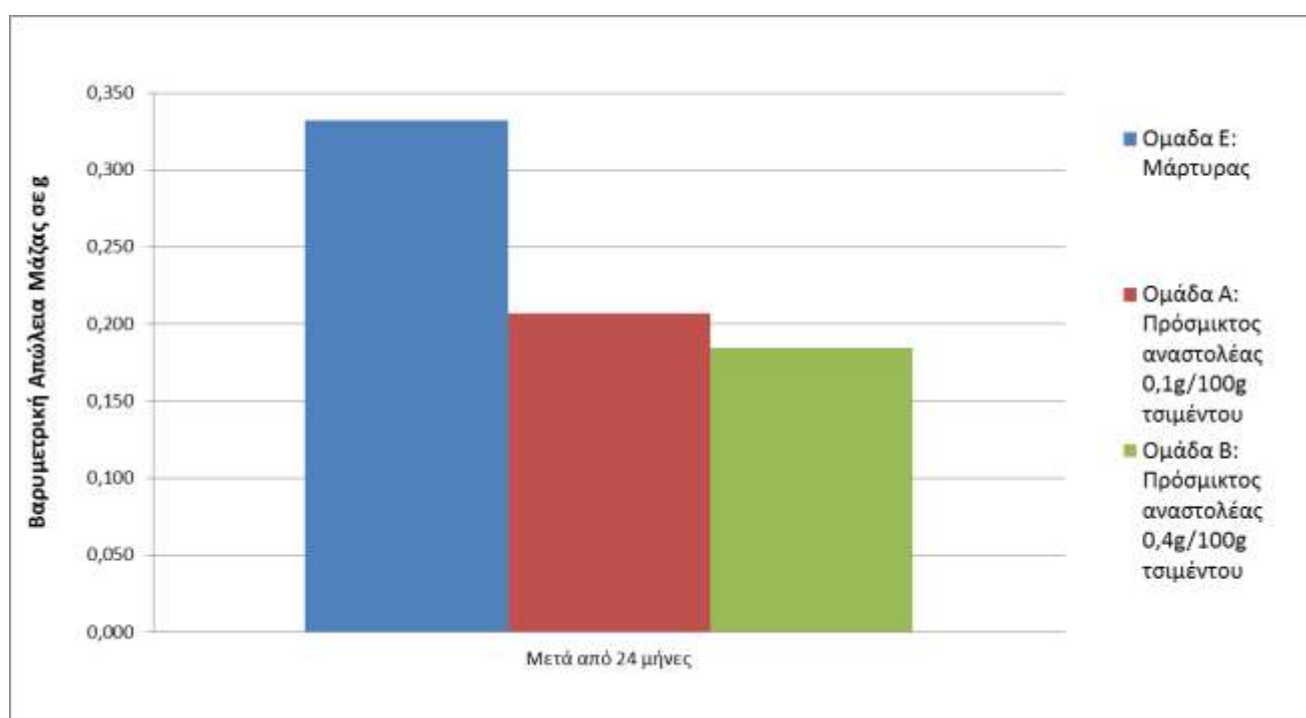
Μέσοι Όροι Απώλειας Μάζας							
Ομάδα Γ							
Ομάδα Γ1: Χωρίς αναστολέα				Ομάδα Γ2: Πρόσμικτος αναστολέας 0,1g/100g τιμέντου			
Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)	Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)
Γ ₁	61,623	61,410	0,213	Γ ₃	61,320	61,109	0,211
Γ ₂	61,283	61,048	0,235	Γ ₄	60,866	60,660	0,206
Γ ₅	59,752	59,509	0,243	Γ ₇	60,461	60,258	0,204
Γ ₆	60,239	59,998	0,241	Γ ₈	59,736	59,507	0,229
Γ ₉	60,768	60,529	0,239	Γ ₁₁	60,990	60,757	0,233
Γ ₁₀	61,395	61,098	0,298	Γ ₁₂	59,044	58,817	0,227
Γ ₁₃	62,547	62,305	0,242	Γ ₁₅	61,581	61,365	0,216
Γ ₁₄	58,254	58,014	0,240	Γ ₁₆	60,025	59,806	0,219
Μέσος όρος			0,244				0,2180

Πίνακας: 9.77: Μέσοι όροι Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό της ομάδας Δ.

Μέσοι Όροι Απώλειας Μάζας							
Ομάδα Δ							
Ομάδα Δ1: Χωρίς αναστολέα				Ομάδα Δ2: Πρόσμικτος αναστολέας 0,4g/100g τιμέντου			
Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)	Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)
Γ ₁	60,965	60,706	0,260	Γ ₃	60,695	60,509	0,186
Γ ₂	59,938	59,752	0,186	Γ ₄	60,611	60,401	0,210
Γ ₅	60,488	60,259	0,229	Γ ₇	61,798	61,598	0,200
Γ ₆	60,799	60,548	0,251	Γ ₈	61,236	61,054	0,181

Γ9	60,882	60,659	0,223	Γ11	60,937	60,713	0,223
Γ10	61,881	61,643	0,237	Γ12	60,084	59,877	0,207
Γ13	58,217	57,982	0,235	Γ15	62,874	62,672	0,202
Γ14	59,374	59,144	0,230	Γ16	59,889	59,689	0,200
Μέσος όρος			0,231				0,201

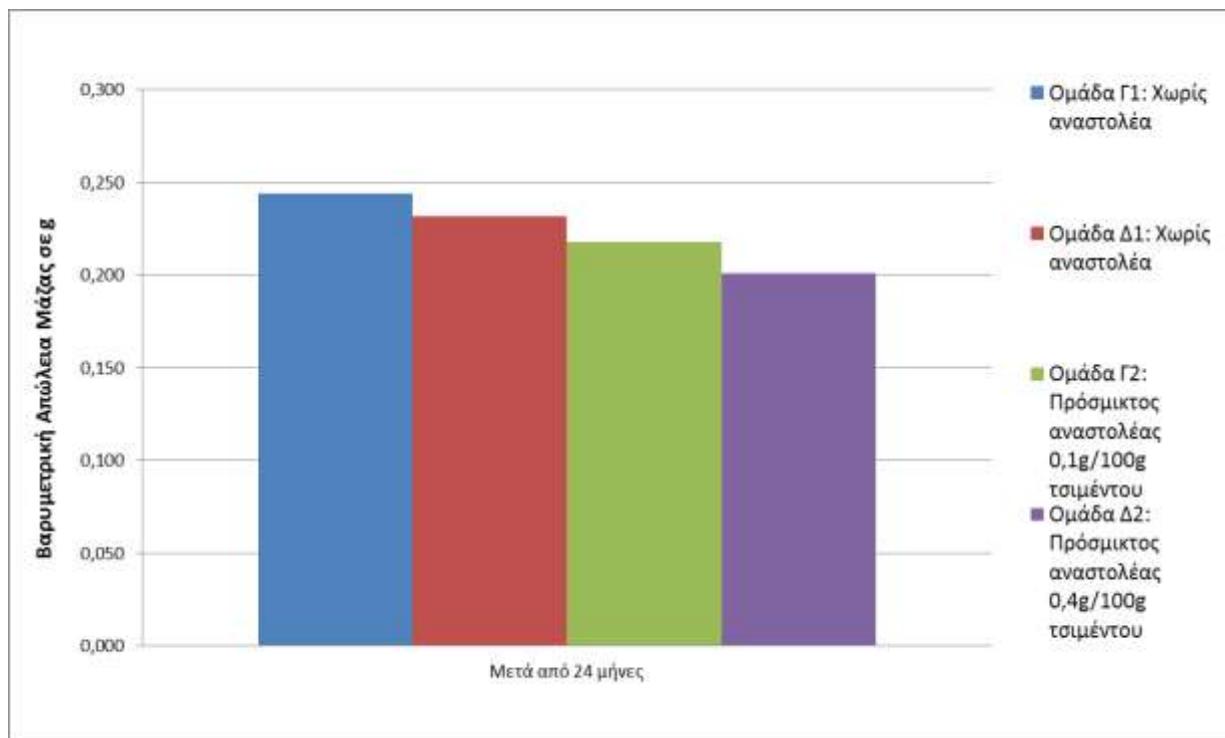
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό μετά από 24 μήνες των ομάδων Α, Β και Ε.



Διάγραμμα 9.29: Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων Α, Β και Ε.

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι μετρήσεις Βαρυμετρικής Απώλειας μάζας για τις ομάδες Α, Β και Ε, όπου οι ομάδες Α και Β περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου και 0,4g/100g τσιμέντου αντίστοιχα ενώ η ομάδα Ε δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης. Παρατηρούμε ότι η ομάδα με την μεγαλύτερη ποσότητα αναστολέα διάβρωσης έχει την μικρότερη απώλεια μάζας. Η ομάδα Ε έχει την μεγαλύτερη απώλεια μάζας.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό μετά από 24 μήνες των ομάδων Α, Β και Ε.



Διάγραμμα 9.30: Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων Γ και Δ.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται οι μετρήσεις Βαρυμετρικής απώλειας μάζας για τις ομάδες Γ και Δ, όπου περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου αλλά στο μισό δοκίμιο, το άλλο μισό δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης, αντίστοιχα και η ομάδα Δ με την μόνη διαφορά ότι περιέχει 0,4g/100g τσιμέντου περιεκτικότητα αναστολέα διάβρωσης. Παρατηρούμε ότι η ομάδα Δ2 με την μεγαλύτερη ποσότητα αναστολέα διάβρωσης έχει την μικρότερη απώλεια μάζας, ακολουθεί η ομάδα Γ2, εν συνεχεία η ομάδα Δ1 και τέλος η ομάδα Γ1.

9.4.4.2 Δοκίμια με ψεκαζόμενο και πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης στα ασβεστολιθικά τσιμέντα – Δοκίμια πίνακα 9.2

Στην περίπτωση αυτή εξετάστηκαν 11 ομάδες: CEM I, LC1, LC2, CEM I + C.I.(additive), LC1 + C.I.(additive), LC2+ C.I.(additive), CEM I + C.I.(sprayed), LC1 + C.I.(sprayed), LC2+ C.I.(sprayed), SR και SR + C.I.(sprayed). Τα δοκίμια των ομάδων CEM I + C.I.(additive), LC1 + C.I.(additive), LC2+ C.I.(additive) περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο ενώ τα δοκίμια των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC1 + C.I.(sprayed), LC2+ C.I.(sprayed) και SR + C.I.(sprayed) περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως ψεκαζόμενο. Τα δοκίμια των ομάδων CEM I, LC1, LC2 και SR δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης και χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρο σύγκρισης με τα δοκίμια με τον αναστολέα διάβρωσης. Παρακάτω θα ακολουθήσουν οι μετρήσεις κάθε ομάδας ως προς την Απώλεια Μάζας στον οπλισμό.

Πίνακας: 9.78: Μέσοι όροι Απώλειας Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I, CEM I + C.I.(additive) και CEM I + C.I.(sprayed) .

CEM I + C.I.(additive)				CEM I + C.I.(sprayed)				CEM ₁			
Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)	Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)	Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)
1	65,458	65,237	0,222	1	60,185	59,984	0,202	1	61,874	61,628	0,246
2	67,153	66,918	0,236	2	60,984	60,769	0,215	2	62,986	62,750	0,236
3	62,445	62,229	0,215	3	58,378	58,156	0,222	3	61,258	61,011	0,248
4	61,061	60,856	0,205	4	57,957	57,714	0,243	4	60,365	60,105	0,260
5	61,145	60,885	0,260	5	58,129	57,893	0,237	5	59,871	59,635	0,236
6	69,296	69,041	0,255	6	56,874	56,659	0,215	6	58,964	58,718	0,246
7	69,107	68,841	0,266	7	59,698	59,497	0,202	7	60,552	60,315	0,237
8	61,670	61,474	0,197	8	60,548	60,322	0,226	8	65,985	65,737	0,249
9	59,972	59,786	0,185	9	61,985	61,784	0,201	9	64,128	63,874	0,254
10	57,191	57,012	0,179	10	55,556	55,331	0,225	10	63,587	63,354	0,233
11	57,828	57,653	0,175	11	58,987	58,776	0,211	11	62,002	61,781	0,221
12	69,957	69,761	0,195	12	59,287	59,072	0,216	12	61,854	61,653	0,202
M.O.			0,199	M.O.			0,213	M.O.			0,233

Πίνακας: 9.79: Μέσοι όροι Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων LC2, LC2+ C.I.(additive) και LC2 + C.I.(sprayed).

LC 2 + C.I.(additive)				LC 2 + C.I.(sprayed)				LC2			
Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)	Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)	Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)
1	61,874	61,644	0,230	1	56,874	56,638	0,237	1	61,874	61,644	0,230
2	59,871	59,634	0,237	2	59,698	59,450	0,249	2	62,986	62,749	0,237
3	58,964	58,719	0,245	3	60,548	60,300	0,249	3	61,258	60,982	0,276
4	63,587	63,373	0,214	4	57,957	57,720	0,237	4	60,365	60,151	0,214
5	61,854	61,618	0,237	5	58,129	57,861	0,269	5	59,871	59,635	0,237
6	58,214	57,978	0,237	6	56,874	56,604	0,270	6	58,964	58,718	0,246
7	55,987	55,741	0,246	7	59,698	59,444	0,254	7	60,552	60,306	0,246
8	56,237	55,980	0,257	8	60,548	60,283	0,265	8	65,985	65,728	0,257
9	58,269	58,014	0,255	9	60,552	60,283	0,270	9	64,128	63,858	0,270
10	60,552	60,337	0,215	10	65,985	65,725	0,260	10	63,587	63,309	0,278
11	65,985	65,761	0,224	11	64,128	63,868	0,260	11	62,002	61,736	0,266
12	64,128	63,891	0,237	12	59,458	59,190	0,269	12	61,854	61,608	0,246
M.O.			0,239	M.O.			0,257	M.O.			0,272

Πίνακας: 9.80: Μέσοι όροι Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων LC1, LC1+ C.I.(additive), και LC1 + C.I.(sprayed) .

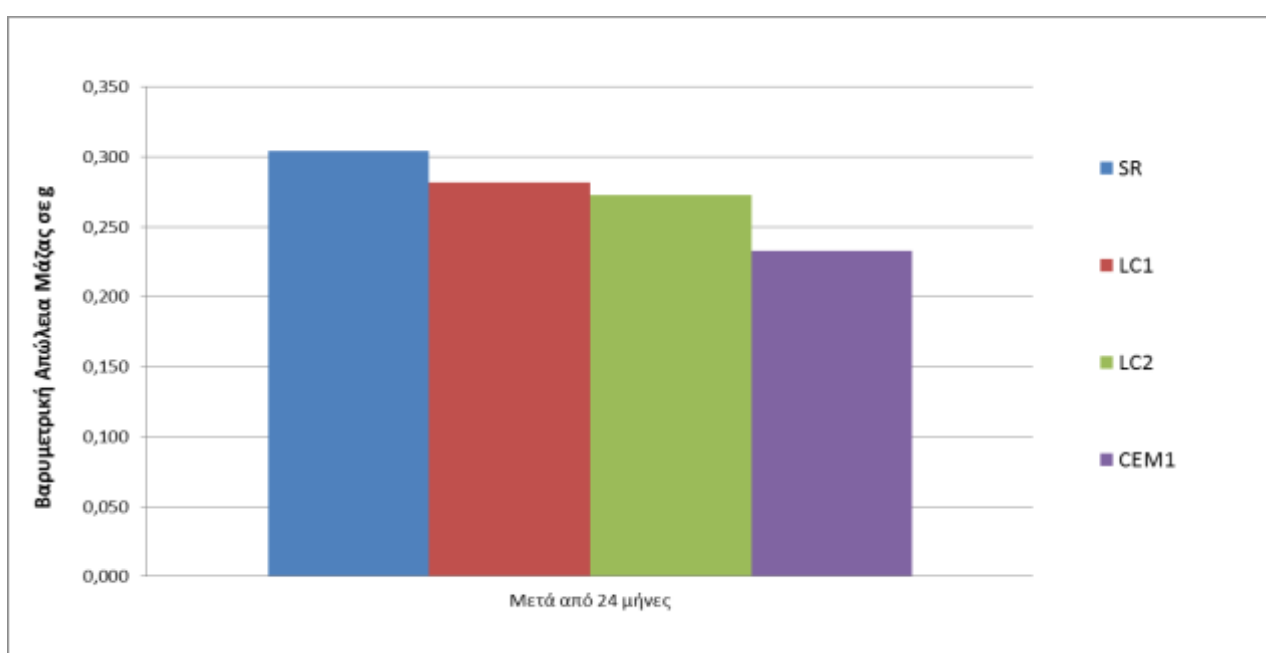
LC 1 + C.I.(additive)				LC 1 + C.I.(sprayed)				LC1			
Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)	Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)	Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)
1	58,654	58,400	0,254	1	60,185	59,944	0,241	1	61,874	61,637	0,237
2	59,325	59,040	0,285	2	60,984	60,769	0,215	2	62,986	62,701	0,285
3	61,254	60,980	0,274	3	58,378	58,163	0,215	3	61,258	60,971	0,287
4	62,488	62,203	0,284	4	57,957	57,672	0,285	4	60,365	60,076	0,289
5	63,254	62,989	0,265	5	58,129	57,855	0,275	5	59,871	59,573	0,299
6	58,214	57,959	0,255	6	56,874	56,604	0,270	6	58,964	58,666	0,299
7	55,987	55,718	0,269	7	59,698	59,411	0,287	7	60,552	60,278	0,275
8	56,237	55,959	0,278	8	60,548	60,291	0,257	8	65,985	65,707	0,278
9	58,269	58,003	0,266	9	61,985	61,696	0,289	9	64,128	63,844	0,285
10	57,239	56,960	0,279	10	55,556	55,266	0,290	10	63,587	63,288	0,299
11	61,238	60,954	0,284	11	58,987	58,689	0,299	11	62,002	61,718	0,284
12	62,984	62,710	0,274	12	59,287	59,009	0,278	12	61,854	61,588	0,266
M.O.			0,272	M.O.			0,267	M.O.			0,282

Πίνακας: 9.81: Μέσοι όροι Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων SR και SR + C.I.(sprayed).

SR + C.I.(sprayed)				SR			
Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)	Δοκίμια	Μάζα Αρχική g	Μάζα Τελική g	ΔΜ (Αρχική - Τελική)
1	55,128	54,832	0,297	1	55,554	55,254	0,300
2	58,296	57,996	0,300	2	52,698	52,379	0,319
3	59,748	59,463	0,285	3	62,984	62,684	0,300
4	59,317	59,028	0,289	4	60,185	59,873	0,313
5	60,128	59,853	0,275	5	61,874	61,565	0,309

6	61,985	61,690	0,295	6	61,548	61,214	0,334
7	62,258	61,958	0,300	7	60,654	60,344	0,310
8	63,963	63,638	0,325	8	59,658	59,351	0,307
9	63,741	63,444	0,297	9	61,143	60,845	0,299
10	60,028	59,747	0,281	10	60,543	60,265	0,278
11	60,985	60,685	0,300	11	59,996	59,711	0,285
12	58,845	58,533	0,313	12	58,965	58,666	0,299
M.O.			0,296	M.O.			0,304

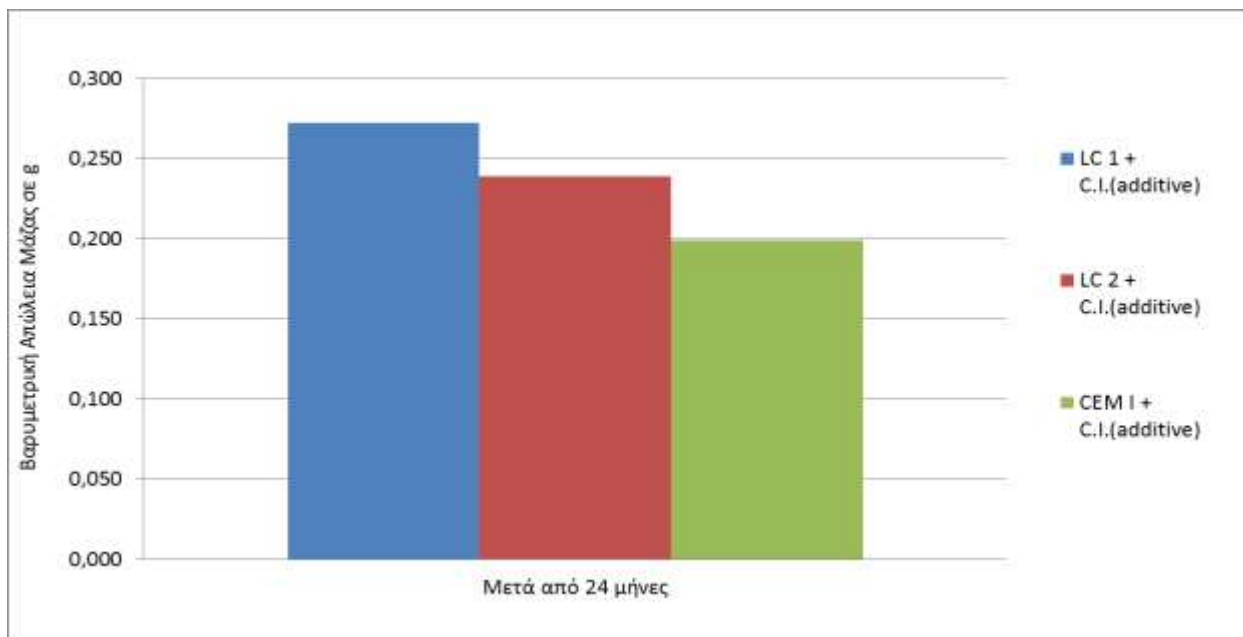
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό μετά από 24 μήνες των ομάδων CEM I, LC 1, LC2 και SR.



Διάγραμμα 9.31: Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I, LC 1, LC2 και SR.

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι μετρήσεις της Βαρυμετρική απώλειας μάζας για τις ομάδες CEM I, LC 1, LC2 και SR, όπου δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης. Παρατηρούμε ότι η ομάδα SR έχει την μεγαλύτερη απώλεια μάζας, μετά ακολουθεί η LC1, η LC2 και τέλος CEM I. Παρατηρούμε ότι οι ομάδες των ασβεστολιθικών βρίσκονται ανάμεσα στις δύο άλλες ομάδες ως προς την συμπεριφορά τους στη διάβρωση.

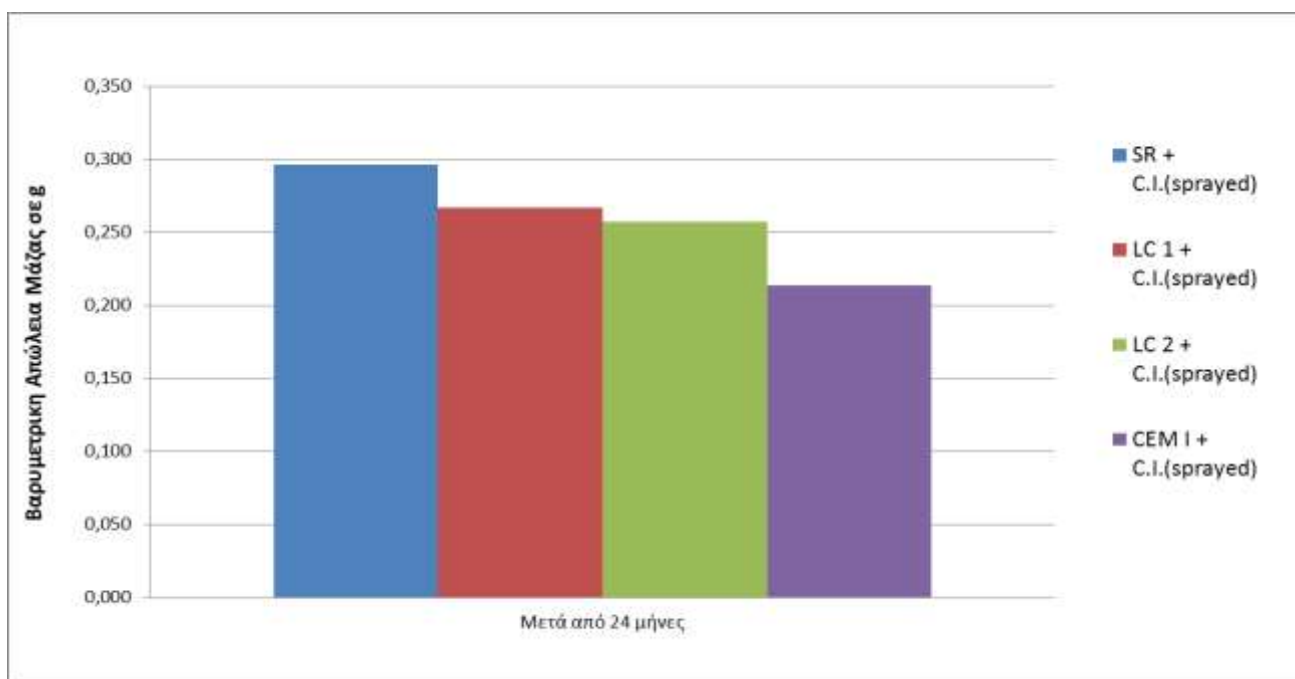
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό μετά από 24 μήνες των ομάδων CEM I + C.I.(additive), LC 1 + C.I.(additive) και LC 2 + C.I.(additive).



Διάγραμμα 9.32: Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων CEM I + C.I.(additive), LC 1I + C.I.(additive) και LC 2 + C.I.(additive).

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι μετρήσεις της Βαρυμετρικής απώλειας μάζας για τις ομάδες CEM I + C.I.(additive), LC 1 + C.I.(additive) και LC 2 + C.I.(additive), όπου περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο. Παρατηρούμε ότι η ομάδα LC 1 + C.I.(additive) έχει την μεγαλύτερη απώλεια μάζας, μετά ακολουθεί η LC 2 + C.I.(additive) και τέλος CEM I + C.I.(additive). Παρατηρούμε ότι η ομάδα CEM I συμπεριφέρεται καλύτερα από τις ομάδες των ασβεστολιθικών. Επίσης, παρατηρούμε ότι η ομάδα των ασβεστολιθικών με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο (LC 2) έχει μικρότερη απώλεια μάζας από την ομάδα LC 1.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό μετά από 24 μήνες των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC 1I + C.I.(sprayed), LC 2 + C.I.(sprayed) και SR + C.I. (sprayed).



Διάγραμμα 9.33: Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον σπλισμό των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC 1 + C.I.(sprayed), LC 2 + C.I.(sprayed) και SR + C.I. (sprayed).

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι μετρήσεις της Βαρυμετρικής απώλειας μάζας για τις ομάδες CEM I + C.I.(sprayed), LC 1 + C.I.(sprayed), LC2 + C.I.(sprayed) και SR + C.I.(sprayed), όπου περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως ξεκαζόμενο. Παρατηρούμε ότι η ομάδα SR + C.I.(sprayed) έχει την μεγαλύτερη απώλεια μάζας, μετά ακολουθεί η LC 1 + C.I.(sprayed), εν συνεχεία η LC 2 + C.I.(sprayed) και τέλος CEM I + C.I.(sprayed). Παρατηρούμε ότι η ομάδα CEM I συμπεριφέρεται καλύτερα από τις ομάδες των ασβεστολιθικών και η SR συμπεριφέρεται χειρότερα από όλες τις ομάδες. Επίσης, παρατηρούμε ότι η ομάδα των ασβεστολιθικών με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο (LC 2) έχει μικρότερη απώλεια μάζας από την ομάδα LC 1.

9.4.5 Μετρήσεις χλωριόντων στο σκυρόδεμα

9.4.5.1 Δοκίμια με πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης – Δοκίμια πίνακα 9.1

Στην περίπτωση αυτή εξετάστηκαν 5 ομάδες: Α, Β, Γ, Δ και Ε. Τα δοκίμια της ομάδας Α και Β περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητες 0,1g/100g τσιμέντου και 0,4g/100g τσιμέντου αντίστοιχα, τα δοκίμια της ομάδας Γ περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,1g/100g τσιμέντου αλλά στο μισό δοκίμιο, το άλλο μισό δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης. Και τα δοκίμια της ομάδας Δ είναι κατασκευασμένα όπως τα δοκίμια της ομάδας Γ απλά περιέχουν 0,4g/100g τσιμέντου περιεκτικότητα αναστολέα διάβρωσης. Τα

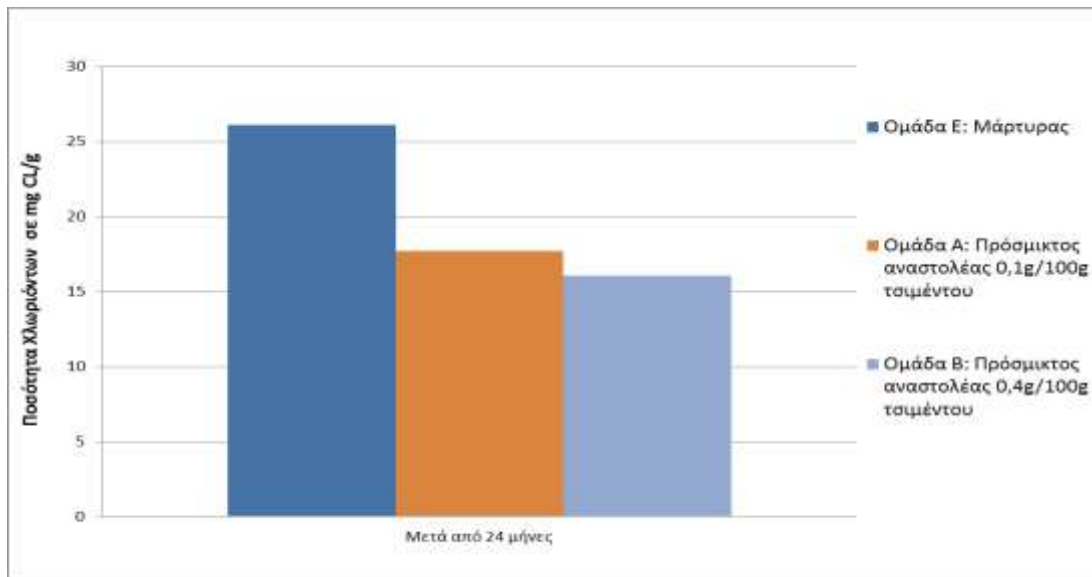
δοκίμια της ομάδας Ε δεν περιέχουν αναστολέα, είναι τα δοκίμια όπου χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρο σύγκρισης. Παρακάτω θα ακολουθήσουν οι μετρήσεις κάθε ομάδας ως προς την μέτρηση χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

Πίνακας 9.82: Ποσότητα χλωριόντων στο σκυρόδεμα ανά ομάδα.

Ποσότητα χλωριόντων στο σκυρόδεμα ανά ομάδα στον οπλισμό			
Ομάδες	Όνομα Δοκιμίου	mg Cl /g (διάλυμα AgNO ₃)	Μέσος Όρος Μετρήσεων
Ομάδα Α: Πρόσμικτος αναστολέας 0,1g/100g τσιμέντου	A1	17,65	17,72
	A2	17,12	
	A3	17,96	
	A4	18,14	
Ομάδα Β: Πρόσμικτος αναστολέας 0,4g/100g τσιμέντου	B1	15,46	16,06
	B2	16,37	
	B3	16,56	
	B4	15,86	
Ομάδα Ε: Μάρτυρας	E1	25,97	26,11
	E2	26,48	
	E3	25,74	
	E4	26,25	
Ομάδα Γ			
Ομάδα Γ1: Χωρίς αναστολέα	Γ1	24,12	24,95
	Γ2	25,78	
Ομάδα Γ2: Πρόσμικτος αναστολέας 0,1g/100g τσιμέντου	Γ3	21,45	21,62
	Γ4	21,78	
Ομάδα Δ			
Ομάδα Δ1: Χωρίς αναστολέα	Δ1	22,63	23,30
	Δ2	23,97	
Ομάδα Δ2: Χωρίς αναστολέα	Δ3	19,85	20,18
	Δ4	20,51	

Από την εξέταση του Πίνακα 9.82 προκύπτει ότι δεν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στις μετρήσεις χλωριόντων για τις όλες τις ομάδες.

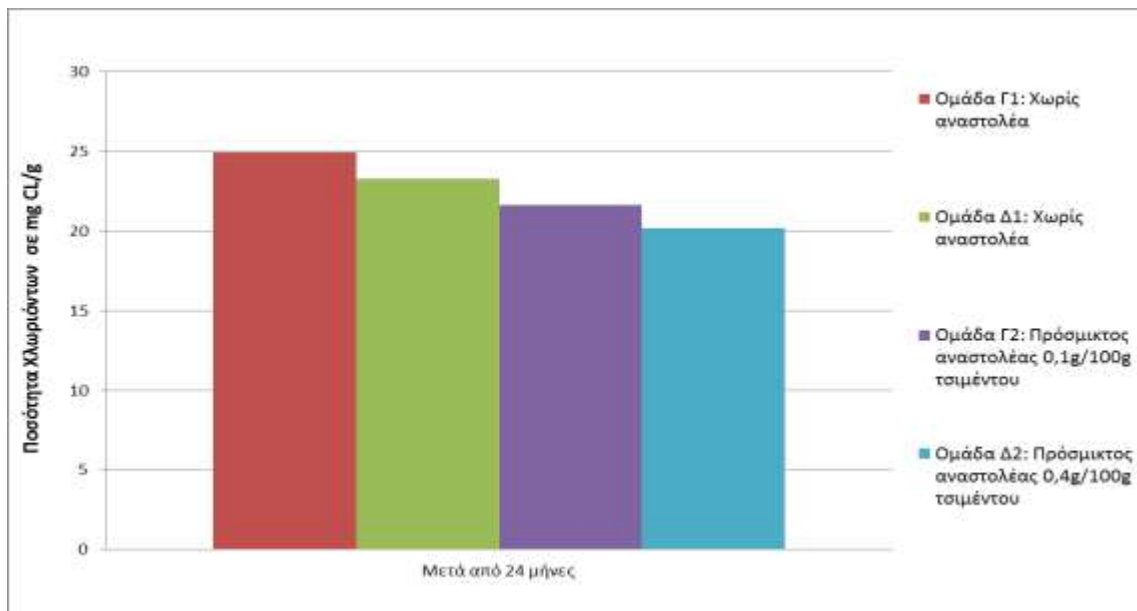
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται τα χλωριόντα στο σκυρόδεμα μετά από 24 μήνες των ομάδων Α, Β και Ε.



Διάγραμμα 9.34: Απεικόνιση της ποσότητας των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από διάστημα 24 μηνών των ομάδων A, B και E.

Από το ανωτέρω διάγραμμα προκύπτει ότι η ποσότητα των χλωριόντων βρίσκεται σχεδόν στα ίδια επίπεδα για τις ομάδες A και B και με μικρή διαφορά η ομάδα E εμφανίζει μεγαλύτερη ποσότητα χλωριόντων.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται τα χλωριόντα στο σκυρόδεμα μετά από 24 μήνες των ομάδων Γ και Δ.



Διάγραμμα 9.35: Απεικόνιση της ποσότητας των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από διάστημα 24 μηνών των ομάδων Γ και Δ.

Από το ανωτέρω διάγραμμα προκύπτει ότι η ποσότητα των χλωριόντων στα τμήματα των δοκιμίων όπου δεν έχουν αναστολέα διάβρωσης είναι μεγαλύτερη από τα τμήματα των δοκιμίων όπου περιέχουν αναστολέα διάβρωσης, χωρίς όμως με μεγάλες αποκλίσεις.

9.4.5.2 Δοκίμια με ψεκαζόμενο και πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης στα ασβεστολιθικά τσιμέντα – Δοκίμια πίνακα 9.2

Στην περίπτωση αυτή εξετάστηκαν 11 ομάδες: CEM I, LC1, LC2, CEM I + C.I.(additive), LC1 + C.I.(additive), LC2+ C.I.(additive), CEM I + C.I.(sprayed), LC1 + C.I.(sprayed), LC2+ C.I.(sprayed), SR και SR + C.I.(sprayed). Τα δοκίμια των ομάδων CEM I + C.I.(additive), LC1 + C.I.(additive), LC2+ C.I.(additive) περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο ενώ τα δοκίμια των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC1 + C.I.(sprayed), LC2+ C.I.(sprayed) και SR + C.I.(sprayed) περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως ψεκαζόμενο. Τα δοκίμια των ομάδων CEM I, LC1, LC2 και SR δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης και χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρο σύγκρισης με τα δοκίμια με τον αναστολέα διάβρωσης. Παρακάτω θα ακολουθήσουν οι μετρήσεις κάθε ομάδας ως προς την μέτρηση χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

Πίνακας 9.83: Ποσότητα χλωριόντων στο σκυρόδεμα για τις ομάδες CEM I, CEM I + C.I.(additive) και CEM I + C.I.(sprayed) .

ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ ΑΝΑ ΟΜΑΔΑ								
ΟΜΑΔΑ	ΔΟΚΙΜΙΑ	mg Cl /g (διάλυμα AgNO ₃)	ΟΜΑΔΑ	ΔΟΚΙΜΙΑ	mg Cl /g (διάλυμα AgNO ₃)	ΟΜΑΔΑ	ΔΟΚΙΜΙΑ	mg Cl /g (διάλυμα AgNO ₃)
CEM ₁	1	13,56	CEM I + C.I.(addi tive)	1	10,65	CEM I + C.I.(sprayed)	1	10,85
	2	13,08		2	10,90		2	11,94
	3	12,95		3	11,55		3	12,24
	Μέσος Όρος	13,20		Μέσος Όρος	11,03		Μέσος Όρος	11,68

Πίνακας 9.84: Ποσότητες χλωριόντων στο σκυρόδεμα για τις ομάδες LC2, LC2+ C.I.(additive), και LC2+ C.I.(sprayed).

ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ ΑΝΑ ΟΜΑΔΑ								
ΟΜΑΔΑ	ΔΟΚΙΜΙΑ	mg Cl /g (διάλυμα AgNO ₃)	ΟΜΑΔΑ	ΔΟΚΙΜΙΑ A	mg Cl /g (διάλυμα AgNO ₃)	ΟΜΑΔΑ	ΔΟΚΙΜΙΑ	mg Cl /g (διάλυμα AgNO ₃)
LC2	1	16,85	LC 2 + C.I.(addi tive)	1	14,50	LC 2 + C.I.(sprayed)	1	15,28
	2	16,72		2	15,94		2	15,96
	3	17,44		3	15,23		3	16,04
	Μέσος Όρος	17,00		Μέσος Όρος	15,22		Μέσος Όρος	15,76

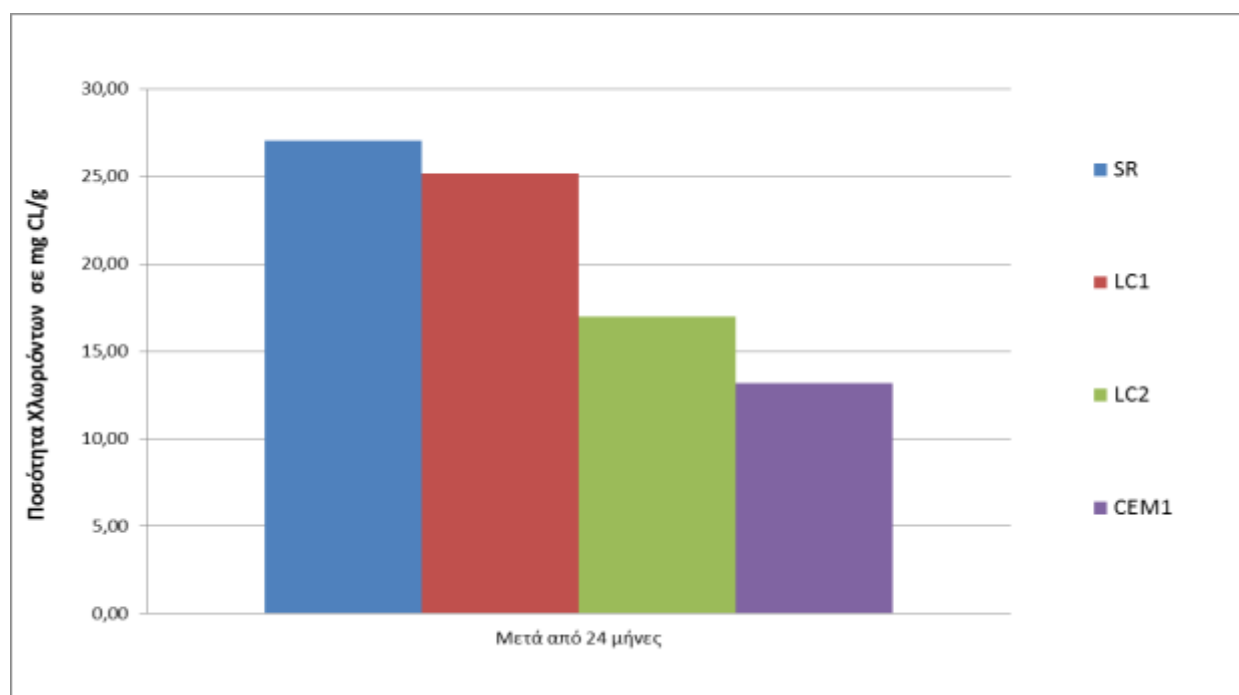
Πίνακας 9.85: Ποσότητες χλωριόντων στο σκυρόδεμα για τις ομάδες LC1, LC1+ C.I.(additive), και LC1+ C.I.(sprayed).

ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ ΑΝΑ ΟΜΑΔΑ								
ΟΜΑΔΑ	ΔΟΚΙΜΙΑ	mg Cl /g (διάλυ μα AgNO ₃)	ΟΜΑΔΑ	ΔΟΚΙΜΙΑ	mg Cl /g (διάλυμ α AgNO ₃)	ΟΜΑΔΑ	ΔΟΚΙΜΙΑ	mg Cl /g (διάλυμα AgNO ₃)
LC1	1	25,51	LC 1 + C.I.(additi ve)	1	18,95	LC 1 + C.I.(spraye d)	1	22,94
	2	26,14		2	20,25		2	23,61
	3	23,91		3	21,54		3	24,58
	Μέσος Όρος	25,19		Μέσος Όρος	20,24667		Μέσος Όρος	23,71

Πίνακας 9.86: Ποσότητα χλωριόντων στο σκυρόδεμα για τις ομάδες SR και SR + C.I.(sprayed) .

ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΕΝΤΟΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ ΑΝΑ ΟΜΑΔΑ					
ΟΜΑΔΑ	ΔΟΚΙΜΙΑ	mg Cl /g (διάλυμα AgNO ₃)	ΟΜΑΔΑ	ΔΟΚΙΜΙΑ	mg Cl /g (διάλυμα AgNO ₃)
SR	1	26,81	SR + C.I.(sprayed)	1	25,58
	2	26,52		2	24,74
	3	27,83		3	25,99
	Μέσος Όρος	27,05		Μέσος Όρος	25,44

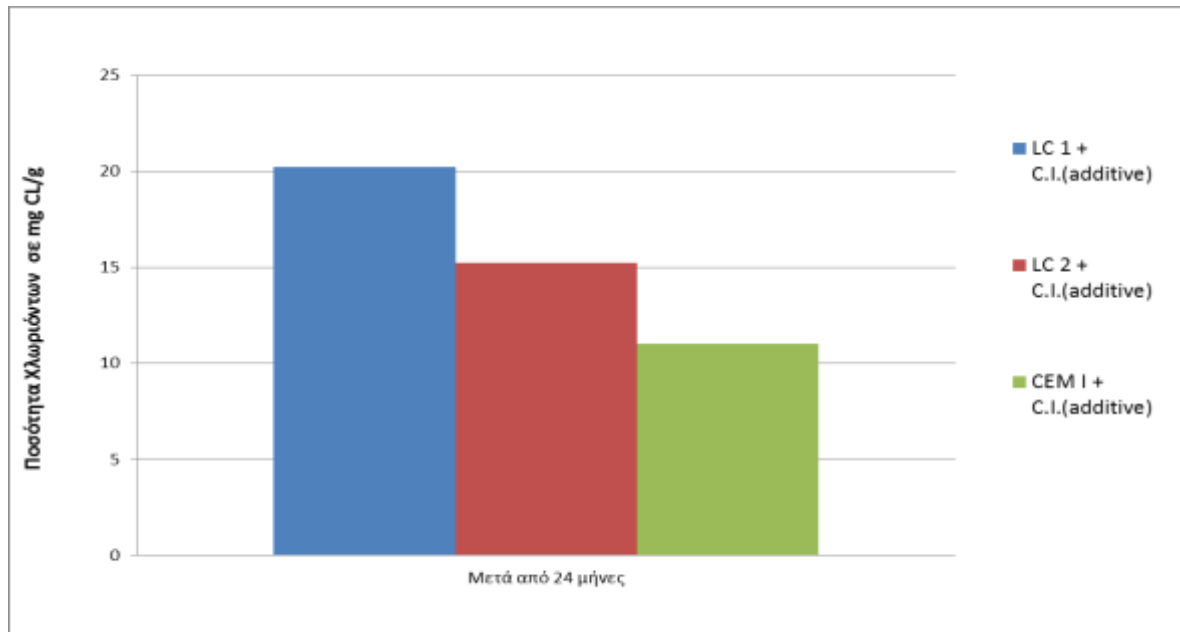
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται τα χλωριόντα στο σκυρόδεμα μετά από 24 μήνες των ομάδων CEM I, LC 1, LC2 και SR.



Διάγραμμα 9.36: Απεικόνιση της ποσότητας των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από διάστημα 24 μηνών, των ομάδων CEM I, LC 1, LC2 και SR.

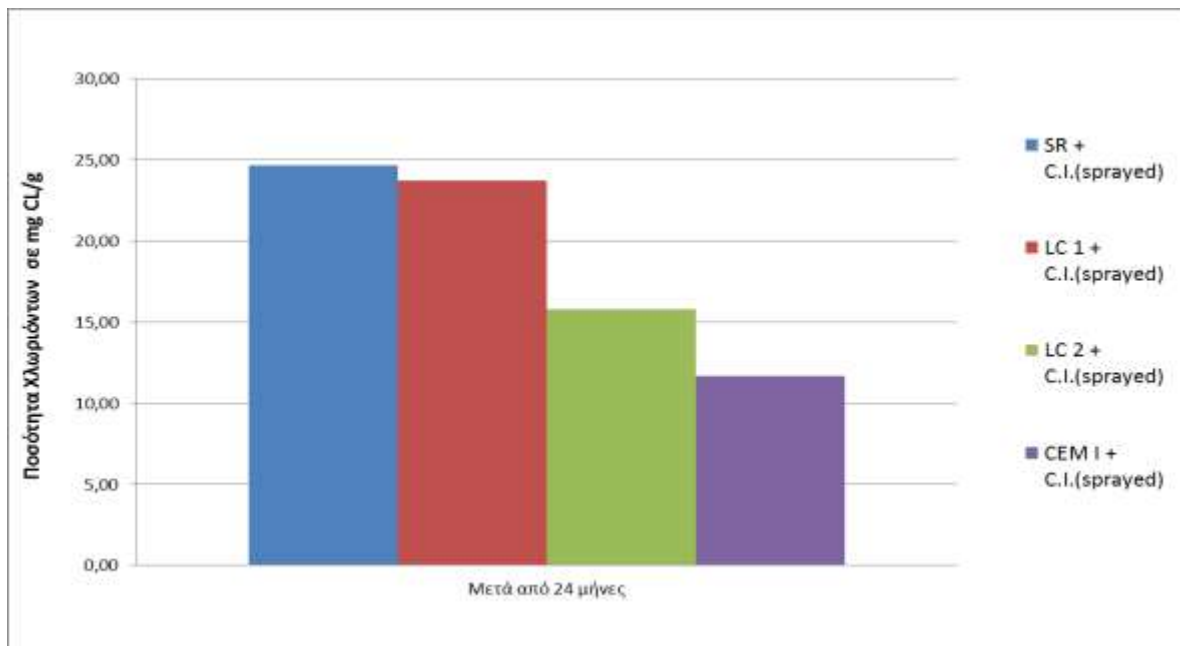
Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι μετρήσεις των χλωριόντων στο σκυρόδεμα για τις ομάδες CEM I, LC 1, LC2 και SR, όπου δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης. Παρατηρούμε ότι η ομάδα SR έχει την μεγαλύτερη ποσότητα χλωριόντων, μετά ακολουθεί η LC1, η LC2 και τέλος CEM I. Παρατηρούμε ότι οι ομάδες των ασβεστολιθικών βρίσκονται ανάμεσα στις δύο άλλες ομάδες. Η ομάδα SR και LC1 δεν έχουν μεγάλη απόκλιση ενώ αντιθέτως η CEM I έχει αρκετά μικρότερη ποσότητα χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται τα χλωριόντα στο σκυρόδεμα μετά από 24 μήνες των ομάδων CEM I + C.I.(additive), LC 1 + C.I.(additive) και LC 2 + C.I.(additive).



Διάγραμμα 9.37: Απεικόνιση της ποσότητας των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από διάστημα 24 μηνών, των ομάδων CEM I + C.I.(additive), LC 1 + C.I.(additive) και LC 2 + C.I.(additive).

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι μετρήσεις των χλωριόντων στο σκυρόδεμα για τις ομάδες CEM I + C.I.(additive), LC 1 + C.I.(additive) και LC 2 + C.I.(additive), όπου περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο. Παρατηρούμε ότι η ομάδα LC 1 + C.I.(additive) έχει την μεγαλύτερη ποσότητα χλωριόντων, μετά ακολουθεί η LC 2 + C.I.(additive) και τέλος CEM I + C.I.(additive). Παρατηρούμε ότι η ομάδα CEM I συμπεριφέρεται καλύτερα από τις ομάδες των ασβεστολιθικών. Επίσης, παρατηρούμε ότι η ομάδα των ασβεστολιθικών με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο (LC 2) έχει μικρότερη ποσότητα χλωριόντων.



Διάγραμμα 9.38: Απεικόνιση της ποσότητας των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από διάστημα 24 μηνών, των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC 1 + C.I.(sprayed), LC 2 + C.I.(sprayed) και SR + C.I.(sprayed).

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται οι μετρήσεις των χλωριόντων στο σκυρόδεμα για τις ομάδες CEM I + C.I.(sprayed), LC 1 + C.I.(sprayed), LC2 + C.I.(sprayed) και SR + C.I.(sprayed), όπου περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως ξεκαζόμενο. Παρατηρούμε ότι η ομάδα SR + C.I.(sprayed) έχει την μεγαλύτερη ποσότητα χλωριόντων, μετά ακολουθεί η LC 1 + C.I.(sprayed), εν συνεχεία η LC 2 + C.I.(sprayed) και τέλος CEM I + C.I.(sprayed). Παρατηρούμε ότι η ομάδα CEM I συμπεριφέρεται καλύτερα από τις ομάδες των ασβεστολιθικών και η SR συμπεριφέρεται χειρότερα από όλες τις ομάδες. Επίσης, παρατηρούμε ότι η ομάδα των ασβεστολιθικών με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο (LC 2) έχει μικρότερη ποσότητα χλωριόντων από την ομάδα LC 1.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

10 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

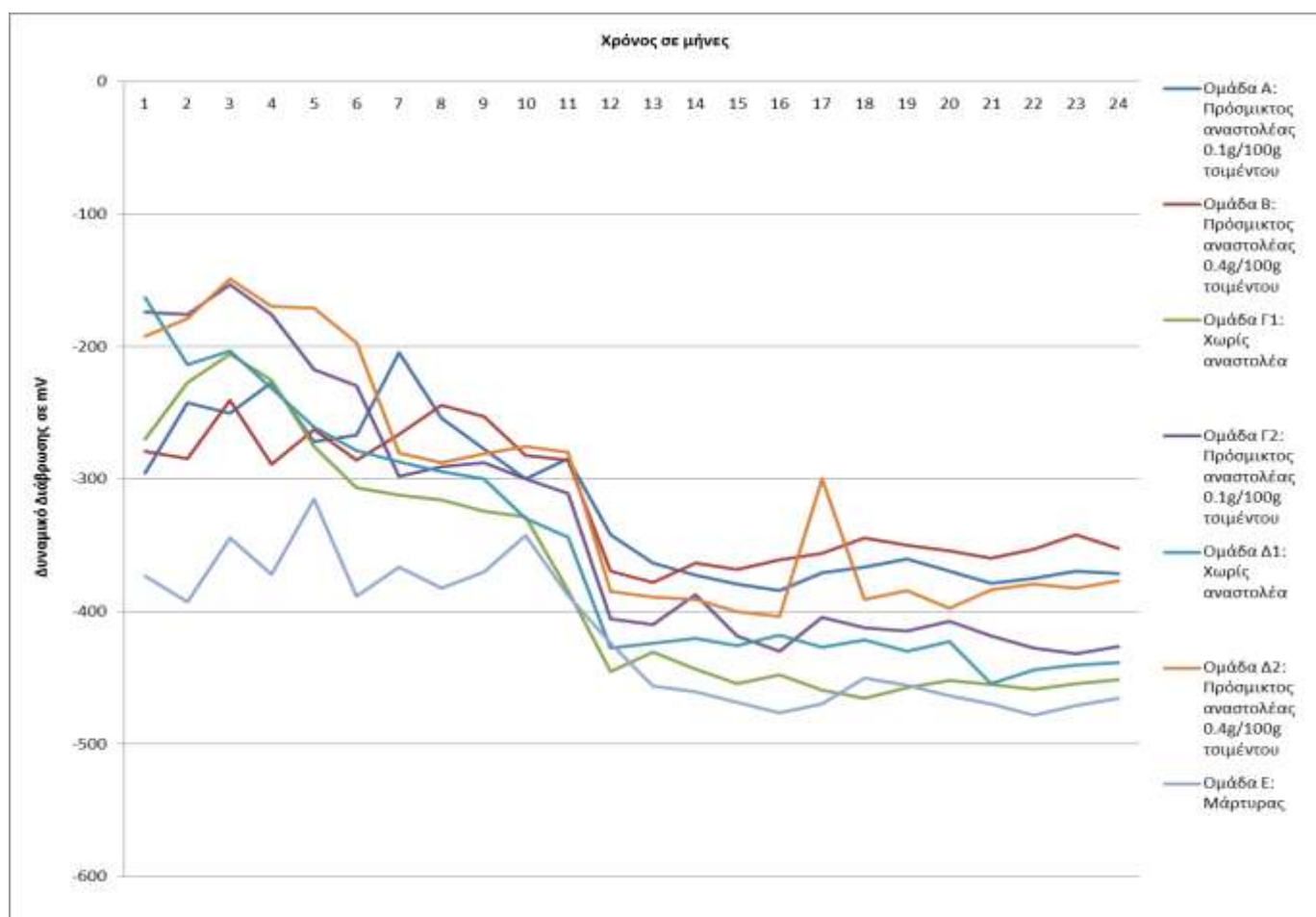
Η διάβρωση του οπλισμού αποτελεί ένα από τα κυριότερα κατασκευαστικά και οικονομικά προβλήματα στις μέρες μας (Τάσσιος, 1993). Το ίδιο το σκυρόδεμα αρχικά αποτελεί ένα προστατευτικό αλκαλικό περιβάλλον γύρω από τον οπλισμό. Η μείωση όμως της αλκαλικότητας λόγω ενανθράκωσης του σκυροδέματος ή λόγω διείσδυσης των χλωριόντων οδηγούν στην καταστροφή του προστατευτικού στρώματος οξειδίων του οπλισμού και στην ανάπτυξη διαβρωτικής δράσης. Έτσι, ιδίως όταν το περιβάλλον της κατασκευής είναι έντονα διαβρωτικό πρέπει να εξετάζεται η λήψη κατάλληλων προστατευτικών μέτρων. Μεταξύ των συστημάτων προστασίας από τη διάβρωση η χρήση των αναστολέων διάβρωσης ως πρόσμικτα στο σκυρόδεμα είναι μία δημοφιλής, εύκολη και σχετικά οικονομική μέθοδος. Τα χημικά πρόσθετα αναστολής διάβρωσης στο σκυρόδεμα έχουν σαν στόχο τον περιορισμό της διάβρωσης του οπλισμού δια μέσω της δράσης τους στην επιφάνεια του οπλισμού. Οι αναστολείς διάβρωσης έχουν μια ιστορία 150 ετών για την χημική βιομηχανία αντίθετα όμως με το σκυρόδεμα η ιστορία τους είναι πιο μικρή, κύριος λόγος είναι ότι μια πολύ καλή προστατευτική επίδραση στον χάλυβα προξενεί ταυτόχρονα και μείωση της αντοχής του σκυροδέματος.

Οι αναστολείς διάβρωσης είναι ουσίες οι οποίες προστίθενται, καταρχήν, στο σκυρόδεμα κατά την παρασκευή του, με σκοπό να προστατέψουν τον ενσωματωμένο χάλυβα από τη διάβρωση. Το 1978 για πρώτη φορά χρησιμοποιείται σαν αναστολέας διάβρωσης στο σκυρόδεμα το Νιτρώδες ασβέστιο. Η χρήση του νιτρώδες ασβεστίου, $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ως αντιδιαβρωτικό πρόσθετο σκυροδέματος προκαλεί μια ελαφριά αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος με παράλληλη αύξηση της ανθεκτικότητας του ως προς τη διάβρωση (N. S. Berke, 1992, U. Nuerbeger, 1986). Το νιτρώδες ασβέστιο είναι ένας ανοδικός αναστολέας διάβρωσης. 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 οργανικοί αναστολείς είναι μικτοί αναστολείς και μειώνουν τόσο την ανοδική όσο και την καθοδική ηλεκτροχημική αντίδραση της διάβρωσης. Οι δράσεις τους οφείλονται στο ότι προσροφώνται στην επιφάνεια του χάλυβα, δημιουργώντας ένα προστατευτικό στρώμα από την διάβρωση (U. Maeder 1996, M. Kharshan, C. Cracauer, 2011).

Για τις επισκευές οπλισμένου σκυροδέματος παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον οι 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 τη διάβρωση, παρουσιάζοντας διπλή δράση, τόσο ανοδική όσο και καθοδική. (T.H. Misselbrook, J. Webb and S.L. Gilhespy, 2006).

Στην διπλωματική εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε ως αναστολέας διάβρωσης το Βενζοϊκό κυκλοεξυλαμμώνιο. Ο αναστολέας αυτός χρησιμοποιήθηκε σε δοκίμια τύπου CEM I προκειμένου να εξετασθεί η προστατευτική του ικανότητα. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε σε δοκίμια με ασβεστολιθικά τσιμέντα και σε τσιμέντα SR.

Στην αρχή χρησιμοποιήθηκε ο αναστολέας διάβρωσης ως πρόσμικτος. Κατασκευάστηκαν δοκίμια όπου περιείχαν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητες 0,1 g/100 g τσιμέντου και 0,4 g/100 g τσιμέντου και δοκίμια όπου το μισό δοκίμιο δεν περιείχε αναστολέα διάβρωσης και το άλλο μισό περιείχε αναστολέα διάβρωσης, με τις αντίστοιχες περιεκτικότητες. Τέλος, κατασκευάστηκαν και δοκίμια χωρίς αναστολέα διάβρωσης ώστε να γίνει σύγκριση. Καταρχήν παρατίθεται παρακάτω το συνολικό διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης όλων των ανωτέρω ομάδων που κατασκευάστηκαν.

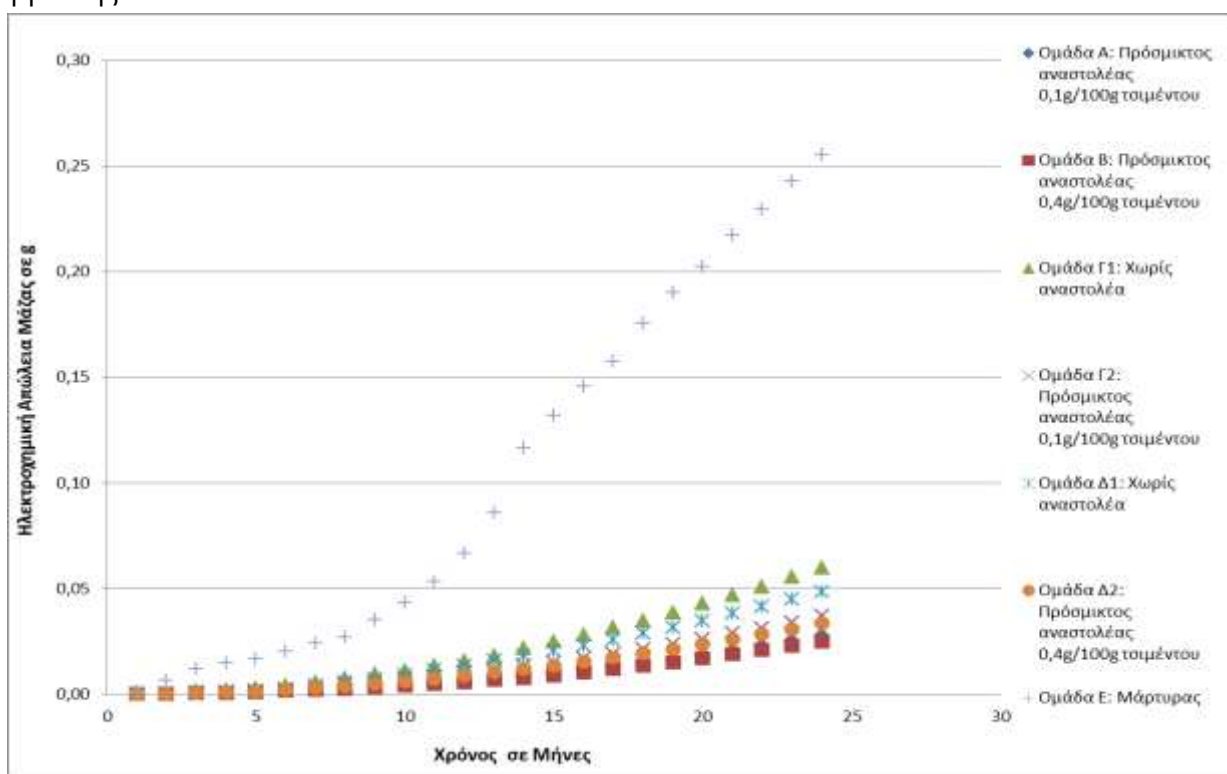


Διάγραμμα 10.1: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον σπλισμό συναρτήσεως του χρόνου όλων των ομάδων.

Βασιζόμενοι στο παραπάνω διάγραμμα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ομάδα B, όπου περιέχει αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,4 g/100 g τσιμέντου έχει καλύτερη συμπεριφορά από όλες τις άλλες ομάδες τουλάχιστον μετά τους 9 μήνες και η ομάδα E όπου δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης έχει την χειρότερη συμπεριφορά. Επίσης, η ομάδα B με αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,4 g/100 g τσιμέντου έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα A όπου περιέχει αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,1 g/100 g τσιμέντου. Η ομάδα Δ2, όπου περιέχει αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,4 g/100 g τσιμέντου έχει χειρότερη συμπεριφορά από την ομάδα B παρόλο που περιέχουν την ίδια περιεκτικότητα σε αναστολέα διάβρωσης αλλά και από την ομάδα A όπου περιέχει αναστολέα διάβρωσης σε

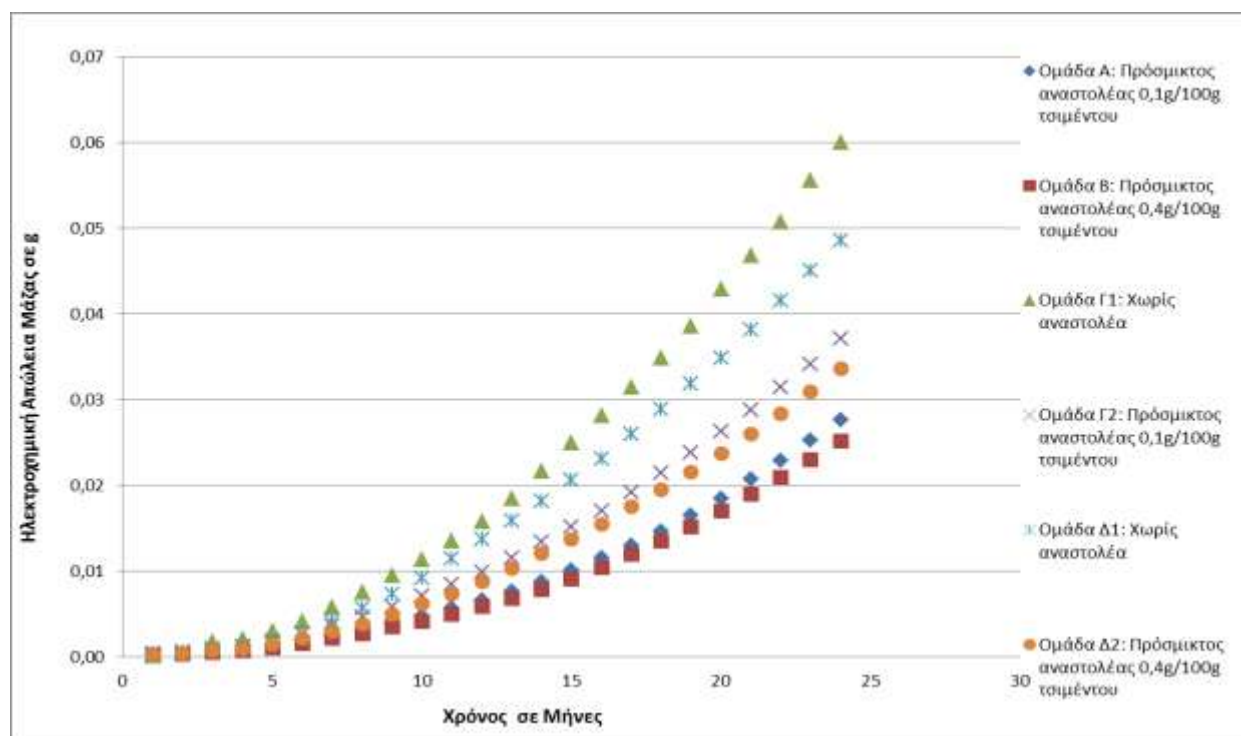
περιεκτικότητα 0,1 g/100 g τσιμέντου. Το ανωτέρω συμπέρασμα προκύπτει από την διάχυση του αναστολέα διάβρωσης από την ομάδα Δ2 (περιεκτικότητα 0,4 g/100 g τσιμέντου) στην ομάδα Δ1 που δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης. Ομοίως ισχύει και για την ομάδα Γ2, που λόγω μικρότερης περιεκτικότητας αναστολέα διάβρωσης έχει χειρότερη συμπεριφορά από την ομάδα Δ2. Εν συνεχεία, παρατηρούμε ότι η ομάδα Δ1, που δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης έχει καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Γ1, που δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης και χειρότερη συμπεριφορά από την ομάδα Γ2, που περιέχει αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,1 g/100 g τσιμέντου. Το παραπάνω αποτέλεσμα οφείλεται στην διάχυση του αναστολέα διάβρωσης από την μία ομάδα στην άλλη. Τέλος, και οι δύο ομάδες Γ1 και Δ1 παρόλο που όπως ήδη αναφέραμε δεν έχουν αναστολέα διάβρωσης λόγω διάχυσης έχουν καλύτερη συμπεριφορά από την ομάδα Ε, όπου δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης σε όλο το δοκίμιο. Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι οι τιμές του δυναμικού διάβρωσης για τις ομάδες Α, Β και Δ2 κυμαίνονται από -250 mV έως -350 mV περίπου, το οποίο σημαίνει ότι ο οπλισμός έχει την τάση να διαβρωθεί με πιθανότητα 50%. Ενώ οι τιμές του δυναμικού διάβρωσης για τις υπόλοιπες ομάδες κυμαίνονται από -350 mV έως -500 mV, το οποίο σημαίνει ότι ο οπλισμός μας στην πάροδο του χρόνου διαβρώνεται με πιθανότητα 90%. Ο αναστολέας μπορεί να προστατέψει μέχρι έναν βαθμό τον οπλισμό που βρίσκεται εγκιβωτισμένος σε κονίαμα.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ηλεκτροχημική απώλεια μάζας για όλες τις ομάδες όπως απεικονίζεται και παρακάτω και προκύπτει σαφώς ότι η ομάδα Ε, όπου δεν περιέχει αναστολέα διάβρωσης έχει την μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας. Και από την ηλεκτροχημική απώλεια μάζας καταλήγουμε στα ίδια συμπεράσματα όπως και στην μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης.



Διάγραμμα 10.2: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό όλων των ομάδων.

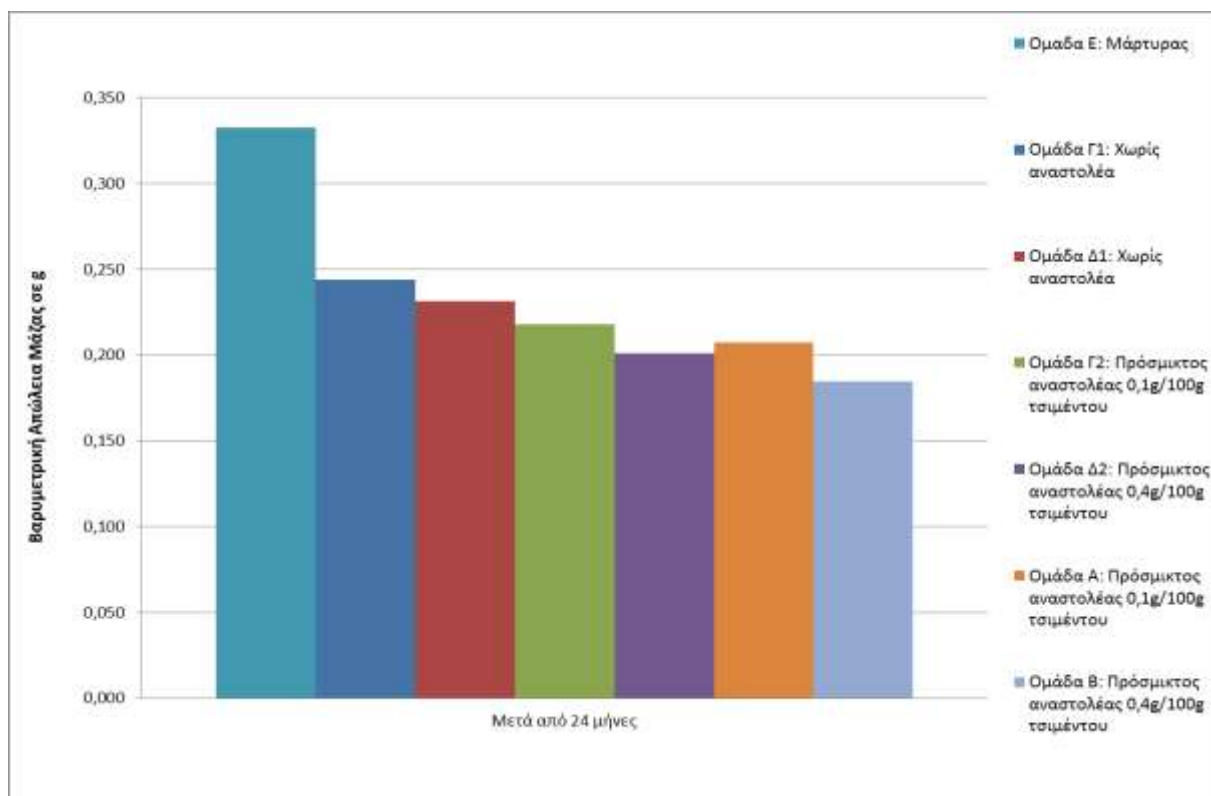
Προκειμένου να γίνει σύγκριση όλων των ομάδων (πλην της ομάδας Ε) παρατίθεται το διάγραμμα 10.3 όπου απεικονίζονται οι μετρήσεις ηλεκτροχημικής απώλειας.



Διάγραμμα 10.3: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον σπλισμό των ομάδων Α, Β, Γ και Δ.

Βασιζόμενοι στα διάγραμματα 10.2 και 10.3 παρατηρούμε ότι η ηλεκτροχημική απώλεια μάζας αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου για όλες τις ομάδες. Αξιοσημείωτο είναι ότι μετά το πέρασμα 24 μηνών η ομάδα Α και η ομάδα Γ2 που περιέχουν πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,1 g/100 g τσιμέντου έχουν 10% μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας από την ομάδα Β και την ομάδα Δ2 που περιέχουν αναστολέα διάβρωσης σε περιεκτικότητα 0,4 g/100 g τσιμέντου, αντίστοιχα. Η ομάδα Γ1 σε σχέση με την ομάδα Δ1 παρουσιάζει 19% μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας. Η ομάδα Γ1 σε σχέση με την ομάδα Γ2 παρουσιάζει 38% μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας και η ομάδα Δ1 σε σχέση με την ομάδα Δ2 παρουσιάζει 31% μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας.

Εν συνεχεία μετρήθηκε η βαρυμετρική απώλεια μάζας που απεικονίζεται παρακάτω στο διάγραμμα 10.4. Από αυτή την μέτρηση καταλήγουμε στο ίδιο συμπέρασμα με την μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης και της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας ως προς την διαδοχική συμπεριφορά προστασίας που παρουσιάζουν οι διάφορες ομάδες.

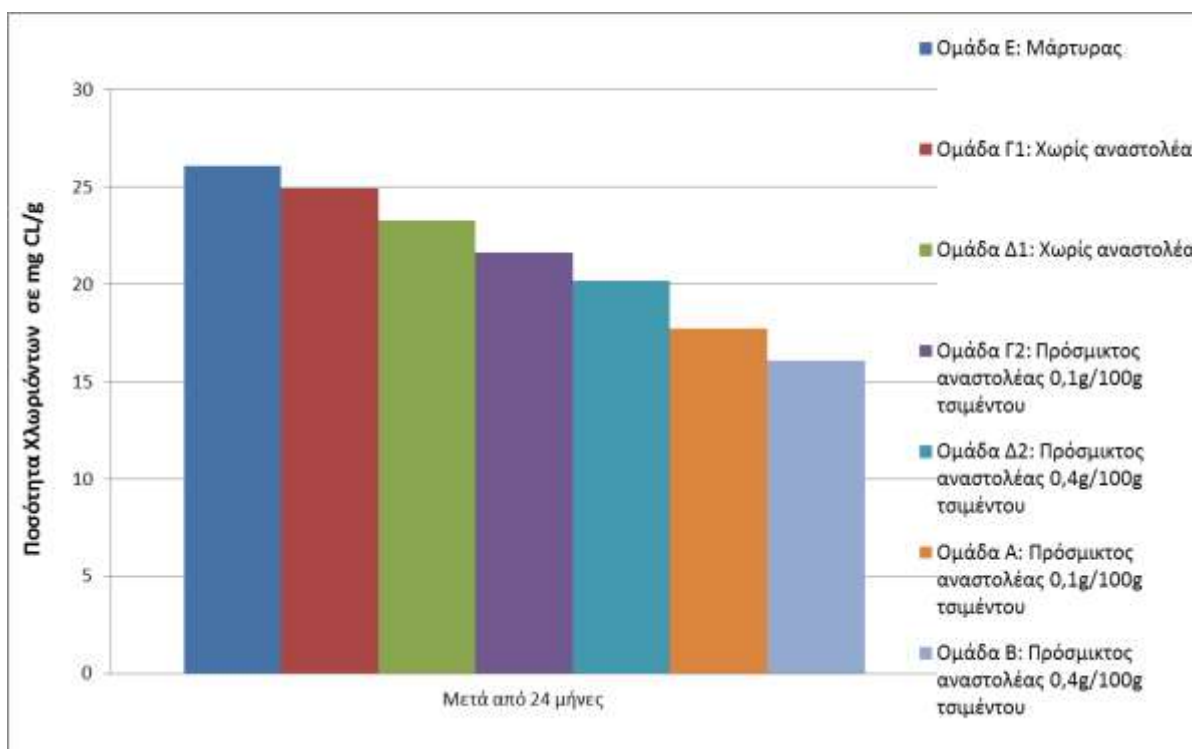


Διάγραμμα 10.4: Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό των ομάδων Α, Β, Γ, Δ και Ε.

Βασιζόμενοι στην βαρυμετρική απώλεια μάζας το ποσοστό προστασίας για την ομάδα Β με περιεκτικότητα αναστολέα διάβρωσης 0,4 g/100 g τσιμέντου ήταν 55% και για την ομάδα Α με περιεκτικότητα αναστολέα διάβρωσης 0,1 g/100 g τσιμέντου ήταν 37%. Για την ομάδα Δ2 το ποσοστό προστασίας ήταν 39%, για την ομάδα Δ1 το ποσοστό προστασίας ήταν 30%, για την ομάδα Γ2 το ποσοστό προστασίας ήταν 34% και για την ομάδα Γ1 το ποσοστό προστασίας ήταν 27%. Παρατηρούμε ότι η ομάδα Δ2 συμπεριφέρεται λίγο καλύτερα από την ομάδα Α αλλά η διαφορά θεωρείται πολύ μικρή.

Είναι γενικά δεκτό ότι η χρήση του αναστολέα διάβρωσης μπορεί να πετύχει έναν διπλασιασμό της ζωής του σκυροδέματος (N. S. Berke, 1992). Παρατηρούμε ότι τα δοκίμια της ομάδας Β εκπληρούν τον όρο αυτό.

Τέλος, προχωρήσαμε στην μέτρηση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα σε όλες τις ομάδες. Παρακάτω φαίνεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από 24 μήνες.



Διάγραμμα 10.5: Απεικόνιση της ποσότητας των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από διάστημα 24 μηνών, όλων των ομάδων.

Συγκρίνοντας το ποσοστό των χλωριόντων στα δοκίμια σε όλες τις ομάδες με αναστολέα διάβρωσης και χωρίς αναστολέα διάβρωσης, διαπιστώθηκε ότι τα δοκίμια χωρίς αναστολέα διάβρωσης είχαν μεγαλύτερο ποσοστό συνολικών χλωριόντων. Μια πιθανή εξήγηση είναι η υδροφοβικότητα που δίνει ο αναστολέας διάβρωσης στους πόρους του σκυροδέματος (BATIS G., GRIGORIADIS G. 1999).

Συγκρίνοντας τις ομάδες Β και Δ2 με την ίδια περιεκτικότητα αναστολέα διάβρωσης παρατηρήσαμε ότι η ομάδα Β έχει 25% λιγότερη ποσότητα χλωριόντων στο σκυρόδεμα λόγω διάχυσης του αναστολέα που εμφανίζεται στην ομάδα Δ. Επίσης, συγκρίνοντας τις ομάδες Α και Γ2 με την ίδια περιεκτικότητα αναστολέα διάβρωσης παρατηρήσαμε ότι η ομάδα Α έχει 22% λιγότερη ποσότητα χλωριόντων στο σκυρόδεμα λόγω διάχυσης του αναστολέα που εμφανίζεται στην ομάδα Γ. Τέλος, συγκρίναμε και τις ομάδες Γ1 και Δ1 με την ομάδα Ε και παρατηρήσαμε ότι η ομάδα Γ1 έχει 5% και η ομάδα Δ1 έχει 12% λιγότερη ποσότητα χλωριόντων στο σκυρόδεμα από την ομάδα Ε. Είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί ότι η διάχυση του αναστολέα διάβρωσης παρουσιάζεται με την ίδια περίπου αναλογία και στις δύο ομάδες με τις διαφορετικές περιεκτικότητες και ιδιαίτερα συγκρίνοντας τα δοκίμια όπου είχαν αναστολέα διάβρωσης.

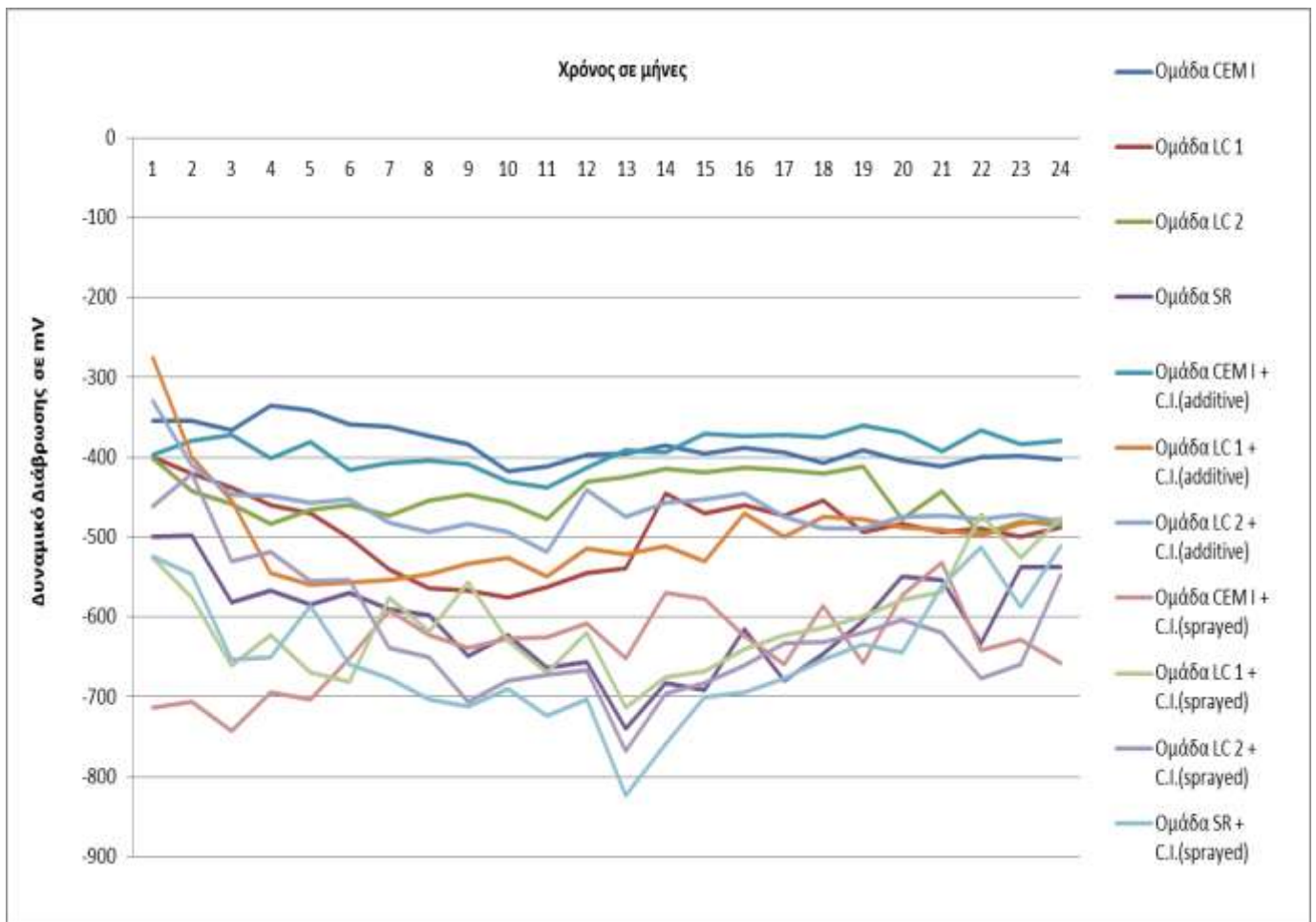
Το γενικό μας συμπέρασμα είναι ότι ο αναστολέας διάβρωσης προστατεύει τον οπλισμό, όμως αν και τετραπλασιάστηκε η ποσότητα του αναστολέα στην μια ομάδα (0,4 g/100 g τσιμέντου) δεν προέκυψε από κανένα αποτέλεσμα τετραπλασιασμός και του βαθμού προστασίας του

οπλισμού. Αντιθέτως, είναι περίπου 18% καλύτερη συμπεριφορά η ομάδα με την τετραπλάσια ποσότητα αναστολέα διάβρωσης. Δεν υπάρχει μια αναλογική σχέση με τον τετραπλασιασμό της ποσότητας του αναστολέα και του ποσοστού προστασίας. Επίσης, με τα δοκίμια όπου περιείχαν στο ένα τμήμα αναστολέα διάβρωσης παρατηρήσαμε ότι εμφανίζεται το φαινόμενο της διάχυσης. Αυτό έχει εφαρμογή σε υφιστάμενες κατασκευές όπου δεν υπάρχει αναστολέας διάβρωσης στην αρχική κατασκευή. Συνεπώς κατά την επισκευή, συνδέοντας το παλιό τμήμα με καινούριο, μπορούμε να πετύχουμε προστασία με την χρήση αναστολέων διάβρωσης. Ιδιαίτερα μετά την εφαρμογή του ΚΑΝΕΠΕ (ΦΕΚ 2187 Β/ 5-9-2013), επιβάλλεται σε πολλές περιπτώσεις έλεγχος στατικής επάρκειας των υφιστάμενων κατασκευών, με αποτέλεσμα κατά την ενίσχυση, να επιβάλλεται, η εφαρμογή των αναστολέων διάβρωσης ώστε να επιμηκύνουν τη ζωή της κατασκευής. Αυτό έχει προταθεί και σε άλλες ερευνητικές εργασίες (Haibing Zheng, Weihua Li, Fubin Ma, Qinglin Kong, 2012).

Αφού μελετήσαμε την δράση του αναστολέα διάβρωσης σε τσιμέντα CEM I και διαπιστώθηκε η προστατευτική επίδραση προχωρήσαμε την έρευνα μας και στην διερεύνηση της δράσης του αναστολέα διάβρωσης στα ασβεστολιθικά τσιμέντα. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι ασβεστολιθικών τσιμέντων με διαφορετική περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο (συνθέσεις LC1 και LC2) (σελ. 128). Είναι γνωστό ότι τα ασβεστολιθικά τσιμέντα είναι πιο οικονομικά αλλά έχουν το μειονέκτημα ότι υστερούν στην ανθεκτικότητα σε σχέση με το τσιμέντο CEM I. Επίσης, μελετήσαμε και την συμπεριφορά του τσιμέντου SR, τσιμέντο ανθεκτικό σε θειικά.

Είναι γνωστό ότι οι αναστολείς διάβρωσης εκτός από την χρήση τους ως πρόσθετα στις κατασκευές έχουν χρήση και στις υφιστάμενες κατασκευές ως ψεκαζόμενοι. Μελετήσαμε την δράση των αναστολέων διάβρωσης και ως πρόσμικτους και ως ψεκαζόμενους στα ασβεστολιθικά τσιμέντα με περιεκτικότητα αναστολέα διάβρωσης 0,4 g/100 g τσιμέντου σε όλα τα δοκίμια. Η χρήση των ψεκαζόμενων αναστολέων διάβρωσης βρίσκει εφαρμογή σε υπάρχουσες κατασκευές που έχουν προβλήματα διάβρωσης οπλισμού. Στην περίπτωση αυτή εξετάστηκαν 11 ομάδες: CEM I, LC1, LC2, CEM I + C.I.(additive), LC1 + C.I.(additive), LC2+ C.I.(additive), CEM I + C.I.(sprayed), LC1 + C.I.(sprayed), LC2+ C.I.(sprayed), SR και SR + C.I.(sprayed). Τα δοκίμια των ομάδων CEM I + C.I.(additive), LC1 + C.I.(additive), LC2+ C.I.(additive) περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο ενώ τα δοκίμια των ομάδων CEM I + C.I.(sprayed), LC1 + C.I.(sprayed), LC2+ C.I.(sprayed) και SR + C.I.(sprayed) περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ως ψεκαζόμενο (βλ. σελ. 154). Τα δοκίμια των ομάδων CEM I, LC1, LC2 και SR δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης και χρησιμοποιήθηκαν ως μέτρο σύγκρισης για την μελέτη της δράσης του αναστολέα διάβρωσης σε κάθε περίπτωση.

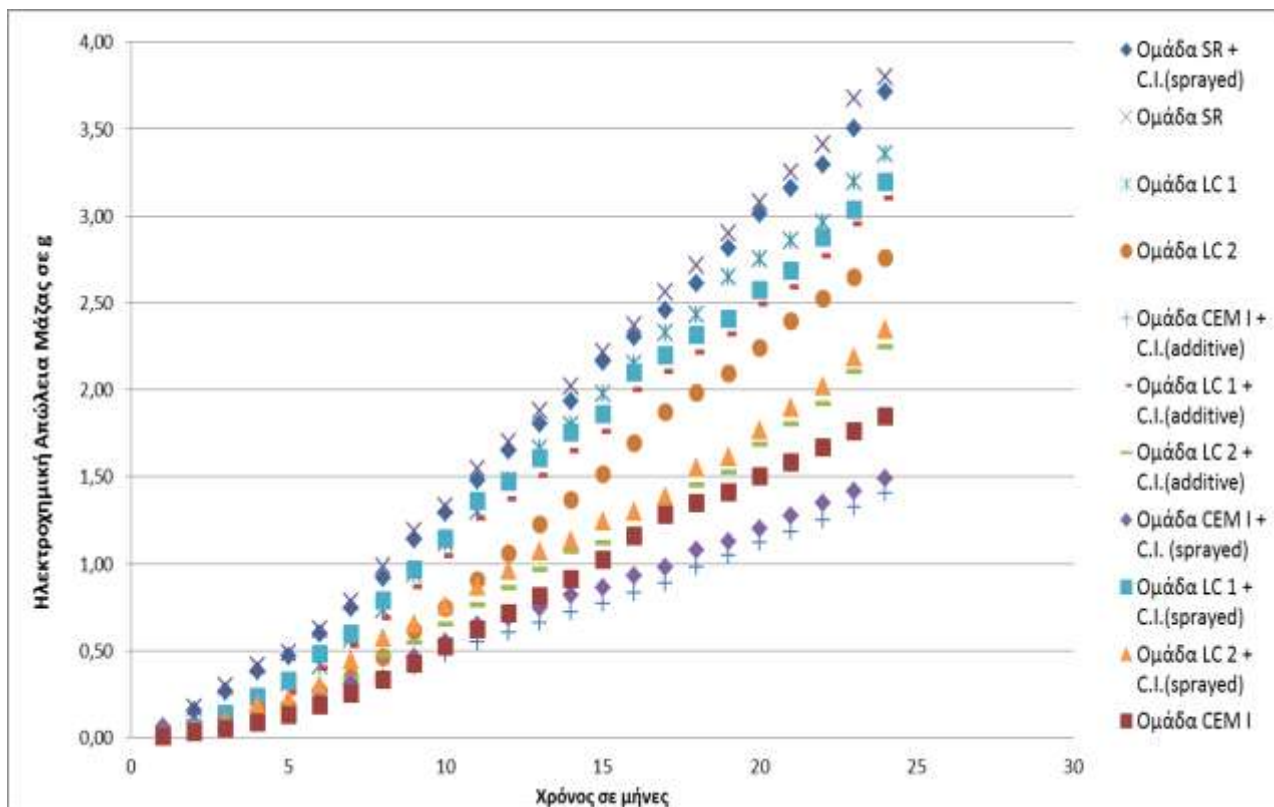
Καταρχήν παρατίθεται παρακάτω το συνολικό διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης όλων των ανωτέρω ομάδων που κατασκευάστηκαν.



Διάγραμμα 10.6: Μέσοι Όροι Δυναμικού Διάβρωσης σε mV στον οπλισμό συναρτήσει του χρόνου όλων των ομάδων.

Βασιζόμενοι στο παραπάνω διάγραμμα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ομάδα CEM I + C.I.(additive) έχει την καλύτερη συμπεριφορά από όλες τις ομάδες. Σε γενικές γραμμές παρατηρούμε ότι ο αναστολέας διάβρωσης επηρεάζει ευνοικά την συμπεριφορά των δοκιμών και μάλιστα ο πρόσμικτος συμπεριφέρεται καλύτερα από τον ψεκαζόμενο σε όλες τις ομάδες. Τους πρώτους μήνες παρατηρείται ότι δεν εμφανίζεται η υπεροχή του αναστολέα διάβρωσης ενώ κατά τους τελευταίους μήνες παρατηρείται μια σταθεροποίηση του δυναμικού και ο αναστολέας προστατεύει τον οπλισμό.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ηλεκτροχημική απώλεια μάζας για όλες τις ομάδες όπου απεικονίζεται παρακάτω στο διάγραμμα 10.7. Προκύπτει ότι η ομάδα SR, όπου έχει τσιμέντο ανθεκτικό σε θειικά έχει την μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας. Αυτό έχει παρατηρηθεί και σε άλλες ερευνητικές εργασίες (Γ. Μπατής, 1989). Συγκρίνοντας την ηλεκτροχημική απώλεια μάζας έχουμε πιο σαφή εικόνα της κατάστασης ως προς την δράση του αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο και ως ψεκαζόμενο.



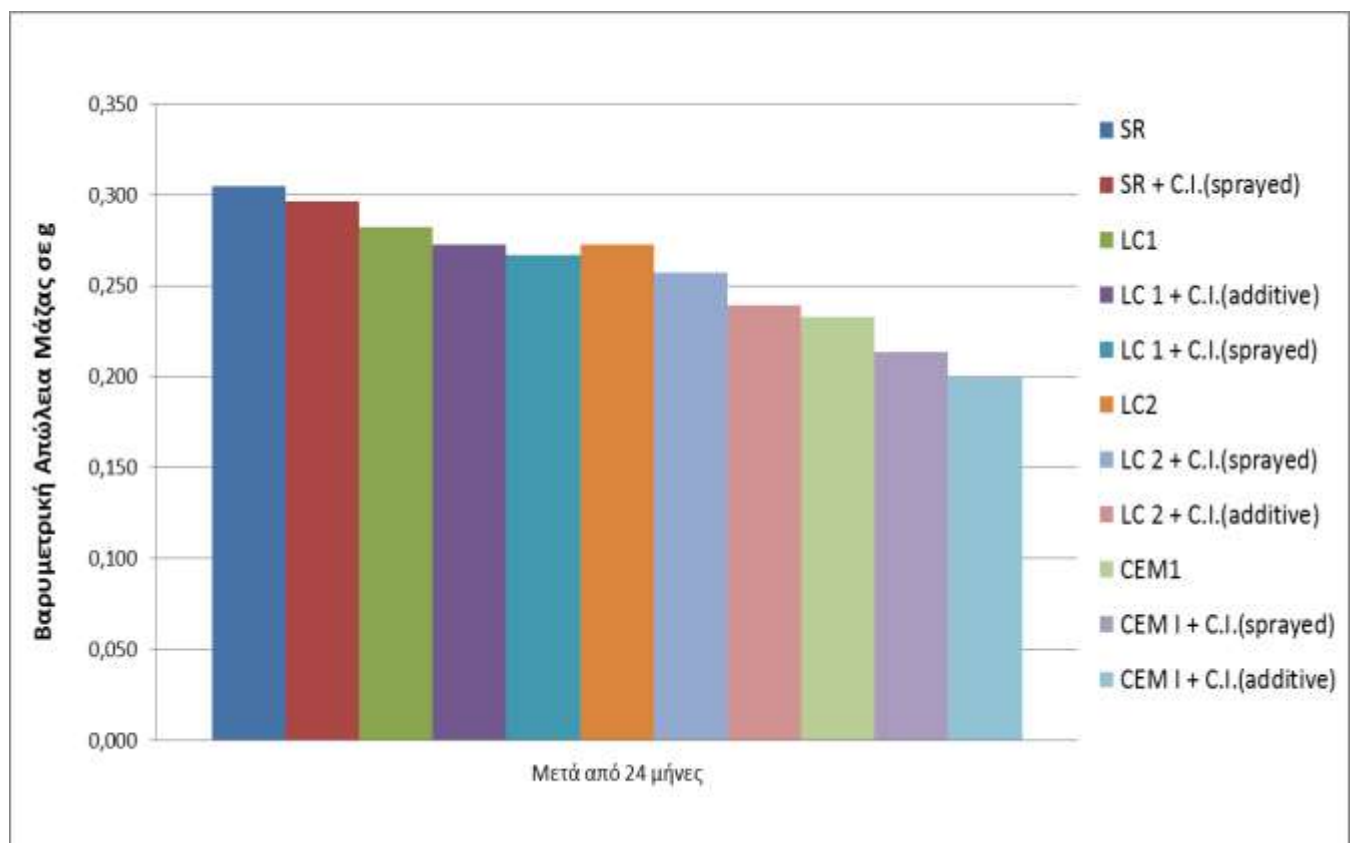
Διάγραμμα 10.7: Ηλεκτροχημική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό όλων των ομάδων.

Βασιζόμενοι στο παραπάνω διάγραμμα 10.7 παρατηρούμε ότι η ηλεκτροχημική απώλεια μάζας αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου για όλες τις ομάδες. Οι ομάδες με σειρά αυξανόμενης προστασίας μετά το πέρασμα 24 μηνών από τη μεγαλύτερη προς την μικρότερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας είναι SR, SR + C.I.(sprayed), LC₁, LC₁ + C.I.(sprayed), LC₁ + C.I.(additive), LC₂, LC₂ + C.I.(sprayed), LC₂ + C.I.(additive), CEM I, CEM I + C.I.(sprayed) και τέλος CEM I + C.I.(additive). Καταρχήν, παρατηρούμε ότι οι ομάδες με τον αναστολέα διάβρωσης είτε αυτός είναι πρόσμικτος είτε είναι ψεκαζόμενος συμπεριφέρονται καλύτερα από αυτές που δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης. Συγκρίνοντας όμως τα δοκίμια με πρόσμικτο και ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο πρόσμικτος έχει καλύτερη δράση από τον ψεκαζόμενο για κάθε ομάδα ξεχωριστά και συγκεκριμένα η ομάδα CEM I + C.I.(sprayed) έχει 6% μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας από την ομάδα CEM I + C.I.(additive), η ομάδα LC₁ + C.I.(sprayed) έχει 3% μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας από την ομάδα LC₁ + C.I.(additive) και η ομάδα LC₂ + C.I.(sprayed) έχει 4% μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας από την ομάδα LC₂ + C.I.(additive). Η διαφορά αυτή είναι λογική μιας και στην περίπτωση του πρόσμικτου αναστολέα διάβρωσης έχουμε ομοιόμορφη διασπορά του αναστολέα στο σκυρόδεμα ενώ στον ψεκασμό η διασπορά είναι στην επιφανειακή ζώνη, με αποτέλεσμα να ξεπλένεται πιο εύκολα.

Επίσης, είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί ότι οι ομάδες των ασβεστολιθικών βρίσκονται ανάμεσα στις άλλες ομάδες CEM I και SR ως προς την συμπεριφορά τους στη διάβρωση. Ο αναστολέας βελτιώνει την συμπεριφορά των ασβεστολιθικών ομάδων αλλά η ομάδα CEM I

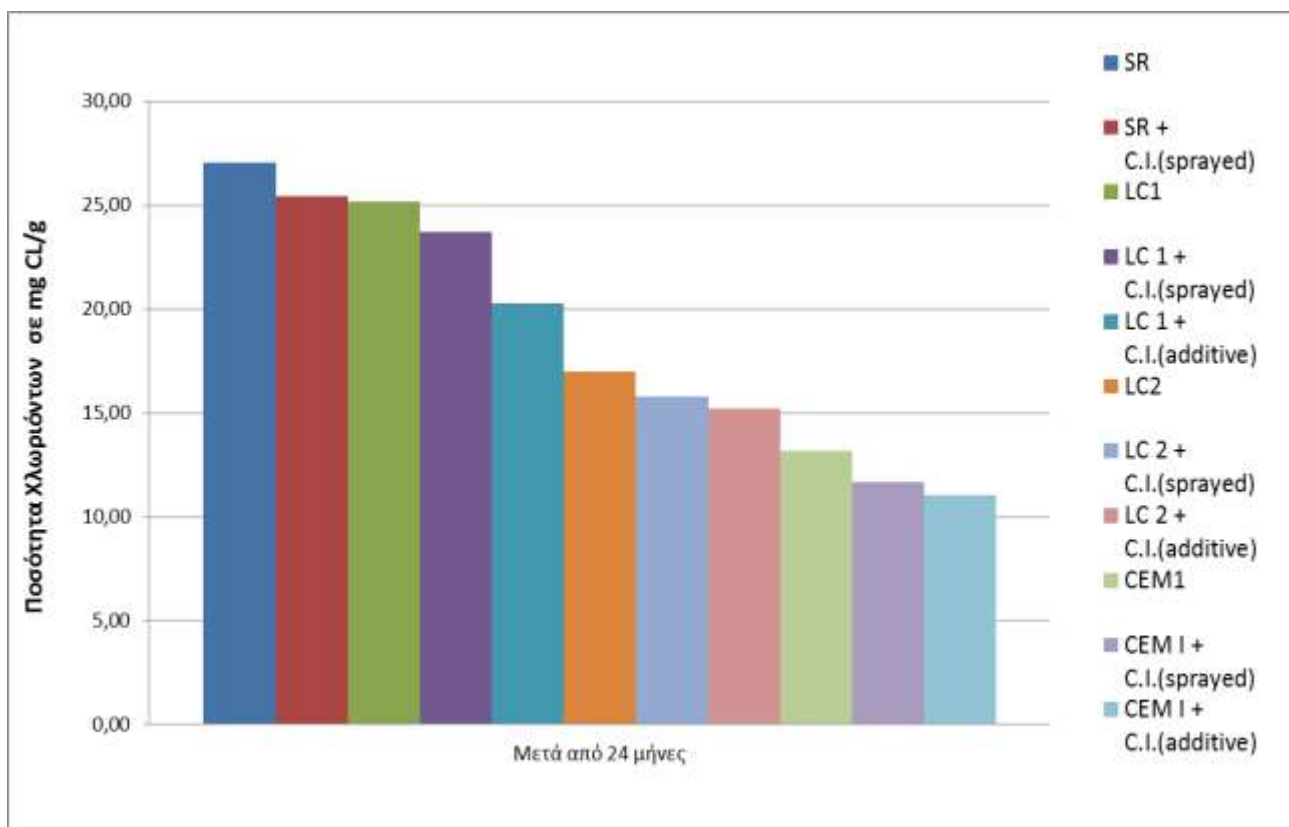
παραμένει να συμπεριφέρεται καλύτερα. Αξιοπρόσεκτο είναι ότι η ομάδα LC 2 + C.I.(additive) παρόλο που έχει την καλύτερη συμπεριφορά από τις ασβεστολιθικές ομάδες και περιέχει και πρόσμικτο αναστολέα διάβρωσης, έχει 21% μεγαλύτερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας από την ομάδα CEM I. Επίσης, παρατηρούμε ότι η ομάδα των ασβεστολιθικών με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο (LC 2) έχει 22% μικρότερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας από την ομάδα LC 1 και αν συγκρίνουμε και την ομάδα LC 2 + C.I.(additive) με την LC 1 + C.I.(additive), παρατηρούμε ότι η ομάδα LC 2 + C.I.(additive) έχει 38% μικρότερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας από την ομάδα LC 1 + C.I.(additive). Επιπλέον, συγκρίναμε και την ομάδα LC 2 + C.I.(sprayed) με την LC 1 + C.I.(sprayed), παρατηρήσαμε ότι η ομάδα LC 2 + C.I.(sprayed) έχει 36% μικρότερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας από την ομάδα LC 1 + C.I.(sprayed). Αποδεικνύεται ότι όταν η περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο είναι 35% έχει καλύτερη συμπεριφορά από όταν η περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο είναι 15% με ή χωρίς αναστολέα διάβρωση. Το ίδιο συμβαίνει και με τη χρήση του αναστολέα διάβρωσης σε πρόσμικτο ή ψεκαζόμενο. Τέλος, παρατηρούμε ότι η ομάδα SR έχει την χειρότερη συμπεριφορά σε σχέση με όλες τις άλλες ομάδες και μάλιστα συγκρίνοντας την με την ομάδα CEM I, η ομάδα CEM I έχει διπλάσια ηλεκτροχημική απώλεια μάζας από την ομάδα SR. Σε σχέση όμως με την ομάδα SR + C.I. (sprayed), η SR + C.I. (sprayed) έχει 2% μικρότερη ηλεκτροχημική απώλεια μάζας από την ομάδα SR.

Εν συνεχεία, μετρήθηκε η βαρυμετρική απώλεια μάζας όπου απεικονίζεται παρακάτω και μέσα από αυτή την μέτρηση καταλήγουμε στα ίδιο συμπέρασμα με την μέτρηση της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας ως προς την διαδοχική συμπεριφορά προστασίας που παρουσιάζουν οι ομάδες.



Διάγραμμα 10.8: Βαρυμετρική Απώλεια Μάζας σε g στον οπλισμό όλων των ομάδων.

Συγκρίνοντας τα δοκίμια με πρόσμικτο και ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο πρόσμικτος έχει καλύτερη δράση από τον ψεκαζόμενο για κάθε ομάδα ξεχωριστά πλην της περιπτώσεως της ομάδας LC1 όπου παρατηρούμε ότι ο ψεκαζόμενος αναστολέας διάβρωσης έχει παρόμοια συμπεριφορά από τον πρόσμικτο αλλά με πολύ μικρή διαφορά, σχεδόν αμελητέα. Η διαφορά αυτή είναι λογική, μιας και στην περίπτωση του πρόσμικτου αναστολέα διάβρωσης, έχουμε ομοιόμορφη διασπορά του αναστολέα στο σκυρόδεμα ενώ στον ψεκασμό η διασπορά είναι στην επιφανειακή ζώνη, με αποτέλεσμα να ξεπλένεται πιο εύκολα. Η ηλεκτροχημική απώλεια μάζας και η βαρυμετρική δίνουν την ίδια συγκριτική σειρά των δοκιμίων, παρόλο που η πρώτη είναι μεγαλύτερη της δεύτερης. Αυτό έχει παρατηρηθεί και σε άλλες ερευνητικές εργασίες (N. Kouloumbi, G. Batis, Ch. Malami, 1994). Τέλος, προχωρήσαμε στην μέτρηση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα σε όλες τις ομάδες. Παρακάτω φαίνεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από 24 μήνες.



Διάγραμμα 10.9: Απεικόνιση της ποσότητας των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μετά από διάστημα 24 μηνών, όλων των ομάδων.

Γενικά τα αποτελέσματα της μέτρησης των χλωριόντων ισχυροποιούν τα αποτελέσματα της ηλεκτροχημικής και βαρυμετρικής απώλειας μάζας.

Συγκρίνοντας το ποσοστό των χλωριόντων στα δοκίμια σε όλες τις ομάδες με αναστολέα διάβρωσης και χωρίς αναστολέα διάβρωσης, διαπιστώθηκε ότι τα δοκίμια χωρίς αναστολέα

διάβρωσης είχαν μεγαλύτερο ποσοστό συνολικών χλωριόντων. Μια πιθανή εξήγηση είναι η υδροφοβικότητα που δίνει ο αναστολέας διάβρωσης στους πόρους του σκυροδέματος.

Συγκρίνοντας τα δοκίμια με πρόσμικτο και ψεκαζόμενο αναστολέα διάβρωσης καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο πρόσμικτος έχει καλύτερη δράση από τον ψεκαζόμενο για κάθε ομάδα ξεχωριστά. Η διαφορά αυτή είναι λογική, μιας και στην περίπτωση του πρόσμικτου αναστολέα διάβρωσης, έχουμε ομοιόμορφη διασπορά του αναστολέα στο σκυροδέμα ενώ στον ψεκασμό η διασπορά είναι στην επιφανειακή ζώνη, με αποτέλεσμα να ξεπλένεται πιο εύκολα.

Ωστόσο παρατηρείται μια αύξηση της ποσότητας των Χλωριόντων στις ομάδες όπου δεν έχουμε αναστολέα διάβρωσης σε σύγκριση με τις ομάδες που περιείχαν αναστολέα διάβρωσης. Μια πιθανή εξήγηση είναι η υδροφοβικότητα στην οποία δίνει ο αναστολέας στους πόρους του σκυροδέματος (BATIS G., GRIGORIADIS G. 1999).

Η διαφορά αυτή οφείλεται ότι ο αναστολέας διάβρωσης καθώς απορροφάται στην επιφάνεια του μετάλλου, δημιουργεί ένα παθητικό στρώμα, το οποίο επηρεάζει σημαντικά την ηλεκτροχημική μέτρηση (Maeder, 1996). Ως εκ τούτου το υπολογιζόμενο ρεύμα διάβρωσης μειώνεται αισθητά εξαιτίας των επιδράσεων τοπικών γαλβανικών στοιχείων που μπορούν να προκύψουν από τις διάφορες συγκεντρώσεις των αναστολέων διάβρωσης.

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Το γενικό μας συμπέρασμα είναι ότι ο αναστολέας διάβρωσης προστατεύει τον οπλισμό σε δοκίμια με τσιμέντο CEM I.
2. Δεν υπάρχει γραμμική αναλογία μεταξύ ποσοστού προστασίας και ποσότητας αναστολέα διάβρωσης
3. Επαληθεύθηκε ότι ο αναστολέας διάβρωσης διαχέεται μέσα στο σκυρόδεμα.
4. Ο αναστολέας διάβρωσης προστατεύει τον οπλισμό και στα ασβεστολιθικά τσιμέντα.
5. Για την κατηγορία δοκιμίων με τα ασβεστολιθικά τσιμέντα συμπεραίνεται ότι ο πρόσμικτος αναστολέας διάβρωσης προσφέρει μεγαλύτερη προστασία από τον ψεκαζόμενο.
6. Την καλύτερη συμπεριφορά επιτυγχάνει ο αναστολέας διάβρωσης στο ασβεστολιθικό τσιμέντο LC 2.

11 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

"Life-cycle Cost Case Study, 1997: River Crossing Highway Bridge (Schaffhausen Bridge, Switzerland)", Published by Euro Inox

A. Poeydomenge and W.H. Hartt, 1998, "Cathodic Protection of Pre-Tensioned Concrete: Part II - Experiments upon Prestressed Beams", CORROSION98, Paper No. 631, NACE, Houston, Texas

A.A. Almusallam, F.M. Khan, S.U. Dulaijan, O.S.B. Al- Amoudi, 2003, "Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability", Cement & Concrete Composites 25, pp. 473-481

A.-L. Stauder and W.H. Hartt, 1998, "Cathodic Protection of Pre-Tensioned Concrete: Part I - Brittle Fracture Propensity of Corrosion Damaged Prestressing Tendon Wire", CORROSION98, Paper No. 635, NACE, Houston, Texas

A.M. El-Sherik and M. Shirkhazadeh, 1992, "Hydrogen Permeation Through Cathodically Protected Iron Membranes in Simulated Concrete Environment", Corrosion, 48, 1001-1008 (1992).

A.M. Neville, J.J. Brooks, <Concrete Technology>, Longman, 1987

ACI 222 R-15, 'Corrosion of metals in concrete', ACI Manual of concrete practice, Part 1, Materials and General Properties of Concrete, American Concrete Institute

ACI 318-05, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, Publication date: 2005

American Galvanizers Association, 2000, Galvanizing for Corrosion Protection-A Specifier's Guide to Reinforcing Steel, Colorado.

American Galvanizers Association, 2000, Hot Dip Galvanizing versus Fusion Bonded Epoxy, Colorado.

An Cheng, Ran Huang, Jiann-Kuo Wu and Cheng-Hsin Chen, 2005, "Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete", Materials Chemistry and Physics, Vol.93, Issues 2-3, pp.404-411

ASTM C 618, American Society for Testing and Materials. ASTM Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as Mineral Admixture in Portland

ASTM C150-05, Standard Specification for Portland Cement, 2005

ASTM C494/C494M-05a, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Publication date 1992

ASTM C595-07, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements, Publication date:2007

Baker A.P., Cory H.P., 1991, The early hydration of limestone-filled cements In: Blended cements in construction (ed. Swamy R.N.), Proc. Int. Conf., Sheffield 9-12 Sept. 1991, Elsevier Applied Science, London (UK)

BATIS G., GRIGORIADIS G., 1999, «Anti-corrosive performance of various inhibitors in lightweight concrete» Infrastructure regeneration and rehabilitation improving the quality of life through better construction. International conference, Sheffield, ROYAUME-UNI (28/06/1999), pp. 591-599

Batis, G., Katsiamboulas, A., Meletiou, C.A, Chaniotakis, E., 1996, "Durability of Reinforced Concrete made with Composite Cement Containing Kiln Dust" International Conference "Concrete in the Service of Mankind", Dundee, UK, pp. 67-72

BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, ERMCO, 2005: European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use, May 2005, downloadable from www.efnarc.org

Broomfield, J.P., Rodriguez, J., Ortega, L.M., and Garcia, A.M., 1994, "Corrosion rate measurements in reinforced concrete structures by a linear polarization device", in Weyers, R.E. (ed.) Philip D. Cady Symposium on Corrosion of Steel in Concrete, American Concrete Institute, Special Publication 151

BS 12: 91, Specification for Portland Cement, 1991

BS 5075 P1, Accelerating Admixtures, Retarding Admixtures and Water Reducing Admixtures, Publication date 2000

BS 5075 P3, Superplasticizing Admixtures, Publication date 2000

C. Shi and R.L.Day, 1995, "A Calorimetric Study of Early Hydration of Alkali – Slag Cement", Cement And Concrete Research, Vol. 25, No. 6, pp. 1333-1346

C. Shi and R.L.Day, 1996, "Some Factors Affecting Early Hydration of Alkali – Slag Cement", Cement And Concrete Research, Vol. 26, No. 3, pp. 439-447

C.L. Page, P. Lambert and P.R.W. Vassie, «Investigations of Reinforcement Corrosion. 1. The Pore Electrolyte Phase in Chloride Contaminated Concrete», Materials Structures, 24, 243-252 (1991)

Ch. Malami, G. Batis, N. Kouloumbi, V. Kaloidas, 1994, "Influence of Pozzolanitic and Hydraulic Cement Additions on Carbonations and Corrosion of Reinforced Mortar Specimens", Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, Sheffield, Vol 2, pp 668-679

Ch. Malami, V. Kaloidas, G. Batis, N. Kouloumbi, 1994, "Carbonation and Porosity of Mortar Specimens with Pozzolanitic and Hydraulic Cement Admixture", Cement and Concrete Research, Vol 24, No 8, p 1444-1454

Chandler, K. A., 1984, " Marine offshore corrosion", Butterworths, London

Chandler, K. A., and Kilcullen, M. B, 1968, "Survey of corrosion and atmospheric pollution in and around Sheffield", Br. Corrosion Journal, No. 3, pp.80-84

Chandler, K. A., Bayliss, B. A., 1985, "Corrosion Protection of Steel Structures" Elsevier Applied Science

Coat. Tech. 179 (2004) 158 – 164

D. A. Jones, 1992, "Principles and prevention of corrosion", Prentice – Hall

D. Ramirez, E. Oters, J. A. Conzalas, 1993, "Determination of Critical Inhibition Threshold in Fe-Ca(OH)₂-Cl--NO₂- System, Br. Corrosion Journal, Vol 28, No 2, pp121-124

D.A. Bayliss, D.H. Deacon, 2002, "Steelwork corrosion control", Spon Press, Second edition

D.A. Hausmann, 1969, "Criteria for Cathodic Protection of Steel in Concrete", Materials Protection, 8 (10), 23-25

Din 1045-1 Plain, reinforced and prestressed concrete structures – Design and construction, Publication date: 2005-06

DIN 1045-2, Concrete, reinforced and prestressed concrete structures – Part 2: Concrete; Specification, properties, production and conformity; Application rules for DIN EN 206-1, Publication date: 2001-07

DIN 1164-10, Special cement - Part 10: Composition, requirements and conformity evaluation for special common cement, Publication date:2004

DIN 1164-31, Portland-, Iron Portland-, blast furnace- and trass cement; determination of granulated blast furnace slag content of iron Portland cement and blast furnace cement and trass content of trass cement, Publication date:1990

DIN EN 1008,2002, «Mixing water for concrete - Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete»; German version EN 1008, Publication date 2002

DIN EN 12620/A1,2002, Aggregates for concrete; German version EN 12620:2002/prA1:2006, Publication date 2002

Domone P. and Chai H., 1997: "Testing of binders for High-Performance Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 27 (8), 1997, pp. 141-147.

Domone P., Chai H. and Jin J, 1999: "Optimum mix proportioning of self-compacting concrete", Proceedings of International Conference on Innovation in Concrete Structures: Design and Construction, Dundee, September 1999, Thomas Telford; London, pp. 277-285

E. Proverbio, E.Mejía, O. García and E. Traversa, 1995, "Incorrect Cathodic Protection Connection Leads to Rebar Corrosion", Materials Performance, 34/8, 27-30

Edamatsu Y., Nishida N, and Ouchi M., 1999: "A rational mix-design method for selfcompacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles". Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, September 1999, pp. 309-320.

ENV 10080, 1996, « Steel for the reinforcement of concrete. Weldable ribbed reinforcing steel B500. Technical delivery conditions for bars, coils and welded fabric», Publication Date 1996

F. de Larrard, 1999: Concrete mixture proportioning-a scientific approach, in S. Midness, A. Bentur (EDs), Modern Concrete Technology Series No 7, E&FN SPON, London, 1999, p. 421.

F. Massazza, 1985, 'Concrete resistance to sea water and marine environment', Cemento, Vol. 1, pp. 3-26

G. Batis, A. Routoulas and E. Rakanta, 2003, «Effects of Migrating Inhibitors on Corrosion of Reinforcing Steel Covered with Repair Mortar», Cement and Concrete Composites, Vol. 25, pp 109-115

G. Batis, N. Kouloumbi, A. Aidini, 1994, "The effects of curing time on the chloride corrosion of steel rebars in concrete with slag", Be'ton, Plâtres, Chaux, 6, No. 811, pp.405-410.

G. Batis, N. Kouloumbi, A. Aidini, 1994, "The effects of curing time on the chloride corrosion of steel rebars in concrete with slag", Be'ton, Plâtres, Chaux, 6, No. 811, pp.405-410.

- G. Batis, N. Kouloumbi, A. Katsiamboulas, 1996, "Durability of Reinforced Lightweight Mortar with Corrosion Inhibitors" *Cement, Concrete, and Aggregates*, Vol 18, No 2, pp 118-125.
- G. Batis, Th. Routoulas, 1999, "Steel Rebars Corrosion Investigation with Strain Gages" *Cement & Concrete Composites*, Vol 21, pp 163-171.
- G. De Schutter and L. Luo, 2004, "Effect of corrosion inhibiting admixtures on concrete properties", *Construction and Building Materials*, Volume 18, Issue 7, pp. 483-489.
- G.K. Glass and J.R. Chadwick, 1994, "An Investigation into the Mechanisms of Protection Afforded by a Cathodic Current and the Implications for Advances in the Field of Cathodic Protection", *Corrosion Science*, 36, 2193-2209
- G.K. Glass, 1999, "Technical Note. The 100-mV Decay Cathodic Protection Criterion", *Corrosion*, 55, 289-290
- G.K. Glass, J.-Z. Zhang, and N.R. Buenfeld, 1995, "Chloride Ion Barrier Properties of Small Electric Fields in the Protection of Steel in Concrete", *Corrosion*, 51, 721-726
- Gaidis J.M., Rosenberg A.M., 2001, Avoiding corrosion damage in reinforced concrete. Corrosion-inhibiting admixture protect steel reinforcing, *Concr Int.*, 23:11, 80-83
- Garboczi, E.Z. and Bentz, D.P., 2001, <The effect of statistical fluctuation, finite size error, and digital resolution on the phase percolation and transport properties of the NIST cement hydration model>, *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1501-1514
- Grauers M. et al, 2000: "Rational production and improved working environment through using self-compacting concrete", EC Brite Euram Contract No BRPR-CT96-0366, 1997-2000
- H.H. Uhlig, R. Winston Revie, 1985, "Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering", John Wiley&Sons – Inc. Publication, 3rd Edition
- H.E. Jamil, A. Shiri, R. Boulif, M. F. Montemor, M.G.S. Ferreira, 2005, Corrosion behaviour of reinforcing steel exposed to an aminoalcohol based corrosion inhibitor, *Cement and Concrete Composites* 27 (671-678)
- Haibing Zheng, Weihua Li, Fubin Ma, Qinglin Kong, 2012, The effect of the surface-applied corrosion inhibitor on the durability of concrete, *Construction and Building Materials* 37 (36-40)

Hawkins P., Tennis P.D., Detwiler R.J., 2003, The use of limestone in Portland cement: A state-of-the-art review, R&D Serial No. 2052b, Portland Cement Association, Skokie, Illinois (USA)

Helmuth, R. A., 1987, Fly Ash in Cement and Concrete, SP040T, Portland Cement Association, Skokie, IL

Hladky K., Callow L.M., Dawson J.L., 1980, Corrosion rates from impedance measurements: an introduction, Br Corros J., 15:1, 20-25

Hudson, J. C. and Stunners J. F., 1955, "The corrosion resistance of low alloy steels", Iron and Steel Institute., London, 180, pp. 271-284.

Hwang, C.L., Lee S.L., Lin F.Y. and Liu J.C., 1994: Densified mix design algorithm and early properties of HPC, Journal of China's Institute of Civil and Hydraulic Engineering 8, Vol. 2, 1994, pp. 217-219

Ingram K.D., Daugherty K.E., 1992, in 9th ICCO, Vol. 3, New Delhi (India), p. 180

International Handbook Committee

Islam, M., Daily, S.F., 2006, "Use of electrochemical techniques to assess performance of corrosion protection systems for reinforced concrete structures – A Review", Journal of ASTM International (JAI), Vol. 3, Issue 2

ISO 8044 "Corrosion of Metals and Alloys – Basic Terms and Definitions", Publication Date:15/08/1999

J. M. R. Dotto, A. G. de Abreu, D. C. C. Dal Molin and I. L. Müller, 2004, "Influence of silica fume addition on concrete's physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars", Cement and Concrete Composites, Vol. 26, Issue 1, pp.31-39.

J. P. Broomfield, 1997, "Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair", E&FN SPON

J. R. Davis, "ASM Specialty Handbook – Aluminum and Aluminum Alloys" ASM

J. T. N. Atkinson, H. VanDroffelaar, 1985, "Corrosion and its control: An introduction to the subject", National Association of Corrosion Engineering (NACE)

J.M Gaidis, 2004, "Chemistry of Corrosion Inhibitors", Cement & Concrete Composites, 26, pp.181-189.

J.M. Gaidis, A.M. Rosenberg, 2001, "Avoiding corrosion damage in reinforced concrete. Corrosion – inhibiting admixture protect steel reinforcing", The magazine of ACI, Vol.23, No. 11

J.P. Broomfield, 1992, "Field Survey of Cathodic Protection on North American Bridges", Materials Performance, 31/9, 28-33

K. R. Trethewey, J. Chamberlain, 1995, "Corrosion for Science and Engineering", Longman

K.Y. Ann, H.S. Jung, H.S. Kim, S.S. Kim and H.Y. Moon, 2006, "Effect of calcium nitrite-based corrosion inhibitor in preventing corrosion of embedded steel in concrete", Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 3, pp. 530-535.

Kakali G., Tsvilis S., Aggeli E., Bati M., 2000, Hydration products of C₃A, C₃S and Portland cement in the presence of CaCO₃, Cem Concr Res., 30:7, 1073-1077

Kayali, O., Yeomans, S., 2000, "Bond of ribbed galvanized reinforcing steel in concrete", Cem. and Concr. Com., 22, 459-467.

Klemm W.A., Adams L.D., 1990, Carbonate additions to cement (eds. Klieger P. and Hooton R.D.), ASTM STP 1064, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (USA)

Klieger, Paul, Joseph F. Lamond (Eds.), 1994, Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, ASTM STP 169C

Knudsen, A., Jensen, F.M. , Klinghoffer, O. & Skovsgaard, T., 1998, Cost-effective Enhancement of Durability of Concrete Structures by Intelligent Use of Stainless Steel Reinforcement, pp. 12-14, Florida

L.Gardner, 2005, The use of stainless steel in structures

Leonhard, F., Monnig, E., 1977, 'Ολόσωμες Κατασκευές. Ειδικά κεφάλαια οπλισμένου σκυροδέματος.' Μετάφραση: Πέντζας, Δ., Εκδόσεις Γκιούρδα, Αθήνα, σελ.133

London Metal Exchange, Official Prices for 13 January 2005, www.lme.co.uk.

M. G. Fontana, 1986, "Corrosion Engineering", 3rd Edition, McGraw – Hill, New York

M. Ormellese, M. Berra, F. Bolzoni and T. Pastore, 2006, "Corrosion inhibitors for chlorides induced corrosion in reinforced concrete structures", Cement and Concrete Research, Volume 36, Issue 3, pp. 536-547.

- Marder, A.R., 2000, "The metallurgy of zinc-coated steel", *Prog. in Mat. Sci.*, 45, 191-271.
- Maria Isabel Prieto, Alfonso Cobo, Angel Rodriguez, Maria de las Nieves Gonzalez, 2014, 'The efficiency of surface-applied corrosion inhibitors as a method for the repassivation of corroded reinforcement bars embedded in ladle furnace slag mortars.', *Construction and Building Materials* 54, pp.70-77
- Milan Kouril, Pavel Novak, Martin Bojko, 2006, Limitations of the linear polarization method to determine stainless steel corrosion rate in concrete environment, pp 3-5
- M. Kharshan, C. Cracauer, «Application for biodegradable vapor phase corrosion inhibitors», *Materials Performance, NACE International*, Vol 50, No 3, 2011
- N. Kouloumbi, G. Batis., «Chloride Corrosion of Steel Rebars in Mortars with Fly Ash Admixtures», *Cement and Concrete Composites*, 14, 199-207
- N. Kouloumbi, G. Batis, Ch. Malami, 1994, The anticorrosive effect of fly ash, slag and a greek pozzolan in reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites* 16, pps 253-260
- N. Perez, "Electrochemistry and Corrosion Science", Kluwer Academic Publishers, 2004
- N. S. Berke, 1992, "Impregnation of Concrete with Corrosion Inhibitors", *Corrosion Forms and Control of Infrastructure*, ASTM STP 1137, Philadelphia, 1992.
- NACE Standard RP0290-1990, "Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures", (Houston, TX – NACE)
- Okamura H. and Ozawa K., 1995: "Mix design for self-compacting concrete", *Concrete Library of JSCE*, 25, 1995, pp.107-120
- Ouchi M, Hibino M., Ozawa K and Okamura H., 1998: "A rational mix-design method for mortar in self-compacting concrete". *Proceedings of the Sixth South-East Asia Pacific Conference of Structural Engineering and Construction*, Taipei, Taiwan, pp 1307-1312.
- Ouchi M., Hibino M., Okamura H., 1997: "Effect of superplasticizer on self compactibility of fresh concrete". *Transportation research record*, pp 37-40.
- P. R. Roserge, 1992, "Handbook of corrosion engineering", McGraw – Hill Handbooks, 1992
- P.M Chess, 1998, "Cathodic protection of steel in concrete", E&FN Spon

Pedro Faustino, Ana Bras, Thomas Ripper, 2014, 'Corrosion inhibitors' effect on design service life of RC structures., *Construction and Building Materials* 53, pp.360-369

Pelova G., Takada K. and Walraven J., 1998: "Aspects of the Development of SelfCompacting Concrete in the Netherlands, applying the Japanese mix design system". *Fracture Mechanics and Physics of Construction Materials and Structures*; Andreikiv OY, Luchko JJ, editors. 3rd edition. The National Academy of Sciences of Ukraine, Kamaniar, 1998.

Petersson O., Billberg P., and Van B.K., 1996: "A model for self-compacting concrete", *Proceedings of the RILEM International Conference on Production Methods and Workability of Fresh Concrete*, Paisley, June 1996, ed. Bartos PJM, Marris DJ, E&FN SPON, London, pp.484-492

R.H.Bogue, 1955, <The Chemistry of Portland Cement>, 2cd Edition, New York Publishing Corp., 1955

R.P. Brown, J.S. Tinnea, 1991, "Cathodic Protection Design Problems for Reinforced Concrete", *Materials Performance*, 30/8, 28-31

Ramirez, E., Gonzalez, J.A., Bautista, A., 1996, "The protective efficiency of galvanizing against corrosion of steel in mortar and in Ca(OH)₂ saturated solutions containing chlorides", *Cem. and Concr. Res.*, 26, 1525-1536.

Read P., Carette G.G., Malhotra V.M., 1990, Strength developmenet characteristics of highstrength concrete incorporating supplementary cementing materials, 2nd International Symposium on Utilization of High – Strength Concrete, Berkeley, California (USA)

Regourd M., 1986, Characterization and activation of addition products (in French) In: *Proceedings of 8th ICCO*, Vol. 1 p, Rio de Janeiro (Brazil), p.p. 199-229

Reinhard, W., 1981, 'Δομικά Υλικά', Έκδοση 21^η, Μετάφραση: Τουλιάτος, Δ., Λεονταρίτης, Μ., Παπαγιάνης, Δ., Μπίσμπος, Χ., Εκδόσεις Γκιούρδα, Αθήνα, σελ.306

RILEM 12-CRC, 'Corrosion of reinforcement and prestressing tendons- A state of tha art report', *Materials and Structures*, Vol. 9, Nr51, 1976, pp. 187-206

Romanoff, M. J., 1997, "Underground Corrosion" Natl Assn of Corrosion, Reprint Edition

S. Mindess, J. Young, 1975, "Concrete Manual", U.S Bureau of Reclamation

S.M.Trepanier, B.B. Hope, C.M. Hansson, 2001, "Corrosion Inhibitors in concrete. Part III. Effect on time to chloride – induced corrosion initiation and subsequent corrosion rates of steel in mortar" *Cement and Concrete Research* 31, pp. 713- 718

Saak W.A, Jennings H.M. and Shah S.P., 2001: "New methodology for designing Self-Compacting Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No 6, 2001, pp. 429-439.

Saeid A. Alghamdi, Shamsad Ahmad, 2014, Service life prediction of RC structures based on correlation between electrochemical and gravimetric reinforcement corrosion rates, *Cement and Concrete Composites* 47 (64-68)

Sideris K.K., Georgiadis A.S, Anagnostopoulos N.S. and Manita P., 2008: "Low strength self-compacting concrete for building application", *Proceedings of the 9th International fib Congress: Tailor made concrete structures, new solutions for our society*", 3-5 May 2008, Amsterdam, pp. 1057-1059.

T.A. Söylev, C. McNally and M.G. Richardson, 2007, "The effect of a new generation surface-applied organic inhibitor on concrete properties", *Cement and Concrete Composites*, Volume 29, Issue 5, pp. 357-364.

T.H. Misselbrook, J. Webb and S.L. Gilhespy, 2006, "Ammonia emissions from outdoor concrete yards used by livestock—quantification and mitigation", *Atmospheric Environment*, Volume 40, Issue 35, 2006, pp.6752-6763.

Taylor H.F.W., 1997, *Cement chemistry*, 2nd edition, Thomas Telford, London (UK)

Tsivilis S., Batis G., Chaniotakis E., Grigoriadis G., Theodossis D., 2000, Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar, *Cem Concr Res.*, 30:10, 1679-1683

Tsivilis S., Chaniotakis E., Badogiannis E., Pahoulas G., Ilias A., 1999, A study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements, *Cem Concr Compos.*, 21:2,107-116

Tulliani J.-M., Montanaro L., Negro A., Collepari M., 2002, Sulphate attack of concrete building foundations induced by sewage waters, *Cem Concr Res.*, 32:6, 843-849

U. Maeder, 1996, A new class of corrosion inhibitors for reinforced concrete, *Concrete in Marine Environment*, sp 163-10

U. Nuerbeger, 1986, 'Korrosionsschutz im Massivbau', Expert Verlag, Boebbingen, pp 108-114

Vernet C., 1986, in 8th ICCO, Vol. 3, Rio de Janeiro (Brazil)

Γ. Μπατής, Κ. Μελετίου, Αθ. Ρούτουλας, 1999, «Η Προστασία του Οπλισμού του Σκυροδέματος με Ορυκτά Πρόσθετα», 13ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Ρέθυμνο, Vol 2, pp 345-352

Γ. Μπατής, Ν. Κουλουμπή, 1989, Διάβρωση του σιδηροπλισμού του μπετόν σε περιβάλλον χλωριόντων με χρήση τσιμέντου Πόρταλντ και ανθεκτικό σε θειικά (Τεχνικά Χρονικά, τεύχος 4, τομ.9)

Γ. Παρισάκης, Β. Κασελούρη, Σ. Τσίμας, Χ. Φτίκος, 1981, <Χημεία και Τεχνολογία Τσιμέντου>, Αθήνα

Γ. Στεργιούδης, 2007-2008, «Ακτίνες Χ (XRD)», ΑΠΘ.

Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, «Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών»

Δ. Κ. Υφαντής, 2000, «Υλικά – Διάβρωση και Προστασία», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα

Δαπόντε Ι., 1991, <Παραδόσεις Τεχνολογίας Δομικών Υλικών, Σκυροδέματα >, Έκδοση Β, Θεσσαλονίκη

Δέδε Μ., Δημόγλου Ε., Φεβρ. 2007, «Ανοξειδωτος χάλυβας οπλισμένου σκυροδέματος», 13ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα

Δρακάτος Δ., 2009, «Συστήματα επισκευής – μετρίασης της διάβρωσης κατασκευών Ο.Σ.», 15ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα

ΕΑΚ 2000, «Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000», ΟΑΣΠ, ΣΠΜΕ, Έκδοση ΟΑΣΠ, Αθήνα 2001

ΕΚΩΣ 2000, «Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000», ΟΑΣΠ, ΣΠΜΕ, Έκδοση ΟΑΣΠ, Αθήνα 2001.

ΕΛΕΝΗ ΖΑΧΑΡΙΟΥ – ΡΑΚΑΝΤΑ, ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ, ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΕΙΔΙΚΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ, Αθήνα 2010

ΕΛΟΤ 1421: Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος- Συγκολλησιμοι Χάλυβες – Μέρος 1: Γενικές Απαιτήσεις, Μέρος 2: Τεχνική κατηγορία Β500Α, Μέρος 3: Τεχνική κατηγορία Β500C, Ημερομηνία έκδοσης: 24/02/2004.

ΕΛΟΤ 1421: Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος- Συγκολλησιμοι Χάλυβες – Μέρος 1: Γενικές Απαιτήσεις, Μέρος 2: Τεχνική κατηγορία Β500Α, Μέρος 3: Τεχνική κατηγορία Β500C, Ημερομηνία έκδοσης: 24/02/2004

ΕΛΟΤ 197.01: Τσιμέντο – Μέρος 1: Σύνθεση, Προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα (Cement – Part 1, Composition, specifications, and conformity criteria for common cements), Ημερομηνία έκδοσης: 27/07/2000

ΕΛΟΤ 345, Το ύδωρ αναμίξεως και συντηρήσεως σκυροδέματος, 1979

ΕΛΟΤ 959 «Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος», 1996

ΕΛΟΤ 971 «Συγκολλησιμοι Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος», 1996

ΕΛΟΤ EN 12620: Αδρανή για σκυρόδεμα (Aggregates for concrete), Ημερομηνία έκδοσης 23/10/2002

ΕΛΟΤ EN 934.02: Πρόσθετα σκυροδέματος, κονιαμάτων και ενεμάτων- Μέρος 2: Πρόσθετα σκυροδέματος – Ορισμοί, απαιτήσεις, συμμόρφωση, σήμανση και επισήμανση, Ημερομηνία Έκδοσης 09/01/2002

Θ.Ν. Σκουλικίδης, 2000, «Διάβρωση και Συντήρηση των Δομικών Υλικών των Μνημείων», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, (ΠΕΚ)

Θ.Π. Τάσιος, Κ. Αλιγιζάκη, 1992, «Ανθεκτικότητα Ωπλισμένου Σκυροδέματος», Αθήνα

Κ.Κ.Σίδερης, 1984, <Τεχνολογία Δομικών Υλικών>, Τομ.Β, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη

Κ.Κ.Σίδερης, 2009, Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα και Ελληνική Πραγματικότητα: Παρούσα Κατάσταση και προοπτικές εξέλιξης, 'Self-compacting concrete in the Greek market: Present situation and future development', σελ. 2-11

Κανονισμός για την Μελέτη και την Κατασκευή Έργων από Σκυρόδεμα, Τεχνικό Επιμελητήριο της Ελλάδας, Αθήνα 1991

Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος, 1997, Αιτιολογική Έκθεση Κ.Τ.Σ. – 97, Εγκύκλιος Ε7, Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, Αθήνα 1997

Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (Κ.Τ.Χ.), Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., Αθήνα (2000)

Κορωναίος Α., 2006, Τεχνικά Υλικά, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα

Κουλουμπή Ν., 1994, Διάβρωση και προστασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα

Λιόσης, Ε., 1999, "Μέτρα για την έγκαιρη διάγνωση διάβρωσης του οπλισμού-καθοδική προστασία", Τεχ. Χρονικά, Τεύχος 5, σελ. 120-128.

Μ. Φαρδής, 2004, Ανθεκτικότητα του (οπλισμένου) σκυροδέματος σε διάρκεια

Μ. Χρονόπουλος, Χ. Σπανός, 1991, Κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος και περιβαλλοντικές δράσεις, 10^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, 23-25/10/1991

Μ.Δ. Κωτσοβός, 2001, "Οπλισμένο Σκυρόδεμα", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, σελ. 27, 46

Μ.Φαρδής, 2000, Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Κατασκευών, Πάτρα

Μαυροειδής Π., Ρακαντά Ε., Μπατής Γ, 2006, «Ανοξείδωτοι Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος: Μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορά απέναντι στην διάβρωση», 15^ο Ελληνικό Συνέδριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη

Μπατής Γ., 1999, "Φθορά και Προστασία των Υλικών", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα

Μπατής Γ., 2007, «Χρήση νέων υλικών για την αύξηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών», Ημερίδα ΤΕΕ «Ενίσχυση κτιρίων με σύγχρονα υλικά», Αθήνα

Μπατής Γ., 2006, Σημειώσεις Φθορά και Προστασία Υλικών, Αθήνα

Ν. Κουλουμπή, Α. Καραντώνης, 2005-06, «Προσδιορισμός της μορφής και της ταχύτητας διάβρωσης μετάλλων με τη μέθοδο ανάλυσης ηλεκτροχημικού θορύβου», Σημειώσεις Ασκήσεων Εργαστηρίου για το μάθημα «Φθορά και Προστασία Υλικών», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2009DIN 1045-1 Plain, reinforced and prestressed concrete structures - Design and construction, Publication date:2005-06

Ν. Κουλουμπή, 1999, «Διάβρωση και Προστασία», Αθήνα

Ν. Κουλουμπή, 2000, «Διάβρωση και Προστασία», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα

Ν. Οικονόμου, 1999, <Δομικά Υλικά II – Τεχνολογία Σκυροδέματος>, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος

Ν. ΠΙΣΤΟΦΙΔΗΣ, Γ. ΒΟΥΡΛΙΑΣ, Γ. ΣΤΕΡΓΙΟΥΔΗΣ, 2006, Η αποτελεσματικότητα του θερμού γαλβανίσματος ενάντια στη διάβρωση του σιδηροπλισμού σκυροδέματος

Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Οπλισμού Σκυροδέματος - ΚΤΧ 2008

Π. Μαυροειδής, «Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος με βάση τις σύγχρονες απαιτήσεις των κανονισμών», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2005

Παναγιωτίδης Θ., 2011, «Αναστολείς Διάβρωσης: Ένα αποτελεσματικό όπλο κατά της διάβρωσης», www.e-archimedes.gr

Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ) για το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα που κυκλοφόρησαν από το ΥΠΕΧΩΔΕ (ΥΠΕΧΩΔΕ 2004)

Ρούτουλας Α., 2010, Σημειώσεις Μαθήματος «Έλεγχος Ποιότητας και Τεχνολογία Δομήσιμων Υλικών», Αθήνα

Σ. Τσίμας, 2001, <Δομικά Υλικά (Τσιμέντο-Ασβέστης-Σκυρόδεμα-Κονιάματα)>, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα

Σίδερης Κ.Κ., Κυριτσάς Σ., Χανιωτάκης Ε., 2003: "Μηχανικά χαρακτηριστικά και Ανθεκτικότητα Αυτοσυμπυκνούμενων Σκυροδεμάτων παρασκευασθέντων με Ελληνικά Ποζολανικά Υλικά", Πρακτικά 14ου Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος, Κως, 15-17 Οκτωβρίου 2003, Τόμος Β, σελ. 187-193

Σκουλικίδης Θ., Βασιλείου Π., 2000, Διάβρωση και Προστασία Υλικών, Εκδόσεις Συμεών

T. M.Yue, L. J. Yan, C. P. Chan, C. F. Dong, H. C. Man, G. K. H. Pang, Surf. and Trey, H., Herrman, A., Kuhn, V., Lillich, J., Nestbe, H., Nutsch, W., Schultz, P., Waibel, H., 1999, <Τεχνολογία Δομικών Υλικών>, Μετάφραση: Ρούλης, Σ., Κασσελούρη, Β., Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές Εκδόσεις, Αθήνα, σελ.67-70

Τάσιος, Θ. Π. και Αλιγιζάκη, Κ., 1993, Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος, Εκδόσεις Φοίβος, Αθήνα.

Τσακαλάκης Κ., 2010, Τεχνολογία Παραγωγής Τσιμέντου και Σκυροδέματος, Αθήνα

Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., 2004, Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου, Εκδόσεις Ε.Μ.Π. Αθήνα

Τσίμας Σ.-Τσιβιλής Σ., 2000, "Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα

Υφαντής Δ., 2008, «Υλικά – Διάβρωση και Προστασία», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα

Χρήστος Στρογγύλης, http://monosimacon.blogspot.com/2009/06/blog-post_10.html:
Ενανθράκωση μπετόν και διάβρωση οπλισμών, Πολιτικός Μηχανικός – MBA – DipM

12 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Με την παρούσα διδακτορική διατριβή αποδείχθηκε η δυνατότητα προστασίας του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος με την χρήση αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο σε τσιμέντα τύπου CEM I και σε ασβεστολιθικά τσιμέντα ως πρόσμικτο και ως ψεκαζόμενο. Αποδείχθηκε ότι ο αναστολέας βελτιώνει την συμπεριφορά των ασβεστολιθικών ομάδων αλλά η ομάδα CEM I παραμένει να συμπεριφέρεται καλύτερα.

Όσον αφορά την προστασία του οπλισμού μέσα στο σκυρόδεμα η έρευνα πρέπει να συνεχισθεί ώστε να προσδιοριστεί:

- Η βέλτιστη συγκέντρωση του αναστολέα διάβρωσης μέσα στο σκυρόδεμα για τις Ελληνικές συνθήκες.
- Διερεύνηση του πορώδους και της υδροφοβικότητας της επιφάνειας των πόρων στις περιπτώσεις των οργανικών αναστολέων διάβρωσης.
- Ο λόγος αναστολέα διάβρωσης προς συγκέντρωση χλωριόντων κάτω από τον οποίο ο αναστολέας δεν είναι ενεργός.
- Διερεύνηση άλλων αναστολέων διάβρωσης.

13 ΔΗΜΟΣΙΕΥΕΙΣ - ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΕΔΡΙΑ

ΔΗΜΟΣΙΕΥΕΙΣ

E. Zacharopoulou, A. Zacharopoulou, Sayedalhosseini A., G. Batis, S. Tsivilis, "EFFECT OF CORROSION INHIBITORS IN LIMESTONE CEMENT" (Vol.4 No.12A 2013) of Materials Sciences and Applications (MSA).

A.Zacharopoulou, E.Zacharopoulou, G.Batis, "Statistics Analysis Measures Painting of Cooling Tower," International Journal of Corrosion, vol. 2013, Article ID 389159, 9 pages, 2013

ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΝΕΔΡΙΑ

5/03 – 8/03/2013: Συνέδριο: INNOVATIONS IN CONCRETE CONSTRUCTION. **Εργασία:** PROTECTION OF REINFORCEMENT IN CONCRETE USING CORROSION INHIBITORS. Jalandhar Punjab India 2013

30/10 – 1/11/2012: Συνέδριο: TWELFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY AND SUSTAINABILITY ISSUES. **Εργασία:** CORROSION INHIBITORS AND MACROGALVANIC CELLS. Πράγα

19-23/6/2011: Συνέδριο: 9th ESEE EUROPEAN SUMPOSIUM ON ELECTROCHEMICAL ENGINEERING. **Εργασία:** A NOVEL METHOD OF DECHLORINATING MARINE IRON REMOVED FROM THE SEA USING IMPRESSED CURRENT: APPLICATION ON THE PADDLE WHEEL FROM THE 1868 SHIPWRECK 'PATRIS'. Χανιά

9-11/11/2010: Συνέδριο: FATIPEC 2010 THE EUROPEAN CONTESTS FOR COATING SCIENTISTS. **Εργασία:** STATISTICS ANALYSIS MEASURES PAINTING OF COOLING TOWER. Γένοβα

7-8/05/2009: Συνέδριο: ΣΥΜΠΟΣΙΟ ΧΡΩΜΑΤΩΝ. **Εργασία:** ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΩΝ ΠΥΡΓΩΝ ΨΥΞΕΩΣ. Αθήνα.

