ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΟΡΥΚΤΑ ΠΡΟΣΘΕΤΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΓΕΝΙΑ ΒΟΥΛΓΑΡΗ

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΠΑΤΗΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΟΡΥΚΤΑ ΠΡΟΣΘΕΤΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΓΕΝΙΑ ΒΟΥΛΓΑΡΗ

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Γ. ΜΠΑΤΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Σ. ΤΣΙΒΙΛΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο «Επιστήμης & Τεχνικής των Υλικών» της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, από τον Ιούνιο του 2011 έως τον Ιούνιο του 2012.

Ευχαριστώ θερμά για την συνεργασία στην υλοποίηση της παρούσας μελέτης:

- Τον Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ και επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας κ. Γεώργιο Μπατή, για την ανάθεση του θέματος της μεταπτυχιακής εργασίας και τις καθοριστικές παρεμβάσεις και συμβουλές του.
- Την Υποψήφια Διδάκτορα Ευγενία Ζαχαροπούλου για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής εργασίας.
- Επίσης τις Υποψήφιες Διδάκτορες Αγγελική Ζαχαροπούλου και Θεοδοσία Ζαφειροπούλου για την βοήθειά τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής εργασίας μου.
- Το Λέκτορα της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ κ. Αντώνη Καραντώνη, για την καθοριστική συνεισφορά του στο πείραμα γραμμικής πόλωσης.
- Όλους τους διδάσκοντες του ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών» του ακαδημαϊκού έτους 2010-2011, για τα «ερεθίσματα» που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια παρακολούθησης του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι παγκοσμίως το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο κατασκευαστικό υλικό. Το σκυρόδεμα αρχικά παρέχει ένα προστατευτικό αλκαλικό περιβάλλον γύρω από τον οπλισμό. Η διάβρωση του σιδηροπλισμού όμως, ως θερμοδυναμικά αυθόρμητο φαινόμενο, συμβαίνει είτε οφειλόμενη στην ενανθράκωση του σκυροδέματος, που τελικά μειώνει την αλκαλικότητα, είτε στη διείσδυση των χλωριόντων που καταστρέφουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίων του οπλισμού.

Οι κατασκευές από σκυρόδεμα και οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ανθεκτικές στη φθορά. Όμως η ανθεκτικότητα των κατασκευών αυτών επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες επιδρούν στην κατασκευή εσωτερικά και εξωτερικά. Η φθορά του οπλισμού στο σκυρόδεμα εξαιτίας της ατμοσφαιρικής διάβρωσης παίζει σημαντικό ρόλο στην ανθεκτικότητα των κατασκευών και έχει μεγάλη οικονομική σημασία

Η διάβρωση του σιδηροπλισμού μπορεί να αντιμετωπιστεί με μεθόδους όπως η χρήση προσθέτων ή / και αναστολέων διάβρωσης, ανοξείδωτων σιδηροπλισμών, επιφανειακών επικαλύψεων και καθοδικής προστασίας.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετήθηκε η ανθεκτικότητα των κονιαμάτων από την διάβρωση με την προσθήκη αναστολέων διάβρωσης και ορυκτών προσθέτων. Η ανθεκτικότητα των δοκιμίων εκτιμήθηκε με ηλεκτροχημικές μεθόδους, όπως τη μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης και τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης, με την οποία υπολογίστηκε η αντίσταση πόλωσης και το ρεύμα διάβρωσης.

Οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας τους, κατέδειξαν ότι ο ψεκασμός με αναστολέα διάβρωσης δεν βελτίωσε την ανθεκτικότητα των δοκιμίων.

Εξαίρεση αποτελούν οι τελευταίες μετρήσεις, αλλά απομένει αυτή η μεταβολή στη συμπεριφορά σε διάβρωση των δοκιμίων να επαληθευτεί σε μεγαλύτερους χρόνους έκθεσης στη διάβρωση.

ABSTRACT

Reinforced concrete is worldwide the most widely used constructional material. Concrete initially provides a protective alkaline environment around the steer rebars. The steel rebars corrosion however, as thermodynamic spontaneous phenomenon, happens either due to the carbonation of concrete, that finally decreases the alkalinity or due to the chloride migration through the concrete cover, that destroys the protective layer of oxides of the steel rebars.

Construcions of concrete and reinforced concrete are durable in the deterioration. However the resistibility of these constructions is influenced to a great degree by the environmental conditions, that affect the construcion internal and externally. The deterioration of reinforced concrete due to the atmospheric corrosion plays an important role in the durability of constructions and it is of a great economic importance.

The steel rebars corrosion can be faced with methods such as the use of mineral additions and/or corrosion inhibitors, stainless steels, coatings and cathodic protection.

The aim of the present postgraduate work was to examinate the performance of reinforced mortar speciments containing mineral additions together with corrotion inhibitors added in order to lower the corrosion rate of steel reinforcement in a chloride environment. The durability of the speciment was evaluated by electrochemical measurements such as half-cell potential measurement and measuring olarization resistance (Rp) and corrosion current density (icorr) with linear polarization technique.

The results expored of this work revealed that the corrotion inhibitor did not improve the durability of the speciment. Exceptions are the latest measurements but the corrosion behaviour has to be tested in longer period of exposure to corrosive environment.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

I. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Τσιμέντο……..……... 1

1.1. Εισαγωγή…… 1

1.2. Συστατικά τσιμέντου…… 2

1.3. Τύποι τσιμέντου…… 3

1.4. Μηχανικές, φυσικές και χημικές απαιτήσεις του τσιμέντου…… 5

1.5. Τσιμέντο Portland……. 5

1.6. Ενυδάτωση των τσιμέντων Portland…… 6

2. Σκυρόδεμα και κονιάματα……. 9

2.1. Γενικά για το σκυρόδεμα…….. 9

2.2. Πρώτες ύλες σκυροδέματος……. 10

2.2.1. Αδρανή υλικά……... 10

2.2.2. Το νερό ανάμειξης…… 14

2.2.3. Βελτιωτικά πρόσμικτα…….. 15

2.2.4. Πρόσθετα συστατικά…… 16

2.3. Ιδιότητες σκυροδέματος……... 17

2.3.1. Εργασιμότητα…… 17

2.3.2. Αντοχή…… 18

2.3.3. Πορώδη…….. 18

2.3.4. Διαπερατότητα…… 19

2.3.5. Ανθεκτικότητα…… 20

2.4. Γενικά περί κονιαμάτων……. 21

2.5. Κατηγορίες κονιαμάτων……. 23

2.6. Παρασκευή, δόμηση, ιδιότητες κονιαμάτων…….. 24

3. Διάβρωση…… 25

3.1. Εισαγωγή……. 25

3.2. Διαβρωτικό περιβάλλον…….. 25

3.3. Μορφές διάβρωσης……. 27

3.3.1. Διάβρωση από μηχανική καταπόνηση…… 28

3.3.2. Διάβρωση χωρίς μηχανική καταπόνηση…….. 29

3.3.3. Άλλα είδη διάβρωσης……. 30

3.4. Διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος…… 31

3.5. Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση του σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα…….. 32
3.5.1. Το είδος και η δομή του σκυροδέματος……... 32
3.5.2. Το πάχος επικάλυψης……... 34
3.5.3. Η παρουσία νερού στο σκυρόδεμα……. 34
3.5.4. Η παρουσία ρωγμών…….. 34
3.6. Μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα……... 35
3.6.1. Η διάβρωση του οπλισμού στο ενανθρακωμένο σκυρόδεμα……. 37
3.6.2. Η διάβρωση του σιδηροπλισμού σε σκυρόδεμα με χλωριόντα…….. 43
3.6.3. Η διάβρωση του οπλισμού σε σκυρόδεμα με ρωγμές……. 50
4. Μέθοδοι προστασίας…… 53
4.1. Εισαγωγή……. 53
4.2. Μέθοδοι προστασίας από τη διάβρωση…….. 56
4.2.1. Καθοδική προστασία……... 57
4.2.2. Χρήση ορυκτών πρόσθετων……... 62
4.2.3. Προσθήκη στο σκυρόδεμα αναστολέων διάβρωσης 66
4.2.4. Χρήση οργανικών επικαλύψεων (χρωμάτων)……. 72
4.2.5. Χρήση ειδικών χαλύβων……. 75

ΙΙ. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5. Πρώτες ύλες και μέθοδοι…….. 80
5.1. Σκοπός……. 80
5.2. Πρώτες ύλες……. 80
5.3. Πειραματική διαδικασία…….. 83
5.4. Χρησιμοποιημένοι μέθοδοι……. 88
6. Επεξεργασία αποτελεσμάτων……... 91
6.1. Μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης……... 91
6.2. Μετρήσεις αντίστασης πόλωσης…… 100
6.3. Μεταβολή δυναμικού διάβρωσης και αντίστασης πόλωσης συναρτήσει του χρόνου……... 110
6.3.1. Δοκίμια αναφοράς CEM I……... 111
6.3.2. Δοκίμια LC 1……... 115
6.3.3. Δοκίμια LC 2……... 119
6.3.4. Δοκίμια LC 2…….. 123
6.4. Απώλεια μάζας…… 127

6.4.1. Υπολογισμός του ρεύματος διάβρωσης……. 127
6.4.2. Υπολογισμός της απώλειας μάζας…….. 136
6.5. Συγκεντρωτικά διαγράμματα δυναμικού διάβρωσης και αντίστασης πόλωσης…….. 143
6.6. Γενικά συμπεράσματα – συζήτηση αποτελεσμάτων……... 145
7. Βιβλιογραφία…….. 147

Ι. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 1: Τσιμέντο

1.1. Εισαγωγή

Τσιμέντο είναι μια υδραυλική κονία, δηλαδή ένα λεπτοαλεσμένο ανόργανο υλικό, που αποτελείται κυρίως από ενώσεις οξειδίου του ασβεστίου, οξειδίου του πυριτίου, οξειδίου του αργιλίου και οξειδίου του σιδήρου. Όταν αναμειχθεί με νερό σχηματίζει μια πάστα που λόγω των αντιδράσεων ενυδάτωσης πήζει και σκληρύνεται αποκτώντας συνδετικές ικανότητες και ανθεκτικότητα στο χρόνο. Μετά την σκλήρυνση, δεν διαλύεται στο νερό και διατηρεί την αντοχή και τη σταθερότητά του ακόμη και μέσα στο νερό. (Μπατής Γ., 2006)

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

1. $2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$
2. $2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \rightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$
3. $3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O$
4. $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 + 2Ca(OH)_2 + 10H_2O \rightarrow CaO.Al_2O_3.6H_2O + 3CaO.Fe_2O_3.6H_2O$

Από τα σχηματιζόμενα σύμφωνα με τις παραπάνω αντιδράσεις προϊόντα, η στερεότητα του σκυροδέματος οφείλεται στο **$3CaO.2SiO_2.3H_2O$** και η αλκαλική φύση του στο **$Ca(OH)_2$**.

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

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

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

1.2. Συστατικά τσιμέντου

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

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

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

Το **θειικό ασβέστιο** προστίθεται στα άλλα συστατικά του τσιμέντου κατά την τελική άλεση του κλίνκερ με σκοπό να ρυθμίσει την πήξη του τσιμέντου. Το ακριβές ποσοστό προσθήκης εξαρτάται από την περιεκτικότητα των κύριων συστατικών σε SO_3 καθώς και από τα θειικά του καυσίμου. Το θειικό ασβέστιο μπορεί να προστεθεί κυρίως ως γύψος, που είναι και η περισσότερο συνηθισμένη μορφή.

Ως **πρόσθετα** χαρακτηρίζονται τα συστατικά που προστίθενται στο τσιμέντο και δεν ανήκουν σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες και έχουν σκοπό τη βελτίωση είτε της παραγωγικής διαδικασίας είτε των ιδιοτήτων του τσιμέντου. Η ποσότητα των προσθέτων δεν πρέπει να υπερβαίνει σε ξηρή βάση το 1% κ.β. του τσιμέντου για

ανόργανα πρόσθετα ή το 0.5% κ.β. για οργανικά πρόσθετα. Τα πρόσθετα αυτά δεν πρέπει να προκαλούν διάβρωση του οπλισμού ή να επιβαρύνουν τις ιδιότητες του τσιμέντου καθώς και των σκυροδεμάτων ή κονιαμάτων που προκύπτουν από αυτό. (Τσίμας Σ., 2001)

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

Οι προσμίξεις που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι :

1. Φυσικές ποζολάνες
2. Τεχνητές ποζολάνες όπως :

α. Ιπτάμενες τέφρες

β. Πυριτική παιπάλη

3. Φυσικοί ηφαιστειακοί λίθοι
4. Σκωρίες υψικαμίνων
5. Τέφρα κελύφους ρυζιού

1.3. Τύποι τσιμέντου

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 ΕΝ 197-1).

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

CEM I, Τσιμέντο Portland

CEM II, Σύνθετα τσιμέντα Portland

CEM III, Σκωριοτσιμέντα

CEM IV, Ποζολανικά τσιμέντα

CEM V, Σύνθετα τσιμέντα

Οι περαιτέρω υποδιαιρέσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 1.3.1. όπου τα ποσοστά αναφέρονται στο άθροισμα των κυρίων και δευτερευόντων συστατικών.

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

Τύπος	**Ονομασία**	**Κύρια συστατικά**									**Δευτ. συστ.**
		K	**S**	**D**	**P**	**Q**	**V**	**W**	**T**	**L**	
ΤΣΙΜΕΝΤΑ PORTLAND											
CEM	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	-	-	-	-	-	-	-	
	II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/A-P	80-90	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
	II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	
	II/A-Q	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	
	II/B-Q	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	
	II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	
	II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	
	II/A-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	
	II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	
	II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
	II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	
	II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	
	II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	
	II/A-M	80-94	6-20								0-5
	II/B-M	65-79	21-35								
ΣΚΩΡΙΟΤΣΙΜΕΝΤΑ											
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	-	16-30			-	-	-	0-5
	V/B	20-39	31-50	-	31-50			-	-	-	

1.4. Μηχανικές, φυσικές και χημικές απαιτήσεις του τσιμέντου (Σημαντικές ιδιότητες του τσιμέντου)

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

Οι κανονικές αντοχές του τσιμέντου είναι οι θλιπτικές που προσδιορίζονται σύμφωνα με το EN 196-1 στις 28 ημέρες και θα πρέπει να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις που δίνονται στον πίνακα 1.4.1.

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 1.4.1.

Πίνακας 2: 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		

Όσον αφορά τις χημικές απαιτήσεις ελέγχονται μόνο η απώλεια πύρωσης, το αδιάλυτο υπόλειμμα, τα SO_3, τα χλωριόντα και η ποζολανικότητα.

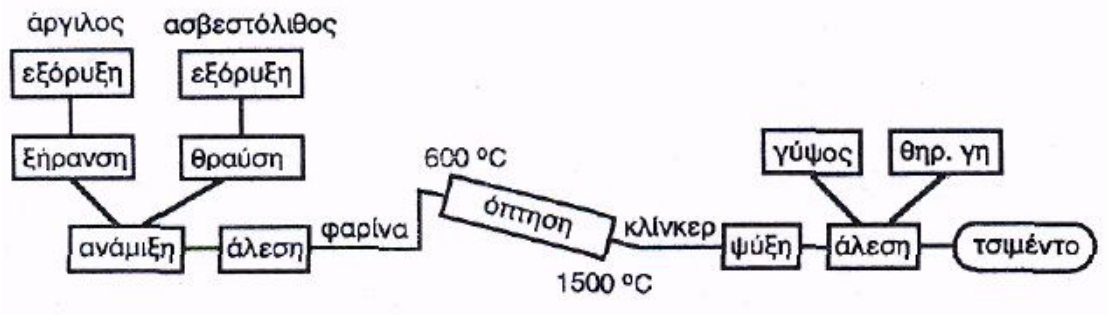
1.5. Τσιμέντο Portland

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

Ως τσιμέντο Portland ορίζεται το προϊόν που προκύπτει μετά από έψηση σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης (1380-1420 ˚C) ενός κατάλληλα αλεσμένου και πλήρως ομογενοποιημένου μίγματος που αποτελείται από 75% περίπου ασβεστολιθικά υλικά και 25% περίπου αργυλοπυριτικά υλικά και συνάλεση του

προκύπτοντος προϊόντος, που καλείται κλίνκερ, με την κατάλληλη ποσότητα γύψου ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

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 1: Σχηματικό διάγραμμα παρασκευής του τσιμέντου Portland.

1.6. Ενυδάτωση των τσιμέντων Portland

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

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

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

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

Τα συστατικά που συμμετέχουν στις αντιδράσεις αυτές είναι:

- Αλίτης (C_3S με προσμίξεις ξένων ιόντων)
- Βελίτης (C_2S με προσμίξεις ξένων ιόντων)
- Αργιλική φάση
- Φερριτική φάση
- Ελεύθερο CaO
- Θειικά αλκάλια
- Θειικό 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 θειικού ασβεστίου,
- η λεπτότητα του τσιμέντου,
- η διαδικασία ελάττωσης μεγέθους του τσιμέντου,
- ο λόγος νερό: τσιμέντο,
- οι συνθήκες διατήρησης των παστών και
- η προσθήκη χημικών προσθέτων.

Λόγω της διαφορετικής σύνθεσής τους, τα συστατικά του τσιμέντου ενυδατώνονται με διαφορετικούς ρυθμούς. Έτσι τα 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 β-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.

Κεφάλαιο 2: Σκυρόδεμα και Κονιάματα

2.1. Γενικά για το σκυρόδεμα

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

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 διάστρωσή 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, fck. Οι κατηγορίες σκυροδέματος σύμφωνα με τον νέο Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3: Κατηγορίες σκυροδέματος

Κατηγορία σκυροδέματος	fck,κυλ. (MPa)	fck,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 (fck), ενώ ο δεύτερος την χαρακτηριστική αντοχή κύβου (fck,cube) σε Mpa, στις 28 ημέρες.

2.2. Πρώτες ύλες σκυροδέματος

2.2.1. Αδρανή υλικά

Τα αδρανή υλικά αποτελούν το 65-70% του όγκου του σκυροδέματος και οι ιδιότητες τους επηρεάζουν την ποιότητα του. Συνδέονται και συγκολλούνται μεταξύ τους και συμβάλλουν, μηχανικά μόνο, στην αντοχή του τελικού προϊόντος.

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

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

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

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

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 επιφάνειας τους, η απορρόφηση νερού και τέλος η αντοχή τους σε φυσικές μεταβολές και χημικές επιδράσεις.

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

Τα αδρανή δεν πρέπει να έχουν στην επιφάνειά τους, μέσα στη μάζα τους ή μεταξύ τους ξένες ουσίες που μπορεί να εμποδίσουν την πρόσφυση με το κονίαμα ή να έχουν επιβλαβή χημική επίδραση στο τσιμέντο ή στο χαλύβδινο οπλισμό. Τα κυριότερα από τα επιβλαβή αυτά πρόσμικτα είναι: πυριτική παιπάλη, οργανικές προσμίξεις, θειούχες ενώσεις.
Επίσης θα πρέπει να ελέγχεται κατά πόσο τα αδρανή περιέχουν ποιότητες πυριτίου επιδεκτές σε προσβολή από τα αλκάλια (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.

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

Οι κόκκοι μπορεί να είναι στρογγυλοί, κυβόμορφοι, γωνιώδεις, πλακόμορφοι ή επιμήκεις. Από πλευράς εργασιμότητας καλύτεροι είναι οι στρογγυλοί ή κυβόμορφοι κόκκοι ενώ από πλευράς μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος, οι κόκκοι με ανώμαλη επιφάνεια. Δηλαδή συνολικά καλύτερα είναι τα θραυστά αδρανή με κόκκους που δεν είναι επιμήκεις και πλακοειδείς.
Τα αδρανή υλικά ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

Πίνακας 4: 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

Τα αδρανή υλικά πρέπει να είναι:

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

Επίσης ισχύουν τα παρακάτω:

1. Τα αδρανή μέχρι 7 mm – χωρίς τσιμέντο- πρέπει να καλύπτουν το 35-45% της συνολικής ποσότητας των αδρανών

2. Ανάλογα με την ποιότητα του σκυροδέματος τα αδρανή υλικά μπορούν να προσκομίζονται στο εργοτάξιο αναμεμιγμένα ή διαβαθμισμένα.

- Προκειμένου για σκυρόδεμα C8 τα αδρανή υλικά μπορούν να είναι αμμοχάλικα ποταμού ή θραυστά λατομείου αναμεμιγμένα αρκεί μακροσκοπικός να είναι προφανές ότι περιέχουν και αρκετό χονδρόκοκκο υλικό.
- Προκειμένου όμως για σκυροδέματα ανώτερης ποιότητας πρέπει να προσκομίζονται σε ξεχωριστές ομάδες. Για μεν τα σκυροδέματα C12 και C16 να προσκομίζονται σε τρεις διαβαθμίσεις (άμμος, γαρμπίλι, σκύρα).
- Για δε τα σκυροδέματα C20 και άνω σε τέσσερις διαβαθμίσεις (άμμος, ριζάκι, γαρμπίλι, σκύρα).

3. Όταν χρησιμοποιούνται θραυστά αδρανή και προπαντός θραύστη άμμος καλό είναι να προστίθενται σε αυτά και άμμος ποταμών.

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

2.2.2. 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 οπλισμού. Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ανθρακούχα νερά., καθώς και τα νερά με υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα και χαμηλό pH. (Μπατής Γ., 2006)
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 σκυρόδεμα, αν η απαιτούμενη αντοχή αυξηθεί κατά 15%.

Το νερό για τη παραγωγή σκυροδέματος πρέπει να έχει:

- περιεκτικότητα σε άλατα μικρότερη από 3.5%
- περιεκτικότητα σε θειικά μικρότερη από 0.5%
- pH μεγαλύτερο από 4
- περιεκτικότητα σε νάτριο μικρότερη από 3%

- πλήρη έλλειψη σε λίπη ή έλαια
- χαμηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένες οργανικές ουσίες
- χαμηλή περιεκτικότητα σε αιωρούμενες οργανικές ουσίες

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

2.2.3. Βελτιωτικά πρόσμικτα

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

Τα υλικά αυτά κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Αερακτικά, που αναπτύσσουν στη μάζα του σκληρυμένου σκυροδέματος μικροσκοπικές (0,02-0,2 mm) φυσαλίδες με σκοπό την αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε κύκλους ζέστης- παγετού.
- Πρόσθετα επιταχυντικά της πήξης, για σκυροδέτηση σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Πρόσθετα επιβραδυντικά της πήξης, για σκυροδέτηση σε πολύ ζεστό καιρό.

- Ρευστοποιητικά ή υπερρευστοποιητικά πρόσθετα, για αύξηση της ρευστότητας του νωπού σκυροδέματος. Η χρήση τους είναι σχεδόν απαραίτητη για σκυροδέματα υψηλής ποιότητας, που αναγκαστικά περιέχουν λιγότερο νερό, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες. Τα υλικά αυτά λύνουν το πρόβλημα της εργασιμότητας και κατ' επέκταση της αντλησιμότητας και διάστρωσης του σκυροδέματος, χωρίς την επιζήμια αύξηση του νερού ανάμειξης, ενώ έχουν επιπρόσθετα και επιβραδυντική δράση. Όταν χρησιμοποιούνται υπερρευστοποιητικά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η επίδραση τους στην ρευστότητα του μίγματος κατά κανόνα εξαφανίζεται μετά από 20-30 min από την προσθήκη τους στο μίγμα.
- Στεγανωτικά

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

2.2.4. Πρόσθετα συστατικά

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 Ι) και τα πρόσθετα που έχουν ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες (τύπου ΙΙ) στα οποία περιλαμβάνονται οι ιπτάμενες τέφρες, η πυριτική παιπάλη κ.α. (Τσίμας Σ., 2006)

2.3. Ιδιότητες σκυροδέματος

2.3.1. 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 ωσότου πετύχουμε πλήρη συμπύκνωση.

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.

2.3.2. 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.

2.3.3. Πορώδες

Το σκυρόδεμα δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές, αλλά περιέχει πλήθος από εσωτερικές κοιλότητες. Το σύνολο των κοιλοτήτων το ονομάζουμε πορώδες του σκυροδέματος.
Ανάλογα με την προέλευσή τους διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

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

2.3.4. 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.

2.3.5. 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.**

2.4. 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 κονίας, 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)

2.5. 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 κονίας 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.

2.6. 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

  Εξανθήματα ενδέχεται να εμφανιστούν από διαλυτά άλατα. Ο κίνδυνος προέρχεται από την άμμο και για αυτό πρέπει να αποφεύγεται η χρήση θαλάσσιας άμμου.

Κεφάλαιο 3: Διάβρωση

3.1. Εισαγωγή

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

Οι κατασκευές από σκυρόδεμα και οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ανθεκτικές στη φθορά. Όμως η ανθεκτικότητα των κατασκευών αυτών επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες επιδρούν στην κατασκευή εσωτερικά και εξωτερικά. Σε χώρες που περιβάλλονται από θάλασσα και με ζεστό κλίμα, όπως η Ελλάδα, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, τα χλωριόντα και άλλοι αέριοι ρύποι όπως το διοξείδιο του άνθρακα CO_2, το διοξείδιο του θείου SO_2 και τα οξείδια του αζώτου NOx, 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.

Στη γενικότερη περίπτωση η διάβρωση του σκυροδέματος μπορεί να είναι φυσική ή χημική. Με τον όρο φυσική διάβρωση χαρακτηρίζονται οι φθορές από καθαρά μηχανικούς λόγους (π.χ. τριβή, ψύχος). Η χημική διάβρωση σχετίζεται με φαινόμενα χημικά ή φυσικοχημικά, χωρίς να αποκλείεται η συνέργια μηχανικών αιτίων.

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. μάκρο-οργανισμοί στο θαλάσσιο περιβάλλον, βακτηρίδια στο έδαφος) κ.α.

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

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

Οι κύριοι διαβρωτικοί παράγοντες για κάθε περιβάλλον είναι:

- Η Ατμόσφαιρα. Οι κύριοι παράγοντες της ατμοσφαιρικής διάβρωσης είναι το οξυγόνο, η υγρασία που περιέχεται στην ατμόσφαιρα και το CO_2. Η ατμοσφαιρική διάβρωση εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες, δηλαδή αν το κλίμα είναι ξηρό, τροπικό ή πολικό.
- Το Έδαφος. Η διαβρωτική ικανότητα του εδάφους επηρεάζεται κυρίως από τα συστατικά που περιέχονται σε αυτό. Παράγοντες διάβρωσης είναι η οξύτητα του εδάφους, η ύπαρξη αλάτων η υγρασία του εδάφους, η περιεκτικότητά του σε O_2, 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. Μορφές διάβρωσης

Δεν υπάρχει ενιαία συστηματική κατάταξη των τύπων της διάβρωσης στη βιβλιογραφία διότι δεν χρησιμοποιούνται πάντοτε τα ίδια κριτήρια κατάταξης. Στο DIN 50900 Tail I, April 1982 Corrosion deer Metallic – Bereft γίνεται η γενική διάκριση μεταξύ διάβρωσης με και χωρίς μηχανική καταπόνηση. Η διάβρωση χωρίς μηχανική καταπόνηση υποδιαιρείται σε 18 τύπους ενώ με μηχανική καταπόνηση σε 6 τύπους.

3.3.1. Διάβρωση από μηχανική καταπόνηση

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)

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

Εικόνα 1: Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση

3.3.2. Διάβρωση χωρίς μηχανική καταπόνηση

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

- Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση. Επιτυγχάνεται όταν ο μέσος όρος ταχύτητας διάβρωσης ανά μονάδα επιφάνειας, είναι ο ίδιος σε όλη την επιφάνεια. Η ομοιόμορφη διάβρωση μπορεί να συμβεί στην ενεργή ή στην παθητική κατάσταση. Η πορεία μετάπτωσης από την ενεργή στην παθητική κατάσταση καλείται παθητικοποίηση και επιτυγχάνεται με ανοδικό ρεύμα, ενώ η αντίθετη μετάπτωση ονομάζεται ενεργοποίηση και επιτυγχάνεται με καθοδικά ρεύματα

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

- 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.

- Γαλβανική διάβρωση ή διάβρωση επαφής. Επιτυγχάνεται όταν δύο διαφορετικά μέταλλα βρίσκονται σε αγώγιμη επαφή μεταξύ τους σε

διαβρωτικό περιβάλλον τότε διαβρώνεται σχεδόν αποκλειστικά το αγενέστερο μέταλλο.

- 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.

- Διάβρωση με μηχανισμό υδρογόνου. Στη διάβρωση του τύπου αυτού εξετάζεται με λεπτομέρεια η εξέλιξη της καθοδικής δράσης $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

- 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.

- 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.

- 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.

3.3.3. Άλλα είδη διάβρωσης

- Διάβρωση μέσω ρευμάτων διαφυγής. Η περίπτωση αυτή διάβρωσης μπορεί να παρατηρηθεί σε οποιαδήποτε μεταλλική κατασκευή ή σωλήνωση υπόγεια ή όχι που γειτνιάζει με γειωμένες πηγές συνεχούς ρεύματος.
- 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.

- Θερμογαλβανική διάβρωση. Είναι παρόμοια προς τη γαλβανική διάβρωση. Το γαλβανικό στοιχείο δημιουργείται από θερμοκρασιακή διαφορά εξαιτίας ανομοιόμορφης θέρμανσης ή ψύξης μεταλλικών επιφανειών.

3.4. Διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος

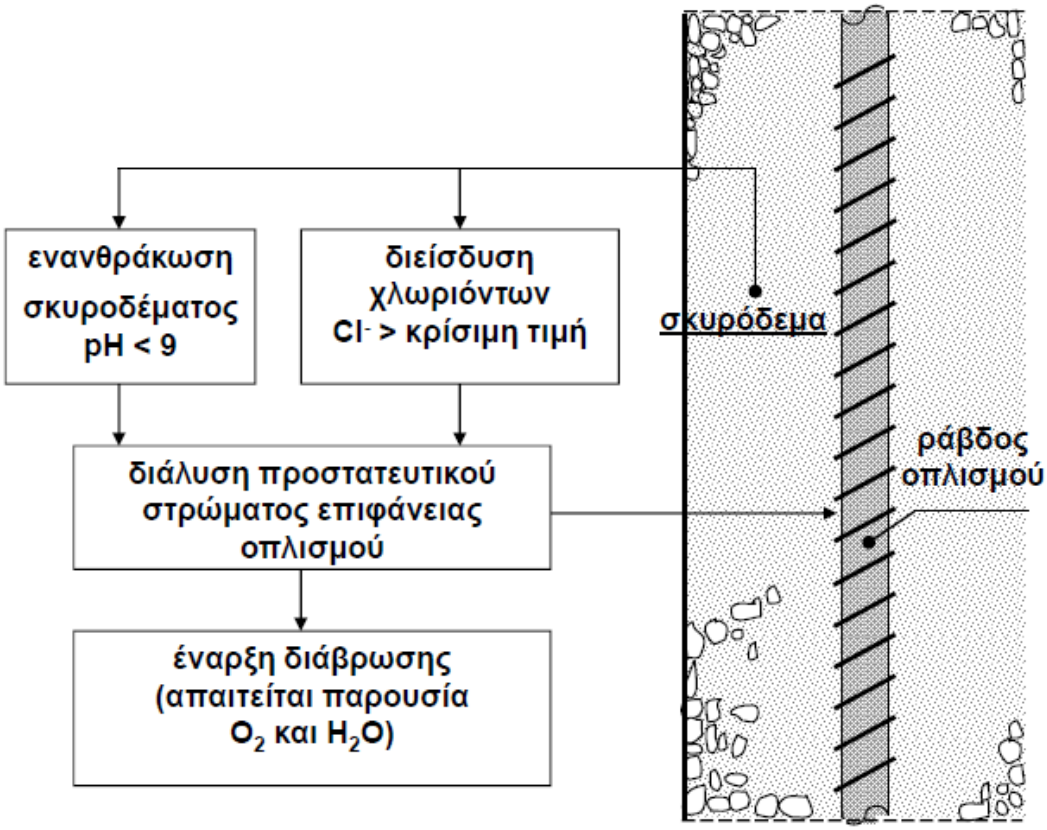
Η διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα είναι μια ηλεκτροχημική δράση που λαμβάνει χώρα όταν το σκυρόδεμα έχει μια ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω της παρουσίας υγρασίας και ηλεκτρολυτών στους πόρους του.

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

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

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

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



Σχήμα 2: Μηχανισμοί έναρξης διάβρωσης οπλισμού σκυροδέματος

3.5. Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση του σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα

3.5.1. 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.

3.5.2. 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.

3.5.3. 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

3.5.4. 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.

3.6. Μηχανισμός Διάβρωσης του χάλυβα

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

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

Ανοδική περιοχή

$Fe \leftrightarrow Fe^{++} + 2e^{-}$

$Fe^{++} + 2\ OH^{-} \leftrightarrow Fe\ (OH)_2$

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 $Fe(OH)_2$ είναι αδιάλυτο και σχηματίζει ένα μικρής συνάφειας πορώδες και ογκώδες στρώμα (σκουριά) πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα.

Καθοδική περιοχή

$H_2O + ½O_2 + 2e^{-} \leftrightarrow 2\ OH^{-}$

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 $Fe(OH)_2$ 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:

$2Fe^{++} + 3H_2O \rightarrow Fe_2O_3 + 6H^+ + 2e^-$

$3Fe^{++} + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 8H^+ + 2e^-$

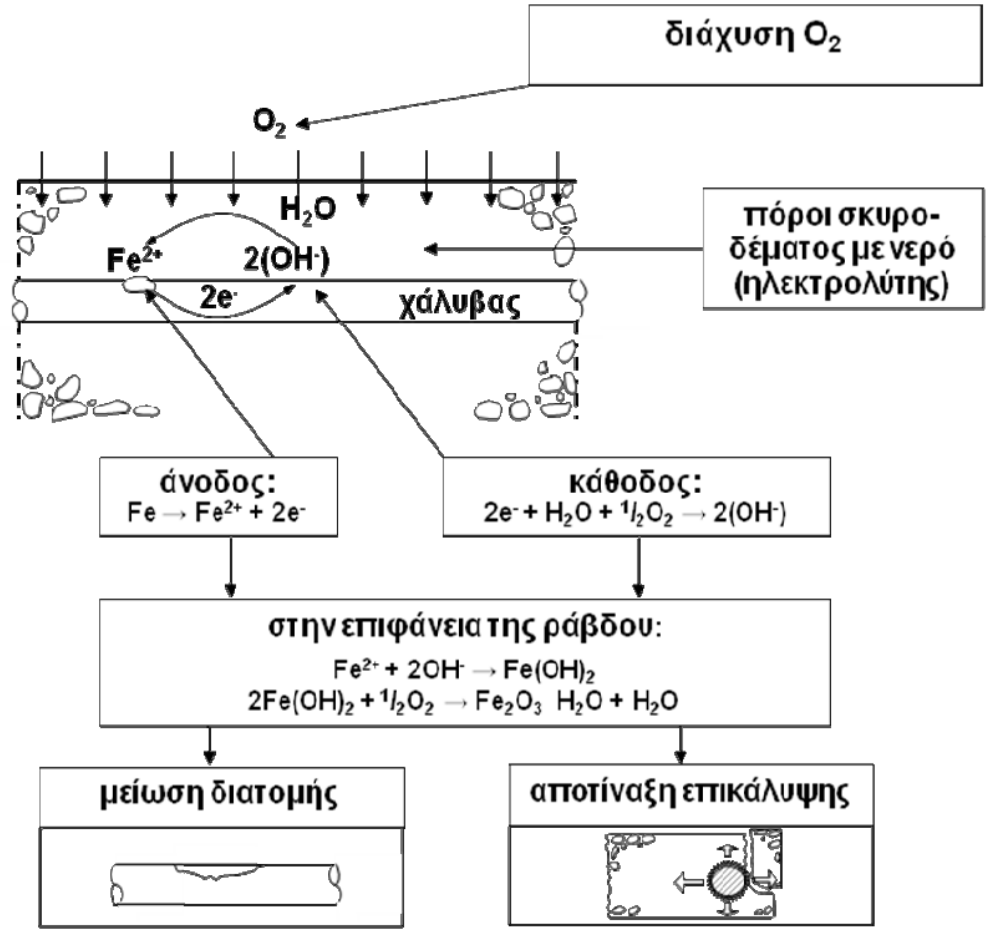
Σύμφωνα με τις παραπάνω αντιδράσεις είναι δυνατόν να συμβεί οξείδωση, δηλαδή διάβρωση ακόμη και όταν η τιμή του pH είναι μεγαλύτερη από 10. Η διαφορά όμως είναι ,ότι τα προϊόντα των αντιδράσεων αυτών (Fe_2O_3, Fe_3O_4) σχηματίζουν ένα συμπαγές και αδιαπέραστο στρώμα που παθητικοποιεί τον οπλισμό και 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: Μηχανισμοί και αποτελέσματα διάβρωσης οπλισμού σκυροδέματος

3.6.1. Η διάβρωση του οπλισμού στο ενανθρακωμένο σκυρόδεμα

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

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

$H_2O + CO_2 \rightarrow 2H^+ + CO_3^{2-}$

$Ca(OH)_2 + 2H^+ + CO_3^{2-} \rightarrow CaC0_3 + 2H_2O$

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

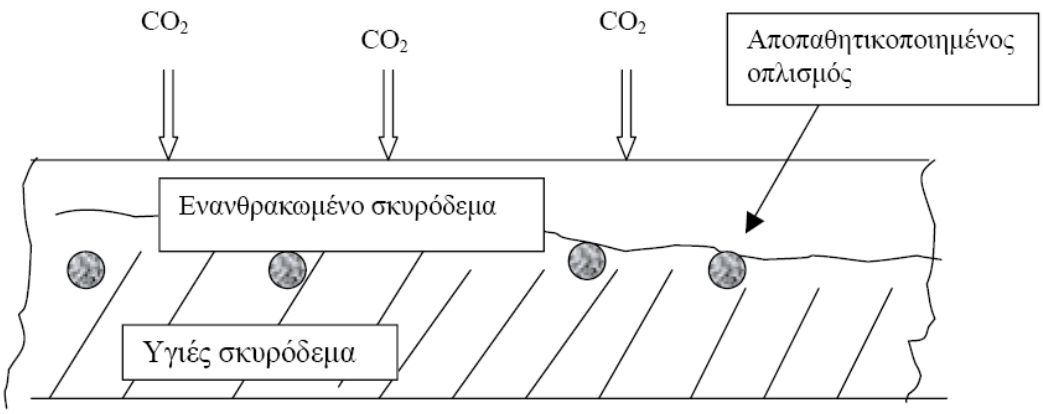
Η μείωση του pH του σκυροδέματος σε τιμές κάτω του 9.0 οφείλεται στην χημική αντίδραση του $Ca(OH)_2$ του νερού των πόρων (και γενικότερα του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού) με το διοξείδιο του άνθρακος (CO_2) της ατμόσφαιρας, που σταδιακά διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη μετατροπή του $Ca(OH)_2$ σε ανθρακικό ασβέστιο ($CaCO_3$) σύμφωνα με την αντίδραση:

$Ca(OH)_2 + CO_2 + H_2O \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$

Η αντίδραση αυτή, γνωστή ως ενανθράκωση του σκυροδέματος, δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις στις ιδιότητες του ίδιου του σκυροδέματος. Αντίθετα έχει σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρηθεί μία ελαφριά αύξηση της αντοχής λόγω του σχηματισμού του ανθρακικού ασβεστίου. Το σημαντικότερο αποτέλεσμα της παραπάνω

αντίδρασης είναι η κατανάλωση $Ca(OH)_2$ προς σχηματισμό $CaCO_3$, με αποτέλεσμα τη μείωση της αλκαλικότητας του περιβάλλοντος των πόρων του σκυροδέματος (πτώση του pH του διαλύματος των πόρων). Όταν η τιμή του pH μειωθεί κάτω του 11, το προστατευτικό στρώμα του χάλυβα αρχίζει να ρηγματώνεται και τελικά καταστρέφεται πλήρως όταν το pH του διαλύματος των πόρων πέσει κάτω από την τιμή 9. Τότε ο χάλυβας του σκυροδέματος αρχίζει να σκουριάζει, σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρθηκε ανωτέρω. Η αντίδραση της ενανθράκωσης ξεκινάει από την εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος και σταδιακά προχωράει προς το εσωτερικό του. Η επιφάνεια που διαχωρίζει το ενανθρακωμένο από το υγιές σκυρόδεμα ονομάζεται μέτωπο της ενανθράκωσης. Όταν το μέτωπο της ενανθράκωσης φθάσει στον οπλισμό (ή με άλλα λόγια το βάθος της ενανθράκωσης γίνει ίσο με το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού), τότε αυτός αποπαθητικοποιείται και η διάβρωσή του ξεκινά. (Σιδέρης Κ. και Ζάρρας Σ., 2006)

Η όλη διαδικασία γίνεται καλύτερα κατανοητή στο σχήμα 4:



Σχήμα 4: Διάβρωση οπλισμού σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα

Για την πραγματοποίηση της αντίδρασης απαιτούνται μικρές ποσότητες νερού. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενανθράκωσης παρατηρείται σε αέρα με σχετική υγρασία 50 έως 70%. Το ξηρό σκυρόδεμα δεν θα ενανθρακωθεί, λόγω απουσίας της απαιτούμενης υγρασίας ενώ σε κορεσμένο με νερό σκυρόδεμα εμποδίζεται η διάχυση του αερίου CO_2 στους πόρους του σκυροδέματος.

Το νερό που δημιουργείται μετά την αντίδραση διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος και η διαδικασία συνεχίζεται σε μεγαλύτερα βάθη. Το pH μειώνεται,

σε πλήρως δε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα παίρνει περίπου την τιμή 8,3.

Το ανθρακικό ασβέστιο που δημιουργείται φράζει τους πόρους του τσιμεντοκονιάματος και έτσι προκαλείται και μια αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Κατόπιν το ανθρακικό ασβέστιο αντιδρώντας με το ανθρακικό οξύ (ανάλογα με την πίεση και την θερμοκρασία το αέριο CO_2 διαλύεται στο νερό και σχηματίζει ανθρακικό οξύ [H_2CO_3] σε πολύ μικρές ποσότητες περίπου 1 % κατά βάρος ενώ το υπόλοιπο παραμένει αδιάλυτο ως αέριο CO_2) δίνει όξινο ανθρακικό ασβέστιο το οποίο είναι ευδιάλυτο στο νερό και έτσι προκαλείται απόπλυση. Αποτέλεσμα της απόπλυσης είναι και οι φωλιές που εμφανίζονται κοντά στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

$$CaCO_3 + [\ H_2O + CO_2\ ] \rightarrow Ca(HCO_3)_2$$

Το ανθρακικό οξύ μπορεί να αντιδράσει με τα ένυδρα άλατα αργιλικού τριασβεστίου (C_3-A-H_6) και σιδηρικού τριασβεστίου (C_3-F-H_6) τα οποία στηρίζουν τη συνάφεια μεταξύ του τσιμεντοπολτού και των αδρανών προκαλώντας χαλάρωση του σκυροδέματος.

Εικόνα 2.: Διάβρωση οπλισμού

Παράμετροι που επηρεάζουν την ενανθράκωση.

- **Συνθήκες περιβάλλοντος**
    - Για σχετική υγρασία περιβάλλοντος 50% έως 70% παρατηρείται το μέγιστο ποσοστό ενανθράκωσης.
    - Θερμοκρασία: Αύξηση της θερμοκρασίας επιταχύνει την ταχύτητα ενανθράκωσης.
- **Ποιότητα και πάχος της επικαλύψεις**
    - Χαμηλή διαπερατότητα. Μειώνει ή και αναστέλλει τη διείσδυση του CO2.
    - Υπάρξει ρωγμών. Επιταχύνει πολύ τη διαδικασία ενανθράκωσης.
    - Σχέση νερού τσιμέντου (W/C). Για μικρές τιμές του λόγου W/C περιορίζεται πολύ η διείσδυση υγρασίας και η διάχυση του αερίου CO_2 λόγω μείωσης του μεγέθους και του αριθμού τριχοειδών πόρων.
    - Πάχος επικάλυψης: Όσο το πορώδες του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερο, τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού από το σκυρόδεμα ώστε να έχουμε τον ίδιο βαθμό προστασίας του οπλισμού. Επικάλυψη με χαμηλή διαπερατότητα μειώνει ή και αναστέλλει τη διείσδυση του CO_2, μειώνοντας έτσι την ταχύτητα της ενανθράκωσης.
    - Η ενανθράκωση επιταχύνεται από πόρους, φωλιές, κακοτεχνίες, ανομοιογενή κακή δόνηση κτλ. (Τάσιος Θ. και Αλιγιζάκη Κ., 1992)

- **Είδος τσιμέντου.** Η αυξημένη περιεκτικότητα του μπετόν σε τσιμέντο μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης
    - Κατά τον **U. Ludwing (1890).** Τσιμέντα που περιέχουν σκωρίες υψικαμίνων και ποζολάνες ενανθρακώνονται πιο γρήγορα από το Portland.
    - Κατά τον **Matthews (1984).** Η προσθήκη ιπταμένων τεφρών στο τσιμέντο επιταχύνει την ενανθράκωση σε σκυροδέματα με αντοχή μικρότερη από 30 έως 35 MPa.

- Από τους **A. Zhu (1982),** και **X. Tan (1982). Η** προσθήκη λιγνοσουλφόνης στο σκυρόδεμα σε ποσότητα 0,25% κ.β. μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης κατά 10 έως 30%.
- Η προσθήκη **πυριτικής παιπάλης**. Επιταχύνει την ενανθράκωση. (Τάσιος Θ. και Αλιγιζάκη Κ., 1992)

Αποτελέσματα της ενανθράκωσης

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

Επίσης άλλες συνέπειες της ενανθράκωσης είναι:

- Αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος (από 30-100%) όταν τα δοκίμια βρίσκονται σε χώρους με πλούσια περιεκτικότητα σε CO_2.
- Μείωση του πορώδους. Η μείωση του πορώδους πιθανόν να οφείλεται στην εναπόθεση των προϊόντων της ενανθράκωσης στα τοιχώματα των τριχοειδών πόρων. Γι αυτό το λόγο αποφεύγεται η μέτρηση του πορώδους για να εκτιμήσουμε την αντοχή του σκυροδέματος σε ενανθράκωση.
- Αύξηση του ερπυσμού και της ταχύτητας του ερπυσμού
- Αυξάνεται η συστολή του σκυροδέματος λόγω της αποβολής του νερού, προκαλούμενη κυρίως από την απελευθέρωση του νερού.
- Ακόμη μια φθορά που μπορεί να προκληθεί από την ενανθράκωση είναι η άτακτη ρηγμάτωση η οποία αν δεν οφείλεται στην υπερβολική συρρίκνωση του νωπού σκυροδέματος (υπερβολική εξάτμιση νερού) οφείλεται σε μεταγενέστερη αλκαλική αντίδραση τσιμέντου-αδρανών. Η άτακτη ρηγμάτωση μπορεί να οδηγήσει σε εκτεταμένες απολεπίσεις του σκυροδέματος.
- Καθώς διαβρώνεται ο οπλισμός προκαλείται διόγκωση, η οποία με την σειρά της προκαλεί εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα, που προκαλούν

ρηγματώσεις και αποκόλληση της επικάλυψης του οπλισμού. Η οξείδωση του οπλισμού έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της μηχανικής αντοχής του.

- Ένα ακόμη αποτέλεσμα της ενανθράκωσης είναι η απόθεση αλάτων η οποία γίνεται εμφανής με τη δημιουργία λευκών κηλίδων στην επιφάνεια του σκυροδέματος.
- Αποτέλεσμα της ενανθράκωσης είναι και οι κηλίδες σκουριάς, οι οποίες εμφανίζονται στις παρειές ή στον πυθμένα στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, έχουν καφέ χρώμα και οφείλονται στη διάβρωση του χάλυβα.

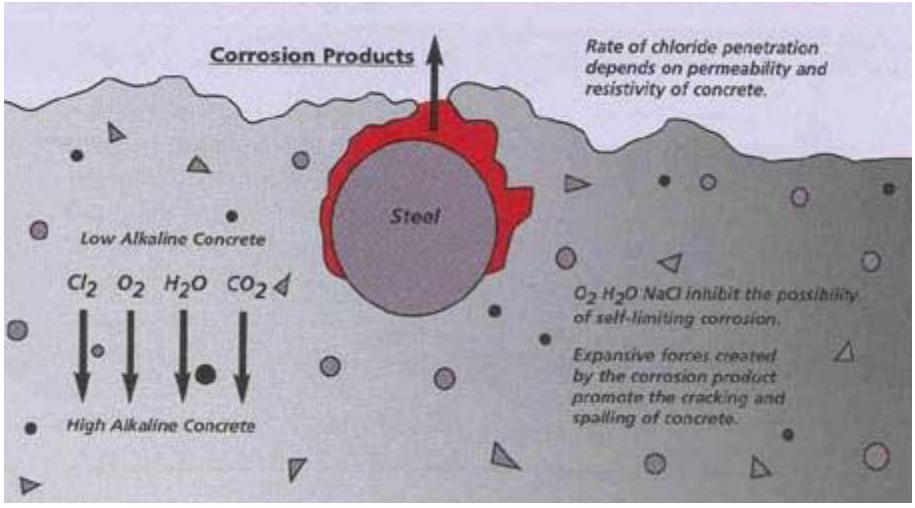
3.6.2. Η διάβρωση του σιδηροπλισμού σε σκυρόδεμα με χλωριόντα

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

Η επίδραση του περιβάλλοντος σε παραθαλάσσιες περιοχές είναι η κύρια πηγή των χλωριόντων που απαιτούνται για να λάβει χώρα η διάβρωση του σκυροδέματος στις γέφυρες και γενικά στις παραθαλάσσιες κατασκευές όπως λιμάνια και μαρίνες. Επίσης σε ψυχρά κλίματα, η χρησιμοποίηση αλάτων τήξης χιονιού στους δρόμους είναι μία συνήθης πρακτική, με αποτέλεσμα τα χλωριόντα να διαλύονται στο νερό και να διεισδύουν αρκετά εύκολα στο σκυρόδεμα καταστρωμάτων γεφυρών και αλλού. (Αποστολόπουλος Χ. κ.α., 2009)

Η διείσδυση των χλωριόντων είναι μια διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε πλήρως ή μερικώς γεμάτους πόρους με νερό. Τα χλωριόντα, φθάνοντας στην εξωτερική επιφάνεια ενός δομικού στοιχείου, διεισδύουν στους πόρους του σκυροδέματος είτε

μέσω διάχυσης είτε μέσω τριχοειδούς απορρόφησης του επιφανειακού νερού στο οποίο διαλύονται, όπου τα ποσά των μεταφερόμενων χλωριόντων είναι μεγαλύτερα από ότι με διάχυση, είτε με συνδυασμό των δυο αυτών μηχανισμών.



Σχήμα 5: Απεικόνιση διείσδυσης χλωριόντων

Η ικανότητα δέσμευσης των χλωριόντων εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο τσιμέντο. Κατά τη διείσδυση των χλωριόντων στο εσωτερικό του σκυροδέματος, μέρος αυτών δεσμεύεται από το C_3A προς σχηματισμό του άλατος Friedel ($CaO \cdot Al_2O_3.CaCl \cdot 10H_2O$). Οι αργιλικές φάσεις παίζουν κύριο ρόλο στη δέσμευση των χλωριόντων (σχηματισμός του άλατος Friedel), ενώ οι πυριτικές φάσεις έχουν πολύ μικρή συνεισφορά. Συχνά όμως το υπάρχον C_3A δεν επαρκεί για τη δέσμευση όλων των χλωριόντων, με αποτέλεσμα μέρος αυτών να παραμένει ελεύθερο στο διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος. (Σωτηριάδης Κ. κ.α., 2009)

Ο ρόλος των ιόντων χλωρίου στην πρόκληση της διάβρωσης και της ενίσχυσης του ρεύματος διάβρωσης είναι σημαντικός. Εάν τα χλωριόντα βρίσκονται σε επαρκή ποσότητα, καταστρέφουν το παθητικό στρώμα οξειδίων προκαλώντας διάβρωση του χάλυβα. Η τιμή του ορίου της συγκέντρωσης των χλωριόντων είναι ένας παράγοντας σημαντικής σπουδαιότητας, ο οποίος ποικίλει ανάλογα με τον τύπο σκυροδέματος. Συγκεντρώσεις της τάξης των 0,71 έως 0,89 Kg/m3 θεωρούνται όριο συγκέντρωσης των χλωριόντων για συνήθεις κατασκευές από σκυρόδεμα για γέφυρες. Σύμφωνα με το AASHTO, συγκεντρώσεις μικρότερες των 1,42 Kg/m3 είναι αποδεκτές για

γέφυρες, ωστόσο το σκυρόδεμα θα πρέπει να επισκευάζεται όταν το όριο των χλωριόντων φτάσει την τιμή 2.8 Kg/m3. (Ρούτουλας Α., 2010)

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

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

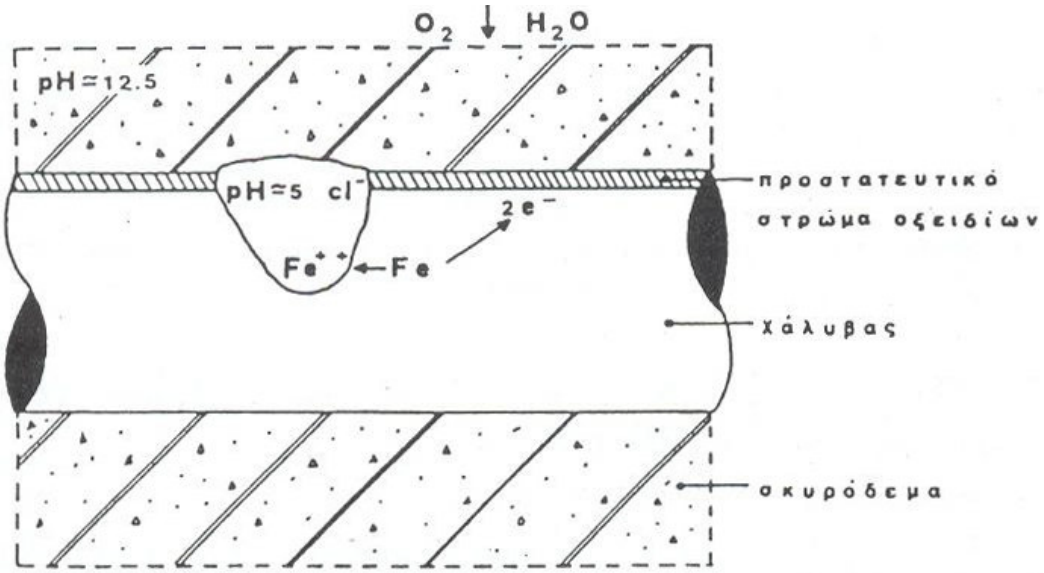
$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ (1)

$Fe^{2+} + 2Cl^- \rightarrow FeCl_2$ (2)

$FeCl_2 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2H^+ + 2Cl^-$ (3)

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

Ο ρυθμός της διάβρωσης του χάλυβα εξαρτάται από την διαθεσιμότητα οξυγόνου και νερού στην κάθοδο. Όμως ακόμα και χαμηλά ποσοστά οξυγόνου μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική διάβρωση με βελονισμούς. Το φαινόμενο αυτό προκύπτει διότι οι ανοδικές περιοχές είναι τοπικές, ενώ οι αντίστοιχες καθοδικές περιοχές μπορούν να επεκταθούν σε μία ευρύτερη περιοχή. Η επίδραση ακόμα και μικρών ποσοστών παροχής O_2 σε μεγάλες καθοδικές περιοχές είναι αρκετά σημαντική. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μία γρήγορη τοπική μείωση της διατομής της ράβδου και σε σημαντική υποβάθμιση της ικανότητας του δομικού στοιχείου από οπλισμένο σκυρόδεμα να μεταφέρει με ασφάλεια τα φορτία του. Όταν η ποσότητα των προϊόντων της διάβρωσης γίνεται εμφανής στην επιφάνεια της ράβδου, το μέγεθος της δομικής υποβάθμισής της μπορεί να είναι ήδη αρκετά σημαντικό. (Αποστολόπουλος Χ. κ.α., 2009)



Σχήμα 6: Απλοποιημένο προσομοίωμα της διάβρωσης του χάλυβα λόγω επίδρασης χλωριόντων.

Μια άλλη θεωρία αναφέρει ότι το όριο στο οποίο ο χάλυβας αποπαθητικοποιείται δεν πρέπει να λαμβάνει υπόψη της μόνο την συγκέντρωση των χλωριόντων στη μάζα του σκυροδέματος, αλλά την αναλογία του λόγου των χλωριόντων ως προς την συγκέντρωση των υδροξυλιόντων. Έτσι κατά την παρουσία χλωριόντων η αποπαθητικοποίηση του χάλυβα μπορεί να αρχίσει σε υψηλότερες από τις κανονικές τιμές του pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος με τη μορφή βελονισμών (pitting corrosion). Για να γίνει αυτό πρέπει ο λόγος $[Cl^-]/[OH^-]$ να πάρει τιμές

μεγαλύτερες από 0.6, οπότε τα ελεύθερα χλωριόντα φθάνουν, λόγω διάχυσης, στην επιφάνεια του οπλισμού, όπου δημιουργούνται τοπικά γαλβανικά στοιχεία (Σωτηριάδης Κ. κ.α., 2009)

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

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

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

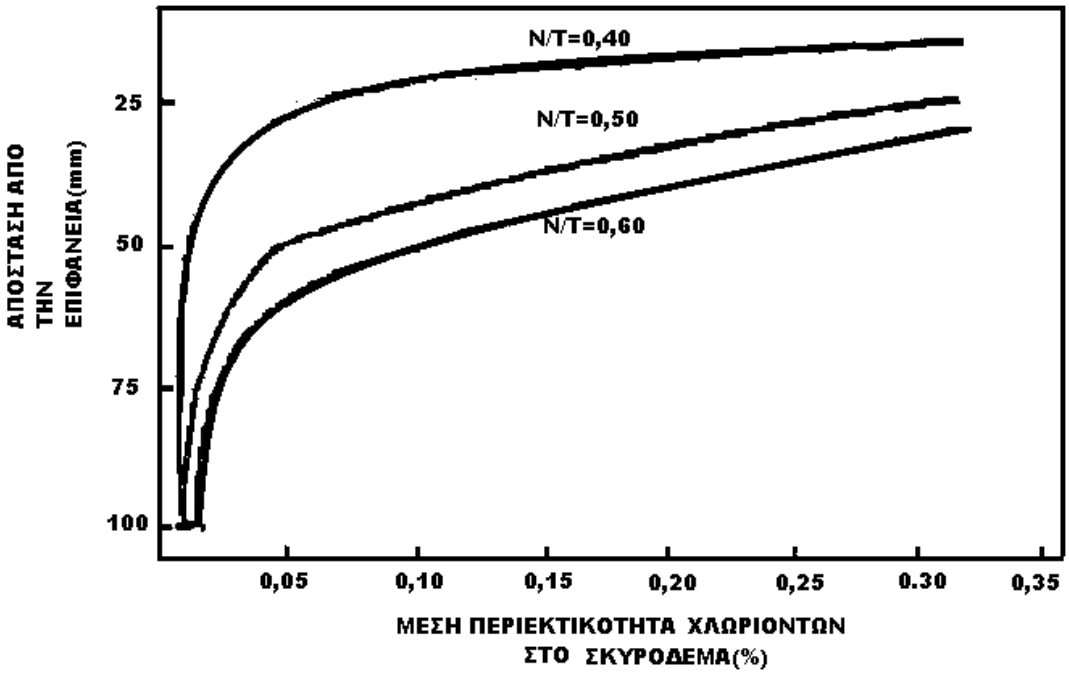
- Τα υλικά κατασκευής του (π.χ. άμμος θαλάσσης, γλυφό νερό), όπου βρίσκονται με τη μορφή των αλάτων τους και είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στην μάζα του σκυροδέματος.
- Το περιβάλλον (διείσδυση διαλυμάτων αλάτων διάλυσης του πάγου και θαλασσινού νερού), όπου η συγκέντρωσή τους παρουσιάζει μια μέγιστη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

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

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

- Τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

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



Σχήμα 7: Επίδραση του λόγου N/T στην διείσδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα

Για την περίπτωση των χλωριόντων διακρίνονται δύο περιπτώσεις διάβρωσης:

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

Ιδιοδιάβρωση

Όταν η συγκέντρωση των ελεύθερων χλωριόντων φθάσει σε ένα επίπεδο, η δράση τους είναι μια αυτοκαταλυόμενη αντίδραση. Το ποσό των χλωριόντων στην επιφάνεια του οπλισμού είναι σταθερό και ακόμα και αν παρεμποδιστεί η περαιτέρω είσοδος χλωριόντων, η διάβρωση δεν παρεμποδίζεται. Τα ελεύθερα χλωριόντα

φτάνουν, λόγω διάχυσης, στη επιφάνεια του οπλισμού όπου αρχίζει η αποπαθητικοποίησή του, λόγω δημιουργίας τοπικών γαλβανικών στοιχείων. Εκεί πραγματοποιείται η διάλυση του σιδήρου, σύμφωνα με τις αντιδράσεις:

Άνοδος: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$

Κάθοδος: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

Τα ιόντα της καθόδου που σχηματίζονται από την αντίδραση της καθόδου, αντιδρούν με τα χλωριόντα που έχουν φθάσει στην επιφάνεια του οπλισμού σχηματίζοντας διχλωριούχο σίδηρο ($FeCl_2$) ο οποίος παρουσία του οξυγόνου μετατρέπεται σε χλωρίδιο του τρισθενούς σιδήρου (FeOCl). Κατόπιν με την παρουσία νερού έχουμε υδρόλυση των προϊόντων της διάβρωσης σύμφωνα με τις αντιδράσεις:

$FeOCI + H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + CI^-$

$FeCI_2 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2CI_2 + 2H^+$

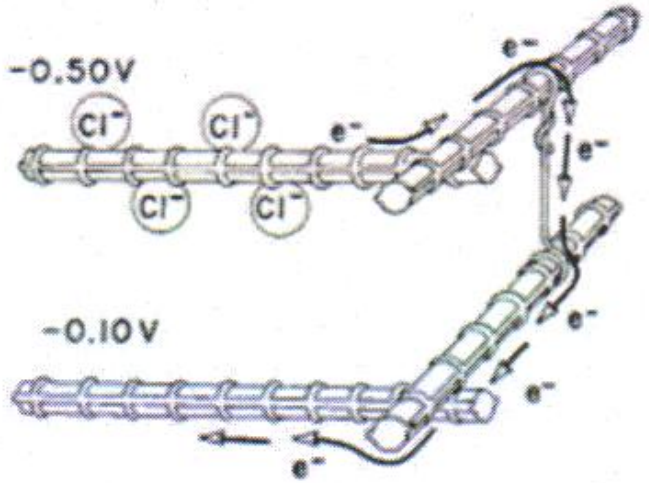
Με την υδρόλυση τα χλωριόντα που είχαν δεσμευθεί στα προϊόντα διάβρωσης επιστρέφουν πάλι στο διάλυμα των πόρων και ταυτόχρονα έχει γίνει τοπική οξύνιση του διαλύματος. (Μπατής Γ.,2006)

Γαλβανικό μακροστοιχείο:

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

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

Στο σχήμα 8 δίνεται ένα παράδειγμα διάβρωσης με την δημιουργία γαλβανικού μακροστοιχείου εξαιτίας της διαφορετικής συγκέντρωσης χλωριόντων.



Σχήμα 8: Διαφορετική συγκέντρωση χλωριόντων, δημιουργεί διαφορά δυναμικού

Η ταχύτητα της διάβρωσης εξαρτάται:

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

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

3.6.3. Η διάβρωση του οπλισμού σε σκυρόδεμα με ρωγμές

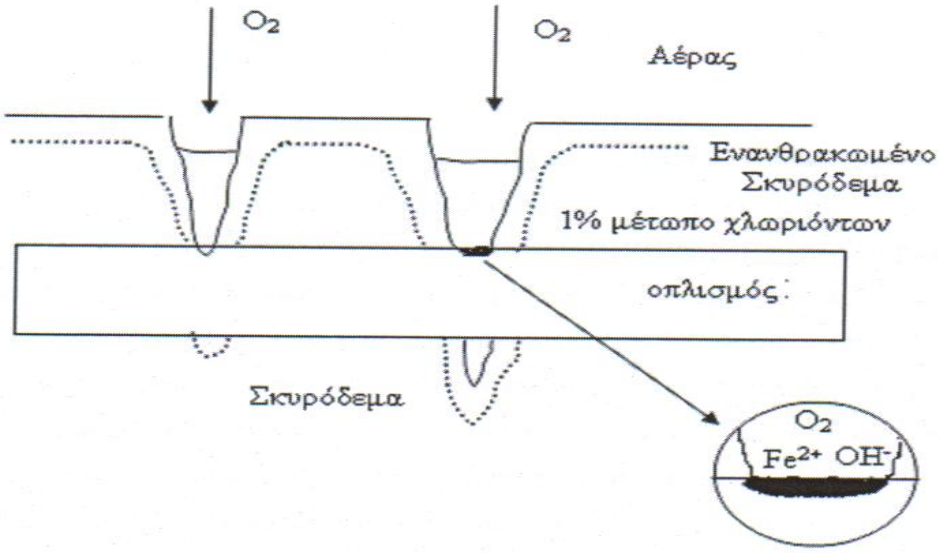
Η παρουσία των ρωγμών στο σκυρόδεμα επιταχύνει την διάχυση των διαβρωτικών ουσιών του περιβάλλοντος στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος και το βάθος των ρωγμών, τόσο ταχύτερη θα είναι η διάβρωση. Όταν οι ρωγμές φθάσουν στην επιφάνεια του οπλισμού, τότε αρχίζει η διάβρωση του.

Εικόνα 3: Εμφάνιση ρωγμής σε σκυρόδεμα

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

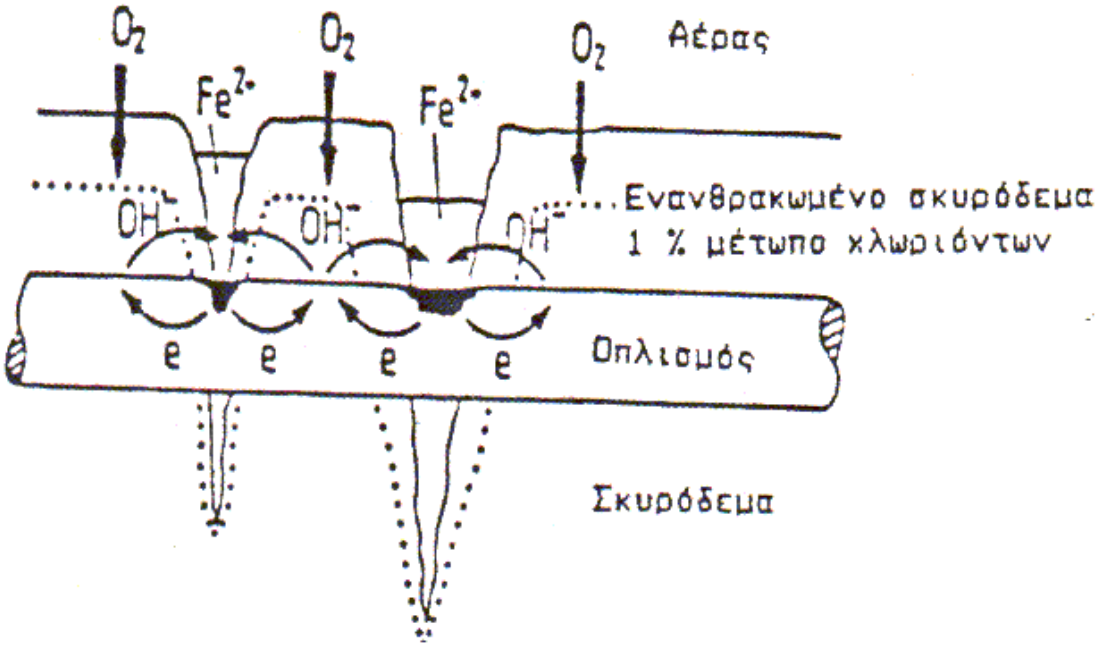
- Η ισοδιάβρωση
- Η διάβρωση με δημιουργία γαλβανικού στοιχείου, μεταξύ του τμήματος του οπλισμού στη ρωγμή και του τμήματος του οπλισμού στο σκυρόδεμα.

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



Σχήμα 9: Διάβρωση του οπλισμού σε ρωγμές του σκυροδέματος (ισοδιάβρωση)

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



Σχήμα 10: Η δημιουργία μακροστοιχείου διάβρωσης του οπλισμού σε μακροστοιχείο με ρωγμές

Η ταχύτητα της διάβρωσης εξαρτάται από:

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

Κεφάλαιο 4: Μέθοδοι προστασίας

4.1. Εισαγωγή

Για την εξασφάλιση της καλής ποιότητας μιας κατασκευής από σκυρόδεμα, απαιτείται κατάλληλη επιλογή υλικών, καλή δόνησή του και μεγάλος χρόνος συντήρησης. Η προστασία του χάλυβα στο σκυρόδεμα μπορεί να επιτευχθεί είτε μειώνοντας τη διαπερατότητα του σκυροδέματος για να εμποδιστεί η διείσδυση των διαβρωτικών ουσιών, είτε με άμεση προστασία του ίδιου του χάλυβα εμποδίζοντας την προσβολή του μετάλλου.

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

- **Μέτρα στην μάζα του σκυροδέματος**

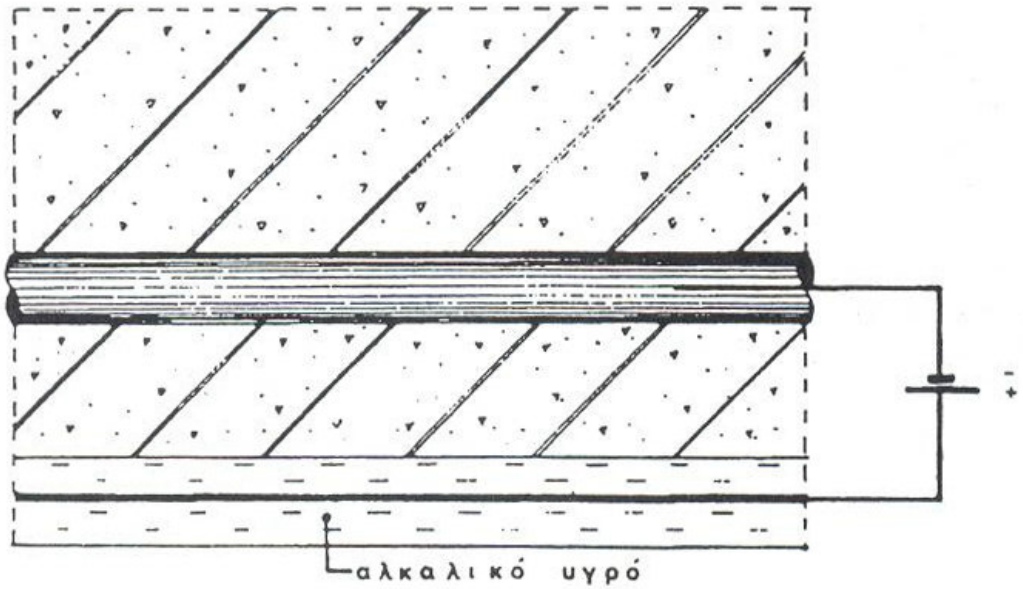
  Πρόκειται για διεργασίες ή / και προσθήκες που τροποποιούν τη σύσταση (κραματοποίηση ή καθαρισμός), τη δομή (θερμική κατεργασία) ή τις εσωτερικές τάσεις του υλικού.

  Τέτοιες επεμβάσεις μπορεί να είναι:

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

  - Το σφράγισμα των ρωγμών. Αυτό μπορεί να γίνει με ενέσεις ρητινών, ενέσεις τσιμέντου ή με την επαναλκαλοποίηση του σκυροδέματος. Οι ρητίνες αποτελούν ένα υλικό που μπορεί να γεμίσει το κενό μιας ρωγμής, επιτυγχάνοντας τελικά την πλήρη συνέχεια του υλικού. Επίσης λόγω της σύστασής τους, παρεμποδίζουν την ελεύθερη διείσδυση οξυγόνου και

υγρασίας, των κύριων δηλαδή συστατικών της οξειδωτικής διαδικασίας. Κατά την διαδικασία αυτή οι οπλισμοί εγκιβωτίζονται, με αποτέλεσμα την προστασία τους από την διάβρωση. Επίσης οι υψηλές αντοχές εφελκυσμού και συνάφειας των ρητινών εμποδίζουν την διεύρυνση των ρωγμών. Μεγάλο πλεονέκτημα στις ρητίνες είναι το γεγονός ότι δεν είναι υλικά ευάλωτα σε εξωτερικούς παράγοντες και άρα έχουν αντοχή στο χρόνο. Το βασικό μειονέκτημα των ρητινών είναι η χαμηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (κίνδυνος σε πυρκαγιά), καθώς και το υψηλό τους κόστος.



Σχήμα 11: Διάταξη για επαναλκαλοποίηση του σκυροδέματος

- **Μέτρα στην επιφάνεια του οπλισμού**

  Η προστασία από τη διάβρωση μπορεί να επιτευχθεί με τα:

  - Επιχρίσματα σιδηροπλισμών.

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

    Τα επιχρίσματα μπορεί να είναι μεταλλικά ή μη μεταλλικά.

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

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

- **Μέτρα στην επιφάνεια του σκυροδέματος**

Οι κυριότεροι τρόποι επέμβασης είναι οι ακόλουθοι:

- Απομάκρυνση του οξυγόνου ή των οξειδωτικών από το νερό με κατεργασία υπό κενό, με κορεσμό με αδρανές αέριο ή με προσθήκη ουσιών που δεσμεύουν το οξυγόνο
- Απομάκρυνση των οξέων με εξουδετέρωση
- Απομάκρυνση των αλάτων με ιονεναλλαγή
- Ελάττωση της θερμοκρασίας. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις μη επίδρασης ή θετικής επίδρασης της αύξησης της θερμοκρασίας στην ελάττωση της διάβρωσης (π.χ. λόγω ελάττωση ς της διαλυτότητας του οξυγόνου)
- Ελάττωση της ταχύτητας ροής εκτός γενικά από τα παθητικά μέταλλα

- Απομάκρυνση των στερεών σωματιδίων από το νερό ή τον αέρα με φιλτράρισμα ή άλλη κατάλληλη τεχνική
- Ελάττωση της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντα αέρα με αύξηση της θερμοκρασίας
- Απομάκρυνση του νερού από τον αέρα με αφύγρανση (π.χ. χρησιμοποίηση si1ica-gel)
- Χρησιμοποίηση αναστολέων δηλαδή ουσιών που προστίθενται σε μικρές συγκεντρώσεις στο διαβρωτικό περιβάλλον και ελαττώνουν την ταχύτητα διάβρωσης.

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

4.2. Μέθοδοι προστασίας από την διάβρωση

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

Εκτός από την επιλογή των κατάλληλων υλικών, σε σχέση με το διαβρωτικό περιβάλλον, πρέπει να γίνεται προσπάθεια περιορισμού των γενικών συνθηκών που επιταχύνουν τη διάβρωση.
Η εφαρμογή κατάλληλης ή συνδυασμού κατάλληλων μεθόδων προστασίας από τη διάβρωση, αποβλέπει στην ελάττωση της ταχύτητας διάβρωσης μέσω μεταβολής των θερμοδυναμικών ή των κινητικών στοιχείων της διαβρωτικής δράσης.

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

- Καθοδική προστασία
- Προσθήκη στο σκυρόδεμα αναστολέων διάβρωσης

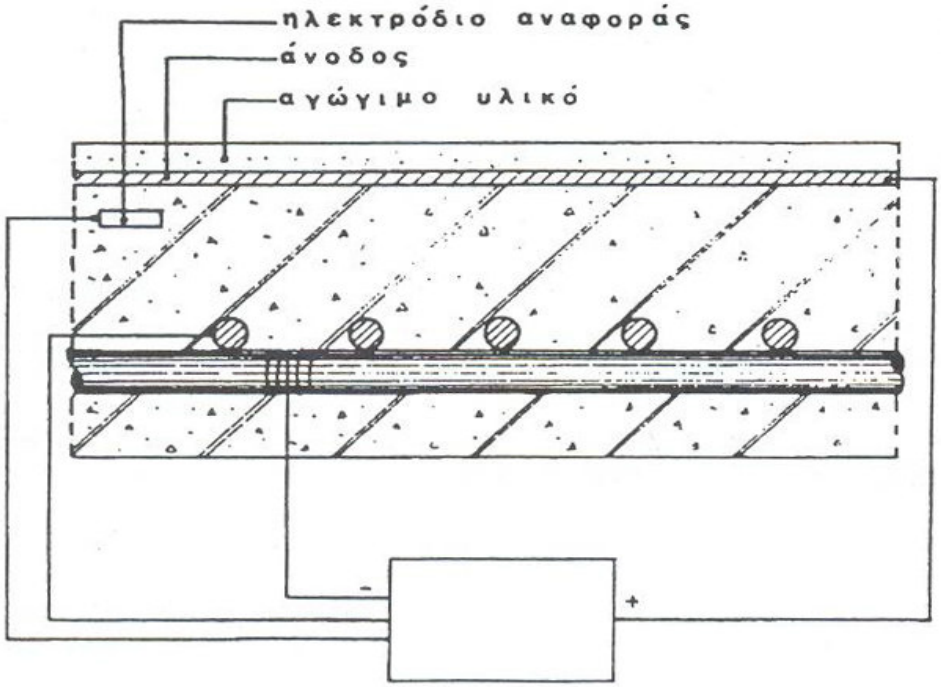
- Χρήση οργανικών επικαλύψεων (χρωμάτων)
- Η χρήση ειδικών χαλύβων

4.2.1. Καθοδική προστασία

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 εφαρμογή της καθοδικής προστασίας βασίζεται στην ύπαρξη πηγής συνεχούς ρεύματος και βοηθητικής ανόδου κοντά στην επιφάνεια του σκυροδέματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 12. 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.



Σχήμα 12 : Καθοδική προστασία οπλισμού με εφαρμοζόμενο ρεύμα

Η προστατευτική επίδραση της καθοδικής προστασίας είναι φανερό ότι διαρκεί όσο υπάρχουν άνοδοι. Οι θυσιαζόμενες άνοδοι όταν εξαντληθούν αντικαθίστανται. Η αντικατάσταση των ανόδων είναι ένα τεχνικά πολύ δύσκολο πρόβλημα. Η θυσιαζόμενη άνοδος θα πρέπει να είναι κατασκευασμένη από υλικό που ευρίσκεται υψηλότερα από τον χάλυβα στην ηλεκτροδιακή σειρά π.χ. από ψευδάργυρο.

Η εφαρμογή της καθοδικής προστασίας επιτυγχάνεται με την διαβίβαση μιας καθορισμένης ποσότητας ρεύματος. Οι καθοδικές περιοχές πολώνονται στο δυναμικό ισορροπίας των ανοδικών περιοχών. Επομένως δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ των ανοδικών και καθοδικών περιοχών και παύει πλέον το μέταλλο να υφίσταται διάβρωση.

Η μέθοδος εφαρμόζεται με δύο τρόπους:

- Με εφαρμοζόμενο ρεύμα
- Με θυσιαζόμενες ανόδους

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

Καθοδική προστασία με εφαρμοζόμενο ρεύμα

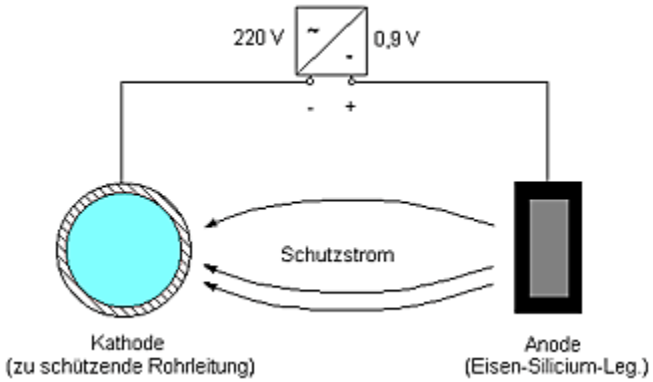
Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής ο θετικός πόλος μιας πηγής συνεχούς ρεύματος συνδέεται με την επιφάνεια του σκυροδέματος, και ο αρνητικός με τους οπλισμούς. Έτσι, η επιφάνεια γίνεται άνοδος και οι οπλισμοί κάθοδος. Τα ανιόντα υδροξυλίου (OH^-) που σχηματίζονται στην κάθοδο (χάλυβας) με την αντίδραση 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 αγώγιμης 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 αγώγιμου 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 13: Απεικόνιση συστήματος καθοδικής προστασίας με χρήση ηλεκτρικής πηγής

Πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής:

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

Μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής:

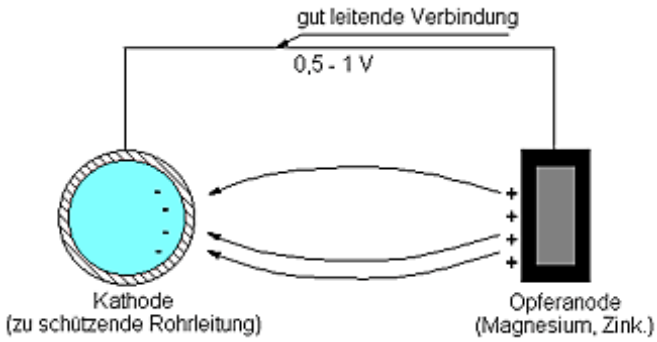
- Απαιτεί συχνή ρύθμιση και προσαρμογή (πιθανή διακοπή ρεύματος, διακύμανση ιδιοτήτων διαβρωτικού περιβάλλοντος)
- Ασυνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος
- Μειώνει την ολκιμότητα σε χάλυβες υψηλής αντοχής λόγω εκλύσεως υδρογόνου
- Υψηλό κόστος (χρησιμοποίηση δαπανηρότερων δυναμοστατών σε διαβρωτικό περιβάλλον με μεγάλες διακυμάνσεις των ιδιοτήτων του)
- Αλληλεπιδρά με γειτονικές εγκαταστάσεις προκαλώντας τους διάβρωση
- Πρέπει να γίνεται σωστή εκλογή των ορίων τιμών της καθοδικής τάσης με προηγούμενη εργαστηριακή έρευνα
- Για την πραγματοποίηση αυτής της μεθόδου πρέπει να βρεθεί ένα σταθερό υλικό ανόδου, που θα μπορεί να κατανείμει 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

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



Σχήμα 14: 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).

4.2.2. 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.

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 cm^2/g).
- Η περιεκτικότητα σε ενεργά συστατικά SiO_2 και Al_2O_3.
- Η περιεκτικότητα σε επιβλαβή συστατικά (C<3% και SO_2).
- Η περιεκτικότητα σε ελεύθερη άσβεστο.

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

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

Σκωρία υψικαμίνων

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

Η σκωρία είναι ένα παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας του χάλυβα. Η σκωρία δεν είναι μεταλλικό προϊόν και αποτελείται κατά βάση από πυριτικά και αργυλοπυριτικά άλατα του ασβεστίου.
Λόγω των υδραυλικών ιδιοτήτων της σκωρίας, σωματίδια κοκκομετρίας μικρότερης από τα 10μm συνεισφέρουν στις πρώιμες αντοχές, ενώ σωματίδια μεγαλύτερα από 10μm και μικρότερα από 45μm συνεισφέρουν στις τελικές αντοχές. Σωματίδια κοκκομετρίας μεγαλύτερης των 45μm είναι δύσκολο να ενυδατωθούν. Η σκωρία είναι υλικό κοκκομετρίας μικρότερης των 45μm. Παρασύρεται από το ρεύμα των καυσαερίων και συλλέγεται σε ειδικές εγκαταστάσεις αποκονίωσης (με μηχανικά ή ηλεκτροστατικά φίλτρα).

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

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

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

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

Διογκωτικά ή μειωτικά της συρρίκνωσης του σκυροδέματος

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

Ρυθμιστές ιξώδους

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

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

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

4.2.3. Προσθήκη στο σκυρόδεμα αναστολέων διάβρωσης

Η μέθοδος της τοπικής επισκευής των προβλημάτων διάβρωσης, όπως η αφαίρεση του αποσαθρωμένου σκυροδέματος, η εξυγίανση των οπλισμών με τρίψιμο και εφαρμογή αντιδιαβρωτικών και έπειτα η αποκατάσταση της αρχικής διατομής με ειδικά επισκευαστικά κονιάματα, έχει σαν αποτέλεσμα να παραμένουν πολλά τμήματα σκυροδέματος, όπου η περιεκτικότητα σε χλωρίδια είναι υψηλή και το πρόβλημα να ξαναπαρουσιάζεται λίγο αργότερα, καθώς η διάβρωση προχωρά, το σκυρόδεμα ρηγματώνεται και σταδιακά αποσαθρώνεται και τελικά το κόστος της επισκευής απογειώνεται.
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 είναι ουσίες οι οποίες προστίθενται στο σκυρόδεμα κατά την παρασκευή του, με σκοπό να προστατέψουν τον ενσωματωμένο χάλυβα από τη διάβρωση. Μπορεί να είναι οργανικά ή ανόργανα άλατα όπως, νιτρώδες ασβέστιο, νιτρώδες νάτριο, αμινοαλκοόλες, αλκανολαμίνες. (Ρούτουλας Α., 2010)

Οι αναστολείς διάβρωσης είναι χημικές ενώσεις, που όταν προστεθούν στο σκυρόδεμα σε μικρές συγκεντρώσεις, έχουν την ικανότητα να επιβραδύνουν ή να σταματούν το ρυθμό διάβρωσης των οπλισμών. Οι αναστολείς γενικά είναι ενεργοί σε μικρές συγκεντρώσεις και ο μηχανισμός της δράσης τους έχει διευκρινιστεί σε

λίγες μόνο περιπτώσεις. Μπορούν να επηρεάσουν είτε τις ανοδικές, είτε τις καθοδικές αντιδράσεις, είτε και τις δύο.

Θα πρέπει να γίνεται σαφής διάκριση μεταξύ των αναστολέων διάβρωσης και άλλων προσθέτων του σκυροδέματος τα οποία βελτιώνουν την αντοχή σε διάβρωση του σκυροδέματος με τη μείωση της διείσδυσης των ιόντων χλωρίου, όπως π.χ. η πυριτική παιπάλη. Οι αναστολείς διάβρωσης που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να παρέχουν προστασία στον οπλισμό για μεγάλο χρονικό διάστημα και να μην επηρεάζουν αρνητικά τις υπόλοιπες ιδιότητες του σκυροδέματος.

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

- Ανοδικοί αναστολείς διάβρωσης: Τα υλικά αυτά αναστέλλουν τη διάβρωση, σταθεροποιώντας το προστατευτικό φιλμ του οπλισμού και το οποίο έχει τη τάση να διασπάται όταν ανεβαίνει η περιεκτικότητα των χλωριδίων. Χαρακτηριστικό δείγμα τέτοιων αναστολέων είναι αυτοί που περιέχουν νιτρώδες ασβέστιο και οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε κονιάματα επισκευών. Το νιτρώδες ασβέστιο όμως έχει σαν παράπλευρη δράση την επιτάχυνση της πήξης και θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για την αποφυγή φαινομένων «άμεσης πήξης» (flash setting).
- Καθοδικοί αναστολείς διάβρωσης: Αυτοί προσροφώνται από τον οπλισμό και σχηματίζουν στην επιφάνειά του ένα φράγμα στη μείωση οξυγόνου, που είναι η κύρια αιτία καθοδικής αντίδρασης του χάλυβα στο σκυρόδεμα. Όμως, οι πιο πολλοί καθοδικοί αναστολείς, όπως οι αμίνες και τα φωσφορικά, έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη επιβράδυνση της πήξης του σκυροδέματος.
- Οργανικοί αναστολείς διάβρωσης: Ονομάζονται επίσης και προσροφητικοί αναστολείς διάβρωσης και η δράση τους συνδυάζει ανοδική και καθοδική προστασία. Τυπικό είδος αυτών των αναστολέων είναι οι οργανικές αμίνες όπως π.χ. οι αμινοαιθανόλες.
- Αναστολείς διάβρωσης φάσης ατμού: Έχουν παρόμοια δράση με τους προσροφητικούς αναστολείς αλλά επίσης προκαλούν υψηλή πίεση υδρατμών, η οποία λειτουργεί σαν φράγμα στη διείσδυση διαβρωτικών ουσιών από την ατμόσφαιρα στο σκυρόδεμα.
- Οξειδωτικοί αναστολείς διάβρωσης: Οι ουσίες αυτές, όπως τα χρωμικά άλατα, δρούν σαν αναστολείς διάβρωσης με πολλούς τρόπους. Η κύρια χρήση τους

είναι η αναστολή διάβρωσης σε μέταλλα τα οποία επιδεικνύουν ενεργητική – παθητική μετάλλαξη, όπως ο σίδηρος και τα 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 διάβρωση, οι αναστολείς πρέπει να προστίθενται σε περίσσεια.

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

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

<u>όπου:</u> Z% = ο % βαθμός προστασίας που παρέχει ο αναστολέας ,

W_1= ο ρυθμός μείωσης του πάχους σε mm/έτος

W_2=ο ρυθμός μείωσης του πάχους χωρίς αναστολέα, σε mm/έτος

W_3= ο ρυθμός μείωσης του πάχους με αναστολέα, σε mm/έτος

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

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

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

- Γίνεται καθαρισμός των αποσαθρωμένων τμημάτων σκυροδέματος.
- Γίνεται καθαρισμός τόσο της επιφάνειας των οπλισμών από τη σκουριά όσο και της επιφάνειας σκυροδέματος που έχει προκύψει μετά το αρχικό καθαρισμό. Ο καθαρισμός θα πρέπει να γίνεται είτε με αμμοβολή είτε με υδροβολή.
- Εφαρμόζεται αντιδιαβρωτική προστασία του οπλισμού, η οποία είναι προτιμότερο να περιέχει έναν αναστολέα διάβρωσης.
- Γίνεται εφαρμογή του αναστολέα διάβρωσης με ψεκασμό ή με 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, βενζοικό νάτριο, εστέρες νατρίου κ.α.. Η χρήση των αναστολέων αυτών έδωσε θετικά αποτελέσματα όσον αφορά τη διάβρωση του οπλισμού και συγκεκριμένα το νιτρώδες νάτριο είχε τα καλύτερα αποτελέσματα. Ταυτόχρονα όμως παρουσίαζαν το πρόβλημα της μείωσης της θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος κατά 20-40%. Ακόμα το νιτρώδες νάτριο και το νιτρώδες κάλιο οδήγησαν σε αύξηση της πιθανότητας της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης, όταν το σκυρόδεμα περιέχει αδρανή ευαίσθητα σε αλκαλοπυριτική αντίδραση.

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

Ως τρόπος δράσης του νιτρώδες ασβεστίου ($Ca(NO_2)_2$) 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 Kg/m3).

Το $Ca(NO_2)_2$ αντιδρά με τα παραγόμενα προϊόντα των αντιδράσεων της ανοδικής περιοχής και χαρακτηρίζεται ανοδικός αναστολέας.

Η χημική αντίδραση του μηχανισμού προστασίας θεωρείται ότι είναι η :

$2Fe^{2+} + 2NO_2^- + 2OH^- \rightarrow Fe_2O_3 + 2NO + H_2O$

Έτσι το $(NO_2)^-$ ανταγωνίζεται τα χλωριόντα δεσμεύοντας τα ιόντα Fe^{2+} σχηματίζοντας σταθερό φιλμ Fe_2O_3.

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

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

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

Οι παράγοντες που επηρεάζονται από τους αναστολείς διάβρωσης είναι:

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

Γενικά ο βαθμός προστασίας ενός αναστολέα διάβρωσης εξαρτάται από την συγκέντρωση του σε σχέση με την συγκέντρωση των χλωριόντων, π.χ. για το νιτρώδες ασβέστιο πρέπει να ικανοποιείται η σχέση NO_2^- / Cl^- ≥1/6. Επομένως ο ρυθμός εισόδου των χλωριόντων και ο ρυθμός απόπλυσης του αναστολέα διάβρωσης καθορίζουν το χρόνο προστασίας.

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 τους 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. Τα τελευταία χρόνια, παράλληλα με τις κλασικές επικαλύψεις (χρώματα), χρησιμοποιούνται και επικαλύψεις με κονίες πολυμερών που εξαιτίας της απουσίας οργανικών διαλυτών είναι περιβαλλοντικά αβλαβείς.

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

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

- Η UV-ακτινοβολία, η οποία προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία
- Η θερμότητα και οι διακυμάνσεις αυτής με την εναλλαγή ημέρας – νύκτας
- Το νερό από το περιβάλλον (π.χ. βροχή, ομίχλη, κλπ)
- Η σκόνη που μεταφέρεται από τον αέρα
- Τα διαβρωτικά αέρια CO_2, SO_2 και NOx 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 εξάνθισης έχουν επιπτώσεις στην αντοχή των χρωμάτων. Οπότε μία οργανική επικάλυψη προστατευτική του σκυροδέματος θα πρέπει να πληρεί κάποιες απαιτήσεις, όπως:

- να παρεμποδίζει την είσοδο του νερού
- να παρεμποδίζει την είσοδο του CO_2, SO_2
- να έχει υψηλή διαπερατότητα σε υδρατμούς
- να είναι ανθεκτική σε υψηλή αλκαλικότητα και στην παρουσία αλάτων
- να έχει υψηλή συνάφεια με το σκυρόδεμα ακόμα και εάν είναι βρεγμένο\
- να έχει ανθεκτικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία
- να έχει διεισδυτική ικανότητα στους πόρους του σκυροδέματος
- να έχει ελαστικότητα ώστε να ακολουθεί τις παραμορφώσεις της επιφάνειας χωρίς να κάνει ρωγμές

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

Τα οργανικά χώματα 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 διείσδυση του χρώματος στους πόρους του σκυροδέματος και η καλή συνάφεια χρώματος και σκυροδέματος.

4.2.5. **Χρήση ειδικών χαλύβων**

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

Επιψευδαργυρωμένος ή Γαλβανισμένος Χάλυβας

Η χρήση επιψευδαργυρωμένου χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα αυξάνει την προστασία του χάλυβα από ατμοσφαιρική διάβρωση και από διάβρωση από διάφορα φυσικά είδη νερού.
Η επιψευδαργύρωση του δομικού χάλυβα πραγματοποιείται με εμβάπτιση σε λουτρό τηγμένου ψευδαργύρου στους 450°C για ένα χρονικό διάστημα μερικών λεπτών.
Το πάχος της επιψευδαργύρωσης συνίσταται να είναι μεταξύ 150-200μm, και εξαρτάται από:

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

Ο χάλυβας αρχικά καλύπτεται από ένα κράμα Fe-Zn και πάνω στο κράμα αυτό επικάθεται το στρώμα του ψευδαργύρου. Αν και τα μεγάλου πάχους επιστρώματα από άποψη διάβρωσης είναι επιθυμητά, έχουν όμως αρνητική επίδραση στη συνάφεια Fe-Zn. Για το λόγο αυτό δεν πρέπει το πάχος της επιψευδαργύρωσης να είναι μεγαλύτερο από 200μm.

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

ψευδάργυρος, ο χάλυβας δεν διαβρώνεται. Η διάβρωση του χάλυβα εμφανίζεται μετά τη κατανάλωση όλου του ψευδαργύρου. (Μπατής Γ., 2006)

Σε περίπτωση που η διάβρωση οφείλεται κατά κύριο λόγο στην είσοδο χλωριόντων στο σκυρόδεμα από το περιβάλλον, τότε ο ψευδάργυρος προστατεύει το χάλυβα μέχρι η συγκέντρωση των χλωριόντων να υπερβεί ένα όριο. Το όριο των χλωριόντων για την ενεργοποίηση της διάβρωσης του ψευδαργύρου είναι 1.5g Cl^- ανά 100g τσιμέντου (Portland). Πάνω από το όριο αυτό η διάβρωση του ψευδαργύρου είναι ταχύτατη 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^{2n} μπορεί να βελτιώσει τη συνάφεια στη περίπτωση αυτή.

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

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

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

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

Χάλυβας Με Επικάλυψη Εποξειδικών Ρητινών ή PVC

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

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

Ενώ η συνάφεια μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος υφίσταται μείωση από 15-30%, η αντοχή σε διάβρωση αυξάνεται σημαντικά. Εάν όμως υπάρχει ρήξη στην συνέχεια της εποξειδικής επικάλυψης τότε υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης ιδιαίτερα όταν υπάρχει ηλεκτρική επαφή μεταξύ καλυμμένου και ακάλυπτου οπλισμού. Η διάβρωση του ακάλυπτου τμήματος στο σημείο ρήξης του εποξειδικού χρώματος εξαρτάται από την αγωγιμότητα του σκυροδέματος και τον λόγο επιφάνειας ανόδου / καθόδου, καθώς και από την κατάσταση του ακάλυπτου οπλισμού. Εξαιτίας της μικρής επιφάνειας του εποξειδικού επιστρώματος που έχει αποκαλυφθεί από τη ρήξη και της μεγάλης επιφάνειας του ακάλυπτου οπλισμού, η ταχύτητα διάβρωσης στην περιοχή της ρήξης του εποξειδικού επιστρώματος είναι μεγάλη. (Μπατής Γ., 2006)

Οι εποξειδικές ρητίνες παρουσιάζουν καλή πρόσφυση στο χάλυβα και έχουν μεγάλη ανθεκτικότητα σε αλκαλικό περιβάλλον, όπως αυτό του σκυροδέματος. Όμως

ορισμένοι ερευνητές αναφέρουν ότι οι επιχρισμένοι με ρητίνες χάλυβες παρουσιάζουν μειωμένη συνάφεια με το σκυρόδεμα. (Ρούτουλας Α., 2010)
Η έκθεση του εποξειδικού επιστρώματος σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 200° C καθιστά το εποξειδικό επίστρωμα μαλακό και εύκολα διαπερατό σε χλωριόντα.

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

Ανοξείδωτοι Χάλυβες

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

Με τον όρο ανοξείδωτοι 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 ανοξείδωτων ράβδων, ενός πολύ λεπτού στρώματος οξειδίου του χρωμίου (παθητικό) με εξαιρετική πρόσφυση σε αυτήν, το οποίο λειτουργεί ως ασπίδα προστασίας από τη διάβρωση. Το παθητικό αυτό στρώμα έχει την ικανότητα να ξαναδημιουργείται σε περίπτωση τοπικών αφαιρέσεων του υλικού.
Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ανοξείδωτοι χάλυβες χωρίζονται σε 60 και πλέον κατηγορίες ποιότητας, ενώ ανάλογα με τη μικρογραφική τους δομή κατατάσσονται σε τέσσερις τύπους (σε κάθε περίπτωση περιέχουν ελάχιστο άνθρακα).

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

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

Οι ανοξείδωτοι 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)

ΙΙ. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 5: Πρώτες Ύλες και Μέθοδοι

5.1 Σκοπός της εργασίας

Είναι γνωστό, από παλαιότερες εργασίες, 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.
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:

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

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάζει την χρήση αναστολέων διάβρωσης με ψεκασμό ($2^{ος}$ τρόπος). 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 εξετάσθηκε 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.

5.2 Πρώτες Ύλες

Το πειραματικό μέρος της εργασίας περιλαμβάνει την κατασκευή 58 δοκιμίων οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος από διαφορετικά είδη τσιμέντου. Τα πρώτα 16 δοκίμια στα οποία χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM I, αποτελούν τα δοκίμια αναφοράς των μετρήσεων. Από

κάθε ομάδα δοκιμίων ψεκάστηκαν 7 δοκίμια με αναστολέα διάβρωσης. Οι πρώτες ύλες για την παρασκευή των τσιμεντοκονιαμάτων καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των χρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται αναλυτικά παρακάτω.

Οπλισμένα Τσιμεντοκονιάματα

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων περιέχουν τσιμέντο, αδρανή και νερό σε αναλογία 1 : 3 : 0.5.

Η ακριβής σύσταση, καθώς και οι προδιαγραφές που πρέπει να πληρούνται για κάθε υλικό αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω.

Τσιμέντο

Για την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα είδη τσιμέντου.

Χρησιμοποιήθηκε βιομηχανικό κλίνκερ τσιμέντου Portland (Πίνακας 5) και ασβεστόλιθος με υψηλή περιεκτικότητα σε ασβεστίτη ($CaCO_3$: 97.5%) (Πίνακας 6). Η χημική ανάλυση των υλικών έχει γίνει με την αναλυτική μέθοδο XRF.

Πίνακας 5: 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 6: Χημική ανάλυση ασβεστόλιθου και ποζολανικών υλικών.

Συστατικό	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	TiO_2	P_2O_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**

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι εργαστηριακών τσιμέντων. Το αμιγές τσιμέντο (σύνθεση PC) παρασκευάσθηκε με συνάλεση κλίνκερ και γύψου, ενώ τα δύο ασβεστολιθικά τσιμέντα, διαφορετικής περιεκτικότητας σε ασβεστόλιθο (συνθέσεις LC1 και LC2) παρασκευάσθηκαν 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 cm^2/g, σύμφωνα με τη μέθοδο Blaine, για τα τσιμέντα PC, LC1 και LC2 αντίστοιχα. Στον Πίνακα 7 δίνεται η σύνθεση και η αντοχή σε θλίψη 28 ημερών των εργαστηριακών τσιμέντων.

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά εργαστηριακών τσιμέντων.

Κωδικός	**Σύνθεση***	**Αντοχή θλίψης 28 ημερών**
PC	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

*γύψος 5% κατά βάρος επί του κλινκερ

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.

Οπλισμός

Τα τσιμεντοκονιάματα που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας ήταν ενισχυμένα με χαλύβδινες ράβδους. Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου S 500s Tempcore, διαμέτρου 12 mm και μήκους 120 mm.

Πίνακας 8: Συνοπτικός Πίνακας Δοκιμίων

Αριθμός Δοκιμίων	Είδος Δοκιμίων	Αναλογία: Τσιμ. / άμμος / νερό	Είδος Τσιμέντου
9	Ref. CEM I	1 / 3 / 0.5	CEM I
7	LC 1	1 / 3 / 0.5	LC 1
7	LC 2	1 / 3 / 0.5	LC 2
7	PC	1 / 3 / 0.5	PC
7	Ref. CEM I + C.I. 903	1 / 3 / 0.5	CEM I
7	LC 1 + C.I. 903	1 / 3 / 0.5	LC 1
7	LC 2 + C.I. 903	1 / 3 / 0.5	LC 2
7	PC + C.I. 903	1 / 3 / 0.5	PC

5.3. Πειραματική διαδικασία

Καθαρισμός χαλύβων και καλουπιών

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος απαιτείται ο καθαρισμός των ράβδων χάλυβα που θα χρησιμοποιηθούν ως ενίσχυση.

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 οξείδια από την επιφάνειά του καθώς και άλλα ανεπιθύμητα σωματίδια. Μετά τον καθαρισμό της επιφάνειας κάθε ράβδος ζυγίζεται σε ζυγό ακριβείας και καταγράφεται το βάρος της με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου (ISO/DIS 8407.3)

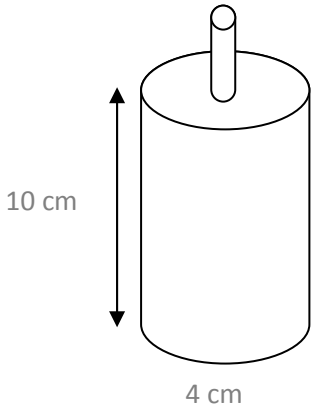
Επίσης απαιτείται ο καθαρισμός των καλουπιών μέσα στα οποία θα τοποθετηθεί ο τσιμεντοπολτός μέχρι τη σκλήρυνση, έτσι ώστε να είναι εύκολη η αποκόλληση των δοκιμίων και να αποφευχθούν ανωμαλίες στην επιφάνειά τους.

Κατασκευή δοκιμίων τσιμεντοκονιάματος

Για την κατασκευή των δοκιμίων 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 12 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 δοκιμίων.

Εικόνα 3: Έκχυση του τσιμεντοπολτού στα καλούπια

Τα δοκίμια τσιμεντοκονιάματος που κατασκευάσθηκαν είναι κυλινδρικού σχήματος με διαστάσεις 10 cm περίπου ύψος και διάμετρο 4 cm περίπου. Σχηματικά ένα δοκίμιο οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 15. : Σχηματική απεικόνιση δοκιμίου οπλισμένου τσιμεντοκονιάματος

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 δοκιμίων.

Εικόνα 4: Απομάκρυνση των καλουπιών

Εικόνα 5: Τοποθέτηση των δοκιμίων στο νερό

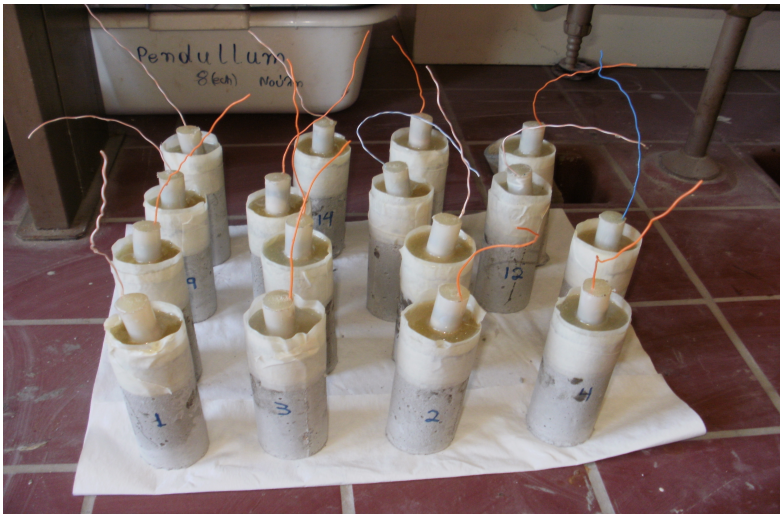
Μόνωση οπλισμού

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.

Εικόνα 6: Τοποθέτηση του χάλκινου 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. Οι κόλλες που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

Για να μην υπάρχει ροή της κόλλας στη περίμετρο των δοκιμίων τοποθετείται χαρτοταινία γύρω από κάθε δοκίμιο. Η διαδικασία εφαρμογής της κόλλας επαναλαμβάνεται 2 ή και 3 φορές, μέχρις ότου υπάρχει πλήρης μόνωση του οπλισμού.



Εικόνα 7.: Μόνωση οπλισμού δοκιμίων

Ψεκασμός με αναστολέα διάβρωσης

Πριν από την εφαρμογή του αναστολέα διάβρωσης απομακρύνονται σκόνες και σαθρά. Επτά (7) δοκίμια από κάθε τύπο σκυροδέματος ψεκάστηκαν με αναστολέα διάβρωσης.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε ο αναστολέας διάβρωσης Ferogard 903 σε ποσότητα 1 lt / m_2.

Εμβάπτισμα δοκιμίων

Αφού τα δοκίμια στεγνώσουν πλήρως από τον αναστολέα διάβρωσης που έχει εφαρμοσθεί σε αυτά, 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.

Εικόνα 8: Τοποθέτηση δοκιμίων σε διάλυμα NaCl 3.5%

5.4 Χρησιμοποιούμενοι Μέθοδοι

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

(α) η μέτρηση του δυναμικού διάβρωση των χαλύβων των τσιμεντοκονιαμάτων και
(β) η μέτρηση της αντίστασης πόλωσης, με τη χρήση της γραμμικής πόλωσης.

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 / $CuSO_4$]. Απαραίτητο επίσης είναι ένα βολτόμετρο, ενώ η παρουσία υγρασίας απαιτεί μεγάλη προσοχή κατά τη μέτρηση.

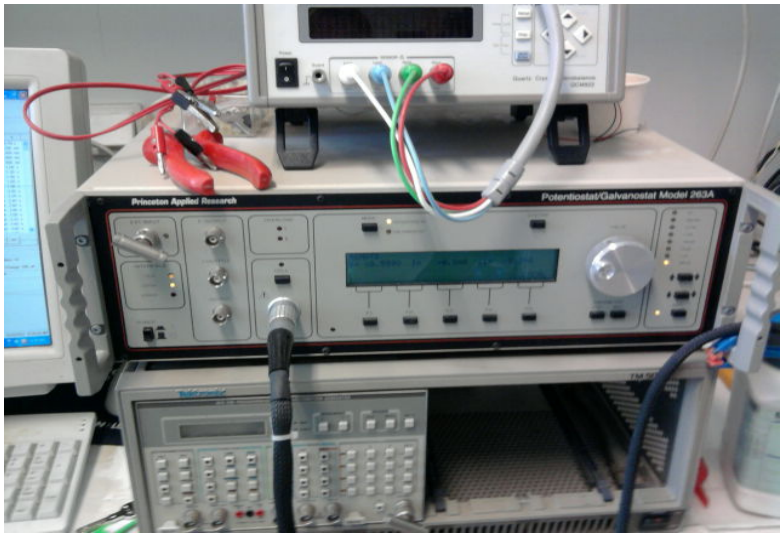
Όπως αναφέρεται στο ASTM C 876-87, από τις τιμές του μετρούμενου δυναμικού, διακρίνονται τα εξής ενδεχόμενα:

- 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 παρούσης εργασίας, 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.

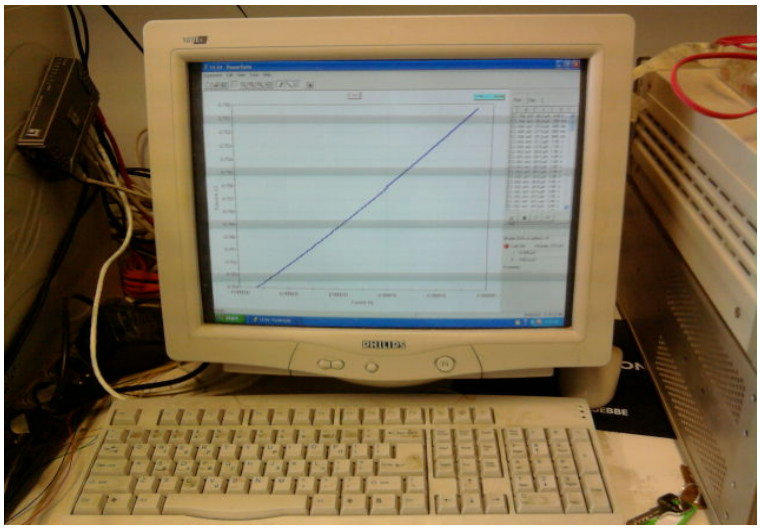
Για την εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής πόλωσης, απαιτείται να προσδιοριστεί πρώτα το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα. Εφαρμόζονται διάφορα δυναμικά στο χάλυβα και μετράται κάθε φορά το ρεύμα αποκρίσεως. Τα εφαρμοζόμενα δυναμικά είναι μερικές εκατοντάδες mV μεγαλύτερα και μικρότερα από το δυναμικό διάβρωσης του χάλυβα. Με τις τιμές του δυναμικού E και τις αντίστοιχης εντάσεως ρεύματος i, συντάσσεται το διάγραμμα E – logi το οποίο ονομάζεται καμπύλη πόλωσης. Παθητικότητα στον χάλυβα υπάρχει όταν η μεταβολή ΔE/Δi 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 έλασμα από πλέγμα πλατίνας / λευκόχρυσου διαστάσεων 2cm^2. Ο ηλεκτρολύτης ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ήταν το διαβρωτικό διάλυμα NaCl.



Εικόνα 9: Ποτενσιοστάτης γραμμικής πόλωσης

Στην τεχνική γραμμικής πόλωσης ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος πολώθηκε σε μικρό εύρος δυναμικών ± 20mV από το δυναμικό ισορροπίας του (Eeq), και ελήφθη διάγραμμα σάρωσης των δυναμικών συναρτήσει της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης. Στη περιοχή -20mV < Eeq <20mV η συνάρτηση του δυναμικού ως προς την πυκνότητα του ρεύματος ακολουθεί τον νόμο του Ohm (γραμμική μεταβολή ρεύματος ως προς δυναμικό).



Εικόνα 10: Διάγραμμα πόλωσης

Κεφάλαιο 6: Επεξεργασία αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

6.1. Μετρήσεις Δυναμικού Διάβρωσης

Παρουσίαση και επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων

Κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής των πειραμάτων ελήφθησαν περίπου 15 μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης για κάθε δοκίμιο. Οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης πραγματοποιήθηκαν και στα δοκίμια αναφοράς, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

(α) Δοκίμια αναφοράς (CEM I)

Για τα δοκίμια αναφοράς (CEM I) η έναρξη των μετρήσεων του δυναμικού διάβρωσης έγινε μετά από 171 ημέρες από την εμβάπτισή τους στο διάλυμα NaCl.

Στους πίνακες 8 και 9 φαίνονται οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια αναφοράς CEM I με αναστολέα διάβρωσης και χωρίς.

Πίνακας 8: Μετρήσεις Δυναμικού διάβρωσης Ref CEM I με αναστολέα διάβρωσης

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	171	181	192	202	214	227	240	255
1	-594,534	-621,337	-745,562	-638,552	-648,197	-653,850	-627,195	-564,054
2	-602,176	-651,057	-742,438	-704,037	-706,553	-692,426	-581,206	-631,345
3	-781,948	-771,642	-819,645	-767,108	-776,992	-673,616	-647,906	-683,284
4	-796,786	-775,334	-742,304	-731,458	-728,789	-717,247	-726,529	-720,480
5	-755,897	-729,303	-713,565	-696,895	-713,222	-468,922	-430,283	-541,591
6	-811,133	-772,692	-772,775	-737,536	-754,040	-755,060	-742,873	-738,167
7	-648,341	-626,038	-658,371	-586,646	-592,354	-605,037	-383,800	-474,314

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	270	**285**	**298**	**312**	**326**	**340**	**353**
1	-508,792	-473,024	-463,336	-486,896	-591,501	-624,082	-639,670
2	-669,658	-696,667	-669,309	-643,447	-740,520	-654,674	-669,895
3	-726,238	-685,700	-702,841	-680,282	-736,220	-642,115	-539,861
4	-766,800	-773,692	-746,544	-723,709	-816,670	-425,267	-521,827
5	-528,071	-563,864	-582,824	-527,838	-648,538	-579,007	-527,684
6	-789,175	-781,676	-716,065	-695,481	-429,686	-527,555	-567,196
7	-485,682	-417,758	-496,878	-494,814	-601,866	-532,254	-570,639

Πίνακας 9: Μετρήσεις Δυναμικού διάβρωσης Ref CEM I χωρίς αναστολέα διάβρωσης

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	171	**181**	**192**	**202**	**214**	**227**	**240**	**255**
8	-502,191	-605,440	-661,414	-619,510	-502,842	-501,232	-590,874	-552,377
9	-256,598	-353,440	-389,356		-215,277			
10	-254,786	-216,272	-293,488	-269,479	-265,907	-302,753	-364,753	-377,514
11	-473,200	-544,912	-534,276	-565,613	-558,300	-515,228	-544,339	-586,682
12	-433,549	-385,362	-421,541	-482,267	-489,729	-451,257	-363,887	-412,646
13	-537,024	-495,832	-513,714	-424,331	-240,607		-484,963	-481,463
14	-501,939	-553,253	-522,310	-556,852	-578,245	-524,686	-534,913	-523,036
15							-307,232	
16	-486,647	-184,673	-332,680		-279,617	-227,457	-235,730	-289,200

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	270	**285**	**298**	**312**	**326**	**340**	**353**
8	-641,840	-625,971	-622,695	-597,690	-696,956	-627,836	-636,773
9			-353,479	-408,846	-432,743	-366,743	-291,662
10	-451,729	-454,330	-450,581	-451,231	-535,434	-533,054	-567,942
11	-603,510	-587,243	-658,871	-638,089	-725,064	-694,130	-712,014
12	-474,859	-561,683	-562,874	-542,247	-625,833	-555,517	-568,700
13	-501,765	-446,675	-481,100	-483,133	-522,593	0,000	-484,448
14	-587,426	-628,205	-652,487	-615,559	-759,758	-605,710	-691,602
15		-344,086			-449,097	-319,075	
16	-269,478	-596,589	-654,983	-666,698	-727,427	-660,077	-668,571

Ο Μέσος Όρος των παραπάνω μετρήσεων φαίνεται στους πίνακες 10- 11.

Πίνακας 10: Μέσος Όρος Δυναμικού διάβρωσης Ref CEM I με αναστολέα διάβρωσης

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)								
Δοκίμια	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**							
1-7	**171**	**181**	**192**	**202**	**214**	**227**	**240**	**255**
Μ.Ο.	-688,545	-706,772	-742,094	-694,605	-702,878	-652,308	-591,399	-621,891

Δοκίμια 1-7	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**						
	270	**285**	**298**	**312**	**326**	**340**	**353**
Μ.Ο.	-639,202	-627,483	-625,400	-607,495	-652,143	-569,279	-576,682

Πίνακας 11: Μέσος Όρος Δυναμικού διάβρωσης Ref CEM I χωρίς αναστολέα

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)								
Δοκίμια	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**							
8-16	**171**	**181**	**192**	**202**	**214**	**227**	**240**	**255**
Μ.Ο.	-430,742	-417,398	-458,597	-486,342	-391,316	-420,436	-428,336	-460,417

Δοκίμια 8-16	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**						
	270	**285**	**298**	**312**	**326**	**340**	**353**
Μ.Ο.	-504,372	-530,598	-554,634	-550,437	-608,323	-484,682	-577,714

(β) Δοκίμια LC 1

Η έναρξη των μετρήσεων για τα δοκίμια LC 1 έγινε μετά από 80 ημέρες από την εμβάπτισή τους στο διάλυμα NaCl.

Στους πίνακες 12 και 13 φαίνονται οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια LC 1 με αναστολέα διάβρωσης και χωρίς.

Πίνακας 12: Μετρήσεις Δυναμικού διάβρωσης LC 1 με αναστολέα διάβρωσης

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	80	90	101	111	123	136	149	164
17	-572,795	-591,019	-666,120	-653,519	-693,531	-684,841	-539,801	-671,899
18	-522,115	-567,182	-636,170		-630,896	-608,777	-669,486	-663,983
19	-524,094	-568,204	-641,042	-623,605	-651,474	-636,644	-691,145	-686,287
20	-541,215	-661,618	-768,574	-736,053	-749,779	-732,204	-448,725	-497,256
21	-492,260	-479,541	-577,035	-465,074	-640,555	-689,633	-506,759	-492,641
22	-490,572	-578,907	-655,539	-616,506	-636,989	-688,729	-674,668	-662,748
23	-537,700	-587,960	-677,223	-643,563	-679,735	-731,631	-499,833	-655,360

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	194	207	221	235	249	262
17	-635,402	-549,042	-577,321	-558,858	-675,967	-604,910	-736,350
18	-698,851	-654,133	-695,310	-685,066	-796,740	-738,298	-746,029
19	-716,522	-664,967	-644,211	-633,433	-525,865	-632,303	-523,774
20	-585,484	-579,554	-756,641	-529,026	-743,284	-799,842	-754,014
21	-324,149	-652,220	-638,915	-579,827	-693,017	-525,541	-606,503
22	-462,691	-645,224	-668,212	-652,412	-767,216	-709,479	-723,375
23	-472,493	-668,990	-709,488	-699,970	-788,473	-720,496	-584,989

Πίνακας 13: Μετρήσεις Δυναμικού διάβρωσης LC 1 χωρίς αναστολέα διάβρωσης

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	80	90	101	111	123	136	149	164
24	-540,695	-586,636	-677,065	-660,539	-697,735	-752,428	-571,341	-674,217
25	-547,863			-691,180	-714,840	-674,051	-599,485	-687,014
26	0,000					0,000		
27	-533,382	-574,666	-651,201	-619,955	-648,997	-699,862	-585,432	-600,549
28	-432,847	-496,586	-611,951	-579,533	-609,198	-583,380	-476,225	-541,343
29	-366,556	-408,656	-640,193		-534,983	-446,894	-436,839	-580,182
30	-560,461	-607,160	-670,162	-632,654	-657,993	-703,805	-541,698	-644,940

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	194	207	221	235	249	262
24	-762,118	-775,928	-759,227	-740,125	-842,667	-775,993	-780,379
25	-720,591	-676,242	-707,079	-689,782	-777,060	-712,077	-710,310
26						0,000	
27	-554,575	-567,350	-649,731	-674,897	-801,830	-748,201	-705,517
28	-647,502	-466,765	-627,293	-543,006	-414,292	-625,038	-648,689
29	-656,970	-813,083	-677,341	-670,345	-756,985	-713,807	-724,448
30	-456,292	-587,471	-625,902	-630,796	-707,530	-513,984	-690,706

Ο Μέσος Όρος των παραπάνω μετρήσεων φαίνεται στους πίνακες 14- 15.

Πίνακας 14: Μέσος Όρος Δυναμικού διάβρωσης LC 1 με αναστολέα διάβρωσης

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)								
Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
17-23	80	90	101	111	123	136	149	164
Μ.Ο.	-525,822	-576,347	-660,243	-623,053	-668,994	-681,780	-575,774	-618,596

Δοκίμια 17-23	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	194	207	221	235	249	262
Μ.Ο.	-556,513	-630,590	-670,014	-619,799	-712,937	-675,838	-667,862

Πίνακας 15: Μέσος Όρος Δυναμικού διάβρωσης LC 1 χωρίς αναστολέα διάβρωσης

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)								
Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
24-30	80	90	101	111	123	136	149	164
Μ.Ο.	-425,972	-534,741	-650,114	-636,772	-643,958	-551,489	-535,170	-621,374

Δοκίμια 24-30	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	194	207	221	235	249	262
Μ.Ο.	-633,008	-647,807	-674,429	-658,159	-716,727	-584,157	-710,008

(γ) Δοκίμια LC 2

Η έναρξη των μετρήσεων για τα δοκίμια LC 2 έγινε μετά από 80 ημέρες από την εμβάπτισή τους στο διάλυμα NaCl.

Στους πίνακες 16 και 17 φαίνονται οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια LC 2 με αναστολέα διάβρωσης και χωρίς.

Πίνακας 16: Μετρήσεις Δυναμικού Διάβρωσης LC 2 με αναστολέα διάβρωσης

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	80	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
31	-461,560	-423,562	-537,598	-595,064	-621,547	-611,656	-659,294	-677,342
32	-283,609	-293,879	-513,388	-286,581	-282,787	-403,344	-623,181	-641,921
33	-555,595	-534,132	-610,938	-607,198	-654,053	-606,962	-662,347	-698,478
34	-465,582	-388,805	-495,020	-598,858	-633,150	-630,385	-719,748	-712,227
35	-535,844	-333,657	-483,286	-454,280	-583,956	-599,362	-673,443	-677,649
36	-483,226	-538,358	-546,971	-513,823	-495,113	-432,667	-522,951	-505,883
37	-447,572	-427,425	-520,458	-578,334	-612,938	-587,055	-610,996	-635,530

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
31	-722,074	-676,274	-712,747	-697,167	-795,129	-724,040	-715,113
32	-685,591	-878,737	-663,885	-628,702	-763,965	-709,732	-625,703
33	-730,004	-811,532	-741,378	-726,535	-823,623	-744,641	-738,966
34	-733,507	-688,278	-723,012	-702,534	-798,671	-731,718	-723,927
35	-956,869	-655,565	-724,777	-702,103	-816,564	-746,351	-743,944
36	-425,678	-385,374	-441,732	-525,993	-595,029	-512,271	-505,328
37	-688,498	-659,136	-699,925	-680,831	-779,590	-704,897	-720,966

Πίνακας 17: Δυναμικό διάβρωσης LC 2 με αναστολέα διάβρωσης

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	80	90	101	111	123	136	149	164
38	-448,359	-398,544	-533,368	-541,950	-569,393	-590,993	-617,749	-666,135
39	-552,924	-573,441	-625,170	-621,694	-619,376	-586,769	-642,973	-672,076
40	-504,308	-498,343	-599,321	-554,109	-611,244	-600,946	-659,395	-657,370
41	-674,011	-674,627	-732,248	-721,408	-565,739	-482,272	-523,815	-560,182
42	-463,929	-492,445	-585,504	-598,502	-609,632	-587,124	-600,886	-582,900
43	-550,046	-515,904	-592,941	-618,057	-626,056	-582,679	-651,858	-665,948
44	-541,388	-566,472	-635,959	-607,466	-627,597	-590,016	-634,442	-646,838

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	194	207	221	235	249	262
38	-689,386	-647,365	-682,495	-655,350	-746,063	-670,277	-665,993
39	-711,271	-670,345	-636,470	-694,607	-810,512	-740,005	-752,139
40	-691,618	-649,600	-684,565	-668,975	-765,303	-696,803	-695,501
41	-579,168	-538,980	-505,091	-470,922	-536,411	-432,471	-455,083
42	-711,676	-665,792	-710,237	-651,149	-799,875	-731,923	-644,390
43	-696,560	-846,941	-699,242	-677,312	-778,930	-708,804	-715,030
44	-612,561	-612,934	-653,301	-637,726	-735,540	-670,908	-674,237

Ο Μέσος Όρος των παραπάνω μετρήσεων φαίνεται στους πίνακες 18- 19.

Πίνακας 18: Μέσος Όρος Δυναμικού διάβρωσης LC 2 με αναστολέα διάβρωσης

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
31-37	80	90	101	111	123	136	149	164
Μ.Ο.	-461,855	-419,974	-529,666	-519,163	-554,792	-553,062	-638,851	-649,861

Δοκίμια 31-37	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	194	207	221	235	249	262
Μ.Ο.	-706,032	-679,271	-672,494	-666,266	-767,510	-696,236	-681,992

Πίνακας 19: Μέσος Όρος Δυναμικού διάβρωσης LC 2 χωρίς αναστολέα διάβρωσης

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)								
Δοκίμια	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**							
38-44	**80**	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
Μ.Ο.	-533,566	-531,397	-614,930	-609,027	-604,148	-574,400	-618,731	-635,921

Δοκίμια 38-44	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
Μ.Ο.	-670,320	-661,708	-653,057	-636,577	-738,948	-664,456	-657,482

(γ) Δοκίμια PC

Η έναρξη των μετρήσεων για τα δοκίμια PC έγινε μετά από 80 ημέρες από την εμβάπτισή τους στο διάλυμα NaCl.

Στους πίνακες 20 και 21 φαίνονται οι μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης για τα δοκίμια PC με αναστολέα διάβρωσης και χωρίς.

Πίνακας 20: Δυναμικό διάβρωσης PC με αναστολέα διάβρωσης

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)

Δοκίμια	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**							
	80	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
45	-582,661	-566,118	-651,730	-624,841	-658,523	-720,582	-540,012	-631,254
46	-537,464	-620,263	-718,673	-689,042	-718,750	-779,714	-781,385	-783,465
47	-510,201	-560,879	-636,080	-642,424	-648,291	-608,008	-724,607	-734,398
48	-442,282	-405,495	-648,816	-621,849	-673,393	-668,262	-668,910	-675,480
49	-566,036	-616,345	-726,740	-715,853	-760,136	-737,178	-780,957	-786,125
50		-515,536	-574,499		0,000	-464,352	-616,345	-649,929
51	-574,000	-545,283	-613,714	-604,329	-642,384	-633,354	-621,157	-665,433

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
45	-530,061	-623,741	-651,702	-657,016	-774,841	-719,367	-726,040
46	-749,643	-676,243	-731,669	-728,858	-834,531	-763,233	-766,689
47	-777,257	-741,229	-777,805	-763,021	-869,254	-807,557	-812,004
48	-747,035	-701,318	-701,571	-599,585	-776,162	-695,619	-697,040
49	-792,827	-749,699	-779,058	-756,778	-855,171	-784,779	-784,198
50	-678,047	-652,813	-698,428	-698,674	-822,109	-770,266	-784,683
51	-713,787	-682,950	-727,553	-721,454	-832,237	-770,730	-335,553

Πίνακας 21: Δυναμικό διάβρωσης PC χωρίς αναστολέα διάβρωσης

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	80	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
52			-616,580	-608,206	-633,020	-624,609	-622,071	-661,261
53	-549,927	-561,956	-652,139	-633,436	-660,121	-639,439	-674,879	-687,240
54	-531,000	-527,069	-626,085	-605,132	-642,174	-677,422	-506,492	-550,917
55	-519,732	-506,842	-553,531	-541,734	-496,327	-565,169	-627,535	-626,602
56	-510,413	-521,567	-580,080	-548,617	-581,616	-623,545	-490,854	-451,777
57	-357,541	-385,046	-531,998	-564,240	-566,278	-555,033	-622,727	-631,962
58	-531,682	-489,954	-508,627	-467,756	-508,097	-305,630	-585,636	-573,463

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
52	-690,351	-655,297	-680,865	-675,833	-778,298	-716,401	-725,314
53	-728,448	-697,955	-741,856	-736,515	-849,962	-784,868	-799,974
54	-648,475	-687,215	-691,267	-688,825	-803,797	-745,946	-746,345
55	-647,791	-631,201	-672,847	-663,770	-589,650	-568,533	-592,963
56	-513,003	-460,770	-552,468	-581,014	-676,894	-610,862	-619,003
57	-680,272	-629,572	-676,414	-664,755	-769,835	-710,689	-720,223
58	-634,868	-596,600	-628,790	-584,593	-707,610	-644,818	-635,171

Ο Μέσος Όρος των παραπάνω μετρήσεων φαίνεται στους πίνακες 22- 23.

Πίνακας 22: Μέσος όρος Δυναμικού διάβρωσης PC με αναστολέα διάβρωσης

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
45-51	**80**	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
Μ.Ο.	-535,441	-547,131	-652,893	-649,723	-585,925	-658,779	-676,196	-703,726

Δοκίμια 45-51	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	194	207	221	235	249	262
Μ.Ο.	-712,665	-689,713	-723,969	-703,627	-823,472	-758,793	-700,887

Πίνακας 23: Μέσος Όρος Δυναμικού διάβρωσης PC χωρίς αναστολέα διάβρωσης

Δυναμικό Διάβρωσης (mV)								
Δοκίμια 52-58	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	80	90	101	111	123	136	149	164
Μ.Ο.	-500,049	-498,739	-581,291	-567,017	-583,948	-570,121	-590,028	-597,603

Δοκίμια 52-58	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	194	207	221	235	249	262
Μ.Ο.	-649,030	-622,659	-663,501	-656,472	-739,435	-683,160	-691,285

6.2. Μετρήσεις Αντίστασης Πόλωσης

Παρουσίαση και επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων

Κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής των πειραμάτων ελήφθησαν περίπου 15 μετρήσεις της αντίστασης πόλωσης για κάθε δοκίμιο. Οι μετρήσεις της αντίστασης πόλωσης πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονα με τις μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης με τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και στα δοκίμια αναφοράς, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

(α) Δοκίμια αναφοράς CEM I

Για τα δοκίμια Ref CEM I η έναρξη των μετρήσεων έγινε μετά από 171 ημέρες από την εμβάπτισή τους στο διάλυμα NaCl.

Στους πίνακες 24 και 25 φαίνονται οι μετρήσεις της αντίστασης πόλωσης για κάθε ομάδα δοκιμίων.

Πίνακας 24: Μετρήσεις Αντίστασης πόλωσης Ref CEM I με αναστολέα διάβρωσης

Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	171	**181**	**192**	**202**	**214**	**227**	**240**	**255**
1	2.058.213,623	1.125.931,738	7.519.598,561	721.513,195	7.968.098,788	2.778.508,770	11.563.246,143	7.955.193,635
2	141.381,590	250.211,248	265.082,956	247.485,811	274.566,714	258.425,990	350.825,472	309.795,560
3	13.615,125	10.518,278	5.063,000	9.116,351	8.770,729	9.271,444	9.397,980	7.637,635
4	3.932,090	1.816,845	1.808,270	2.293,259	30.936,000	2.610,844	3.374,088	2.230,872
5	514,571	601,038	713,054	608,266	662,212	884,762	1.350,240	682,588
6	185,789	260,629	361,077	276,969	298,441	403,889	480,197	363,185
7	1.130.790,191	1.636.265,599	1.087.212,151	2.446.032,880	2.736.121,991	3.004.445,743	3.321.169,807	3.411.643,483

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	270	**285**	**298**	**312**	**326**	**340**	**353**
1	52.125.289,894	13.294.483,295	16.552.443,992	5.623.268,698	1.489.583,334	20.094.919,041	12.655.928,535
2	334.727,808	323.226,474	345.093,295	337.215,348	318.675,889	182.581,168	296.108,890
3	26.228,097	6.157,013	5.032,830	6.178,002	6.849,775	5.550,856	276.559,002
4	1.774,282	3.293,172	1.718,809	1.628,836	745.022,152	755.822,921	658.889,783
5	1.365,282	1.163,581	763,886	850,292	1.059,913	1.162,805	922,269
6	3.885,416	380,390	337,949	1.189,025	3.199,066	2.588,064	2.298,023
7	181.272.340,417	1.778.545,574	1.628.219,381	680.578,610	564.605,409	507.136,061	632.036,847

Πίνακας 25: Μετρήσεις Αντίστασης πόλωσης Ref CEM I χωρίς αναστολέα διάβρωσης

Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	171	**181**	**192**	**202**	**214**	**227**	**240**	**255**
8	810,236	649,761	701,879	600,686	764,593	473.863,883	2.146,273	391.269,287
9	6.660.315,509	39.261.225,941	78.410.030,637		4.724.092,698			
10	2.964.280,990	2.735.602,094	5.245.040,840	6.901.594,490	4.361.370,716	5.717.277,487	74.579,203	322.378,478
11	989.435,354	2.060.183,002	2.495.747,266	1.300.246,609	1.007.510,817	1.163.945,578	1.325.935,138	1.365.048,544
12	451,595	675,951	912,485	436,808	549,337	1.506,372	1.205,473	878,419
13	1.338,547	1.563,893	1.780,578	3.335,992	9.865.616,860		58.998.187,741	46.621.441,666
14	557,359	592,832	833,083	565,477	625,813	797,417	2.494,337	8.201,373
15							74.826.969,141	
16	165.414.258,187	8.686.280,221	5.131.078,361		4.171.897,810	6.697.821,327	8.027.184,466	3.713.009,492

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	270	**285**	**298**	**312**	**326**	**340**	**353**
8	8.479,321	1.075,750	1.997,615	1.875,063	1.673,856	1.811,008	1.919,111
9			643.625.515,305	2.692.307,694	7.285.714,287	9.317.307,693	12.318.814,549
10	178.157,722	103.785,429	145.553,879	157.570,731	357.245,702	335.915,572	200.412,272
11	1.146.687,354	2.154.168,852	860.091,169	3.899.049,012	2.842.227,378	719.883,889	59.847,529
12	1.848,695	667,118	663,438	650,571	1.026,481	1.078,641	1.058,394
13	170.560.774,608	90.654.138,670	51.060.778,749	583.846.153,829	81.552.283,349		57.893.761,580
14	45.294,694	19.229,230	21.860,832	20.096,389	14.367,040	12.282,364	10.871,172
15		80.492.115,858			8.866.666,665	555.290.666,661	
16	39.436.511,193	12.467,439	1.073,817	938,408	4.299,373	1.456,107	1.372,037

Ο Μέσος Όρος των αποτελεσμάτων αντίστασης πόλωσης για κάθε μέτρηση φαίνεται στους πίνακες 26 και 27.

Πίνακας 26: Μέσος Όρος Αντίστασης πόλωσης Ref CEM I με αναστολέα διάβρωσης

Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)								
Δοκίμια 1-7	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**							
	171	**181**	**192**	**202**	**214**	**227**	**240**	**255**
Μ.Ο.	478.376,140	432.229,339	1.268.548,438	489.618,104	1.574.207,839	864.935,920	2.178.549,132	1.669.649,565

Δοκίμια 1-7	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**						
	270	**285**	**298**	**312**	**326**	**340**	**353**
Μ.Ο.	33.395.087,314	2.201.035,643	2.647.658,592	950.129,830	446.999,363	3.078.537,274	2.074.677,621

Πίνακας 27: Μέσος όρος Αντίστασης πόλωσης Ref CEM I χωρίς αναστολέα διάβρωσης

Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)								
Δοκίμια 8-16	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**							
	171	**181**	**192**	**202**	**214**	**227**	**240**	**255**
Μ.Ο.	22.003.930,972	6.593.346,712	11.410.765,641	1.367.796,677	3.016.553,581	2.342.535,344	17.907.337,722	7.488.889,608

Δοκίμια 8-16	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**						
	270	**285**	**298**	**312**	**326**	**340**	**353**
Μ.Ο.	30.196.821,941	21.679.706,043	86.964.691,851	73.827.330,212	11.213.944,903	70.710.050,242	8.811.007,081

(β) Δοκίμια LC 1

Η έναρξη των μετρήσεων για τα δοκίμια LC 1 έγινε μετά από 80 ημέρες από την εμβάπτισή τους στο διάλυμα NaCl.

Στους πίνακες 28 και 29 φαίνονται οι μετρήσεις της αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια LC 1 με αναστολέα διάβρωσης και χωρίς.

Πίνακας 28: Μετρήσεις Αντίστασης πόλωσης LC 1 με αναστολέα διάβρωσης

Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	80	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
17	577,234	604,202	564,911	582,832	620,256	679,294	1.300,357	1.859.764,089
18	775,936	664,599	729,528		6.084,620	7.624,935	4.932,555	4.956,534
19	814,012	907,999	751,725	567,181	749,636	706,986	1.110,550	601,631
20	575,130	382,921	450,441	338,147	366,612	475,419	1.636,609	941,940
21	218.130,854	407.010,549	516.137,558	178.247,423	1.293,633	1.031,213	260.764,138	119.722,203
22	735,621	488,458	639,102	441,219	443,608	503,492	673,605	328,720
23	524,915	366,201	429,200	313,015	344,671	343,448	812,686	308,720

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
17	716.723,549	1.697.550,251	1.946.153,846	1.575.757,576	2.178.623,719	1.957.604,813	7.721.561,740
18	76.440,405	4.460,419	889,234	1.031,006	1.132,760	1.089,800	1.131,670
19	2.553,537	522,113	687,512	624.703,791	1.735.042,735	784,945	1.108,304
20	2.639,223	1.578,497	848,706	915,036	169.042,673	167.767,403	81.771,963
21	315.032,081	742,645	479,191	305.497,211	302.892,355	56.489,576	269.291,695
22	6.196,765	693,068	569,356	573,832	756,364	808,576	488,375
23	3.513,793	561,407	420,893	420,068	8.545,763	563,573	1.235.568,994

Πίνακας 29: Μετρήσεις Αντίστασης πόλωσης LC 1

Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	80	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
24	710,282	523,942	609,952	375,716	427,196	490,891	924,624	366,296
25	1.818.181,816			2.555.149,596	1.882.723,528	1.397.849,463	1.072.855,938	681.285,360
26								
27	652,493	444,034	592,353	456,812	454,403	400,407	875,678	484,669
28	5.156,645	1.164,420	1.337,971	835,982	956,262	1.144,944	1.407,155	1.001,345
29	2.130.664,653	1.263.688,530	368.177,032		173.133,595	127.292,066	125.201,906	735,946
30	561,101	395,582	509,611	416,104	455,747	419,796	854,711	418,694

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
24	4.446,230	382,406	362,970	353,977	393,583	413,902	330,284
25	507.600,434	367.389,600	326.459,356	248.566,329	206.423,770	194.440,780	141.148,904
26							
27	11.426,121	737,021	594,793	615,286	734,318	788,308	534,900
28	2.380,224	2.147.211,414	1.337.444,934	2.564.752,373	664.694,422	899,670	641,422
29	13.532,035	1.309,813	7.143,991	4.610,064	30.219,762	36.094,253	8.949,947
30	1.652,047	651,744	469,989	488,904	475,393	744,441	378,945

Ο Μέσος Όρος των αποτελεσμάτων αντίστασης πόλωσης για κάθε μέτρηση φαίνεται στους πίνακες 30 και 31.

Πίνακας 30: Μέσος Όρος Αντίστασης πόλωσης LC 1 με αναστολέα διάβρωσης

Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)								
Δοκίμια	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**							
17-23	**171**	**181**	**192**	**202**	**214**	**227**	**240**	**255**
Μ.Ο.	31.733,386	58.632,133	74.243,209	30.081,636	1.414,719	1.623,541	38.747,214	283.803,405

Δοκίμια 17-23	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
Μ.Ο.	160.442,765	243.729,771	278.578,391	358.414,074	628.005,196	312.158,384	1.330.131,820

Πίνακας 31: Μέσος όρος Αντίστασης πόλωσης LC 1

Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)								
Δοκίμια	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**							
24-30	**80**	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
Μ.Ο.	659.321,165	253.243,302	74.245,384	511.446,842	343.025,122	254.599,595	200.353,335	114.048,718

Δοκίμια 24-30	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
Μ.Ο.	90.172,849	419.613,666	278.746,006	469.897,822	150.490,208	38.896,892	25.330,734

(γ) Δοκίμια LC 2

Η έναρξη των μετρήσεων για τα δοκίμια LC 2 έγινε μετά από 80 ημέρες από την εμβάπτισή τους στο διάλυμα NaCl.

Στους πίνακες 32 και 33 φαίνονται οι μετρήσεις της αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια LC 2 με αναστολέα διάβρωσης και χωρίς.

Πίνακας 32: Μετρήσεις Αντίστασης πόλωσης LC 2 με αναστολέα διάβρωσης

Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	80	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
31	751,512	964,831	736,742	430,470	339,306	764,038	598,808	386,367
32	11.795.134,443	1.812.072,216	1.585,452	1.103.358,916	314.982,074	137.081,751	59.417,758	676,839
33	623,536	575,246	679,560	455,407	423,053	623,236	715,416	354,304
34	662.086,823	194.501,690	246.685,709	206.979,198	1.545.824,847	741.186,981	729,415	373,050
35	1.105,511	99.346,382	121.104,647	84.942,429	160.645,674	141.390,936	345.936,110	210.635,920
36	12.915,258	8.707,929	7.532,072	14.562,932	12.773,282	13.604,894	18.891,677	228.331,220
37	802,525	820,381	785,910	530,246	424,742	828,947	601,725	410,804

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
31	3.462,111	315,737	300,189	261,696	336,873	269,416	24.538,625
32	25.490,583	502,069	172.135,624	194.662,204	245.814,618	560.878,062	678.951,606
33	2.351,005	375,620	274,634	260,577	341,202	379,621	400,353
34	5.199,632	328,281	305,275	320,200	470,961	386,540	460,795
35	11.790.771,189	581,919	1.084,103	275.564,090	2.629,109	355,265	724,464
36	566.958,966	108.600,530	126.641,519	551,238	663,270	683,782	141.435,048
37	2.472,180	345,307	276,279	276,802	327,856	315,835	304,418

Πίνακας 33: Μετρήσεις Αντίστασης πόλωσης LC 2 χωρίς αναστολέα διάβρωσης

Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	80	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
38	820,420	799,323	707,817	436,309	414,180	492,127	516,032	350,334
39	50.418,207	46.620,807	34.394,570	24.626,148	15.764,004	10.672,539	8.504,870	5.027,610
40	685,191	587,151	566,408	390,125	481,805	522,503	469,365	6.806,111
41	568,514	251,229	379,728	276,937	2.080,639	585,481	621,515	412,002
42	4.222.687,762	1.780,118	1.944,178	719,089	710,371	796,920	1.056,609	154.356,007
43	581,778	420.267,177	128.338,594	408,477	470,922	539,517	517,489	377,914
44	5.215,607	2.942,573	2.927,170	2.726,610	1.709,324	1.906,990	1.985,111	1.646,115

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
38	4.550.588,080	114.763,453	37.712,096	27.364,306	24.501,518	91.257,413	71.023,525
39	14.332,339	3.305,082	3.002,776	2.602,308	2.262,501	2.232,858	1.552,708
40	29.257,792	6.380,434	6.314,955	5.650,796	6.268,565	6.258,917	356,491
41	52.713,347	464,268	554,843	1.708,507	1.897,037	1.758,549	101.115,995
42	8.345,964	517,773	490,410	323.699,421	505,417	508,980	189.506,382
43	14.293,074	395,512	294,348	355,316	16.579,082	15.131,907	12.056,738
44	7.210,227	1.106,654	1.677,552	907,542	962,157	923,835	912,610

Ο Μέσος Όρος των αποτελεσμάτων αντίστασης πόλωσης για κάθε μέτρηση φαίνεται στους πίνακες 34 και 35.

Πίνακας 34: Μέσος Όρος Αντίστασης πόλωσης LC 2 με αναστολέα διάβρωσης

Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)

Δοκίμια 31-37	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	80	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
Μ.Ο.	1.781.917,087	302.426,954	54.158,585	201.608,514	290.773,283	147.925,826	60.984,416	63.024,072

Δοκίμια 31-37	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
Μ.Ο.	1.770.957,952	15.864,209	43.002,518	67.413,830	35.797,698	80.466,932	120.973,616

Πίνακας 35: Μέσος Όρος Αντίστασης πόλωσης LC 2 χωρίς αναστολέα διάβρωσης

Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)

Δοκίμια 38-44	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	80	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
Μ.Ο.	611.568,211	67.606,911	24.179,781	4.226,242	3.090,178	2.216,582	1.952,999	24.139,442

Δοκίμια 38-44	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
Μ.Ο.	668.105,832	18.133,311	7.149,569	51.755,457	7.568,040	16.867,494	53.789,207

(γ) Δοκίμια PC

Η έναρξη των μετρήσεων για τα δοκίμια PC έγινε μετά από 80 ημέρες από την εμβάπτισή τους στο διάλυμα NaCl.

Στους πίνακες 36 και 37 φαίνονται οι μετρήσεις της αντίστασης πόλωσης για τα δοκίμια PC με αναστολέα διάβρωσης και χωρίς.

Πίνακας 36: Μετρήσεις Αντίστασης πόλωσης PC με αναστολέα διάβρωσης

Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	80	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
45	568,853	490,443	600,627	450,445	436,125	438,334	1.167,036	462,719
46	569,407	431,981	508,627	352,919	400,571	381,334	490,378	308,603
47	818,010	809,295	689,529	588,605	62.289,800	43.198,631	752,440	435,268
48	439.108,804	256.781,478	146.027,753	2.253,757	2.001,029	2.889,250	2.565,507	769,957
49	843,338	588,846	625,977	481,564	622,778	617,079	587,782	465,986
50		18.794.804,340	24.232.967,535			8.911.072,464	666.136,380	251.100,603
51	777,212	731,635	682,808	608,580	659,438	743,930	930,896	668,995

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
45	1.864,746	825,616	601,007	596,710	709,869	633,402	517,646
46	511,315	706,718	443,375	2.314.024,390	5.833.333,332	3.141.160,027	3.933.518,006
47	2.140,226	467,022	460,496	419,757	20.331,257	23.653,628	22.217,796
48	7.220,934	1.251,286	146.909,947	116.866,743	115.228,154	110.387,950	88.209,141
49	1.682,897	133.039,750	133.198,272	117.345,945	110.772,834	117.358,396	115.159,568
50	809.958,844	46.839,540	40.725,793	32.867,942	28.135,844	25.871,162	22.570,392
51	2.761,665	802,246	457,999	412,390	12.435,417	11.215,997	21.220,517

Πίνακας 37: Μετρήσεις Αντίστασης πόλωσης PC χωρίς αναστολέα διάβρωσης

Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl							
	80	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
52			4.817,806	521,028	480,170	492,741	497,846	469,537
53	620,581	535,992	660,497	542,005	471,986	673,553	682,995	500,476
54	595,175	593,466	668,410	492,721	497,569	534,723	1.099,100	684,603
55	1.031,248	1.080,142	798,733	4.413,287	4.385.989,311	31.270,226	25.877,634	25.970,561
56	752,959	562,318	735,173	574,397	567,881	557,239	886,371	791,250
57	795.587,416	317.788,397	216.018,338	90.915,333	62.557,217	53.345,035	52.076,820	43.032,165
58	667,598	33.502,317	946.676,197	345.074,986	212.789,703	7.759,347	6.569,792	152.355,455

Δοκίμια	Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
52	3.033,505	464,682	373,428	424,297	438,755	470,323	435,987
53	1.366,673	489,046	541,285	487,182	508,176	400,531	519,751
54	1.284,105	713,018	561,575	609,733	679,675	683,733	552,816
55	69.565,270	590,620	472,410	1.441,394	1.915,045	1.813,352	2.053,129
56	18.682,645	882,086	787,434	618,691	658,067	726,290	529,362
57	1.245.228,117	37.735,247	42.534,353	34.603,509	28.737,394	33.484,163	26.617,793
58	9.401,240	770,799	747,896	83.545,971	796,674	792,242	198.350,785

Ο Μέσος Όρος των αποτελεσμάτων αντίστασης πόλωσης για κάθε μέτρηση φαίνεται στους πίνακες 38 και 39.

Πίνακας 38: Μέσος Όρος Αντίστασης πόλωσης PC με αναστολέα διάβρωσης

Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)								
Δοκίμια	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**							
45-51	**80**	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
Μ.Ο.	73.780,937	2.722.091,145	3.483.157,551	789,312	11.068,290	1.279.905,860	96.090,060	36.316,019

Δοκίμια 45-51	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
Μ.Ο.	118.020,090	26.276,025	46.113,841	368.933,411	874.420,958	490.040,080	600.487,581

Πίνακας 39: Μέσος όρος Αντίστασης πόλωσης PC χωρίς αναστολέα διάβρωσης

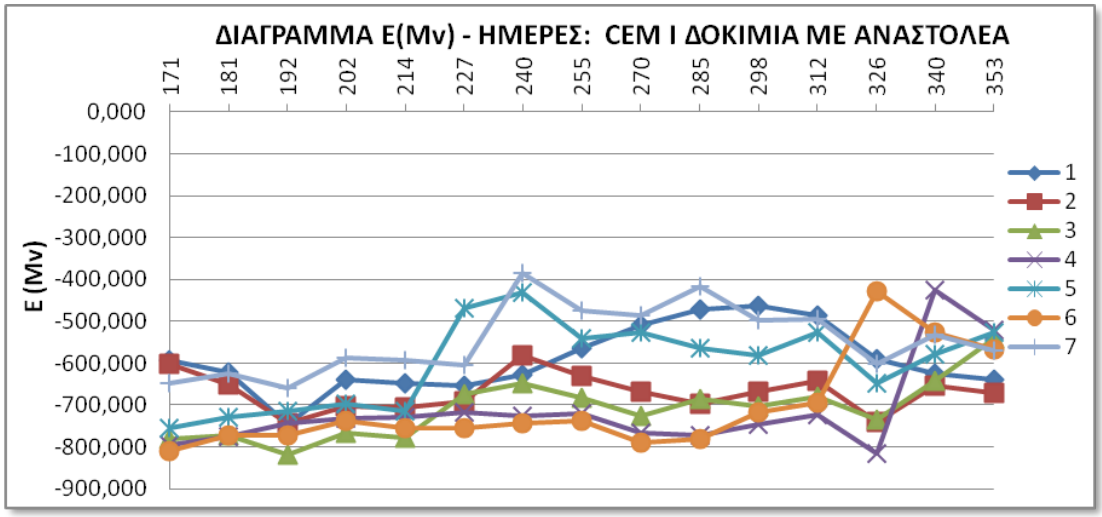
Αντίσταση Διάβρωσης Rp (Ω)								
Δοκίμια	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**							
52-58	**80**	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
Μ.Ο.	133.209,163	59.010,439	167.196,451	63.219,108	666.193,405	13.518,981	12.527,223	31.972,007

Δοκίμια 52-58	**Ημέρες από την εμβάπτιση στο διάλυμα NaCl**						
	179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
Μ.Ο.	192.651,651	5.949,357	6.574,054	17.390,111	4.819,112	5.481,519	32.722,803

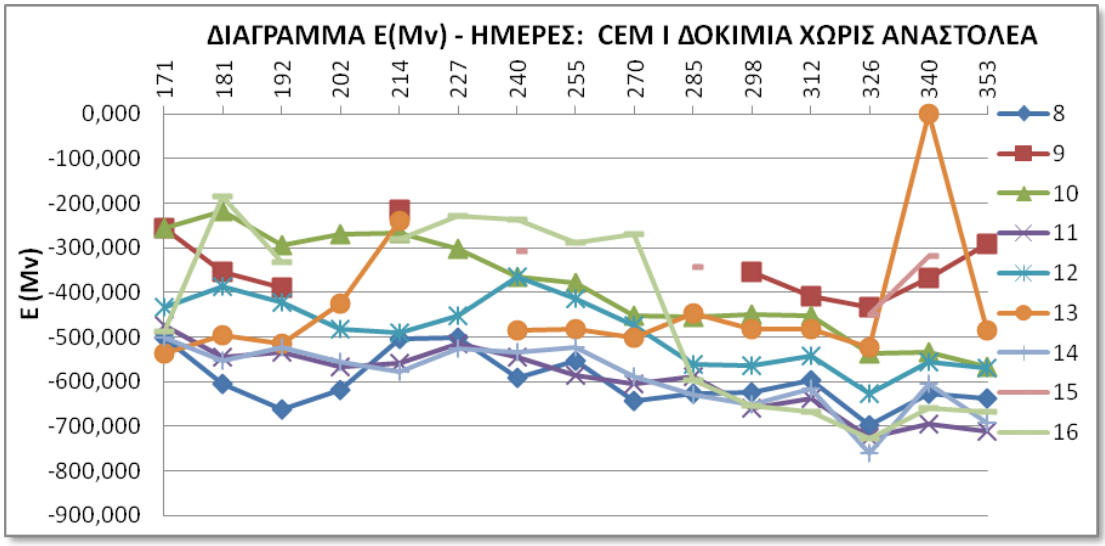
6.3. Μεταβολή δυναμικού διάβρωσης και αντίστασης πόλωσης συναρτήσει του χρόνου

Προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την τάση διάβρωσης των δοκιμίων κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου και αντίστασης πόλωσης συναρτήσεις του χρόνου, για κάθε ομάδα δοκιμίων. Ακολούθως για λόγους ευκολότερης επεξεργασίας των αποτελεσμάτων κατασκευάστηκαν και διαγράμματα που απεικονίζουν το μέσο όρο του δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου, καθώς και το μέσο όρο της αντίστασης πόλωσης συναρτήσει του χρόνου.

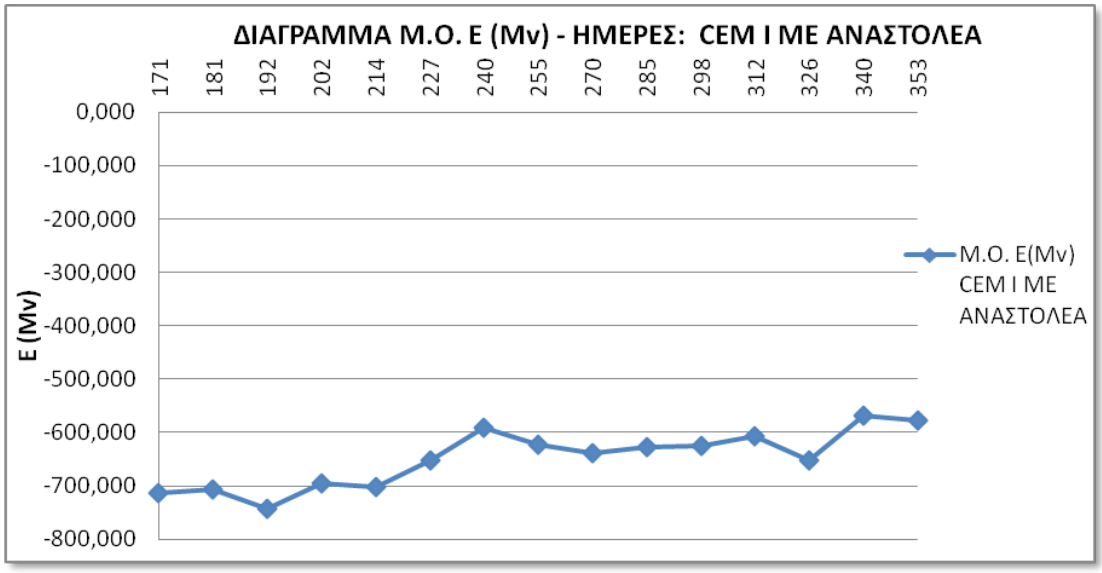
6.3.1. Δοκίμια αναφοράς CEM I



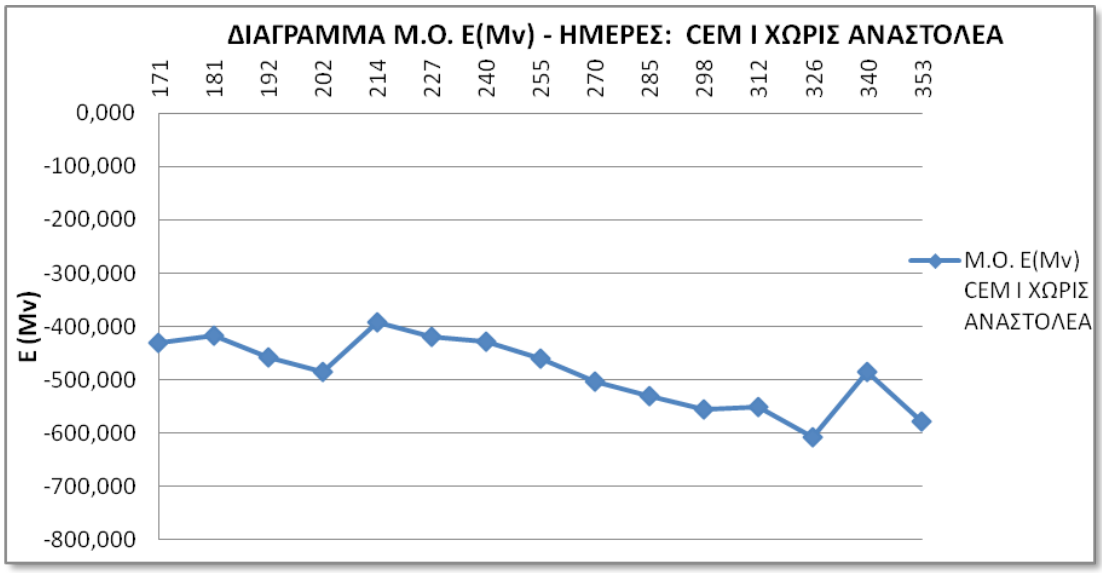
Διάγραμμα 1: Διάγραμμα Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου για CEM I με αναστολέα



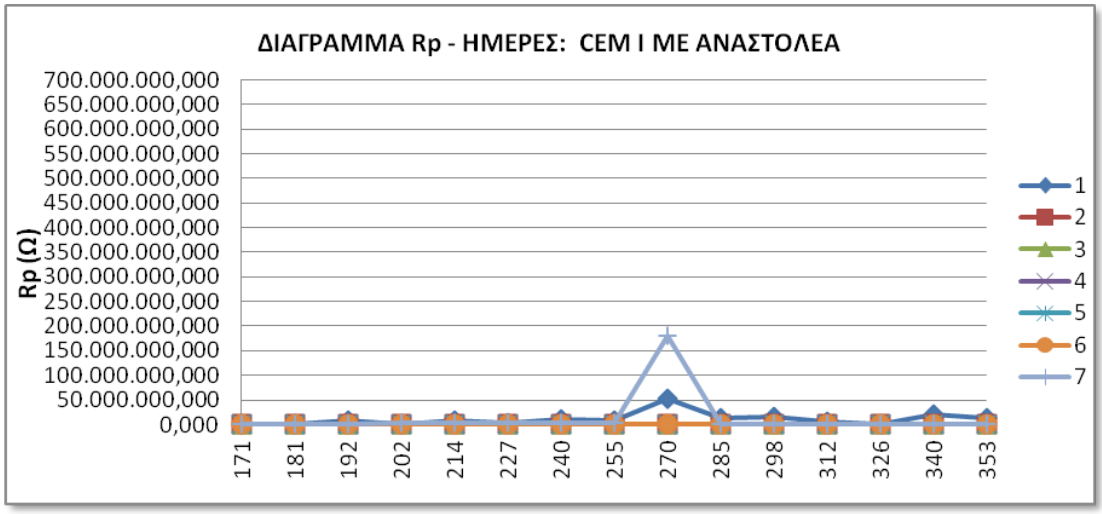
Διάγραμμα 2: Διάγραμμα Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου για CEM I χωρίς αναστολέα



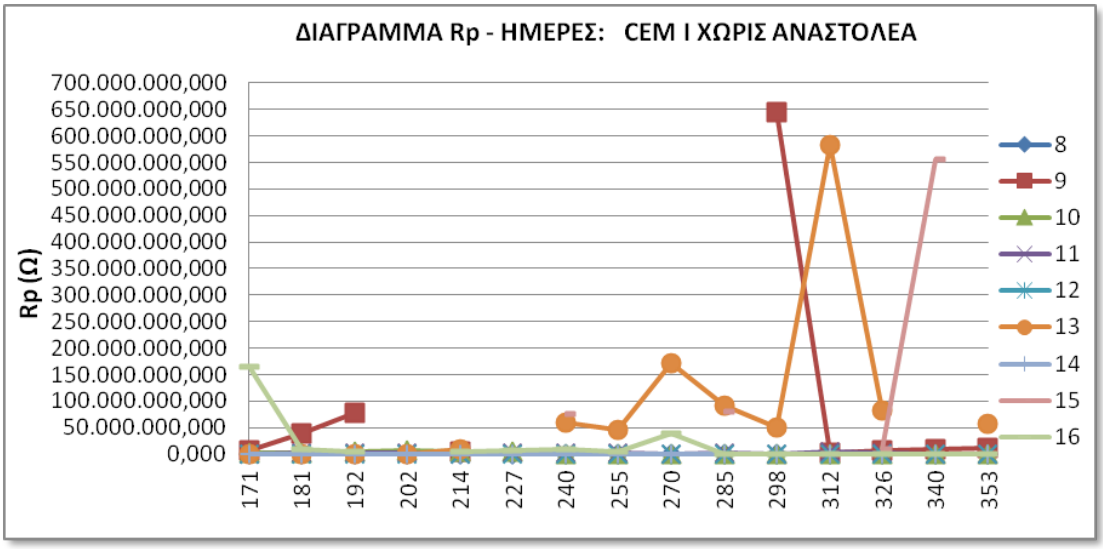
Διάγραμμα 3: Διάγραμμα Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου για CEM I με αναστολέα διάβρωσης



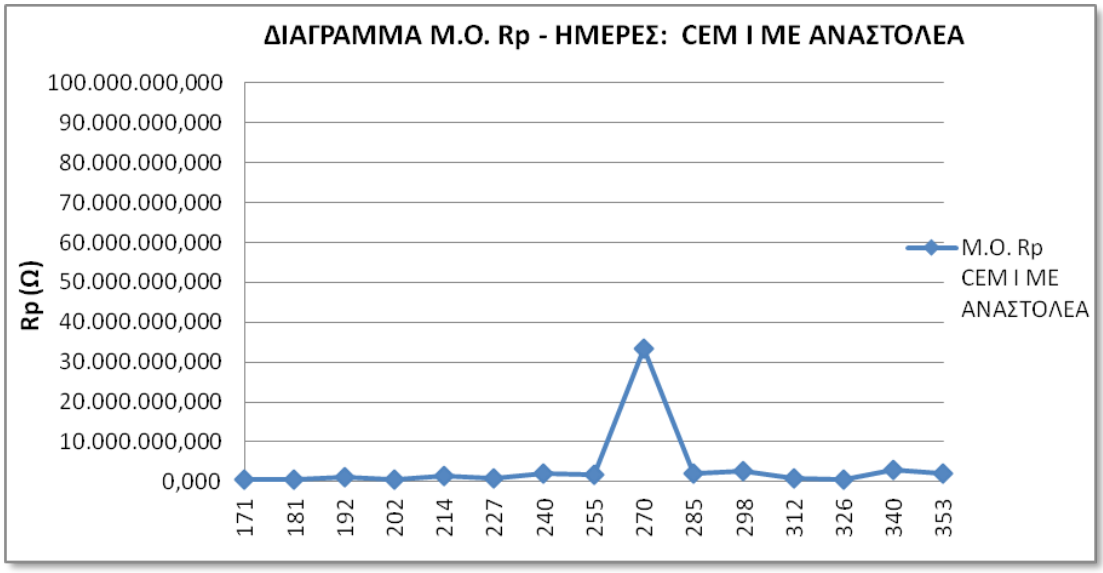
Διάγραμμα 4: Διάγραμμα Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου CEM I χωρίς αναστολέα διάβρωσης



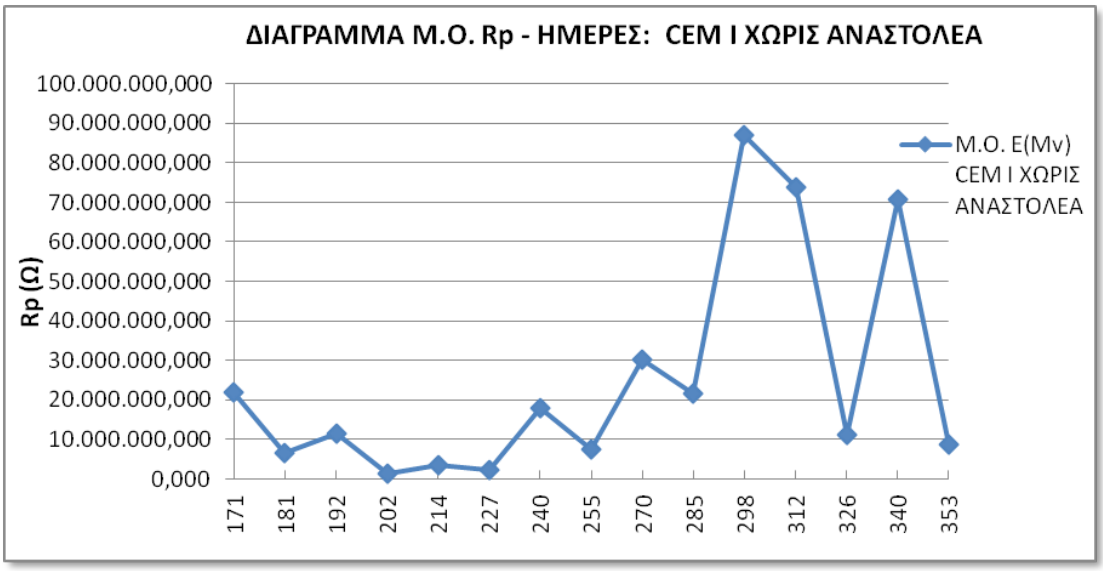
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα Αντίστασης πόλωσης – Χρόνου για CEM I με αναστολέα



Διάγραμμα 6: Διάγραμμα Αντίστασης – Χρόνου για CEM I χωρίς αναστολέα



Διάγραμμα 7: Διάγραμμα Μ.Ο. Αντίστασης πόλωσης – Χρόνου για CEM I με αναστολέα



Διάγραμμα 8: Διάγραμμα Μ.Ο. Αντίστασης – Χρόνου για CEM I χωρίς αναστολέα

<u>Πρώτο μερικό συμπέρασμα</u>

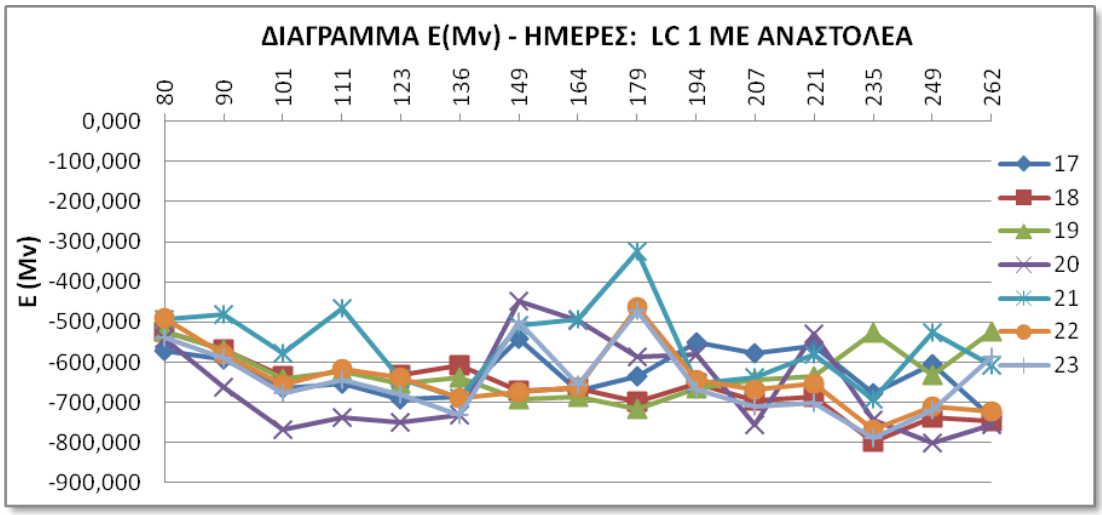
Από την πορεία του δυναμικού των δοκιμίων CEM I χωρίς αναστολέα προκύπτει ότι τα δυναμικά μεταβάλλονται σε ένα εύρος από – 400 mV έως – 700 mV. Αντίθετα στα δοκίμια CEM I με ψεκασμό με αναστολέα διάβρωσης οι τιμές μεταβάλλονται από – 600 mV έως – 700 mV.

Επομένως από τις μετρήσεις της παρούσας εργασίας προκύπτει ότι ο ψεκασμός του αναστολέα δεν επέφερε μετακίνηση του δυναμικού σε ηλεκτροθετικότερη τιμή.

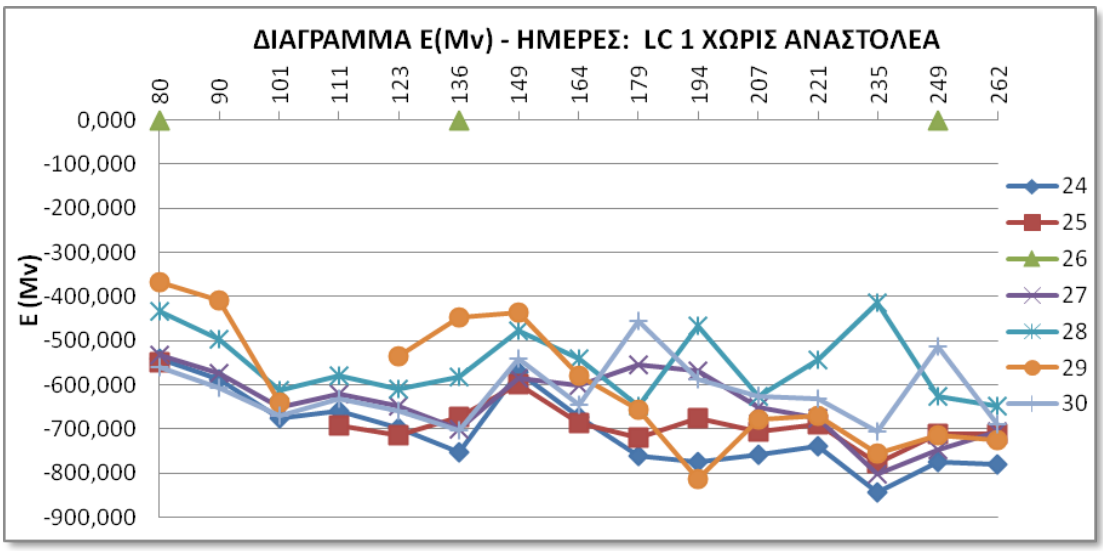
Από τις μετρήσεις της αντίστασης πόλωσης προκύπτει επίσης ότι με τον ψεκασμό του αναστολέα, η αντίσταση πόλωσης δεν αυξήθηκε αλλά αντιθέτως μειώθηκε.

Από τις δύο μετρήσεις προκύπτει ότι ο ψεκασμός με αναστολέα διάβρωσης δεν οδήγησε σε αύξηση της αντίστασης πόλωσης. Αυτό πιθανά οφείλεται στον μικρό χρόνο έκθεσης, κατά τον οποίο ο οπλισμός βρίσκεται ακόμα σε κατάσταση όπου δεν έχει ενεργοποιηθεί, ενώ η αύξηση της αγωγιμότητας του σκυροδέματος λόγω αναστολέα είναι άμεση.

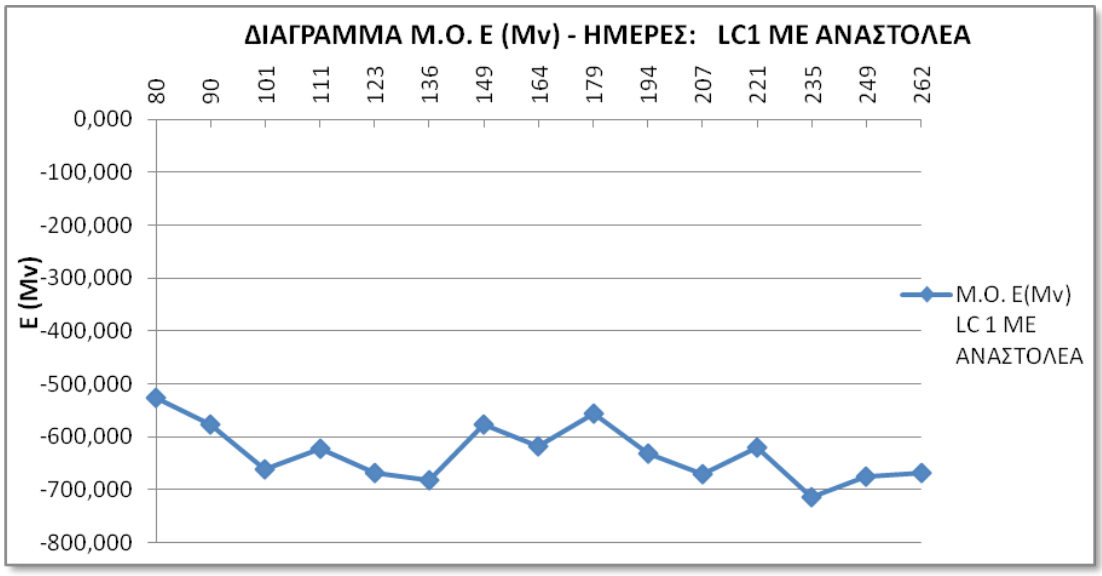
6.3.2. Δοκίμια LC 1



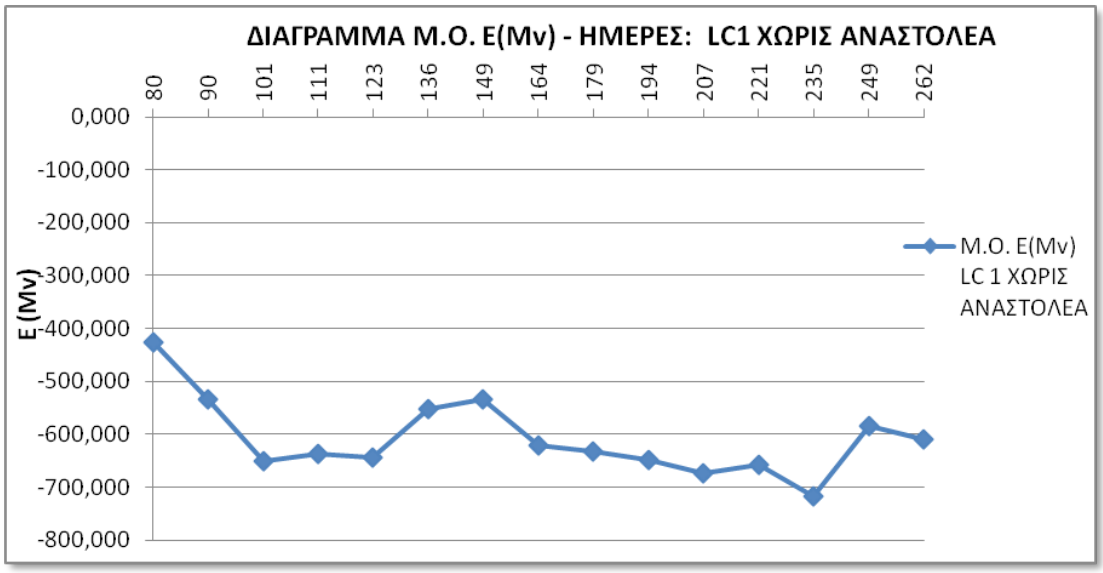
Διάγραμμα 9: Διάγραμμα Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου για LC 1 με αναστολέα



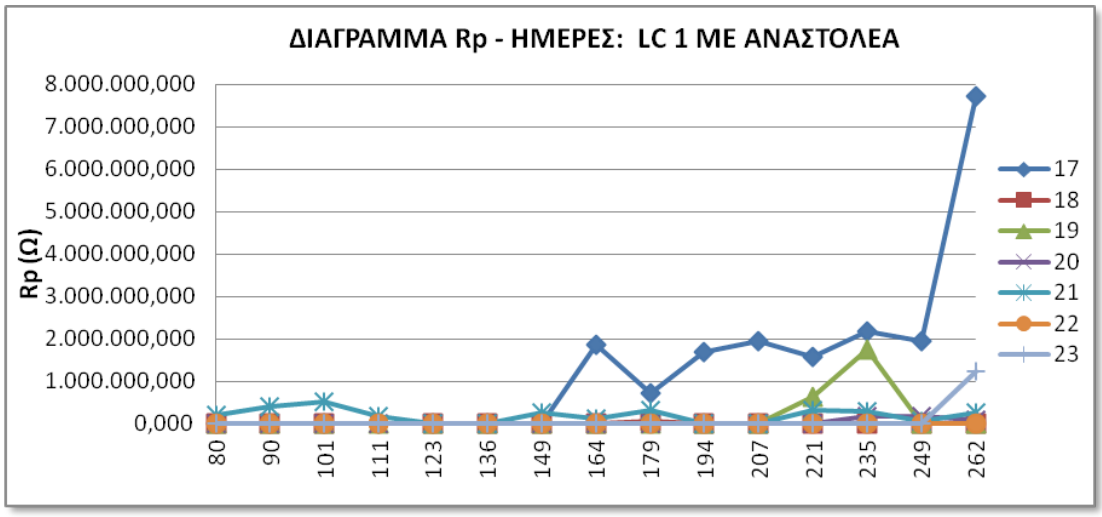
Διάγραμμα 10: Διάγραμμα Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου για LC 1 χωρίς αναστολέα



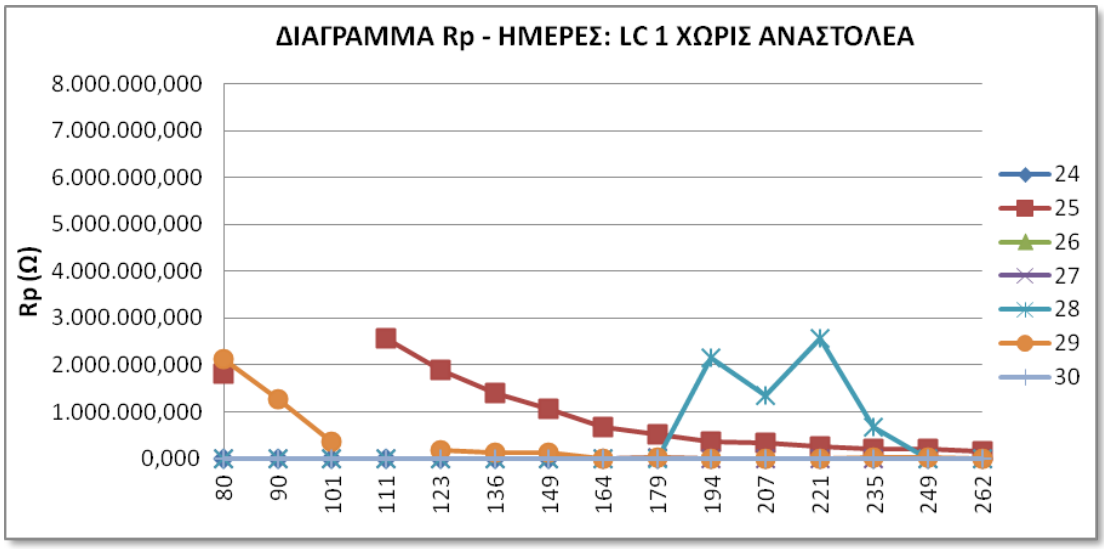
Διάγραμμα 11: Διάγραμμα Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου για LC 1 με αναστολέα



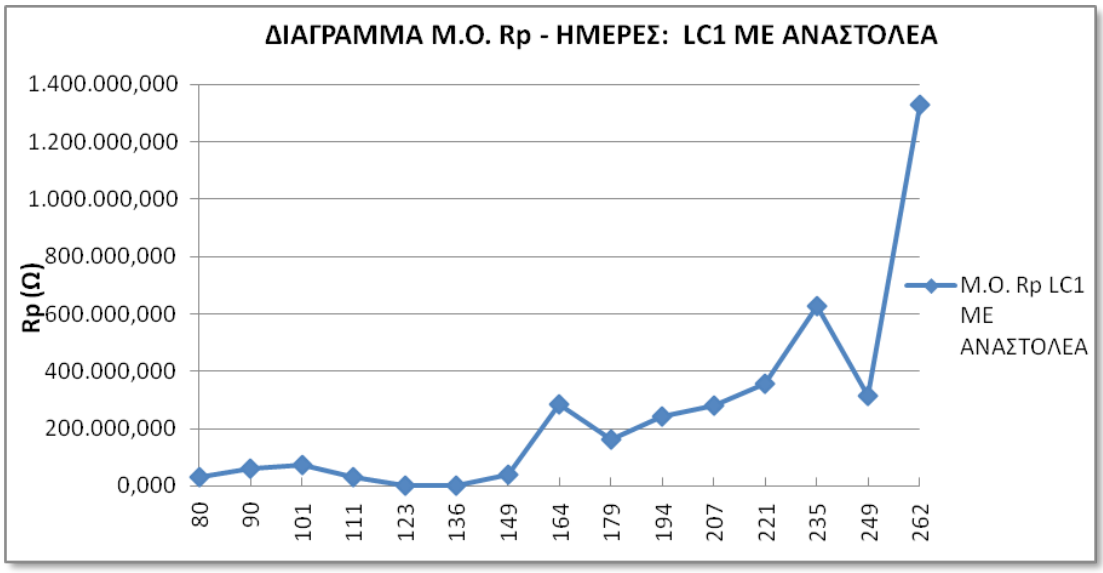
Διάγραμμα 12: Διάγραμμα Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου για LC 1 χωρίς αναστολέα



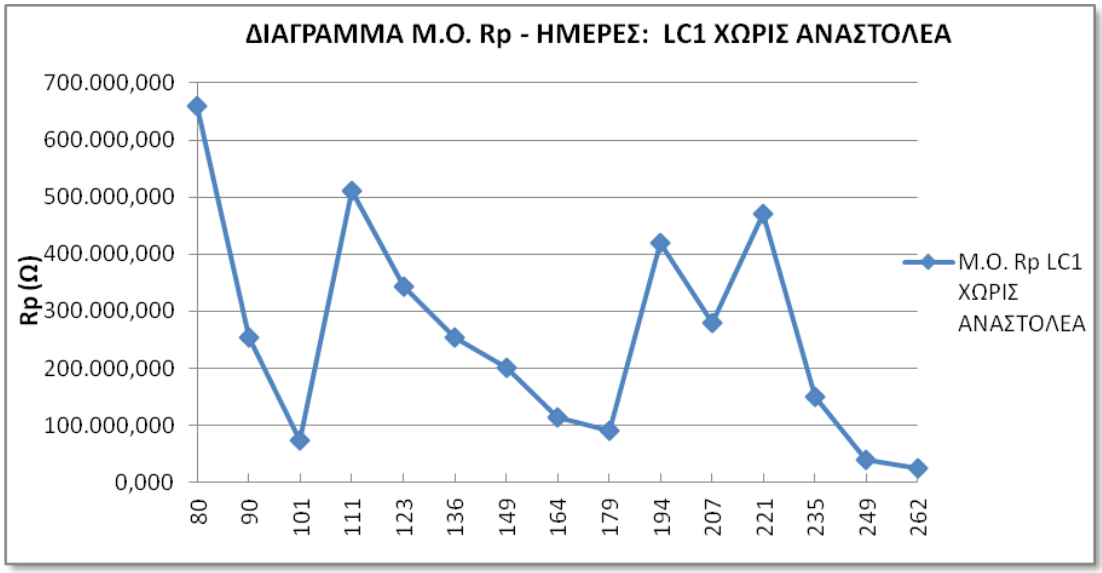
Διάγραμμα 13: Διάγραμμα Αντίστασης – Χρόνου για LC 1 με αναστολέα



Διάγραμμα 14: Διάγραμμα Αντίστασης – Χρόνου για LC 1 χωρίς αναστολέα



Διάγραμμα 15: Διάγραμμα Μ.Ο. Αντίστασης – Χρόνου για LC 1 με αναστολέα



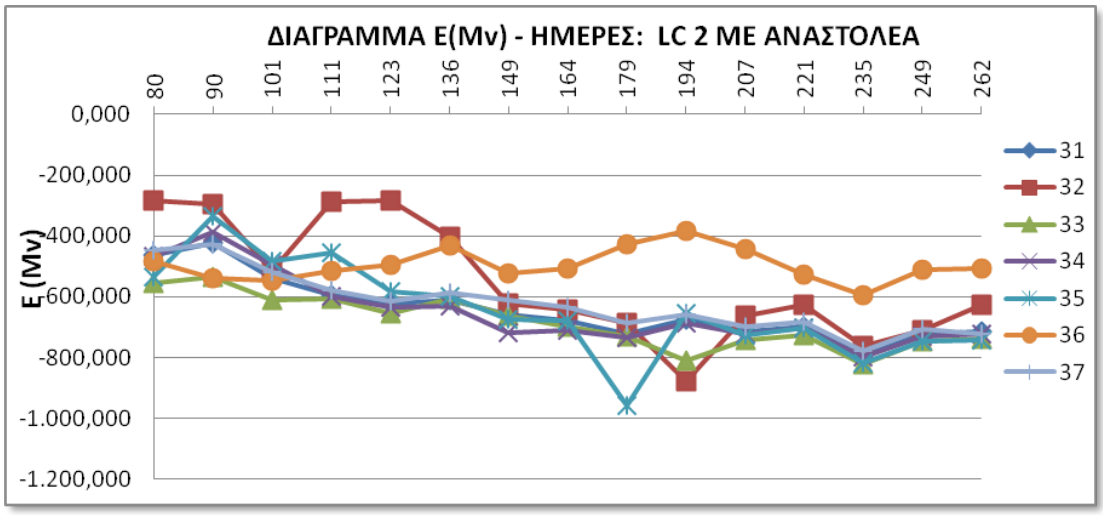
Διάγραμμα 16: Διάγραμμα Μ.Ο. Αντίστασης – Χρόνου για LC 1 χωρίς αναστολέα

<u>Δεύτερο μερικό συμπέρασμα</u>

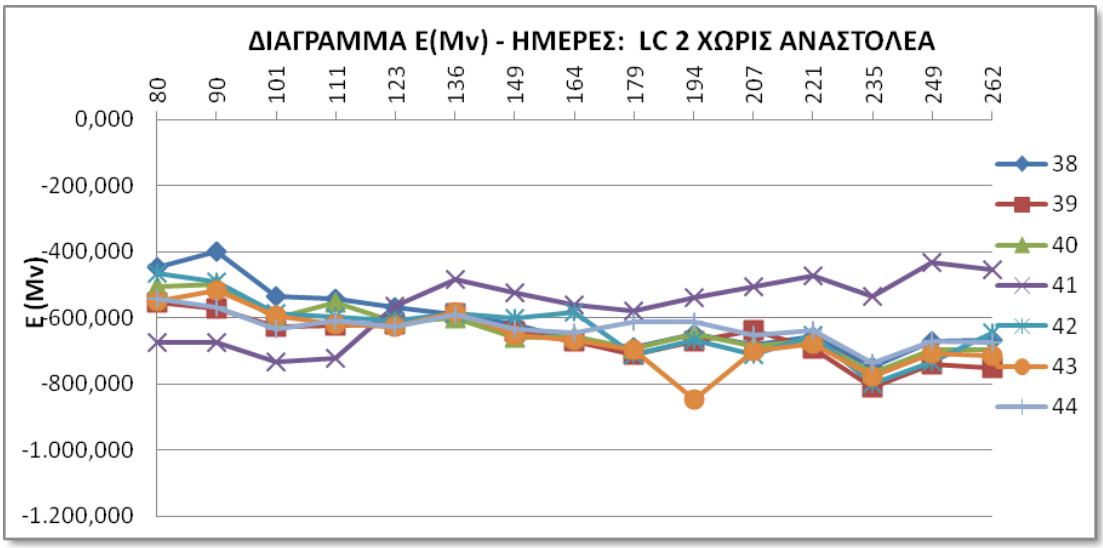
Από την πορεία του δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου προκύπτει ότι ο ψεκασμός με αναστολέα διάβρωσης δεν οδήγησε τα δυναμικά σε ηλεκτροθετικότερες τιμές. Από τα διαγράμματα της μεταβολής της αντίστασης πόλωσης με τον χρόνο προκύπτει ότι ο ψεκασμός με τον αναστολέα διάβρωσης μείωσε την αντίσταση πόλωσης στα αρχικά στάδια, αλλά από τις 235 ημέρες και μετά οι αντιστάσεις

πόλωσης των δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης αυξήθηκαν σημαντικά. Αυτό θα πρέπει να επιβεβαιωθεί με την πάροδο του χρόνου.

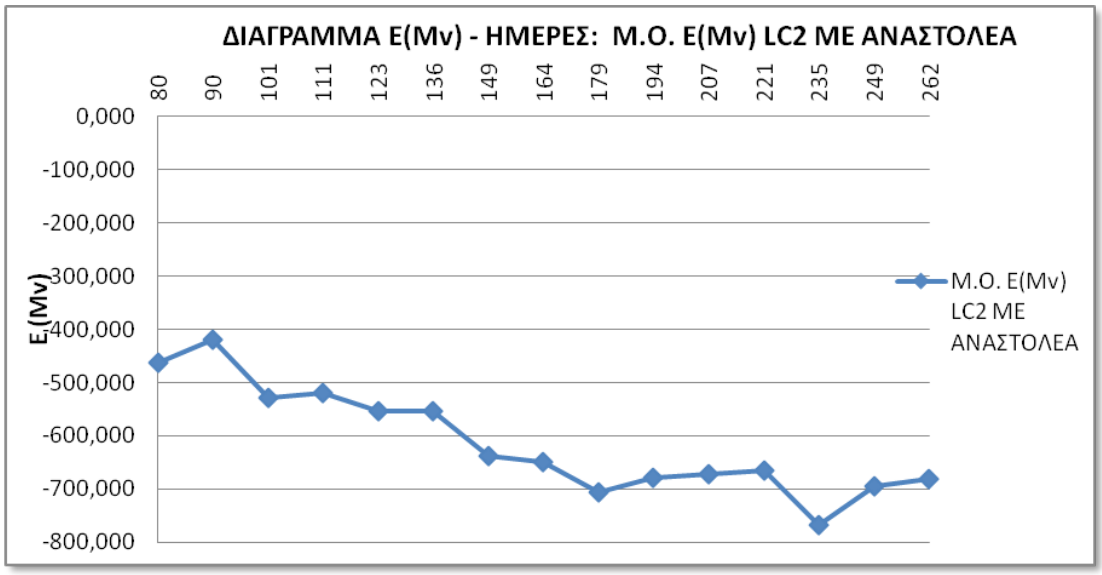
6.3.3. Δοκίμια LC 2



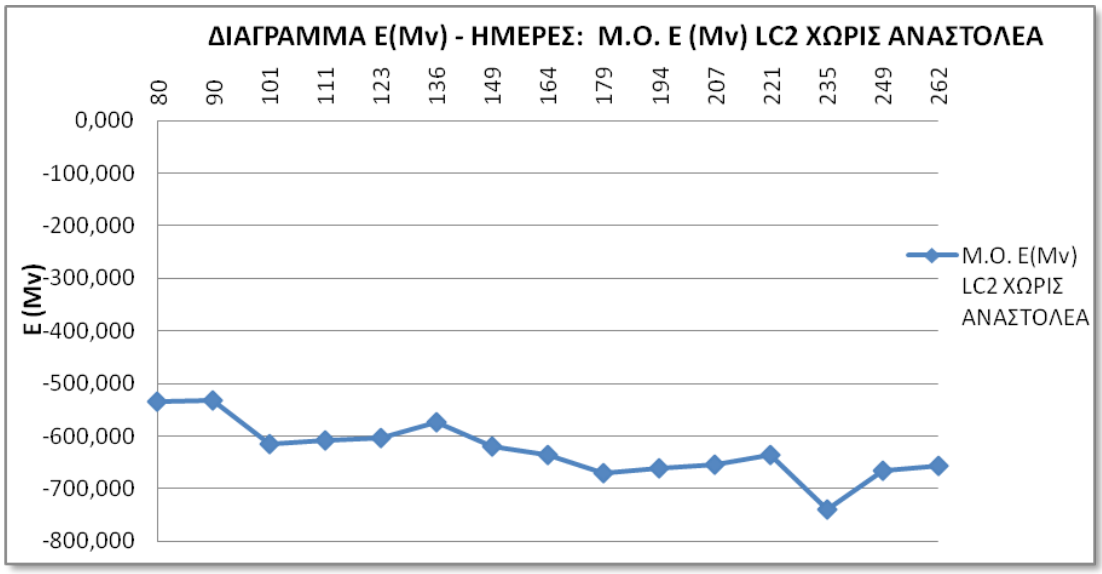
Διάγραμμα 17: Διάγραμμα Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου για LC 2 με αναστολέα



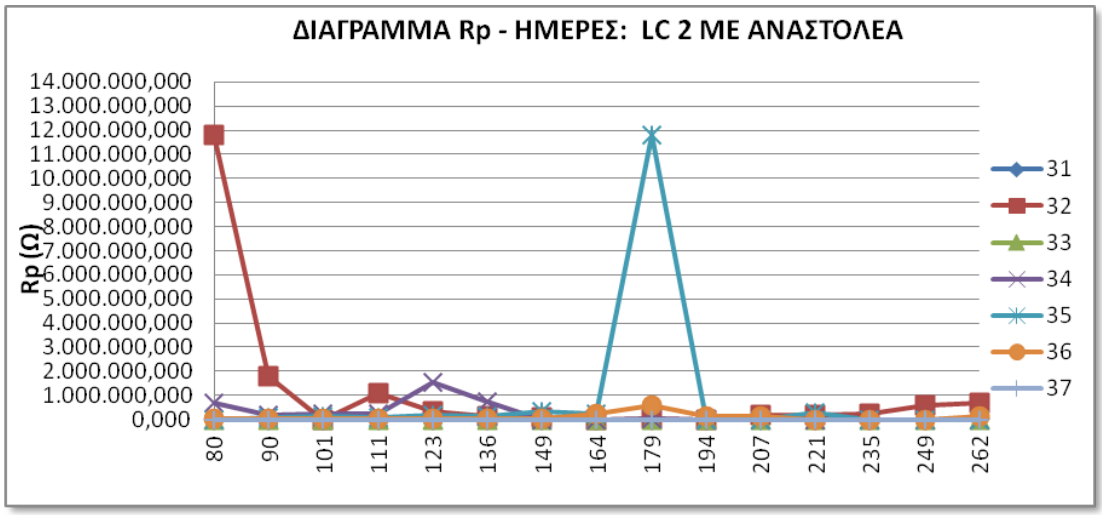
Διάγραμμα 18: Διάγραμμα Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου για LC 2 χωρίς αναστολέα



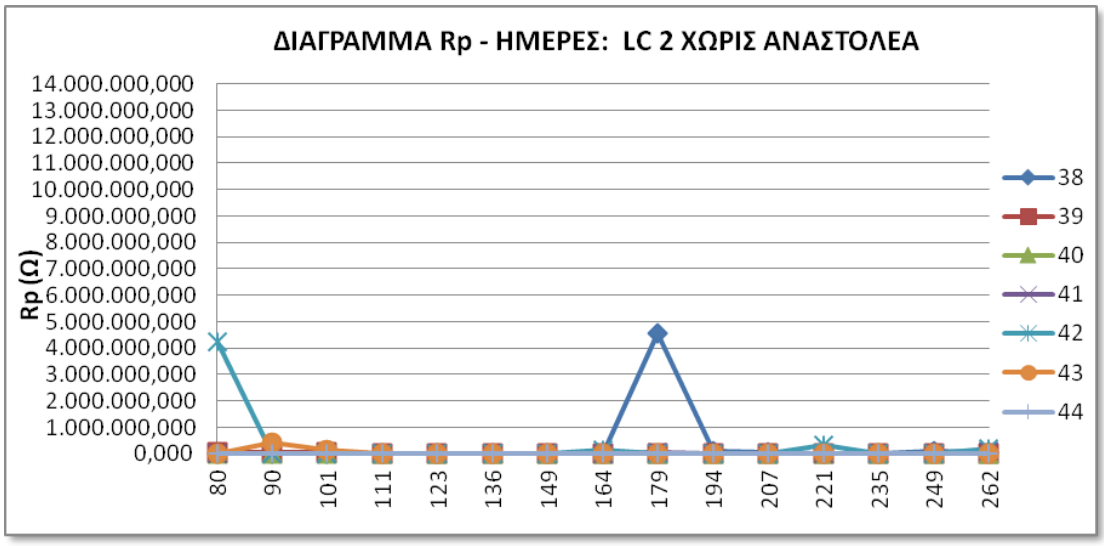
Διάγραμμα 19: Διάγραμμα Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου για LC 2 με αναστολέα



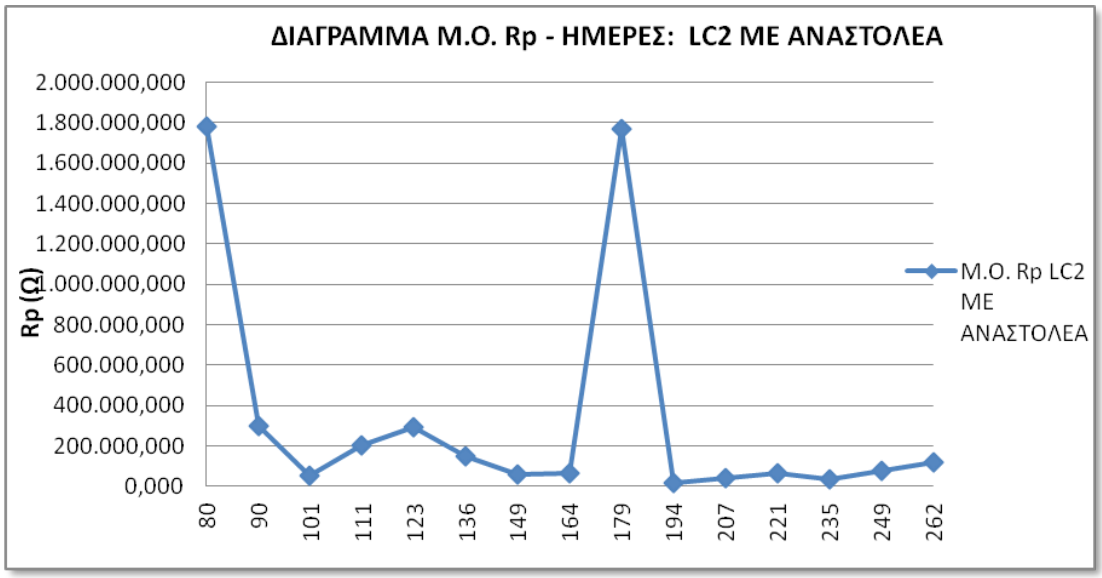
Διάγραμμα 20: Διάγραμμα Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου για LC 2 χωρίς αναστολέα



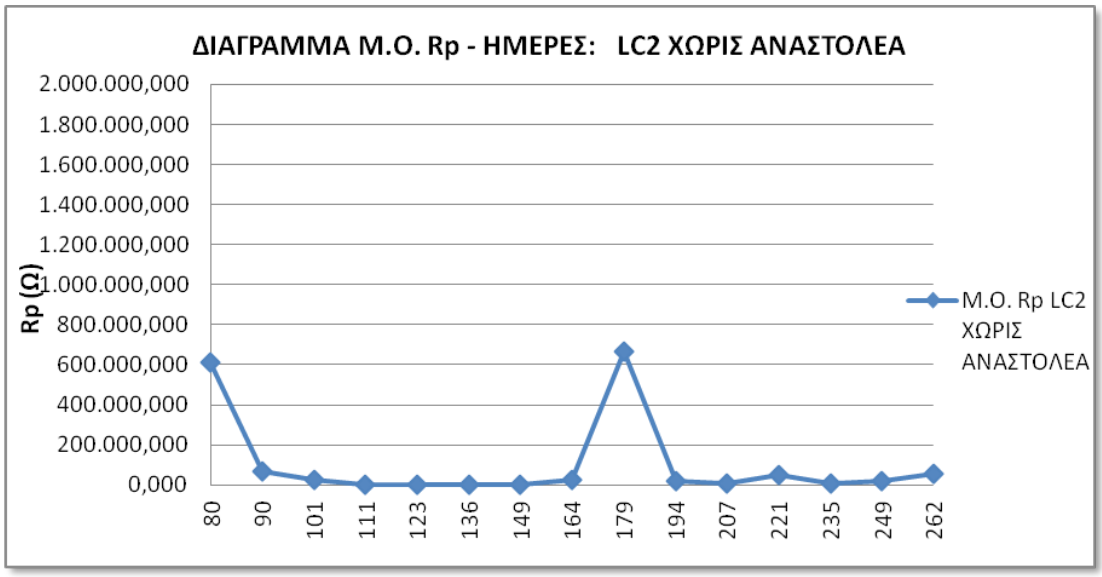
Διάγραμμα 21: Διάγραμμα Αντίστασης – Χρόνου για LC 2 με αναστολέα



Διάγραμμα 22: Διάγραμμα Αντίστασης – Χρόνου για LC 2 χωρίς αναστολέα



Διάγραμμα 23: Διάγραμμα Μ.Ο. Αντίστασης – Χρόνου για LC 2 με αναστολέα



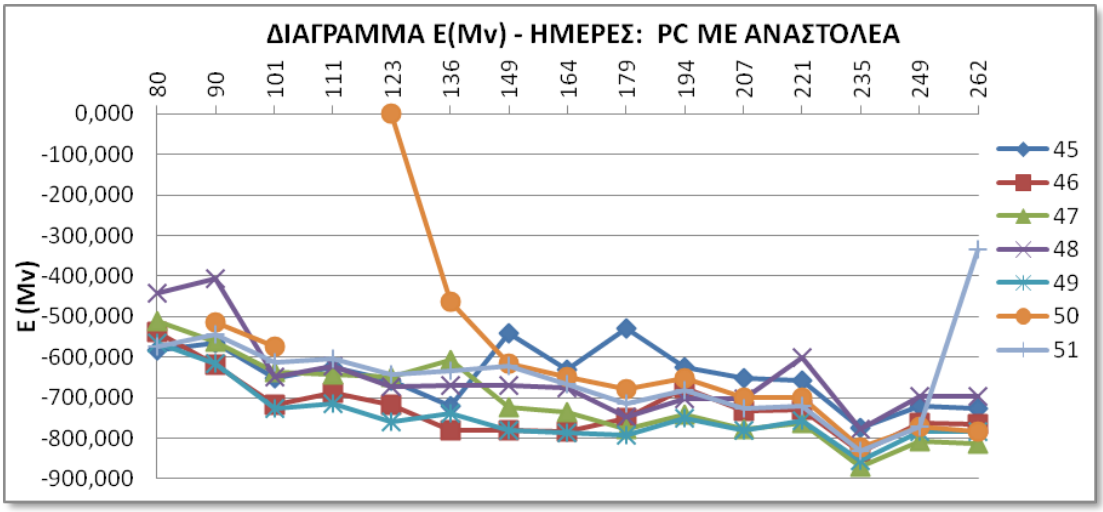
Διάγραμμα 24: Διάγραμμα Μ.Ο. Αντίστασης – Χρόνου για LC 2 χωρίς αναστολέα

<u>Τρίτο μερικό συμπέρασμα</u>

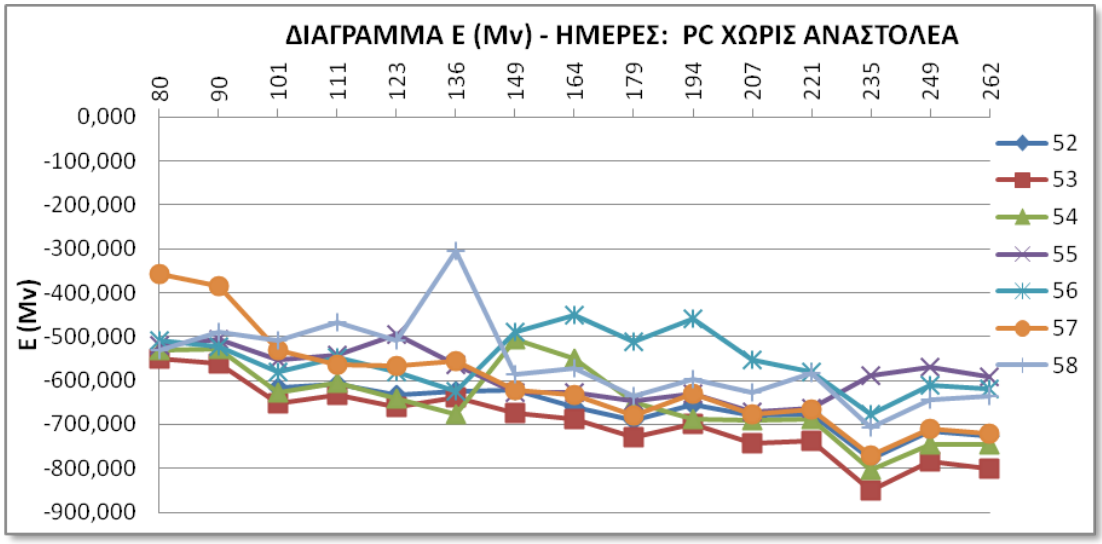
Από την πορεία του δυναμικού συναρτήσει του χρόνου προκύπτει ότι ο ψεκασμός με αναστολέα διάβρωσης δεν οδήγησε τις μεταβολές των δυναμικών προς σημαντικά ηλεκτροθετικότερες τιμές. Επίσης από την πορεία της μεταβολής της αντίστασης πόλωσης με τον χρόνο, προκύπτει ότι ο ψεκασμός με αναστολέα διάβρωσης δεν οδήγησε σε αύξηση της αντίστασης πόλωσης. Μετά τις 235 ημέρες φαίνεται ότι τα

δοκίμια με αναστολέα διάβρωσης εμφανίζουν υψηλότερες τιμές αντίστασης πόλωσης από αυτά χωρίς αναστολέα, αλλά αυτό θα πρέπει να επιβεβαιωθεί.

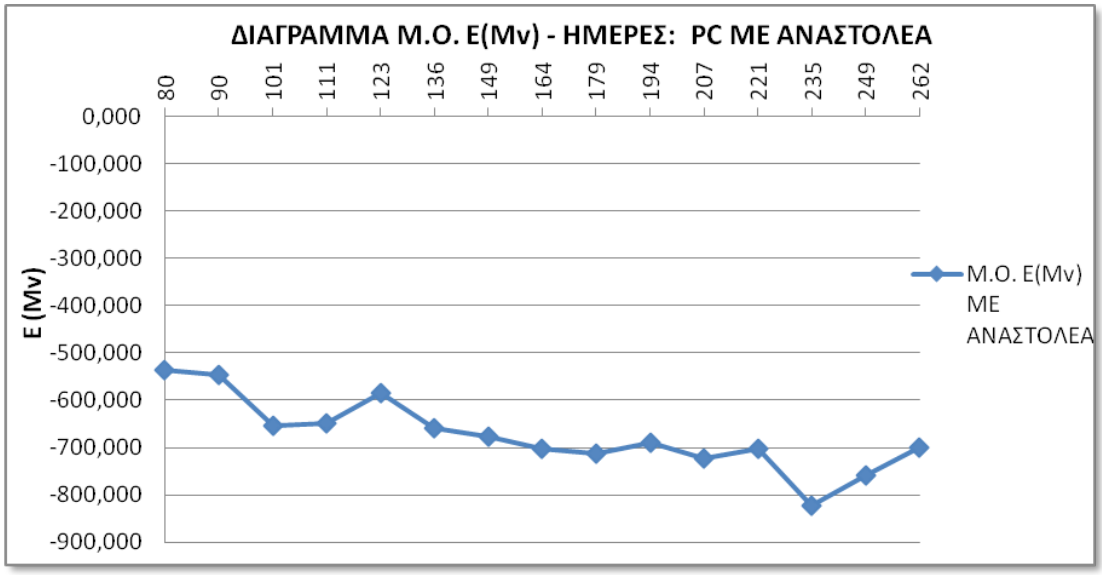
6.3.4. Δοκίμια PC



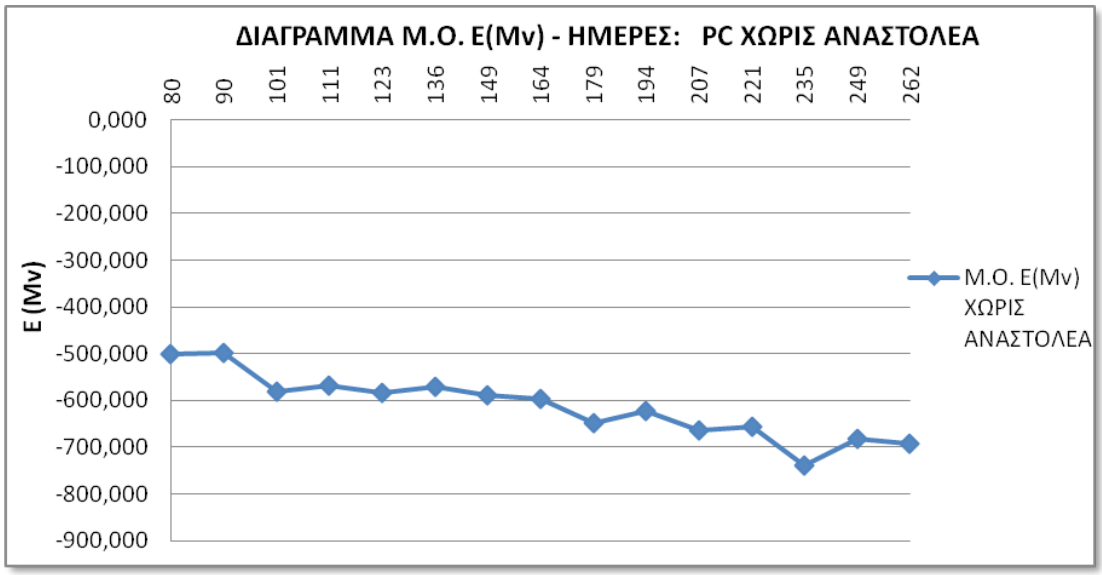
Διάγραμμα 25: Διάγραμμα Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου για PC με αναστολέα



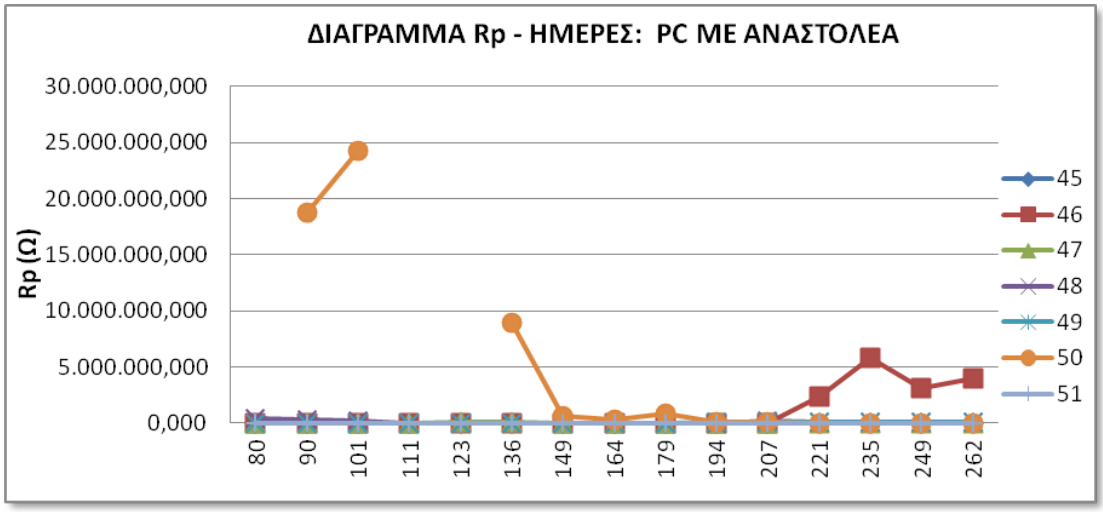
Διάγραμμα 26: Διάγραμμα Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου για PC χωρίς αναστολέα



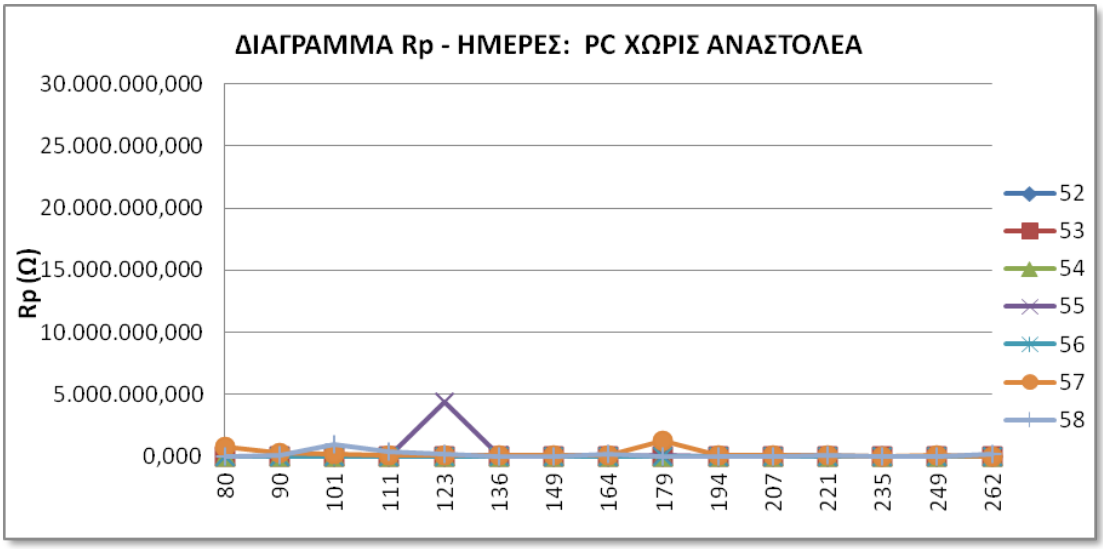
Διάγραμμα 27: Διάγραμμα Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου για PC με αναστολέα



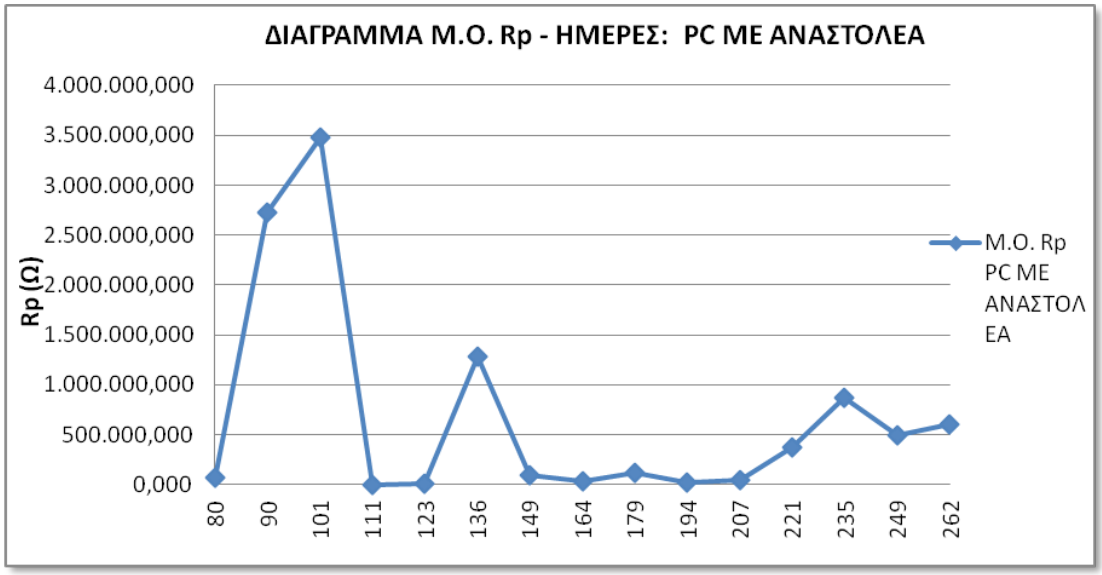
Διάγραμμα 28: Διάγραμμα Μ.Ο. Δυναμικού Διάβρωσης – Χρόνου για PC χωρίς αναστολέα



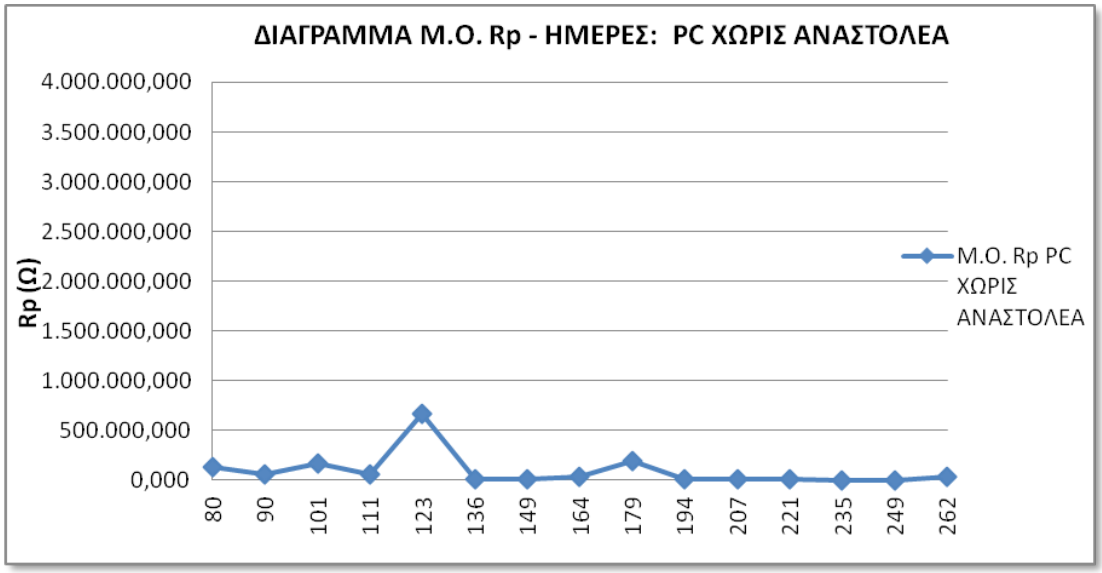
Διάγραμμα 29: Διάγραμμα Αντίστασης – Χρόνου για PC με αναστολέα



Διάγραμμα 30: Διάγραμμα Αντίστασης – Χρόνου για PC χωρίς αναστολέα



Διάγραμμα 31: Διάγραμμα Μ.Ο. Αντίστασης – Χρόνου για PC με αναστολέα



Διάγραμμα 32: Διάγραμμα Μ.Ο. Αντίστασης – Χρόνου για PC χωρίς αναστολέα

<u>Τέταρτο μερικό συμπέρασμα</u>

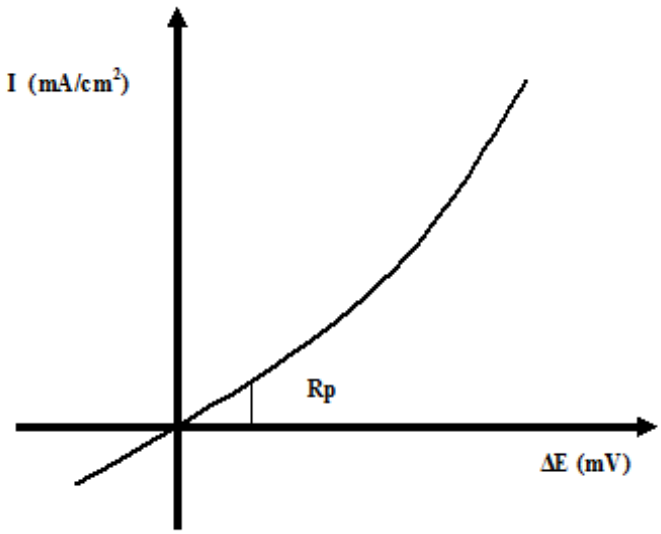
Από την πορεία του δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου προκύπτει ότι ο ψεκασμός με αναστολέα διάβρωσης δεν οδήγησε σε ηλεκτροθετικότερες τιμές το δυναμικό. Στην περίπτωση της μεταβολής της αντίστασης πόλωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο προκύπτει ότι αρχικά ο ψεκασμός με αναστολέα διάβρωσης οδήγησε σε αύξηση της αντίστασης πόλωσης. Όμως μετά από 30 ημέρες οι αντιστάσεις πόλωσης κατέβηκαν στο επίπεδο των δοκιμίων που δεν έχουν ψεκαστεί με αναστολέα

διάβρωσης. Από τις 221 ημέρες όμως και μετά η αντίσταση πόλωσης των δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης αυξήθηκε πάνω από την τιμή της αντίστασης χωρίς αναστολέα.

6.4. Ηλεκτροχημική Απώλεια μάζας

6.4.1. Υπολογισμός του ρεύματος διάβρωσης

Η κλίση της καμπύλης στην αρχή των αξόνων, δηλαδή για E = Ecorr , ονομάζεται αντίσταση πόλωσης **Rp** (βλ. Σχήμα 16), και δίδεται από τη σχέση:



Σχήμα 16: Καμπύλη συσχέτισης της έντασης του ρεύματος I προς το δυναμικό V

$$Rp = \frac{1}{Icorr} * \frac{(b\alpha * bc)}{(b\alpha + bc)} = \frac{B}{Icorr}$$

Όπου bα, bc, οι κλίσεις των ευθειών Tafel.

Κατόπιν υπολογίζεται το «ρεύμα διάβρωσης » του χάλυβα, Icorr από τη σχέση :

Icorr = B / Rp (1)

Η σταθερά Β εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος (το είδος του τσιμέντου, το λόγο Ν/Τ, τη συντήρηση του σκυροδέματος και την κατάσταση του οπλισμού). Αναφέρονται οι τιμές Β=52 mV για χάλυβα που ευρίσκεται στην παθητική κατάσταση (περιοχή δυναμικών μεταξύ Ep και ETP) και Β=26 mV για χάλυβα στην ενεργή κατάσταση (δυναμικά ηλεκτροθετικότερα του ETP ή ηλεκτραρνητικότερα του EP).
Ανάλογα όμως με το είδος του σκυροδέματος, οι τιμές της σταθεράς Β διαφέρουν από τις προαναφερθείσες τιμές, συνήθως δε κυμαίνονται από 13 έως 52 mV.

Ο επακριβής προσδιορισμός της σταθεράς Β 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 icorr υπολογίστηκαν θεωρώντας ότι ο χάλυβας ήταν στην ενεργή κατάσταση, δηλαδή για Β = 26 mV.

Για κάθε ομάδα δοκιμίων υπολογίζεται το Icorr. Οι τιμές του Icorr φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 40: Ρεύμα διάβρωσης Icorr για τα Ref CEM I με αναστολέα διάβρωσης

Ομάδα δοκιμίων	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)							
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl							
		80	90	101	111	123	136	149	164
Ref CEM I με αναστολέα διάβρωσης	1	0,0000000126	0,0000000231	0,0000000035	0,0000000360	0,0000000033	0,0000000094	0,0000000022	0,0000000033
	2	0,0000001839	0,0000001039	0,0000000981	0,0000001051	0,0000000947	0,0000001006	0,0000000741	0,0000000839
	3	0,0000019096	0,0000024719	0,0000051353	0,0000028520	0,0000029644	0,0000028043	0,0000027666	0,0000034042
	4	0,0000066123	0,0000143105	0,0000143784	0,0000113376	0,0000008404	0,0000099585	0,0000077058	0,0000116546
	5	0,0000505275	0,0000432585	0,0000364629	0,0000427445	0,0000392624	0,0000293864	0,0000192558	0,0000380903
	6	0,0001399437	0,0000997587	0,0000720068	0,0000938733	0,0000871194	0,0000643741	0,0000541444	0,0000715889
	7	0,0000000230	0,0000000159	0,0000000239	0,0000000106	0,0000000095	0,0000000087	0,0000000078	0,0000000076
Μ.Ο.		**0,0000284590**	**0,0000228489**	**0,0000183013**	**0,0000215656**	**0,0000186134**	**0,0000152346**	**0,0000119938**	**0,0000178333**

Ομάδα δοκιμίων	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)						
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl						
		179	194	207	221	235	249	262
Ref CEM I με αναστολέα διάβρωσης	1	0,0000000005	0,0000000020	0,0000000016	0,0000000046	0,0000000175	0,0000000013	0,0000000021
	2	0,0000000777	0,0000000804	0,0000000753	0,0000000771	0,0000000816	0,0000001424	0,0000000878
	3	0,0000009913	0,0000042228	0,0000051661	0,0000042085	0,0000037957	0,0000046840	0,0000000940
	4	0,0000146538	0,0000078951	0,0000151268	0,0000159623	0,0000000349	0,0000000344	0,0000000395
	5	0,0000190437	0,0000223448	0,0000340365	0,0000305777	0,0000245303	0,0000223597	0,0000281913
	6	0,0000066917	0,0000683509	0,0000769347	0,0000218667	0,0000081274	0,0000100461	0,0000113141
	7	0,0000000001	0,0000000146	0,0000000160	0,0000000382	0,0000000460	0,0000000513	0,0000000411
Μ.Ο.		**0,0000059227**	**0,0000147015**	**0,0000187653**	**0,0000103907**	**0,0000052333**	**0,0000053313**	**0,0000056814**

Πίνακας 41: Ρεύμα διάβρωσης Icorr για τα Ref CEM I χωρίς αναστολέα διάβρωσης

ΟμάδαδοκιμίωνΟμάδα	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)							
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl							
		80	90	101	111	123	136	149	164
Ref CEM I χωρίς αναστολέα διάβρωσης	8	0,0000320894	0,0000400147	0,0000370434	0,0000432838	0,0000340050	0,0000000549	0,0000121140	0,0000000665
	9	0,0000000039	0,0000000007	0,0000000003		0,0000000055			
	10	0,0000000088	0,0000000095	0,0000000050	0,0000000038	0,0000000060	0,0000000045	0,0000003486	0,0000000807
	11	0,0000000263	0,0000000126	0,0000000104	0,0000000200	0,0000000258	0,0000000223	0,0000000196	0,0000000190
	12	0,0000575737	0,0000384643	0,0000284936	0,0000595227	0,0000473298	0,0000172600	0,0000215683	0,0000295986
	13	0,0000194240	0,0000166252	0,0000146020	0,0000077938	0,0000000026		0,0000000004	0,0000000006
	14	0,0000466486	0,0000438573	0,0000312094	0,0000459789	0,0000415460	0,0000326053	0,0000104236	0,0000031702
	15							0,0000000003	
	16	0,0000000002	0,0000000030	0,0000000051		0,0000000062	0,0000000039	0,0000000032	0,0000000070
Μ.Ο.		**0,0000194719**	**0,0000173734**	**0,0000139211**	**0,0000261005**	**0,0000153659**	**0,0000083252**	**0,0000055598**	**0,0000047061**

ΟμάδαδοκιμίωνΟμάδα	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)						
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl						
		179	194	207	221	235	249	262
Ref CEM I χωρίς αναστολέα διάβρωσης	8	0,0000030663	0,0000241692	0,0000130155	0,0000138662	0,0000155330	0,0000143566	0,0000135479
	9			0,0000000000	0,0000000097	0,0000000036	0,0000000028	0,0000000021
	10	0,0000001459	0,0000002505	0,0000001786	0,0000001650	0,0000000728	0,0000000774	0,0000001297
	11	0,0000000227	0,0000000121	0,0000000302	0,0000000067	0,0000000091	0,0000000361	0,0000004344
	12	0,0000140640	0,0000389736	0,0000391898	0,0000399649	0,0000253293	0,0000241044	0,0000245655
	13	0,0000000002	0,0000000003	0,0000000005	0,0000000000	0,0000000003		0,0000000004
	14	0,0000005740	0,0000013521	0,0000011893	0,0000012938	0,0000018097	0,0000021169	0,0000023916
	15		0,0000000003			0,0000000029	0,0000000000	
	16	0,0000000007	0,0000020854	0,0000242127	0,0000277065	0,0000060474	0,0000178558	0,0000189499
Μ.Ο.		**0,0000025534**	**0,0000083554**	**0,0000097271**	**0,0000103766**	**0,0000054231**	**0,0000073188**	**0,0000075027**

Πίνακας 42: Ρεύμα διάβρωσης Icorr για τα LC 1 με αναστολέα διάβρωσης

ΔοκιμίωνΟμάδα	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)							
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl							
		80	90	101	111	123	136	149	164
LC 1 με αναστολέα διάβρωσης	17	0,00004504	0,00004303	0,00004602	0,00004461	0,00004192	0,00003828	0,00001999	0,00000001
	18	0,00003351	0,00003912	0,00003564		0,00000427	0,00000341	0,00000527	0,00000525
	19	0,00003194	0,00002863	0,00003459	0,00004584	0,00003468	0,00003678	0,00002341	0,00004322
	20	0,00004521	0,00006790	0,00005772	0,00007689	0,00007092	0,00005469	0,00001589	0,00002760
	21	0,00000012	0,00000006	0,00000005	0,00000015	0,00002010	0,00002521	0,00000010	0,00000022
	22	0,00003534	0,00005323	0,00004068	0,00005893	0,00005861	0,00005164	0,00003860	0,00007909
	23	0,00004953	0,00007100	0,00006058	0,00008306	0,00007543	0,00007570	0,00003199	0,00008422
Μ.Ο.		**0,00003438**	**0,00004328**	**0,00003933**	**0,00005158**	**0,00004371**	**0,00004081**	**0,00001932**	**0,00003423**

ΔοκιμίωνΟμάδα	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)						
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl						
		179	194	207	221	235	249	262
LC 1 με αναστολέα διάβρωσης	17	0,00000004	0,00000002	0,00000001	0,00000002	0,00000001	0,00000001	0,00000000
	18	0,00000034	0,00000583	0,00002924	0,00002522	0,00002295	0,00002386	0,00002297
	19	0,00001018	0,00004980	0,00003782	0,00000004	0,00000001	0,00003312	0,00002346
	20	0,00000985	0,00001647	0,00003063	0,00002841	0,00000015	0,00000015	0,00000032
	21	0,00000008	0,00003501	0,00005426	0,00000009	0,00000009	0,00000046	0,00000010
	22	0,00000420	0,00003751	0,00004567	0,00004531	0,00003437	0,00003216	0,00005324
	23	0,00000740	0,00004631	0,00006177	0,00006189	0,00000304	0,00004613	0,00000002
Μ.Ο.		**0,00000458**	**0,00002728**	**0,00003706**	**0,00002300**	**0,00000866**	**0,00001941**	**0,00001430**

Πίνακας 43: Ρεύμα διάβρωσης Icorr για τα LC 1 χωρίς αναστολέα διάβρωσης

Ομάδα δοκιμίων	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)							
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl							
		80	90	101	111	123	136	149	164
LC 1 χωρίς αναστολέα διάβρωσης	24	0,00003661	0,00004962	0,00004263	0,00006920	0,00006086	0,00005296	0,00002812	0,00007098
	25	0,00000001			0,00000001	0,00000001	0,00000002	0,00000002	0,00000004
	26								
	27	0,00003985	0,00005855	0,00004389	0,00005692	0,00005722	0,00006493	0,00002969	0,00005364
	28	0,00000504	0,00002233	0,00001943	0,00003110	0,00002719	0,00002271	0,00001848	0,00002597
	29	0,00000001	0,00000002	0,00000007		0,00000015	0,00000020	0,00000021	0,00003533
	30	0,00004634	0,00006573	0,00005102	0,00006248	0,00005705	0,00006193	0,00003042	0,00006210
Μ.Ο.		**0,00002131**	**0,00003925**	**0,00003141**	**0,00004394**	**0,00003375**	**0,00003379**	**0,00001782**	**0,00004134**

Ομάδα δοκιμίων	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)						
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl						
		179	194	207	221	235	249	262
LC 1 χωρίς αναστολέα διάβρωσης	24	0,00000585	0,00006799	0,00007163	0,00007345	0,00006606	0,00006282	0,00007872
	25	0,00000005	0,00000007	0,00000008	0,00000010	0,00000013	0,00000013	0,00000018
	26							
	27	0,00000228	0,00003528	0,00004371	0,00004226	0,00003541	0,00003298	0,00004861
	28	0,00001092	0,00000001	0,00000002	0,00000001	0,00000004	0,00002890	0,00004053
	29	0,00000192	0,00001985	0,00000364	0,00000564	0,00000086	0,00000072	0,00000291
	30	0,00001574	0,00003989	0,00005532	0,00005318	0,00005469	0,00003493	0,00006861
Μ.Ο.		**0,00000613**	**0,00002718**	**0,00002907**	**0,00002911**	**0,00002620**	**0,00002675**	**0,00003993**

Πίνακας 44: Ρεύμα διάβρωσης Icorr για τα LC 2 με αναστολέα διάβρωσης

ΟμάδαδοκιμίωνLC 2 με αναστολέα διάβρωσης	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)							
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl							
		80	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**
	31	0,00003460	0,00002695	0,00003529	0,00006040	0,00007663	0,00003403	0,00004342	0,00006729
	32	0,00000000	0,00000001	0,00001640	0,00000002	0,00000008	0,00000019	0,00000044	0,00003841
	33	0,00004170	0,00004520	0,00003826	0,00005709	0,00006146	0,00004172	0,00003634	0,00007338
	34	0,00000004	0,00000013	0,00000011	0,00000013	0,00000002	0,00000004	0,00003565	0,00006970
	35	0,00002352	0,00000026	0,00000021	0,00000031	0,00000016	0,00000018	0,00000008	0,00000012
	36	0,00000201	0,00000299	0,00000345	0,00000179	0,00000204	0,00000191	0,00000138	0,00000011
	37	0,00003240	0,00003169	0,00003308	0,00004903	0,00006121	0,00003137	0,00004321	0,00006329
Μ.Ο.		**0,00001918**	**0,00001532**	**0,00001811**	**0,00002411**	**0,00002880**	**0,00001563**	**0,00002293**	**0,00004462**

ΟμάδαδοκιμίωνLC 2 με αναστολέα διάβρωσης	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)						
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl						
		179	**194**	**207**	**221**	**235**	**249**	**262**
	31	0,00000751	0,00008235	0,00008661	0,00009935	0,00007718	0,00009651	0,00000106
	32	0,00000102	0,00005179	0,00000015	0,00000013	0,00000011	0,00000005	0,00000004
	33	0,00001106	0,00006922	0,00009467	0,00009978	0,00007620	0,00006849	0,00006494
	34	0,00000500	0,00007920	0,00008517	0,00008120	0,00005521	0,00006726	0,00005642
	35	0,00000000	0,00004468	0,00002398	0,00000009	0,00000989	0,00007318	0,00003589
	36	0,00000005	0,00000024	0,00000021	0,00004717	0,00003920	0,00003802	0,00000018
	37	0,00001052	0,00007530	0,00009411	0,00009393	0,00007930	0,00008232	0,00008541
Μ.Ο.		**0,00000502**	**0,00005754**	**0,00005499**	**0,00006024**	**0,00004816**	**0,00006083**	**0,00003485**

Πίνακας 45: Ρεύμα διάβρωσης Icorr για τα LC 2 χωρίς αναστολέα διάβρωσης

Ομάδα δοκιμίων διάβρωσης LC 2 χωρίς αναστολέα	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)							
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl							
		80	90	101	111	123	136	149	164
	38	0,00003169	0,00003253	0,00003673	0,00005959	0,00006277	0,00005283	0,00005038	0,00007421
	39	0,00000052	0,00000056	0,00000076	0,00000106	0,00000165	0,00000244	0,00000306	0,00000517
	40	0,00003795	0,00004428	0,00004590	0,00006665	0,00005396	0,00004976	0,00005539	0,00000382
	41	0,00004573	0,00010349	0,00006847	0,00009388	0,00001250	0,00004441	0,00004183	0,00006311
	42	0,00000001	0,00001461	0,00001337	0,00003616	0,00003660	0,00003263	0,00002461	0,00000017
	43	0,00004469	0,00000006	0,00000020	0,00006365	0,00005521	0,00004819	0,00005024	0,00006880
	44	0,00000499	0,00000884	0,00000888	0,00000954	0,00001521	0,00001363	0,00001310	0,00001579
Μ.Ο.		**0,00002365**	**0,00002919**	**0,00002490**	**0,00004722**	**0,00003399**	**0,00003484**	**0,00003409**	**0,00003301**

Ομάδα δοκιμίων διάβρωσης LC 2 χωρίς αναστολέα	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)						
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl						
		179	194	207	221	235	249	262
	38	0,00000001	0,00000023	0,00000069	0,00000095	0,00000106	0,00000028	0,00000037
	39	0,00000181	0,00000787	0,00000866	0,00000999	0,00001149	0,00001164	0,00001674
	40	0,00000089	0,00000407	0,00000412	0,00000460	0,00000415	0,00000415	0,00007293
	41	0,00000049	0,00005600	0,00004686	0,00001522	0,00001371	0,00001478	0,00000026
	42	0,00000312	0,00005022	0,00005302	0,00000008	0,00005144	0,00005108	0,00000014
	43	0,00000182	0,00006574	0,00008833	0,00007317	0,00000157	0,00000172	0,00000216
	44	0,00000361	0,00002349	0,00001550	0,00002865	0,00002702	0,00002814	0,00002849
Μ.Ο.		**0,00000168**	**0,00002966**	**0,00003102**	**0,00001895**	**0,00001578**	**0,00001597**	**0,00001730**

Πίνακας 46: Ρεύμα διάβρωσης Icorr για τα PC με αναστολέα διάβρωσης

ΔοκιμίωνΟμάδα	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)							
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl							
		80	90	101	111	123	136	149	164
PC με αναστολέα διάβρωσης	45	0,00004571	0,00005301	0,00004329	0,00005772	0,00005962	0,00005932	0,00002228	0,00005619
	46	0,00004566	0,00006019	0,00005112	0,00007367	0,00006491	0,00006818	0,00005302	0,00008425
	47	0,00003178	0,00003213	0,00003771	0,00004417	0,00000042	0,00000060	0,00003455	0,00005973
	48	0,00000006	0,00000010	0,00000018	0,00001154	0,00001299	0,00000900	0,00001013	0,00003377
	49	0,00003083	0,00004415	0,00004154	0,00005399	0,00004175	0,00004213	0,00004423	0,00005580
	50		0,00000000	0,00000000			0,00000000	0,00000004	0,00000010
	51	0,00003345	0,00003554	0,00003808	0,00004272	0,00003943	0,00003495	0,00002793	0,00003886
Μ.Ο.		**0,00003125**	**0,00003216**	**0,00003027**	**0,00004730**	**0,00003652**	**0,00003060**	**0,00002746**	**0,00004696**

ΔοκιμίωνΟμάδα	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)						
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl						
		179	194	207	221	235	249	262
PC με αναστολέα διάβρωσης	45	0,00001394	0,00003149	0,00004326	0,00004357	0,00003663	0,00004105	0,00005023
	46	0,00005085	0,00003679	0,00005864	0,00000001	0,00000000	0,00000001	0,00000001
	47	0,00001215	0,00005567	0,00005646	0,00006194	0,00000128	0,00000110	0,00000117
	48	0,00000360	0,00002078	0,00000018	0,00000022	0,00000023	0,00000024	0,00000029
	49	0,00001545	0,00000020	0,00000020	0,00000022	0,00000023	0,00000022	0,00000023
	50	0,00000003	0,00000056	0,00000064	0,00000079	0,00000092	0,00000100	0,00000115
	51	0,00000941	0,00003241	0,00005677	0,00006305	0,00000209	0,00000232	0,00000123
Μ.Ο.		**0,00001506**	**0,00002541**	**0,00003088**	**0,00002426**	**0,00000591**	**0,00000656**	**0,00000776**

Πίνακας 47: Ρεύμα διάβρωσης Icorr για τα PCχωρίς αναστολέα διάβρωσης

Ομάδα δοκιμίων	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)							
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl							
		80	90	101	111	123	136	149	164
PC χωρίς αναστολέα διάβρωσης	52			0,00000540	0,00004990	0,00005415	0,00005277	0,00005222	0,00005537
	53	0,00004190	0,00004851	0,00003936	0,00004797	0,00005509	0,00003860	0,00003807	0,00005195
	54	0,00004368	0,00004381	0,00003890	0,00005277	0,00005225	0,00004862	0,00002366	0,00003798
	55	0,00002521	0,00002407	0,00003255	0,00000589	0,00000001	0,00000083	0,00000100	0,00000100
	56	0,00003453	0,00004624	0,00003537	0,00004526	0,00004578	0,00004666	0,00002933	0,00003286
	57	0,00000003	0,00000008	0,00000012	0,00000029	0,00000042	0,00000049	0,00000050	0,00000060
	58	0,00003895	0,00000078	0,00000003	0,00000008	0,00000012	0,00000335	0,00000396	0,00000017
Μ.Ο.		**0,00003072**	**0,00002725**	**0,00002167**	**0,00002888**	**0,00002969**	**0,00002733**	**0,00002125**	**0,00002571**

Ομάδα δοκιμίων	Αρ. Δοκ.	Icorr (A)						
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl						
		179	194	207	221	235	249	262
PC χωρίς αναστολέα διάβρωσης	52	0,00000857	0,00005595	0,00006963	0,00006128	0,00005926	0,00005528	0,00005963
	53	0,00001902	0,00005316	0,00004803	0,00005337	0,00005116	0,00006491	0,00005002
	54	0,00002025	0,00003646	0,00004630	0,00004264	0,00003825	0,00003803	0,00004703
	55	0,00000037	0,00004402	0,00005504	0,00001804	0,00001358	0,00001434	0,00001266
	56	0,00000139	0,00002948	0,00003302	0,00004202	0,00003951	0,00003580	0,00004912
	57	0,00000002	0,00000069	0,00000061	0,00000075	0,00000090	0,00000078	0,00000098
	58	0,00000277	0,00003373	0,00003476	0,00000031	0,00003264	0,00003282	0,00000013
Μ.Ο.		**0,00000748**	**0,00003621**	**0,00004106**	**0,00003120**	**0,00003361**	**0,00003456**	**0,00003137**

6.4.2. Υπολογισμός της απώλειας μάζας

Για τον προσδιορισμό της απώλειας μάζας ισχύει:

$$\beta = \frac{I * M * t}{n_e * F}$$

Όπου: β είναι η απώλεια μάζας του οπλισμού (g)

I το ρεύμα διάβρωσης Icorr

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

t ο χρόνος έκθεσης των δοκιμίων (s)

n_e είναι η ανταλλαγή ιόντων (= 2 για $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$)

F η σταθερά Farraday 96.500 (A* s)

Από την επεξεργασία των μετρήσεων για τον μέσο όρο των icorr για κάθε ομάδα δοκιμίων προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 47.

Πίνακας 48: Υπολογισμός απώλειας μάζας

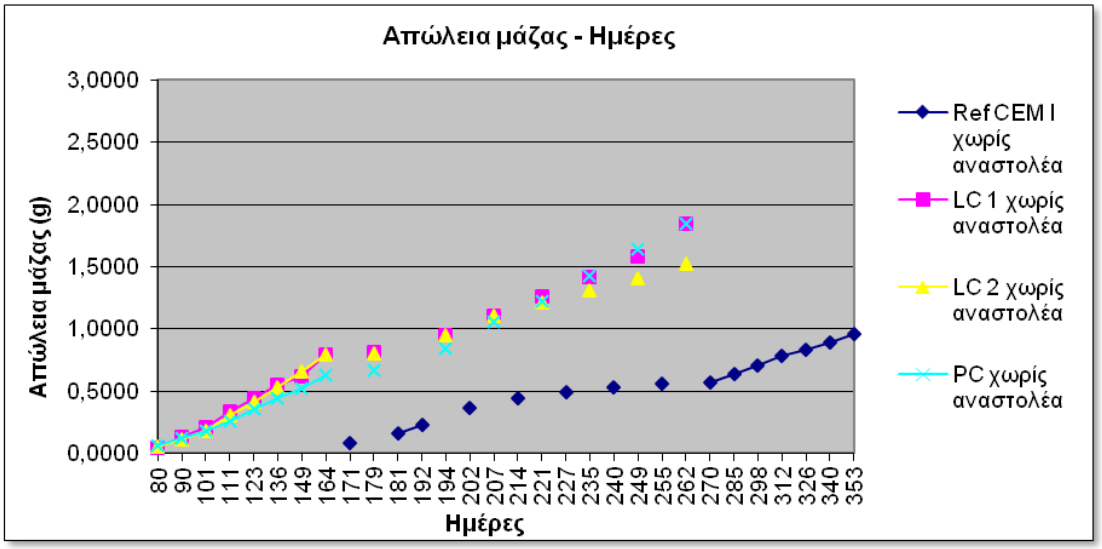
Ομάδα δοκιμίων	**Αρ. Δοκ.**	**Απώλεια μάζας β (g)**									
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl									
		80	**90**	**101**	**111**	**123**	**136**	**149**	**164**	**171**	**179**
M.O. Ref CEM I με αναστολέα	**1-7**									0,1220	
M.O. Ref CEM I χωρίς αναστολέα	**8-16**									0,0835	
M.O. LC 1 με αναστολέα	**17-23**	0,0690	0,1666	0,2662	0,4097	0,5445	0,6836	0,7558	0,8966		0,9171
M.O. LC 1 χωρίς αναστολέα	**24-30**	0,0427	0,1313	0,2108	0,3331	0,4372	0,5524	0,6190	0,7889		0,8164
M.O. LC 2 με αναστολέα	**31-37**	0,0385	0,0730	0,1189	0,1860	0,2748	0,3281	0,4137	0,5972		0,6197
M.O. LC 2 χωρίς αναστολέα	**38-44**	0,0474	0,1133	0,1764	0,3078	0,4126	0,5313	0,6587	0,7944		0,8019
M.O. PC με αναστολέα	**45-51**	0,0627	0,1352	0,2119	0,3435	0,4561	0,5604	0,6630	0,8561		0,9236
M.O. PC χωρίς αναστολέα	**52-58**	0,0616	0,1231	0,1780	0,2583	0,3499	0,4431	0,5224	0,6281		0,6617

Ομάδα δοκιμίων	Αρ. Δοκ.	Απώλεια μάζας β (g)									
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl									
		181	192	194	202	207	214	221	227	235	240
Μ.Ο. Ref CEM I με αναστολέα	**1-7**	0,2257	0,3138		0,4230		0,5228		0,6095		0,6817
Μ.Ο. Ref CEM I χωρίς αναστολέα	**8-16**	0,1623	0,2293		0,3615		0,4439		0,4913		0,5248
Μ.Ο. LC 1 με αναστολέα	**17-23**			1,0498		1,2421		1,3695		1,4205	
Μ.Ο. LC 1 χωρίς αναστολέα	**24-30**			0,9486		1,0995		1,2607		1,4151	
Μ.Ο. LC 2 με αναστολέα	**31-37**			0,8995		1,1849		1,5186		1,8023	
Μ.Ο. LC 2 χωρίς αναστολέα	**38-44**			0,9462		1,1072		1,2122		1,3051	
Μ.Ο. PC με αναστολέα	**45-51**			1,0472		1,2075		1,3419		1,3767	
Μ.Ο. PC χωρίς αναστολέα	**52-58**			0,8378		1,0509		1,2237		1,4218	

Ομάδα δοκιμίων	Αρ. Δοκ.	Απώλεια μάζας β (g)									
		Ημέρες παραμονής στο διάλυμα NaCl									
		249	255	262	270	285	298	312	326	340	353
Μ.Ο. Ref CEM I με αναστολέα	**1-7**		0,7957		0,8358	0,9408	1,0810	1,1623	1,2051	1,2505	1,3008
Μ.Ο. Ref CEM I χωρίς αναστολέα	**8-16**		0,5548		0,5721	0,6318	0,7045	0,7856	0,8300	0,8923	0,9587
Μ.Ο. LC 1 με αναστολέα	**17-23**	1,5417		1,6357							
Μ.Ο. LC 1 χωρίς αναστολέα	**24-30**	1,5820		1,8443							
Μ.Ο. LC 2 με αναστολέα	**31-37**	2,1821		2,4110							
Μ.Ο. LC 2 χωρίς αναστολέα	**38-44**	1,4048		1,5184							
Μ.Ο. PC με αναστολέα	**45-51**	1,4177		1,4686							
Μ.Ο. PC χωρίς αναστολέα	**52-58**	1,6375		1,8436							

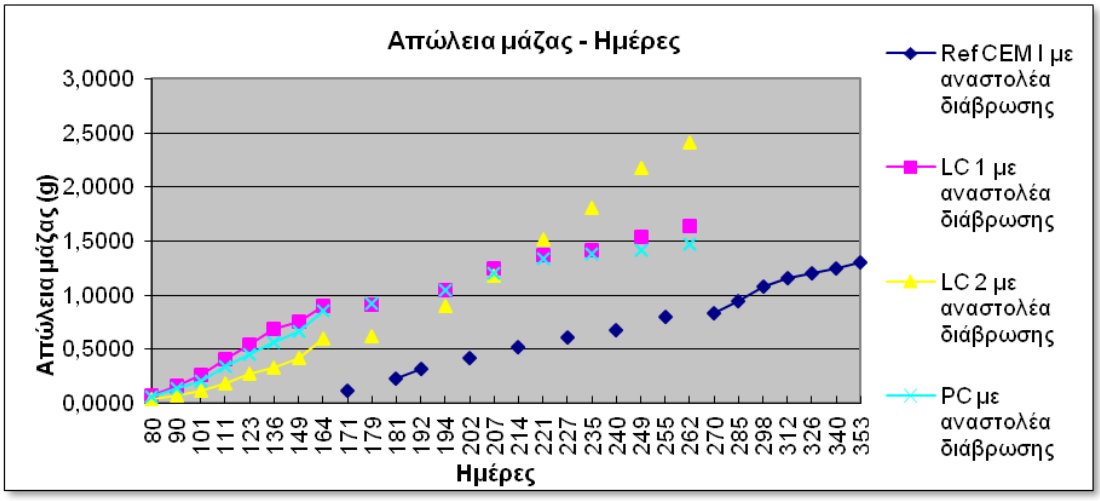
Προκειμένου να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα για την ανθεκτικότητα των κονιαμάτων για κάθε ομάδα δοκιμίων (μέσος όρος), τα αποτελέσματα της απώλειας μάζας παριστάνονται γραφικά σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Στο πρώτο διάγραμμα (διάγραμμα 32) απεικονίζεται η απώλεια μάζας σε συνάρτηση με το χρόνο για τα δοκίμια αναφοράς και τους άλλους τύπους δοκιμίων τα οποία δεν έχουν ψεκαστεί με αναστολέα διάβρωσης.



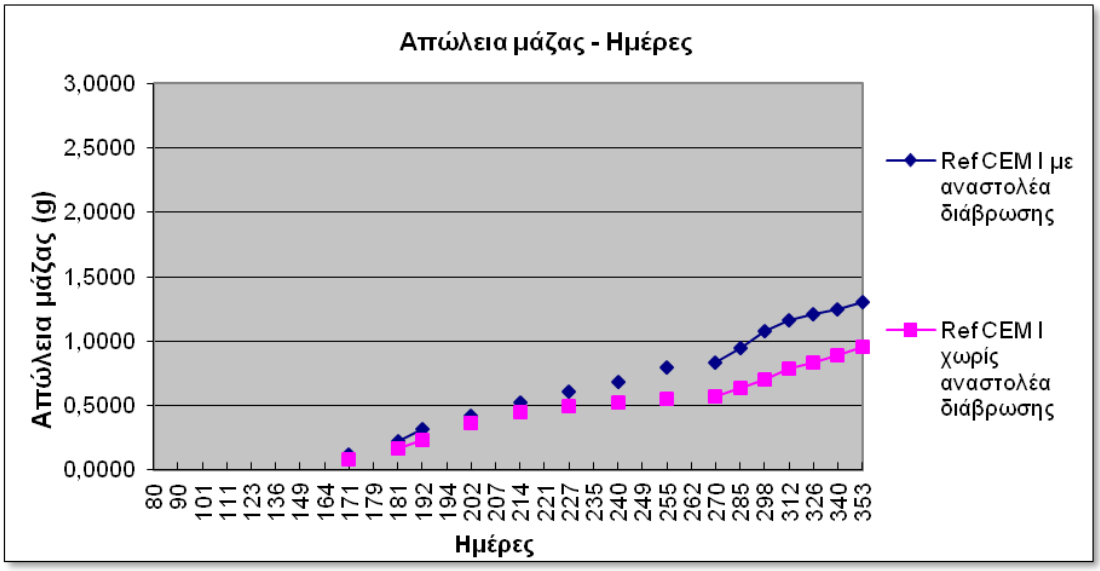
Διάγραμμα 32: Απώλεια μάζας – Ημέρες για Ref CEM I, LC1, LC2 και PC χωρίς αναστολέα διάβρωσης.

Στο επόμενο διάγραμμα (διάγραμμα 33) απεικονίζεται η απώλεια μάζας σε συνάρτηση με το χρόνο για τα δοκίμια αναφοράς και τους άλλους τύπους δοκιμίων τα οποία έχουν ψεκαστεί με αναστολέα διάβρωσης.

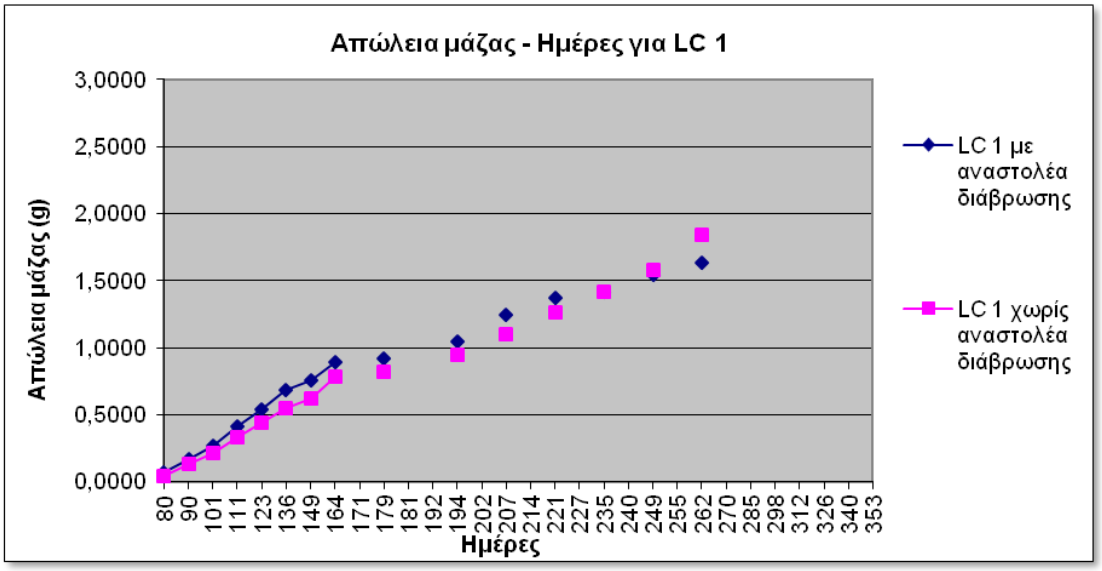


Διάγραμμα 33: Απώλεια μάζας – Ημέρες για Ref CEM I, LC1, LC2 και PC με αναστολέα διάβρωσης.

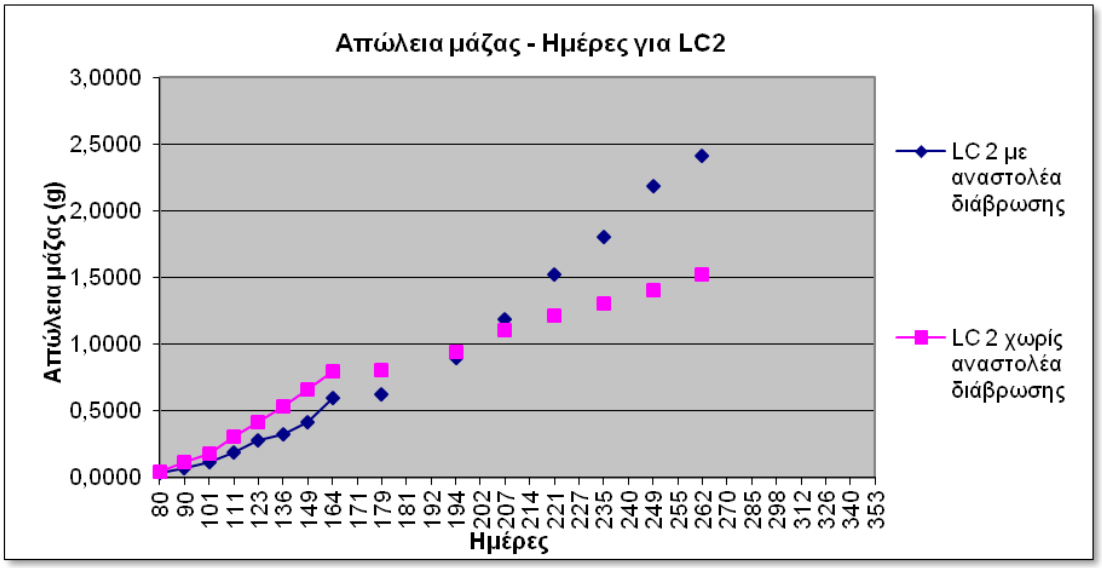
Στη συνέχεια παριστάνεται γραφικά η απώλεια μάζας σε συνάρτηση με τον χρόνο για κάθε ομάδα δοκιμίων, με αναστολέα διάβρωσης και χωρίς αναστολέα διάβρωσης.



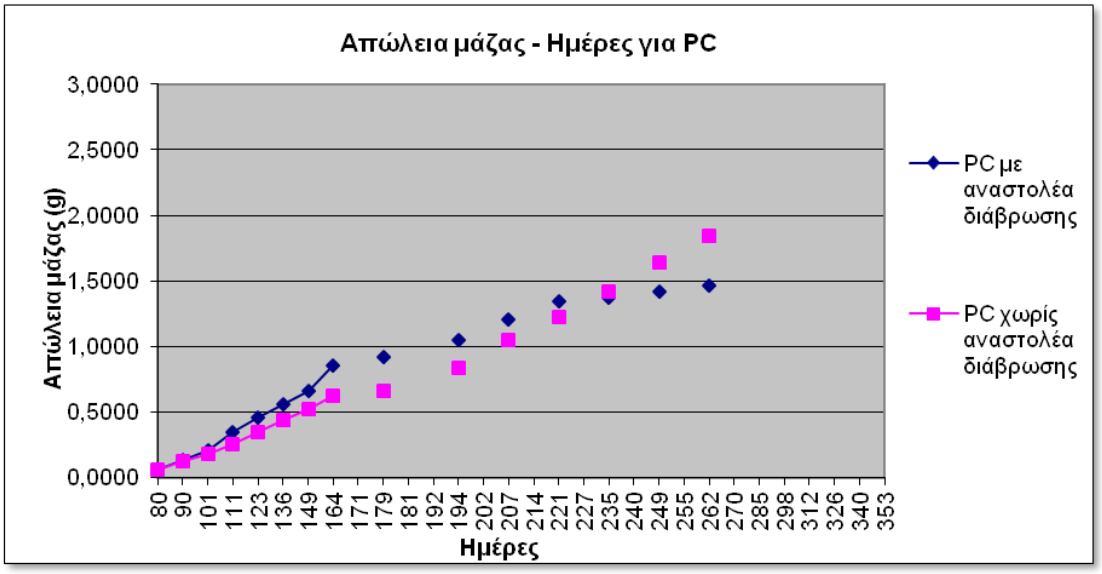
Διάγραμμα 34: Απώλεια μάζας – Ημέρες για Ref CEM I χωρίς αναστολέα διάβρωσης και με αναστολέα διάβρωσης



Διάγραμμα 35: Απώλεια μάζας – Ημέρες για LC1 χωρίς αναστολέα διάβρωσης και με αναστολέα διάβρωσης



Διάγραμμα 36: Απώλεια μάζας – Ημέρες για LC2 χωρίς αναστολέα διάβρωσης και με αναστολέα διάβρωσης



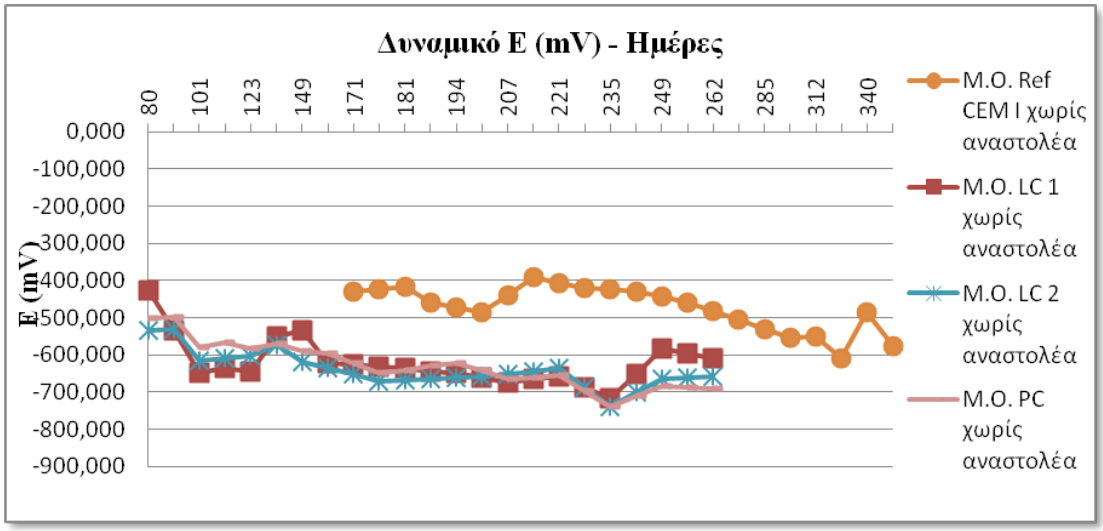
Διάγραμμα 37: Απώλεια μάζας – Ημέρες για PC χωρίς αναστολέα διάβρωσης και με αναστολέα διάβρωσης

Από την απώλεια μάζας, η οποία υπολογίστηκε με βάση το ρεύμα διάβρωσης, το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο με την αντίσταση πόλωσης, γενικά προκύπτει ότι ο ψεκασμός με αναστολέα διάβρωσης δεν οδήγησε σε μείωση της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας.

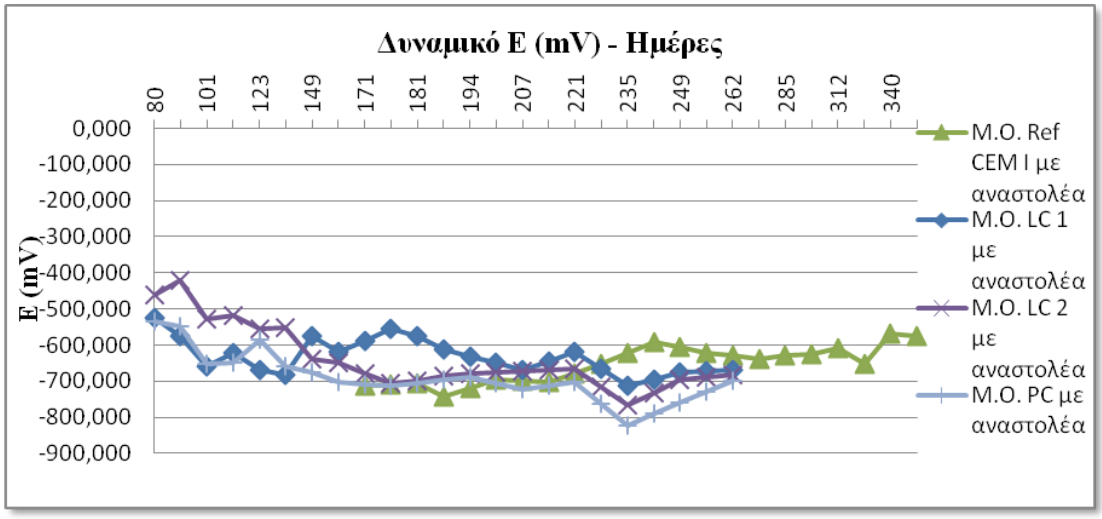
Όμως οι τελευταίες μετρήσεις, μετά τις 235 ημέρες, φαίνεται να δείχνουν μια καλυτέρευση της συμπεριφοράς σε διάβρωση των δοκιμίων που έχουν ψεκαστεί με αναστολέα διάβρωσης, αλλά αυτή η τάση απομένει να επαληθευτεί με μετρήσεις σε μεγαλύτερους χρόνους.

6.5. Συγκεντρωτικά διαγράμματα δυναμικού και αντίστασης πόλωσης

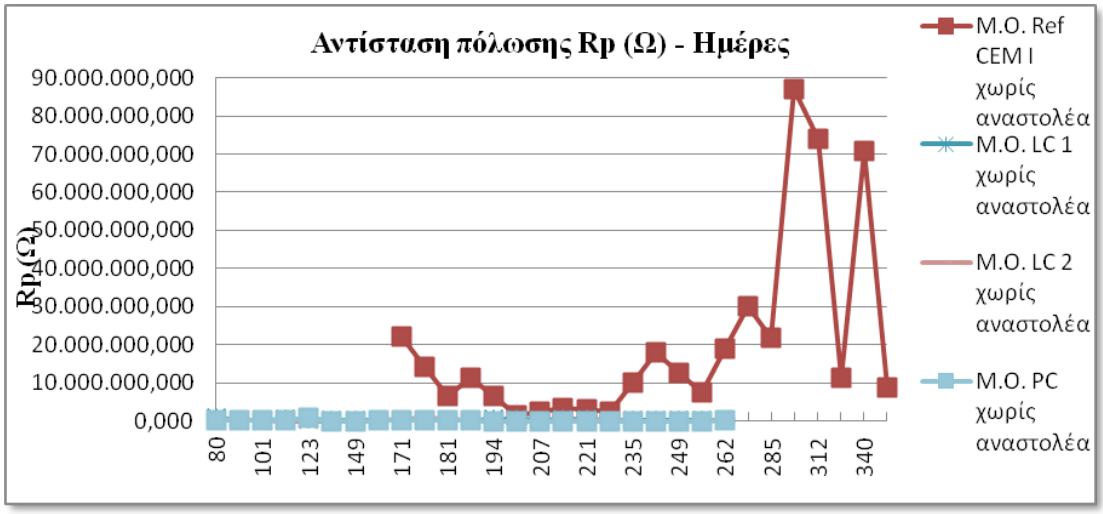
Από τις μετρήσεις των δυναμικών διάβρωσης και των αντιστάσεων πόλωσης προκύπτουν τα παρακάτω συγκεντρωτικά διαγράμματα για τα δοκίμια που έχουν ψεκαστεί με αναστολέα διάβρωσης και για τα δοκίμια χωρίς αναστολέα διάβρωσης.



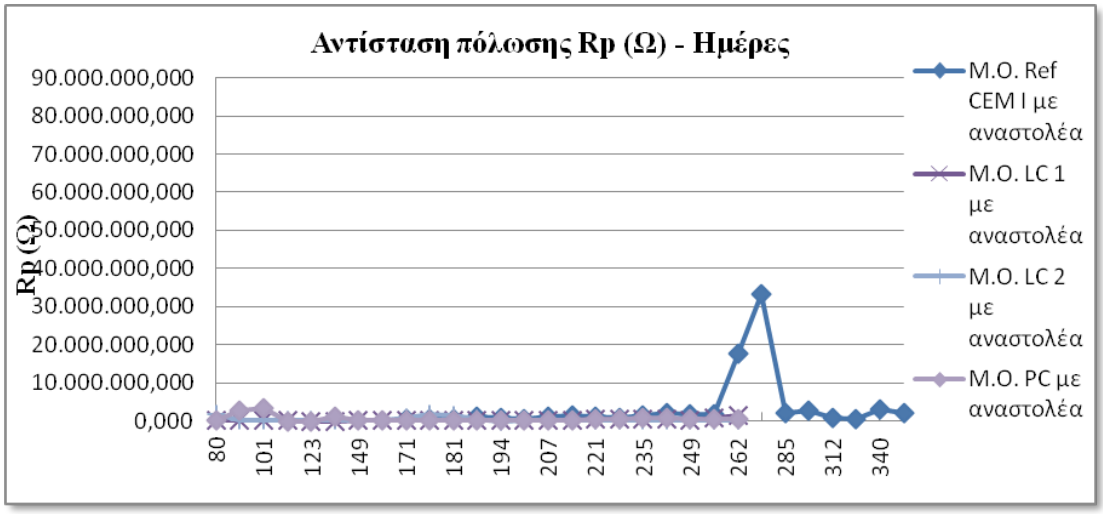
Διάγραμμα 38: Δυναμικό E(Mv) – Ημέρες για τα δοκίμια χωρίς αναστολέα



Διάγραμμα 39: Αντίσταση πόλωσης Rp (Ω) – Ημέρες για τα δοκίμια με αναστολέα



Διάγραμμα 40: Αντίσταση πόλωσης Rp (Ω) – Ημέρες για τα δοκίμια χωρίς αναστολέα



Διάγραμμα 41: Αντίσταση πόλωσης Rp (Ω) – Ημέρες για τα δοκίμια με αναστολέα

Από την πορεία του δυναμικού διάβρωσης προκύπτει ότι γενικά τα δυναμικά διάβρωσης με ψεκασμό δεν μετακινήθηκαν σε ηλεκτροθετικότερες τιμές από ότι τα δοκίμια χωρίς αναστολέα διάβρωσης. Τα ίδια ισχύουν και για τις μετρήσεις της αντίστασης πόλωσης με τον χρόνο.

6.6. Γενικά συμπεράσματα – Συζήτηση αποτελεσμάτων

Γενικά από τις μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου προκύπτει ότι:

- Τα δοκίμια με τσιμέντα CEM I παρουσιάζουν ηλεκτροθετικότερες τιμές από τα υπόλοιπα δοκίμια
- Τα υπόλοιπα δοκίμια έχουν περίπου όμοια συμπεριφορά.

Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν από το διάγραμμα της αντίστασης πόλωσης συναρτήσει του χρόνου.
Το γεγονός αυτό βέβαια αναμένεται δεδομένου ότι είναι γνωστό ότι:

- Η προσθήκη ποζολάνων οδηγεί σε αύξηση της αντίστασης προς διάβρωση
- Τα ασβεστολιθικά τσιμέντα έχουν μικρότερη αντίσταση σε διάβρωση από τα τσιμέντα τύπου CEM I.

Από τις μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης αλλά και από τις μετρήσεις της αντίστασης πόλωσης με τον χρόνο δεν προέκυψε γενικά βελτίωση της συμπεριφοράς σε διάβρωση με την χρήση του αναστολέα διάβρωσης. Το διάγραμμα της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας κάνει την συμπεριφορά αυτή πιο καθαρή.

Η έλλειψη καλυτέρευσης με την χρήση του αναστολέα διάβρωσης οφείλεται στον ανταγωνισμό μεταξύ των μορίων του αναστολέα διάβρωσης και των χλωριόντων στη ρόφηση επί της επιφάνειας του μετάλλου. Στον χρόνο που εξετάσθηκε (80 έως 353 ημέρες) τα μόρια του αναστολέα διάβρωσης δεν κατάφεραν να αντικαταστήσουν τα χλωριόντα στην επιφάνεια του μετάλλου. Από την άλλη πλευρά η προσθήκη αναστολέα διάβρωσης αυξάνει την αγωγιμότητα του σκυροδέματος σε μικρό ποσό.

Στις τελευταίες μετρήσεις (235 έως 353 ημέρες) εμφανίζεται μια διαφορά στη συμπεριφορά των δοκιμίων με αναστολέα διάβρωσης, που γενικά δείχνουν αύξηση της αντοχής σε διάβρωση. Στα πλαίσια όμως αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας δεν ήταν δυνατή η συνέχιση των μετρήσεων.

Επομένως ο βασικός σκοπός αύξησης της αντοχής σε διάβρωση των οπλισμών των ασβεστολιθικών τσιμέντων με αναστολείς διάβρωσης, για τον χρόνο διεξαγωγής της μεταπτυχιακής εργασίας, δεν έχει επιτευχθεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αποστολόπουλος Χ., Παπαδάκης Ε., Δέμης Σ., «Διερεύνηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα και της επακόλουθης υποβάθμισης λόγω διάβρωσης οπλισμού από τη δράση χλωριόντων», 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, 2009, Πάφος, Κύπρος
2. Δέδε Μ., Δημόγλου Ε., «Ανοξείδωτος χάλυβας οπλισμένου σκυροδέματος», 13ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα, Φεβ. 2007
3. Δημάδη Κ., Κατσενίου Γ., «Διάβρωση χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος & τρόποι αποκατάστασης»,
4. Δρακάτος Δ., «Συστήματα επισκευής – μετρίασης της διάβρωσης κατασκευών Ο.Σ.», 15ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, 2009, Πάτρα
5. Κορωναίος Α., Τεχνικά Υλικά, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006
6. Κουλουμπή Ν., «Διάβρωση και Προστασία», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2010
7. Κουρνέτας Δ., «Διάβρωση οπλισμένου σκυροδέματος – Μέτρα επέμβασης», 16ο Φοιτητικό Συνέδριο Επισκευές Κατασκευών, 2006, Πάτρα
8. Μαυροειδής Π., Ρακαντά Ε., Μπατής Γ, (2006) «Ανοξείδωτοι Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος: Μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορά απέναντι στην διάβρωση», 15ο Ελληνικό Συνέδριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη 2006
9. Μπατής Γ., Σημειώσεις Φθορά και Προστασία Υλικών, Αθήνα 2006
10. Μπατής Γ., «Χρήση νέων υλικών για την αύξηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών», Ημερίδα ΤΕΕ «Ενίσχυση κτιρίων με σύγχρονα υλικά», 2007, Αθήνα
11. Μπατής Γ., Γρηγοριάδης Γ., «Η επίδραση οργανικών αναστολέων διάβρωσης στο οπλισμένο ελαφροβαρές σκυρόδεμα», Αθήνα 2003
12. Μπατής Γ., Ρακαντά Ε., Τσάμπρας Λ., Μουγιάκος Σ., Αγναντιάρη Γ., «Διάβρωση χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος», Ημερίδα Κοινοτομίας Αντοχή & Ενέργεια
13. Μπατής Γ., Ρακαντά Ε., Θεοδωρίδης Β., Σίδερης Κ., «Επίδραση του αναστολέα διάβρωσης με βάση την Ν, Ν-διμεθυλαμινοαιθανόλη στη προστασία του οπλισμού σκυροδέματος λόγω ενανθράκωσης και ταυτόχρονης παρουσίας χλωριόντων», 14ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Κως 2003

14. Μπατής Γ., Σιόβα Ε., «Ανθεκτικότητα Κονιαμάτων Αποκατάστασης με Λευκό Τσιμέντο – Δυνατότητες Προστασίας», 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, 2009, Πάφος, Κύπρος
15. Ντάφλου Ε., Καραντώνης Α., Μπατής Γ., «Προστασία του δομικού χάλυβα με τη χρήση πτητικών αναστολέων διάβρωσης. Μελέτη της προσρόφησης του αναστολέα στη μεταλλική επιφάνεια», 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, 2009, Πάφος, Κύπρος
16. Ντάφλου Ε., Ρακαντά Ε., Μπατής., «Αντιδιαβρωτικές μέθοδοι προστασίας του εκτεθειμένου στην ατμόσφαιρα δομικού χάλυβα με τη χρήση επιστρωμάτων που περιέχουν αναστολείς διάβρωσης», 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, 2006, Αλεξανδρούπολη
17. Παναγιωτίδης Θ., «Αναστολείς Διάβρωσης: Ένα αποτελεσματικό όπλο κατά της διάβρωσης», 2011, www.e-archimedes.gr
18. Ρακαντά Ε., Μπατής Γ., «Αναστολείς διάβρωσης για την προστασία κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος», 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, 2008, Αθήνα
19. Ρούτουλας Α., Σημειώσεις Μαθήματος «Έλεγχος Ποιότητας και Τεχνολογία Δομήσιμων Υλικών», Αθήνα 2010
20. Ρούτουλας Α., Μπατής Γ., Μανίτα Π., Μαρουσάκη Α., «Επίδραση ορυκτών προσθέτων και αναστολέων διάβρωσης στην αντιδιαβρωτική προστασία οπλισμών σκυροδέματος», 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, 2006, Αλεξανδρούπολη
21. Σιδέρης Κ., Ζάρρας Σ., «Η σημασία της συντήρησης στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος λόγω ενανθράκωσης», 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, 2006, Αλεξανδρούπολη
22. Σιδέρης Κ., Μπατής Γ., Πανταζοπούλου Π., «Μελέτη της επίδρασης της προσθήκης νιτρώδους ασβεστίου σε τσιμεντοκονιάματα εκτεθειμένα σε περιβάλλον χλωριόντων – θειικών», 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, 2009, Πάφος, Κύπρος
23. Σκουλικίδης Θ., «Εφαρμοσμένη Ηλεκτροχημεία, Α. Διάβρωση και Προστασία», Γ΄ Έκδοση, Αθήνα 1990.
24. Σωτηριάδης Κ., Μιτζήθρα Μ.Ε., Ρακαντά Ε., Μπατής Γ., Τσιβιλής Σ., «Διάβρωση οπλισμού κονιαμάτων με ασβεστολιθικά τσιμέντα σε συνδυασμένο περιβάλλον

χλωριόντων και θειικών ιόντων και χαμηλές θερμοκρασίες», 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, 2009, Πάφος, Κύπρος

25. Τάσιος Θ., Αλιγαζάκη Κ., Ανθεκτικότητα Οπλισμένου Σκυροδέματος, Αθήνα 1992
26. Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου, Εκδόσεις Ε.Μ.Π. Αθήνα 2004
27. Τσίμας Σ., Δομικά Υλικά, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα 2001
28. Τσώνη Ν., «Η διάβρωση του χάλυβα στο σκυρόδεμα – Πρόληψη – Έλεγχοι και επεμβάσεις σε υφιστάμενες κατασκευές – Τρωτότητα των ενισχύσεων», 16ο Φοιτητικό Συνέδριο Επισκευές Κατασκευών, 2006, Πάτρα
29. Υφαντής Δ., «Υλικά – Διάβρωση και Προστασία», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2008
30. ASTM C 494 "Chemical Admixtures for Concrete", American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
31. ASTM G 109, "Test Method for Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments", American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
32. Baghabra Al-Amoudi O.S., Maslehuddin M., Lashari A.N., Almusallam A.A., "Effectiveness of Corrosion Inhibitors in Contaminated Concrete", Cement & Concrete Composites 25 (2003), 439-449
33. Batis G., Pantazopoulou P., Routoulas A., "Corrosion protection investigation of reinforcement by inorganic coating in the presence of alkanolamine-based inhibitor", Cement & Concrete Composites 25 (2003) 371-377
34. Batis G., Sideris K., Pantazopoulou P., "Influence of calcium nitrite inhibitor on the durability of mortars under contaminated chloride and sulphate environments", Anti-Corrosion Methods and Materials, Vol. 51 No. 2, 2004, 112-120
35. Batis G., Routoulas A., Rakanta E., "Effects of migrating inhibitors on corrosion of reinforcing steel covered with repair mortar", Cement & Concrete Composites 25 (2003) 109-115
36. Batis G., Kouloumbi N., Pantazopoulou P., "Corrosion protection of steel in pumice lightweight mortar by coatings", Cement & Concrete Composites (2004)

37. Batis G., Kouloumbi N., Pantazopoulou P., “Protection of reinforced concrete by coatings and corrosion inhibitors”, Pigment & Resin Technology, Vol. 29, No. 3, 2000, p. 159-163
38. Batis G., Kouloumbi N., Pantazopoulou P., “Durability of Reinforced Lightweight Mortars with Corrosion Inhibitors”, Cement, Concrete and Aggregates, 1996, p. 118-125
39. Temiz H., Kose M.M., Koksal S., “Effects of portland composite and composite cements on durability of mortar and permeability of concrete”, Construction and Building Materials 21, (2007), 1170-1176
40. Zafeiropoulou Th., Rakanta E., Batis G., “Performance evaluation of organic coatings against corrosion in reinforced cement mortars”, Progress in Organic Coatings 72, 2011, p. 175– 180
41. http://www.argentumsolutions.com/wiki/en/Stress_Corrosion_Cracking
42. http://www.efcweb.org
43. http://www.cement.org/tech/cct_dur_corrosion.asp
44. http://oikodomima.gr/index.php
45. www.e-archimedes.gr/latest/