

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΑΝΟΡΓΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΥΔΡΟΦΟΒΙΚΟΥ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ
ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ.**

ΠΑΝΤΕΛΗΜΩΝ-ΘΕΟΔΟΣΙΟΣ Γ. ΚΥΡΙΑΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:

ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ ΜΠΕΑΖΗ-ΚΑΤΣΙΩΤΗ

ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2015

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μέρος του εκπαιδευτικού προγράμματος σπουδών των τελειόφοιτων φοιτητών της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Το θέμα ανατέθηκε από την κα. Μαργαρίτα Μπεάζη-Κατσιώτη, Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ και ολοκληρώθηκε με την συνεργασία του κ. Χάρη Αποστολόπουλου, Επίκουρου Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών και του κ. Προκόπη Περδίκη, CEO της AbolinCo.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της προστασίας του οπλισμού του σκυροδέματος μέσω της χρήσης συστημάτων οργανικών και ανόργανων υλικών επικάλυψης και εμποτισμού.

Η μελέτη αφορά την μέτρηση απώλειας μάζας, τον εντοπισμό βελονισμών και την καταπόνηση των μηχανικών ιδιοτήτων των οπλισμών δοκιμίων οπλισμένου σκυροδέματος, τα οποία επικαλύφθηκαν με συστήματα επικάλυψης οργανικών και ανόργανων υλικών μέσω επιφανειακής επικάλυψης, εμποτισμού και υδροφοβικού εμποτισμού. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε θάλαμο επιταχυνόμενης διάβρωσης μέσω αλατονέφωσης για 1000 ώρες.

Η πειραματική διαδικασία διεξήχθη στο Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Αντοχής Υλικών του Πανεπιστημίου Πατρών και οι επικαλύψεις έγιναν στις εγκαταστάσεις της Εταιρίας AbolinCo.

Η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας διήρκησε από τον Μάιο του 2014 έως σήμερα.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην υλοποίηση της.

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Μαργαρίτα Μπεάζη-Κατσιώτη για την ανάθεση του θέματος. Η άψογη συνεργασία της, η επίβλεψη της, οι εύστοχες συμβουλές της, η διάθεση της να παρέχει βοήθεια και η υπομονή της σε όλα τα στάδια της εργασίας ήταν ανεκτίμητα για την περάτωση της μελέτης.

Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται προς τον κο Χάρη Αποστολόπουλο και το προσωπικό του Εργαστηρίου Τεχνολογίας και Αντοχής Υλικών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών & Αεροναυπηγών του Πανεπιστημίου Πατρών για όλη την βοήθεια που μου παρείχαν μέχρι και την τελευταία στιγμή.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ.Περδική Προκόπη, CEO της AbolinCo για την παροχή των υλικών καθώς και για την συνεργασία και την συμβολή του στην εκπόνηση της διπλωματικής.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Ν. Κατσιώτη, Δ. Βελισσαριού και Λ. Καραβοκυρό που συνέβαλαν αποφασιστικά, ο καθένας από την μεριά του.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου Κισκήρα Παναγιώτη, Αλούπη Γιώργο, Μπούρα Θανάση, Μιχαήλ Άγγελου, Μήτση Αρετής και Λιούλη Σπύρου με τους οποίους συνδέθηκα προσωπικά στην πορεία μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι και της ολοκλήρωσης αυτής της προσπάθειας. Όπως και την σύντροφό μου Σκούρτα Σωτηρία για την στήριξη και την υπομονή της, καθώς και την έπμνευση που μου παρείχε για την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Σας ευχαριστώ...

Κυριάκης Παντελεήμων-Θεοδόσιος

«Η διπλωματική εργασία αυτή αφιερώνεται στην οικογένειά μου. Στον αδελφό μου Στέφανο Γ. Κυριάκη, παιδίατρο, για τον ρόλο που διαδραμάτισε στην ζωή μου, ως πατέρας και αδελφός, στην αδελφή μου Αικατερινή Γ. Κυριάκη, φιλόλογο, η οποία συντέλεσε με όλες της τις δυνάμεις στην μόρφωση μου, στην αδελφή μου Παναγιώτα Κυριάκη, διαιτολόγο, για όλα όσα μου προσέφερε από μωρό έως σήμερα και φυσικά στην μητέρα μου Δρόσου-Κυριάκη Γεωργία που μετά την απώλεια του συντρόφου της και πατέρα μου Κυριάκη Γεωργίου 20 χρόνια πριν,είχε την ψυχική δύναμη και την ικανότητα, παρά τις τεράστιες δυσκολίες σε όλα τα επίπεδα, να μορφώσει 4 παιδιά στο ανώτατο επίπεδο και να αποδείξει σε όλους μας ότι η μόρφωση είναι απλά ένα μέσο για την επιτυχία στη ζωή και όχι προαπαιτούμενο.»

«Στην οικογένεια μου,
στην δύναμη της μητέρας μου
και στην Ιερή Μνήμη του Πατέρα μου.»

Περιεχόμενα

Θεωρητικό μέρος

Κεφάλαιο 1: Το οπλισμένο σκυρόδεμα

1.1 Εισαγωγή	8
1.2 Συστατικά Σκυροδέματος	9
1.2.1 Τσιμέντο	9
1.2.2 Τα χημικά πρόσθετα στο σκυρόδεμα	29
1.2.3 Νερό	31
1.2.4 Αδρανή	32
1.2.5 Οπλισμός	34
1.3 Ιδιότητες σκυροδέματος	35
1.4 Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος	37
1.5 Κατηγορίες αντοχής	38

Κεφάλαιο 2: Διάβρωση σκυροδέματος

2.1 Εισαγωγή	39
2.2 Μηχανισμός Διάβρωσης Μετάλλων	41
2.2.1 Ορισμός διάβρωσης μετάλλων	41
2.2.2 Μηχανισμός της Διάβρωσης	42
2.2.3 Γαλβανικά στοιχεία και Μακροστοιχεία	44
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση οπλισμού	45
2.3.1 Πορώδες και διαπερότητα	45
2.3.2 Επίδραση των συστατικών του σκυροδέματος στη διάβρωση του οπλισμού	46
2.4 Παθητικοποίηση οπλισμού	48
2.5 Διάβρωση λόγω ενανθράκωσης	50
2.5.1 Εισαγωγή	50
2.5.2 Μηχανισμός ενανθράκωσης	51
2.5.3 Ρήξη παθητικού στρώματος λόγω ενανθράκωσης	51
2.6 Διάβρωση οπλισμού σε θαλάσσιο περιβάλλον	52
2.6.1 Διάβρωση με βελονισμούς	52
2.6.2 Διάβρωση λόγω διείσδυσης χλωριόντων	53

2.6.3 Ρήξη παθητικού στρώματος λόγω χλωριόντων	55
2.7 Διάβρωση λόγω εδάφους	56
2.7 Διάβρωση λόγω παλαιότητας	57
2.7.1 Συστολή σκυροδέματος	57
2.7.2 Ερπυσμός Σκυροδέματος	58

Κεφάλαιο 3 :Προστασία σκυροδέματος.

3.1 Προστασία μετάλλων	59
3.1.1 Εισαγωγή	59
3.1.2 Παρεμβάσεις για την προστασία των μετάλλων	60
3.1.3 Μέθοδοι Ελέγχου Δυναμικού	61
3.2 Μέθοδοι προστασίας οπλισμένου σκυροδέματος	63
3.2.1 Εισαγωγή	63
3.2.2 Ειδικόι Χάλυβες	65
3.2.3 Επανακαλοποίηση σκυροδέματος	66
3.2.4 Καθοδική προστασία οπλισμένου σκυροδέματος	67
3.2.5 Αναστολείς διάβρωσης	68
3.2.6 Ηλεκτροχημική αφαίρεση χλωριόντων	69
3.3 Προστασία οπλισμένου σκυροδέματος μέσω επικαλύψεων και εμποτισμών	70
3.3.1 Εισαγωγή	70
3.3.2 Γενικά περί επικαλύψεων με οργανικά και ανόργανα χρώματα	72
3.3.3 Υδροφοβικός εμπότισμός	77
3.3.4 Χρήση ψυχρών υλικών για επικαλύψεις και εμπότισμούς με σκοπό την αντιμετώπιση του φαινομένου «Αστικής Θερμικής Νησίδας»	82
3.3.5 Χρήση πολυσιλοξάνων για επικαλύψεις	95
3.3.6 Φωτοκαταλυτικά χρώματα	97
3.3.7 Πολυστρωματικά συστήματα	98
3.3.8 Κρίτηρια επιλογής επικαλύψεων	99
Τοποθέτηση Προβλήματος	100

Πειραματικό μέρος

Κεφάλαιο 4 Δοκίμια και Υλικά

4.1 Διαδικασία παρασκευής 9 δοκιμίων οπλισμένου σκυροδέματος	103
4.2 Υλικά εμποτισμού και επικαλύψεων	111
Κεφάλαιο 5 Διαδικασίες	
5.1 Υδροφοβικός εμποτισμός και επικαλύψεις των δοκιμίων	120
5.2 Θάλαμος επιταχυνόμενης διάβρωσης (αλατονέφωση)	127
5.3 Ελεγχόμενη αποσκυροδέτηση	130
Κεφαλαιο 6 Μέθοδοι Μετρήσεων	
6.1 Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης	132
6.2 Μέτρηση Απώλειας Μάζας	134
6.3 Μηχανικές προδιαγραφές εφελκυσμού	135
Κεφάλαιο 7 Αποτελέσματα Μετρήσεων	
7.1 Οπτικός έλεγχος δοκιμίων	139
7.2 Αποτελέσματα Μετρήσεων Δυναμικού	158
7.3 Αποτελέσματα Μέτρησεων Απώλειας Μάζας	160
7.4 Εντοπισμός Βελονισμών	161
7.5 Αποτελέσματα πειραμάτων εφελκυσμού	164
Τελικά συμπεράσματα	167
Βιβλιογραφία	169

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο Πρώτο: Το οπλισμένο σκυρόδεμα

1.1 Εισαγωγή

Το σκυρόδεμα και συγκεκριμένα το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί το πλέον διαδεδομένο δομικό υλικό της σύγχρονης εποχής. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου αυτού υλικού, δηλαδή την αντοχή στην θλίψη και τον εφελκυσμό, και την στατική επάρκεια. Είναι ένα τεχνητό δομικό υλικό το οποίο παρασκευάζεται με την ανάμιξη τσιμέντου, χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών, πρόσθετων και νερού. Μέσω της χημικής ένωσης του νερού με το τσιμέντο (ενυδάτωση), το σκυρόδεμα στερεοποιείται, εγκλωβίζοντας τα αδρανή εντός της μάζας του και μεταβάλλεται σε στερεό σώμα με υψηλές αντοχές. Η αντοχή του καθορίζεται κατά κύριο λόγο από την αντοχή του τσιμέντου και των αδρανών σε ένα δεδομένο μείγμα.

Χαρακτηριστικά, η πυκνότητα του είναι δυνατόν να κυμανθεί μεταξύ 800 έως 4000 kg/m³ και η τελική θλιπτική αντοχή του μεταξύ 1 έως 140 Μpa, ενώ η διαπερατότητα σε αέρια μπορεί να είναι από μεγάλη έως ελάχιστη. Ανάλογα το φαινόμενο βάρος του, διακρίνεται σε *συνήθες σκυρόδεμα* (2-2,8 g/cm³), *ελαφροσκυρόδεμα* (0,3-2,0 g/cm³) και *βαρύ σκυρόδεμα* (>2,8 g/cm³).

Λόγω της τεράστιας παγκόσμιας δομικής ανάπτυξης των τελευταίων δεκαετιών, των ολοένα και αυξημένων σύγχρονων δομικών απαιτήσεων, της μείωσης του κόστους παραγωγής αλλά και της επιβεβλημένης ανάγκης προστασίας του περιβάλλοντος, η έρευνα για την βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας, την επιλογή νέων εναλλακτικών πρώτων υλών, την αύξηση της ανθεκτικότητας και πλέον της προστασίας του οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί μονόδρομο για την συνέχιση της δομικής δραστηριότητας.

Την σήμερον ημέρα, το σκυρόδεμα παρασκευάζεται από διάφορα είδη τσιμέντου, ενώ ανάλογα την χρήση για την οποία προορίζεται, χρησιμοποιούνται πρόσθετα για την βελτίωση των ιδιοτήτων του, όπως ορυκτά (ποζολάνες, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία) και χημικά (πολυμερικές ίνες, ρευστοποιητές κ.α.)

Η ποιότητα του σκυροδέματος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ποιότητα των υλικών που αποτελείται. Ωστόσο η σωστή παρασκευή και κατεργασία του, καθώς και η συντήρηση του επιτελούν σημαίνοντα ρόλο, ώστε να λάβουμε ένα καλό αποτέλεσμα. Όσον αφορά την χώρα μας σχετικές οδηγίες μπορούν να παρθούν απο τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-97). [1,2,3,4,5]

1.2 Συστατικά σκυροδέματος.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει τα συστατικά του σκυροδέματος είναι το τσιμέντο, τα αδρανή, το νερό ανάμιξης, τα πρόσθετα συστατικά, καθώς και ο χάλυβας όσον αφορά τον οπλισμό. Η δομή του σκυροδέματος είναι σχετικά ανομοιογενής και περίπλοκη, για αυτό το λόγο οι σχέσεις δομής-ιδιοτήτων του υλικού ερευνούνται ακόμα.

1.2.1 Τσιμέντο

➤ Γενικοί Ορισμοί

Ο γενικός ορισμός του τσιμέντου το χαρακτηρίζει ως ένα συνδετικό υλικό, ικανό να πήζει και να σκληραίνει γρήγορα αφότου αναμιχθεί με νερό. Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197 , ως τσιμέντο (CEM) θεωρείται μια υδραυλική συνδετική ύλη ή οποία όταν αναμιχθεί στις κατάλληλες αναλογίες με αδρανή υλικά και νερό δύναται να παράγει σκυρόδεμα ή κονίαμα το οποίο διατηρεί το εργάσιμό του για ένα επαρκές χρονικό διάστημα και μετά από ορισμένες περιόδους επιτυγχάνει καθορισμένα επίπεδα αντοχής ενώ έχει επίσης μακρόχρονη σταθερότητα όγκου.

Δεδομένου ότι η παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου περιλαμβάνει πολλά στάδια και το υλικό καθεαυτό υπάρχει εδώ και πολλά χρόνια, μια σειρά ορισμών έχει αναπτυχθεί εν είδη κοινής γλώσσας μεταξύ των ασχολουμένων με αυτό.

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένοι από τους πιο χρησιμοποιημένους ορισμούς:

- **Τσιμέντο Portland** ονομάζεται το προϊόν που προκύπτει έπειτα από την έψηση ενός πλήρως ομογενοποιημένου μίγματος αποτελούμενου από περίπου 75% ασβεστολιθικά υλικά και 25% αργιλοπυριτικά υλικά σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης (1380 – 1420 °C) και την συνάλεσή του με την κατάλληλη ποσότητα γύψου.
- **Φαρίνα** ονομάζεται το μίγμα των πρώτων υλών που εισέρχεται στην περιστροφική κάμινο προς έψηση.
- **Κλίνκερ** ονομάζεται το προϊόν έψησης που εξέρχεται της περιστροφικής καμίνου.
- Η **Κλινκεροποίηση** περιλαμβάνει το σύνολο των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα εντός των περιστροφικών καμίνων σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1150 °C, τόσο στην υγρή φάση όσο και κατά την οριακή επίτηξη των κόκκων που οδηγούν τελικά στην παραγωγή του κλίνκερ.
- **Υδραυλικές ιδιότητες** είναι οι ιδιότητες που έχουν ορισμένα υλικά, όπως το τσιμέντο, να σχηματίζουν κάτω από την επίδραση του νερού σταθερές ένυδρες ενώσεις που είναι ελάχιστα υδατοδιαλυτές και έχουν μεγάλη συνάφεια μεταξύ τους και με τα αδρανή. Οι ενώσεις αυτές αυξάνουν την συνοχή των πολτών και των κονιαμάτων με τη πάροδο του χρόνου, προσδίδοντας αυξημένες αντοχές σε αυτά.
- **Υδραυλικές Κονίες** είναι τα υλικά που έχουν υδραυλικές ιδιότητες.
- **Αερικές Κονίες** είναι υλικά όπως ο ασβέστης που αποκτούν τις αντοχές τους από την έκθεση στον αέρα και όχι στο νερό.
- **Κύρια συστατικά του τσιμέντου** είναι ειδικά επιλεγμένα ανόργανα υλικά που προστίθενται σε κάποια φάση της παραγωγικής διαδικασίας στο τσιμέντο, σε αναλογία που ξεπερνά το 5% κατά βάρος της συνολικής ποσότητας κυρίων και δευτερευόντων συστατικών.

- **Δευτερεύοντα συστατικά** είναι ειδικά επιλεγμένα ανόργανα υλικά που προστίθενται σε κάποια φάση της παραγωγικής διαδικασίας στο τσιμέντο, σε αναλογία που δεν ξεπερνά το 5% κατά βάρος της συνολικής ποσότητας κυρίων και δευτερευόντων συστατικών.
- Ως **Πρόσθετα** θεωρούνται συστατικά που προστίθενται σε μικρά ποσοστά (συνήθως μικρότερα του 1% κ.β.) με σκοπό την βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας ή των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος.
- Ως **Ενυδάτωση** εννοείται το σύνολο των χημικών και φυσικών διαδικασιών που συμβαίνουν μεταξύ της υδραυλικής φάσης (π.χ. του τσιμέντου) και του νερού και που έχουν ως αποτέλεσμα η πάστα να πάψει να έχει πλαστικές ιδιότητες και να αρχίσει να αναπτύσει αντοχές.
- **Πήξη** είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ο τσιμεντοπολτός παύει να έχει πλαστικές ιδιότητες.
- **Σκλήρυνση** είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η υδραυλική φάση αναπτύσσει αντοχές.
- **Πάστα** καλείται η παχύρρευστη μάζα που προέρχεται από την ανάμιξη ενός υδραυλικού υλικού με το νερό σε αναλογίες τέτοιες ώστε να μπορεί να λάβει χώρα η ενυδάτωση.
- **Κονίαμα** ονομάζεται το μίγμα της πάστας με λεπτομερή ανόργανα αδρανή υλικά, όπως άμμο, των οποίων τα σωματίδια έχουν μέγιστη διάμετρο τα 4 mm.[6]

➤ **Ορισμός του τσιμέντου και ιστορικά στοιχεία**

Το τσιμέντο είναι μια υδραυλική τεχνητή κονία που παρασκευάζεται με άλεση του κλίνκερ, προϊόν που προέρχεται από την όπτηση μίγματος ασβεστολιθικών και αργιλοπυριτικών πετρωμάτων. Αποτελείται από ένα μίγμα ανόργανων, λεπτόκοκκων, αλεσμένων υλικών, το οποίο όταν ενυδατωθεί σκληραίνεται και αποκτά συγκεκριμένα επίπεδα αντοχών συναρτήσει του χρόνου. Η σκλήρυνση οφείλεται βασικά στην ενυδάτωση των ασβεστοπυριτικών υλικών του. Ωστόσο υπάρχουν και άλλες χημικές ενώσεις που μπορούν να συμμετέχουν στον μηχανισμό σκλήρυνσης (για παράδειγμα οι αργιλικές ενώσεις). Χαρακτηριστικό που το διακρίνει από τις άλλες

συνδετικές ύλες είναι η σταθερότητα του όγκου του, ακόμα και σε υδατικό περιβάλλον, γεγονός που το καθιστά βασικό υλικό στα υδραυλικά έργα και τις δομικές κατασκευές. [1]

Το τσιμέντο υπάρχει στη φύση τουλάχιστον 12 εκατομμύρια χρόνια. Όταν η γη υφίστατο έντονες γεωλογικές μεταβολές συνέβαινε φυσική παραγωγή τσιμέντου μέσω αντιδράσεων μεταξύ ασβεστολίθου και πετρελαιοφόρου σχιστολίθου κατά την αυτογενή καύση τους. Αυτό το φυσικό τσιμέντο ήταν και το πρώτο που χρησιμοποίησαν οι άνθρωποι ως δομικό υλικό.

Οι Ρωμαίοι, από το 300 π.Χ. περίπου χρησιμοποιούν ποζολανικό τσιμέντο από την περιοχή Ποτζουόλι, κοντά στο όρος Βεζούβιος, για την κατασκευή περιφώνων έργων, όπως η Αππία Οδός, η Βασιλική του Μαξεντίου, το Κολοσιαίο και το Πάνθεον στην Ρώμη. Σε πολλές λιθόδητες κατασκευές χρησιμοποιήθηκαν θραύσματα κεράμων ως αδρανή, τα οποία προσέθεταν σε μείγμα ασβεστοπολτού, τριμμένου κεραμιδιού ή ηφαιστειακής τέφρας. Η ποιότητα των τσιμεντοειδών υποβαθμίσθηκε και η χρήση του σκυροδέματος εγκαταλείφθηκε κατά τον Μεσαίωνα λόγω του ότι η τεχνογνωσία για την χρήση της ασβέστου με προσθήκη ποζολάνης εξέλιπε βαθμιαία.

Το 1824 ο Joseph Aspdin, ένας Βρετανός κτίστης, παρασκευάζει και κατοχυρώνει με ευρεσιτεχνία, το πρώτο τσιμέντο Portland, με καμίνευση ασβεστολίθου και αργίλου λεπτής άλεσης. Το τήγμα, το οποίο στην συνέχεια αλέθεται, ονομάσθηκε τσιμέντο Portland λόγω της ομοιότητάς του με τους υψηλής ποιότητας λίθους που εξορυσσόταν στην περιοχή Portland της Αγγλίας. [7]

Σήμερα και στα καθ'ημάς, όσον αφορά την χώρα μας δηλαδή, σύμφωνα με απόφαση της ΕΕ, από 01/04/01 τα τσιμέντα που θα κυκλοφορούν σε όλες τις χώρες κράτη μέλη πρέπει να είναι πιστοποιημένα, να φέρουν σήμανση CE και να είναι σύμφωνα με τα νέα Ευρωπαϊκά Πρότυπα, τα οποία είναι:

- **EN 197-1: Τσιμέντο Μέρος-1:** «*Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα*» και

- **EN 197-2 : Τσιμέντο Μέρος-2 : «Αξιολόγηση συμμόρφωσης»**

Τα παραπάνω πρότυπα εφαρμόζονται στην Ελλάδα ως Ελληνικά πρότυπα από τον Ελληνικό Οργανισμό Τυποποίησης (ΕΛΟΤ) και είναι γνωστά ως **ΕΛΟΤ EN 197-1** και **ΕΛΟΤ EN 197-2**.

Ανάλογα με τις διαθέσιμες και χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες, δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων που μπορούν να παραχθούν. Οι τύποι αυτοί είναι το κοινό τσιμέντο Portland, τα τσιμέντα με ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα (πυριτική ή ασβεστιτική), τσιμέντα με σκωρία υφικαμίνου, τσιμέντα με πυριτική παιπάλη, με ασβεστόλιθο κλπ. [7]

➤ **Παραγωγή Τσιμέντου Portland**

- **Πρώτες Ύλες στη Βιομηχανία Τσιμέντου**

Όπως προκύπτει από τον ορισμό που προηγήθηκε για το τσιμέντο Portland, τα κύρια συστατικά του είναι κατά βάση ασβεστοπυριτικές και αργιλοπυριτικές ενώσεις. Έτσι οι πρώτες ύλες που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στη παρασκευή του θα πρέπει να εξασφαλίζουν επαρκείς ποσότητες των οξειδίων CaO , SiO_2 και Al_2O_3 στην κατάλληλη μορφή και στη σωστή αναλογία. Τα συστατικά αυτά σπάνια βρίσκονται στη απαιτούμενη αναλογία στην πρώτη ύλη.

Πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται με μεγάλη περιεκτικότητα σε CaO είναι ο ασβεστόλιθος, η κιμωλία και διάφορες μάργες. Όσον αφορά τα οξειδία Al_2O_3 και SiO_2 χρησιμοποιούνται διάφορες άργιλοι που προτιμούνται από το σκληρό χαλαζία που είναι δυσάλεστος, καθότι αντιδρά πολύ δύσκολα με το CaO . Πολλές φορές όταν το Al_2O_3 και το Fe_2O_3 δεν βρίσκονται σε ικανοποιητικά ποσοστά στη πρώτη ύλη, τότε χρησιμοποιούνται επιπλέον υλικά, τα λεγόμενα διορθωτικά, όπως βωξίτες, πυριτική άμμος ή αποφρύγματα σιδηροπυρίτη και άλλα τα οποία έχουν σκοπό τη διόρθωση των αναλογιών μεταξύ των κυρίων οξειδίων και οι οποίες ελέγχονται μέσω ειδικά προκαθορισμένων δεικτών.

Στο σύνολο των πρώτων υλών που συμμετέχουν στις φάσεις του κλίνκερ δε θα πρέπει να αγνοηθεί η επίδραση της τέφρας του καυσίμου η οποία αναπόφευκτα απορροφάται από το κλίνκερ.

Τέλος στα συστατικά που απαρτίζουν το μίγμα των πρώτων υλών συμπεριλαμβάνονται και ρευστοποιητικές ουσίες (fluxes και mineralizers) προστιθέμενες σε μικρό ποσοστό, οι οποίες έχουν σκοπό να μειώσουν τη θερμοκρασία εμφάνισης της υγρής φάσης, επιταχύνοντας έτσι την κλινκεροποίηση.

- **Διαδικασία Παραγωγής**

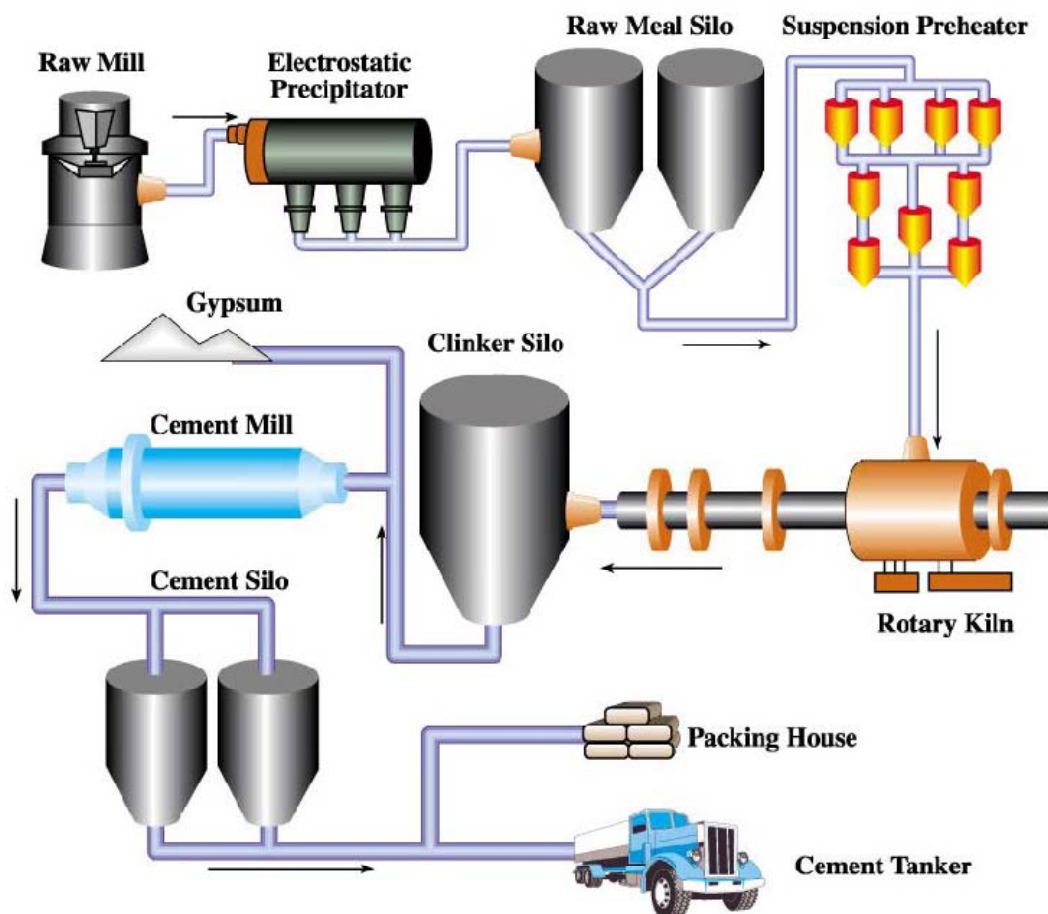
Οι μέθοδοι παραγωγής κλίνκερ κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το τρόπο παραγωγής της φαρίνας. Ως εκ τούτου, υπάρχει η υγρή, η ημιυγρή και η ξηρή μέθοδος. Η τελευταία έχει επικρατήσει λόγω των μικρότερων ενεργειακών απαιτήσεων. Στην ξηρή μέθοδο η φαρίνα υπό μορφή ξηράς σκόνης τροφοδοτείται στο σύστημα προς έψηση.

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα ροής της παραγωγικής διαδικασίας εμφανίζεται στο Σχήμα 1.1 Αρχικά το μίγμα των πρώτων υλών συναλέθεται και μεταφέρεται στον ηλεκτροστατικό διαχωριστή όπου εκεί απομακρύνονται τα πολύ λεπτομερή και τα πολύ χονδροκόκκα μέρη.

Προτού το μίγμα της φαρίνας εισέλθει στην περιστροφική κάμινο, περνάει πρώτα από μια σειρά ανακομιστών (κυκλώνων) όπου κυκλοφορούν κατά αντηροή το μίγμα των πρώτων υλών και τα απαέρια της καμίνου. Με αυτό το τρόπο το μίγμα προθερμαίνεται έτσι ώστε να μειωθούν οι απαιτήσεις σε ενέργεια θέρμανσης εντός της καμίνου. Ο αριθμός των κυκλώνων (συνήθως 4 έως 6) και η στοίχισή τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, με κυριότερο την υγρασία των πρώτων υλών.

Η ασβεστοποίηση, δηλαδή η μετατροπή του CaCO_3 σε CaO , γίνεται σε ποσοστό περίπου 85 – 95% εκτός της καμίνου με τη χρήση του προασβεστοποιητή και καύση περίπου του 60% του συνολικού καυσίμου. Δεδομένου ότι εντός του προασβεστοποιητή τα σωματίδια αιωρούνται (αντίθετα με την περιστροφική κάμινο) επιτυγχάνεται βέλτιστη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας, οπότε και πραγματοποιείται μεγιστοποίηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από τα απαέρια στα σωματίδια της

φαρίνας. Με αυτό το τρόπο αξιοποιείται στο μέγιστο η θερμότητα που εκλύεται από την καύση του καυσίμου και εξοικονομούνται σημαντικά ποσά ενέργειας. Επιπρόσθετα ο προασβεστοποιητής συνεισφέρει στη μείωση των εκπομπών του SO₂, καθότι απορροφάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμή φαρίνα λόγω φυσικής ρόφησης.



ΣΧ. 1.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Στη συνέχεια, η προθερμασμένη φαρίνα εισέρχεται εντός της περιστροφικής καμίνου. Η περιστροφική κάμιμος είναι ένας μακρύς ατσαλένιος περιστρεφόμενος κύλινδρος τοποθετημένος με ελαφριά κλίση προς το δάπεδο. Η διάμετρος της μπορεί να φτάσει τα 6 μέτρα, ενώ το μήκος της τα 180. Μετά την είσοδό του στο υπερυψωμένο άκρο της καμίνου, το μίγμα των πρώτων υλών κινείται αργά κατά μήκος της καμίνου εξαιτίας της συνεχούς περιστροφής της, της κλίσης της αλλά και λόγω των ειδικών σπειρωμάτων που υπάρχουν στο εξωτερικό της. Στο κατώτερο άκρο της περιστροφικής καμίνου πραγματοποιείται καύση του καυσίμου η οποία

παρέχει την απαραίτητη θερμότητα για τις αντιδράσεις κλινκεροποίησης. Ο χρόνος παραμονής των πρώτων υλών στην κάμινο μπορεί να φθάσει τις 2 ώρες και εξαρτάται από το μήκος και την ταχύτητα περιστροφής της.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να παρατηρηθεί το εύρος των ενεργειοβόρων δράσεων που λαμβάνουν χώρα εκτός της περιστροφικής καμίνου. Δεδομένου ότι στόχος είναι η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας και εξαιτίας των περιορισμών που υφίσταται ο σχεδιασμός των περιστροφικών καμίνων, η επίτευξη της ενεργειακής και οικονομικής βελτιστοποίησης πραγματοποιείται με την χρήση των προθερμαντήρων (ανακομιστών θερμότητας) και του προασβεστοποιητή.

Μετά την έψηση της φαρίνας, το προϊόν που λαμβάνεται από την έξοδο της καμίνου είναι κλίνκερ το οποίο οδηγείται σε ψύξη στους 100 οC περίπου. Η γρήγορη ψύξη του κλίνκερ είναι απαραίτητη αφού παρεμποδίζει τον σχηματισμό κρυστάλλων που προκαλεί διαχωρισμό στην υγρή φάση. Όσο γρηγορότερα ψύχεται το κλίνκερ, τόσο μικρότεροι κρύσταλλοι σχηματίζονται καθώς αναδύονται από την υγρή φάση. Όμως, η μορφή του σε αυτό το σημείο δε το καθιστά χρηστικό, καθότι αποτελείται από σφαιρίδια ποίκιλης κοκκομετρίας με εύρος από μερικά εκατοστά έως και ένα μέτρο. Έτσι το κλίνκερ φέρεται εντός του μύλου για άλεση μέχρι το υλικό να μετατραπεί σε μία λεπτή πούδρα. Εκεί πραγματοποιείται και ανάμιξη με γύψο σε αναλογία που ποικίλει και εξαρτάται από την επιθυμητή ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η γύψος προστίθεται για να ελέγξει τον χρόνο πήξης του τσιμέντου, ενώ το ποσοστό του συνήθως δε ξεπερνάει το 5% κ.β..

Σε αυτό το σημείο το τσιμέντο είναι έτοιμο για συσκευασία και διανομή.

- **Προϊόντα Κλινκεροποίησης**

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πηγή θερμότητας βρίσκεται στο χαμηλότερο άκρο της περιστροφικής καμίνου. Ως εκ τούτου κατά μήκος της καμίνου υπάρχει διαφορετική κατανομή θερμότητας, η οποία και καθορίζει τέσσερις διακριτές περιοχές, σε κάθε μία από τις οποίες λαμβάνουν χώρα μία από τις εξής φυσικοχημικές αντιδράσεις (ξεκινώντας από το ψηλότερο σημείο): ξήρανση (ανάλογα με το σύστημα), ασβεστοποίηση, ενδιάμεση

φάση, πυροσυσσωμάτωση και ψύξη. Καθώς το υλικό κινείται προς το κατώτερο άκρο της κλιβάνου πραγματοποιείται μια σειρά από αντιδράσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1 – ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΕΨΗΣΗΣ.

Θερμοκρασία [°C]	Αντιδράσεις	Θερμική Εναλλαγή	Προϊόντα Κλίνκερ
100	Εξάτμιση νερού από την φαρίνα	Ενδόθερμη	-
800+	$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	Ενδόθερμη	-
800 – 900	$\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Εξώθερμη	C ₂ S
900 – 950	$5 \text{CaO} + 3 \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 5 \text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$	Εξώθερμη	C ₃ A
950 – 1200	$2 \text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow 2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Εξώθερμη	C ₂ S
	$2 \text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 2 \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	Εξώθερμη	C ₂ F
1200 – 1300	$3 \text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Εξώθερμη	C ₃ A
1250 – 1280	Σχηματισμός υγρής φάσης	Ενδόθερμη	τήγμα
1260 – 1450	$3 \text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow 3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Ενδόθερμη	C ₃ S

Τα βασικά συστατικά του κλίνκερ είναι το πυριτικό τριασβέστιο C₃S σε ποσοστό 40 με 60% κ.β., το πυριτικό διασβέστιο C₂S σε ποσοστό 16 με 30% κ.β., το αργιλικό τριασβέστιο C₃A σε ποσοστό 7 με 15% κ.β. και το σιδηραργιλικό τετρασβέστιο C₄AF σε ποσοστό 7 με 12% κ.β..

Ο επόμενος Πίνακας 1.2 συνοψίζει τις ιδιότητες των κύριων συστατικών του κλίνκερ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2 ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΚΛΙΝΚΕΡ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ.

Ευστατικό Ιδιότητα	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Χημικός Τύπος	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O ₃	4CaO·Al ₂ O ₃ · Fe ₂ O ₃
Ονομασία	Αλίτης	Βελίτης	Αργυλικό Τριασβέσπιο	Φερριτής
Συνήθεις ακαθαρσίες	MgO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	MgO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	MgO, SiO ₂ , αλκάλια	MgO, SiO ₂
Κρυσταλλικό Σύστημα	Μονοκλινές	Μονοκλινές	Κυβικό, ορθορομβικό	Ορθορομβικό
Ποσοστό στο Κλίνκερ [%κ.β.]	40 - 60	16 - 30	7 - 15	7 - 12
Ρυθμός Αντίδρασης με νερό	Μεσαίος	Αργός	Γρήγορος	Μεσαίος
Συμβολή στην ανάπτυξη πρώιμων αντοχών	Σημαντική	Μικρή	Σημαντική	Σημαντική
Συμβολή στην ανάπτυξη τελικών αντοχών	Σημαντική	Εξαιρετική	Μικρή	Μικρή
Θερμότητα Ενυδάτωσης [cal / g]	120	60	320	100

➤ Η Ενυδάτωση του Τσιμέντου

Οι υδραυλικές ιδιότητες ενός υλικού του δίνουν τη δυνατότητα να σχηματίσει στέρεα προϊόντα ενυδάτωσης. Αν και στην πλειονότητα των κατασκευών ενσωματώνονται στη πάστα μεγάλος όγκος αδρανών που επηρεάζουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού μίγματος, είναι γενικά αποδεκτό ότι η χημική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο είναι αμελητέα και γενικά μη επιθυμητή. Ως εκ τούτου, είναι η τσιμεντόπαστα και ο τρόπος με τον οποίο ενυδατώνεται που καθορίζει τις τελικές ιδιότητες του υλικού, όπως τις αντοχές, το πορώδες και την ανθεκτικότητα.

Η έννοια της ενυδάτωσης περιλαμβάνει μια σειρά απο διακριτές διεργασίες, εγγενώς αντιστρεπτές που συμβαίνουν σε μοριακό επίπεδο μεταξύ του τσιμέντου και του νερού. Κάθε μία από τις διεργασίες αυτές μπορεί να περιλαμβάνει πλήθος αντιδράσεων, οι οποίες ωστόσο έχουν κοινό ρυθμό και χαρακτηριστικά για την εκάστοτε διεργασία.

Προτού γίνει αναφορά στις διεργασίες αυτές, είναι σημαντικό να γίνει η διάκριση μεταξύ των αντιδράσεων «μέσω διαλυμάτων» και των «τοποχημικών» αντιδράσεων, θέτοντας παράλληλα το θέμα της ανομοιομορφίας των διαδικασιών διάλυσης κατά την ενυδάτωση. Η διάκριση μεταξύ της ύπαρξης ανομοιόμορφων διαλυμάτων (δηλαδή διαλυμάτων με διαφορετική σύσταση διαλελυμένης ουσίας από την στερεά φάση με την οποία βρίσκεται σε ισορροπία) και την ύπαρξη βασικών ανομοιόμορφων διεργασιών διάλυσης (δηλαδή διεργασιών στις οποίες η στερεή φάση διαλύεται μερικώς, αφήνοντας μια δεύτερη στερεή φάση με διαφορετική σύσταση) πρέπει να τονιστεί. Η πρώτη περίπτωση είναι ιδιαίτερα σύνηθης σε πολυσυστατικές ισορροπίες στερεού – υγρού, ενώ η δεύτερη είναι πιθανόν να συμβεί στη περίπτωση ύπαρξης πολλών φάσεων σε μία διεπιφάνεια.

Σύμφωνα με τη Θερμοδυναμική, όταν σε μια διεπιφάνεια συνυπάρχουν μία στερεή και μία υγρή φάση, η διάλυση της πρώτης στη δεύτερη θα πρέπει να γίνει ομοιόμορφα ώστε να επιτευχθεί μείωση της εντροπίας του συστήματος. Στην περίπτωση περισσοτέρων φάσεων που ισορροπούν πάνω στην ίδια διεπιφάνεια, η διάλυση θα πραγματοποιηθεί ανομοιογεννώς καθότι θα χαρακτηρίζεται από περισσότερους του ενός ρυθμούς διάλυσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ανομοιόμορφες διεργασίες είναι πιο αργές από τις ομοιόμορφες.

Ειδικά στη περίπτωση του μηχανισμού της ενυδάτωσης, η ύπαρξη τοποχημικών αντιδράσεων μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό προϊόντος πάνω στο διαλυόμενο υπόστρωμα. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως μια μορφή ανομοιόμορφης διάλυσης. Εάν το υγρό έχει κορεστεί από την σχηματιζόμενη φάση του προϊόντος, περαιτέρω διάλυση του υποστρώματος μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την διάχυση των αντιδρώντων ή και των προϊόντων μέσω

ενός κρυσταλλικού στερεού, διαδικασία που είναι πιθανότατα πολλή αργή σε συνθήκες περιβάλλοντος.

Μια από τις αντιδράσεις που συμβαίνουν στο τσιμέντο αποτελεί ένα καλό παράδειγμα για την εξήγηση του παραπάνω μηχανισμού. Όταν αναμιγνύεται το τσιμέντο με το νερό, πραγματοποιείται απευθείας αντίδραση πάνω στους κόκκους του τσιμέντου (διεπιφάνεια) και σχηματίζεται ο κρύσταλλος του ετρινγκίτη – με τοποχημική αντίδραση – μέσα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα (λιγότερο από μερικά λεπτά). Ο κρύσταλλος αυτός αρχικά εμποδίζει την είσοδο του νερού εντός των κόκκων και την συνέχιση της ενυδάτωσης. Σε αυτό το σημείο η διάχυση του νερού γίνεται με αργό ρυθμό μέσα από το κρυσταλλικό στερεό και συνήθως διαρκεί λίγες ώρες. Άπαξ και το νερό διαχυθεί εντός των κόκκων η αντίδραση συνεχίζεται και δε καθορίζεται πλέον από την ανομοιόμορφη διάλυση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στα περισσότερα συστήματα που αφορούν το τσιμέντο, η φάση του προϊόντος μπορεί να είναι άμορφη ή σε μικρό βαθμό κρυσταλλική. Στην περίπτωση αυτή, φαινόμενα στα όρια των κόκκων μπορεί να είναι κυρίαρχα και η επιφανειακή διάχυση μέσω της άμορφης μάζας μπορεί να πραγματοποιηθεί με μεγαλύτερους ρυθμούς από ότι η διάχυση μέσω στερεών. Αυτό καθιστά τις τοποχημικές διεργασίες πιο πιθανές κινητικά. Παρόλα αυτά, εάν η άμορφη φάση είναι πηγματώδης, μπορεί επίσης να περιέχει και υγρό νερό στους πόρους της και έτσι η διάκριση μεταξύ διάλυσης μέσω διαλύματος και επιφανειακής διάχυσης και κατ' επέκταση μεταξύ ομοιόμορφης και ανομοιόμορφης διάλυσης του υποστρώματος να είναι εξαιρετικά δύσκολη.

Παρά τις όσες διαφωνίες, σε γενικές γραμμές πέντε θεωρούνται οι πιο βασικές διεργασίες της ενυδάτωσης: η πυρήνωση, η ανάπτυξη και διάλυση, η διάχυση, η προσρόφηση, και η διόγκωση. [16]

➤ Το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197

Στο σημείο αυτό θα γίνει αναφορά στο Ευρωπαϊκό Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197, το οποίο έχει σκοπό να ορίσει τις προδιαγραφές των 27 διακριτών τύπων τσιμέντου και των συστατικών τους. Κάθε τύπος τσιμέντου ορίζεται από τις αναλογίες των συστατικών του που πρέπει να συνδυαστούν ώστε να παραχθεί το εκάστοτε προϊόν.

Το πρότυπο κατατάσσει όλους τους τύπους τσιμέντου σε έξι κατηγορίες αντοχών, ενώ διατυπώνει τα κριτήρια συμμόρφωσης και τους σχετικούς κανόνες, απαιτώντας τον χαρακτηρισμό των πρώτων υλών και την εναρμόνιση τους με αυτό. Τέλος στο πρότυπο περιλαμβάνονται και οι απαιτήσεις ανθεκτικότητας, ενώ συνδέεται με άλλα πρότυπα που αφορούν τους ελέγχους και τις δοκιμές του τσιμέντου.

Προηγουμένως, δόθηκαν οι ορισμοί του τσιμέντου, των κύριων και των δευτερευόντων συστατικών αυτού σύμφωνα με το πρότυπο. Στις επόμενες παραγράφους θα γίνει σύντομη αναφορά στις προδιαγραφές που ορίζει το πρότυπο για τα συστατικά του τσιμέντου, τις αντοχές και την ανθεκτικότητα.

❖ Κύρια Συστατικά

- **Κλίνκερ (K)** Το κλίνκερ για τσιμέντο Portland είναι ένα υδραυλικό υλικό, το οποίο πρέπει να απαρτίζεται κατά τα δύο τρίτα τουλάχιστον από ασβεστοπυριτικές ενώσεις ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ και $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), ενώ το υπόλοιπο να απαρτίζεται από φάσεις κλίνκερ που περιέχουν αργίλιο και σίδηρο, καθώς και άλλες ενώσεις. Η αναλογία κατά μάζα CaO/SiO_2 πρέπει να μην είναι μικρότερη του 2,0. Η περιεκτικότητα οξειδίου του μαγνησίου (MgO) δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5% κατά μάζα. [8,16]
- **Κοκκοποιημένη Σκωρία Υψικαμίνου (S)** Η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνου παράγεται από ταχεία ψύξη τηγμένης σκωρίας κατάλληλης σύνθεσης, που λαμβάνεται από την τήξη σιδηρομεταλλεύματος σε

υψικάμινο και περιέχει τουλάχιστον δύο τρίτα κατά μάζα υαλώδη σκωρία και διαθέτει υδραυλικές ιδιότητες όταν ενεργοποιηθεί κατάλληλα. Η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνου πρέπει να απαρτίζεται κατά τα δύο τρίτα τουλάχιστον κατά μάζα από το άθροισμα οξειδίου του ασβεστίου (CaO), οξειδίου του μαγνησίου (MgO) και οξειδίου του πυριτίου (SiO_2). Το υπόλοιπο περιέχει οξείδιο του αλουμινίου (Al_2O_3) μαζί με μικρές ποσότητες άλλων ενώσεων. Ο λόγος κατά μάζα $(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{SiO}_2)$ πρέπει να υπερβαίνει το 1. [16,17]

- **Ποζολανικά Υλικά (P, Q)** Τα ποζολανικά υλικά είναι φυσικές ουσίες με πυριτική ή αργιλοπυριτική σύνθεση, ή συνδυασμός αυτών. Αν και η ιπτάμενη τέφρα και η πυριτική παιπάλη έχουν ποζολανικές ιδιότητες, προδιαγράφονται σε χωριστές παραγράφους. Τα ποζολανικά υλικά δεν σκληρύνονται από μόνα τους όταν αναμειχθούν με νερό. Όταν λεπτοαλεστούν και με την παρουσία νερού, αντιδρούν σε κανονική θερμοκρασία περιβάλλοντος με διαλυμένο υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)_2) για να σχηματίσουν ενυδατωμένες ασβεστοπυριτικές και ασβεστοαργιλικές ενώσεις που αναπτύσσουν αντοχή. Αυτές οι ενώσεις είναι παρεμφερείς με αυτές που σχηματίζονται κατά τη σκλήρυνση υδραυλικών υλικών. Οι ποζολάνες αποτελούνται από δραστικό διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3). Το υπόλοιπο περιέχει οξείδιο του σιδήρου (Fe_2O_3) και άλλα οξείδια. Το ποσοστό δραστικού οξειδίου του ασβεστίου για την σκλήρυνση είναι αμελητέο. Η περιεκτικότητα δραστικού οξειδίου του πυριτίου δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 25% κατά μάζα. Τα ποζολανικά υλικά πρέπει να προετοιμάζονται σωστά, δηλαδή να επιλέγονται, να ομογενοποιούνται, να ξηραίνονται ή να επεξεργάζονται θερμικά και να αλέθονται, ανάλογα με την μορφή κατά την παραγωγή ή τη παράδοσή τους. [16]

- Ιπτάμενες Τέφρες (V, W)** Η ιπτάμενη τέφρα λαμβάνεται με ηλεκτροστατική ή μηχανική κατακρήμνιση των αιωρούμενων σωματιδίων στα καυσαέρια κλιβάνων που καίνε κονιορτοποιημένο άνθρακα. Δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί τέφρα που λαμβάνεται με άλλες μεθόδους σε τσιμέντο που συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις του ΕΛΟΤ-EN 197-1. Η ιπτάμενη τέφρα μπορεί να είναι πυριτικής ή ασβεστούχου φύσης. Στην πρώτη περίπτωση έχει ποζολανικές ιδιότητες, στη δεύτερη μπορεί να έχει, επιπρόσθετα, υδραυλικές ιδιότητες. Η απώλεια πύρωσης της ιπτάμενης τέφρας, που προσδιορίζεται σύμφωνα με το ΕΛΟΤ-EN 196-2, δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5% κατά μάζα. Η ιπτάμενη τέφρα με απώλεια πύρωσης από 5% έως 7% κατά μάζα μπορεί να γίνει επίσης αποδεκτή, με την προϋπόθεση ότι ικανοποιούνται στην περιοχή χρήσης ειδικές απαιτήσεις για την ανθεκτικότητα, ειδικά αντοχή σε ψύξη/απόψυξη, και για συμβατότητα με πρόσμικτα, σύμφωνα με τα κατάλληλα πρότυπα ή και κανονισμούς για σκυρόδεμα ή κονίαμα. Στην περίπτωση χρήσης ιπτάμενης τέφρας με απώλεια πύρωσης μεταξύ 5% και 7% κατά μάζα το ανώτατο όριο 7% πρέπει να αναφέρεται στην συσκευασία ή και στο δελτίο αποστολής του τσιμέντου.[16,8,17]
- Ψημένος Σχιστόλιθος (T)** Ο ψημένος σχιστόλιθος, ιδιαίτερα ο ψημένος ασφαλτούχος σχιστόλιθος, παράγεται σε ειδικό κλίβανο σε θερμοκρασία 800 °C περίπου. Εξαιτίας της σύνθεσης του φυσικού υλικού και της διαδικασίας παραγωγής, ο ψημένος σχιστόλιθος περιέχει φάσεις κλίνκερ, κυρίως πυριτικό διασβέστιο και αργιλικό ασβέστιο. Περιέχει επίσης εκτός από μικρές ποσότητες ελευθέρου οξειδίου του ασβεστίου και θειικού ασβεστίου, μεγαλύτερες ποσότητες οξειδίων με ποζολανικές ιδιότητες, ιδίως διοξείδιο του πυριτίου. Συνεπώς σε κατάσταση λεπτοαλεσμένης σκόνης ο ψημένος σχιστόλιθος παρουσιάζει έντονες υδραυλικές ιδιότητες όπως το τσιμέντο και επί πλέον ποζολανικές ιδιότητες . Ο επαρκώς αλεσμένος ψημένος σχιστόλιθος πρέπει να έχει αντοχή σε θλίψη τουλάχιστον 25

MPa σε ηλικία 28 ημερών όταν η δοκιμή διεξάγεται σύμφωνα με το ΕΛΟΤ-EN 197-1. Η διαστολή (σταθερότητα όγκου) του ψημένου σχιστόλιθου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 mm όταν προσδιορίζεται σύμφωνα με το ΕΛΟΤ-EN 196-2 χρησιμοποιώντας μίγμα 30% κατά μάζα αλεσμένου ψημένου σχιστόλιθου όπως περιγράφεται παραπάνω και 70% κατά μάζα ενός τσιμέντου CEM I συμμορφούμενο με το ΕΛΟΤ-EN 197-1. [1,16]

- **Ασβεστόλιθος (L, LL)** Ο ασβεστόλιθος πρέπει να πληρεί ορισμένες προϋποθέσεις προκειμένου να μπορεί να συμπεριληφθεί στα συστατικά του τσιμέντου. Η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) υπολογιζόμενη από την περιεκτικότητα σε οξείδιο του ασβεστίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 75% κατά μάζα. Η περιεκτικότητα αργίλου, προσδιοριζόμενη με τη μέθοδο κυανού του μεθυλενίου σύμφωνα με το ΕΛΟΤ-EN 933-9, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 1,20g/100g. Για τη δοκιμή αυτή ο ασβεστόλιθος πρέπει να κονιορτοποιηθεί σε μια λεπτότητα περίπου 5000 cm²/g προσδιοριζόμενη ως ειδική επιφάνεια σύμφωνα με το ΕΛΟΤ-EN 196-6. Η περιεκτικότητα ολικού οργανικού άνθρακα (TOC), όταν προσδιορίζεται σύμφωνα με το EN 13639, πρέπει να συμμορφώνεται με τα παρακάτω κριτήρια:

- LL: δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,20% κατά μάζα

- L: δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,50% κατά μάζα.

- **Πυριτική Παιπάλη (D)** Η πυριτική παιπάλη προέρχεται από την αναγωγή χαλαζία υψηλής καθαρότητας με άνθρακα σε κλιβάνους ηλεκτρικού τόξου κατά την παραγωγή πυριτίου και κραμάτων σιδηροπυριτίου και συνίσταται από πολύ λεπτά σφαιρικά σωματίδια με περιεκτικότητα τουλάχιστον 85% κατά μάζα σε άμορφο διοξείδιο του πυριτίου.[20]

❖ Δευτερεύοντα Συστατικά

Τα δευτερεύοντα συστατικά είναι ειδικά επιλεγμένα, ανόργανα φυσικά ορυκτά υλικά, που προκύπτουν κατά τη διαδικασία παραγωγής του κλίνκερ. Ύστερα από κατάλληλη προετοιμασία και εξαιτίας της κοκκομετρικής τους κατανομής, βελτιώνουν τις φυσικές ιδιότητες του τσιμέντου. Μπορεί να είναι αδρανή ή να έχουν ελαφρώς υδραυλικές, λανθάνουσες υδραυλικές ή ποζολανικές ιδιότητες. Τα δευτερεύοντα υλικά πρέπει να προετοιμάζονται σωστά, δηλαδή να επιλέγονται, να ομογενοποιούνται, να ξηραίνονται και να αλέθονται ανάλογα με την μορφή κατά την παραγωγή ή την παράδοσή τους. Δεν πρέπει να αυξάνουν αισθητά την απαίτηση σε νερό του τσιμέντου ή να προκαλούν την καταστροφή του σκυροδέματος ή του κονιάματος με οποιοδήποτε τρόπο ή να μειώνουν την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση.

❖ Θεϊκό Ασβέστιο

Το θεϊκό ασβέστιο προστίθεται στα άλλα συστατικά του τσιμέντου κατά τη διάρκεια της παραγωγής του για τον έλεγχο της πήξης. Το θεϊκό ασβέστιο μπορεί να είναι γύψος, διυδρίτης ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ημιυδρίτης ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) ή ανυδρίτης (άνυδρο θεϊκό ασβέστιο CaSO_4), ή οποιοδήποτε μίγμα αυτών. [21]

❖ Πρόσθετα

Για τους σκοπούς του ΕΛΟΤ-EN 197-1 τα πρόσθετα είναι συστατικά που δεν καλύπτονται από τις προαναφερθείσες κατηγορίες, τα οποία προστίθενται για να βελτιώσουν την παραγωγή ή τις ιδιότητες του τσιμέντου. Η ολική ποσότητα των οργανικών προσθέτων δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% κατά μάζα του τσιμέντου (εξαιρούνται οι χρωστικές). Η ποσότητα των οργανικών προσθέτων σε ξηρά βάση δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,5% κατά μάζα του τσιμέντου. Αυτά τα πρόσθετα δεν πρέπει να συμβάλλουν στη διάβρωση του οπλισμού ή να βλάπτουν τις ιδιότητες του τσιμέντου, ή του σκυροδέματος ή κονιάματος που γίνεται από το τσιμέντο.

Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζονται συνοπτικά όλοι οι τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197. Τα ποσοστά είναι % κατά βάρος, ενώ δεν περιλαμβάνεται ο γύψος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3 ΤΥΠΟΙ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΕΛΟΤ EN 197 (%κ.β.).

Τύπος	Ονομασία	Κόρια Συστατικά									Δεστ. Συστ.	
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L		
Τσιμέντα Portland												
CEM I	I	95-100									0-5	
Σύνθετα Τσιμέντα 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								
	II/A-P	80-90			6-20							
	II/B-P	65-79			21-35							
	II/A-Q	80-94				6-20						
	II/B-Q	65-79				21-35						
	II/A-V	80-94					6-20					
	II/B-V	65-79					21-35					
	II/A-W	80-94						6-20				
	II/B-W	65-79						21-35				
	II/A-T	80-94							6-20			
	II/B-T	65-79							21-35			
	II/A-L	80-94								6-20		
	II/B-L	65-79								21-35		
	II/A-LL	80-94								6-20		
	II/B-LL	65-79								21-35		
	II/A-M	80-94	6-20									
	II/B-M	65-79	21-35									
Σκωριοσιμμένα												
CEM III	III/A	35-64	36-65								0-5	
	III/B	20-34	66-80									
	III/C	5-19	81-95									
Ποζολανικά Τσιμέντα												
CEM IV	IV/A	65-89		11-35							0-5	
	IV/B	45-64		36-55								
Σύνθετα Τσιμέντα												
CEM V	V/A	40-64	18-30		16-30						0-5	
	V/B	20-39	31-50		31-50							

❖ Μηχανικές, Φυσικές και Χημικές Απαιτήσεις

Οι κανονικές αντοχές του τσιμέντου (standard strength) είναι οι θλιπτικές που προσδιορίζονται σε συμφωνία με το ΕΛΟΤ EN 196-1 στις 28 ημέρες και θα πρέπει να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις που δίνονται στον Πίνακα 1.4 . Έχουν θεσπισθεί τρεις κατηγορίες αντοχών: 32,5 N/mm², 42,5 N/mm² και 52,5 N/mm².

Οι πρώιμες αντοχές μετρώνται στις 2 ημέρες εκτός από την κατηγορία 32.5 όπου και μετρώνται στις 7 ημέρες. Για κάθε κατηγορία προβλέπονται δύο τάξεις πρώιμων αντοχών, η πρώτη αναφέρεται στις κανονικές πρώιμες αντοχές, N, και η άλλη που συμβολίζεται με το γράμμα R στις μεγάλες πρώιμες αντοχές ή διαφορετικά αντιστοιχεί σε τσιμέντα ταχείας ανάπτυξης αντοχών. Όλα τα όρια φαίνονται στον Πίνακα 1.4.

Όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες προβλέπεται ο έλεγχος μόνο της αρχής χρόνου πήξης και της σταθερότητας του όγκου. Και τα δύο αυτά μεγέθη πρέπει να καλύπτουν τις απαιτήσεις του Πίνακα 1.4.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.4 – ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΕΛΟΤ EN 197.

Κατηγορία Αντοχών (ονομαστική)	Αντοχή σε Θλίψη			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			52,5	45 ≤	
52,5 R	30		52,5		

Όσον αφορά τις χημικές απαιτήσεις ελέγχονται μόνο η απώλεια πύρωσης, το αδιάλυτο υπόλειμμα, τα SO₃, τα χλωριόντα και η ποζολανικότητα. Οι έλεγχοι αυτοί γίνονται στους τύπους και στις κατηγορίες τσιμέντου που αναφέρονται στον Πίνακα 1.5 όπου δίνονται και τα όρια που πρέπει να καλύπτονται.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.5 – ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΕΛΟΤ ΕΝ 197.

Ιδιότητα	Πρότυπο	Τύπος	Κατηγορία	Απαίτηση (% κ.β.)
Απώλεια Πύρωσης	ΕΛΟΤ ΕΝ 196-2	CEM I	όλες	≤ 5
Αδιάλυτο Υπόλειμμα	ΕΛΟΤ ΕΝ 196-2	CEM I	όλες	≤ 5
Θειικά (SO ₃)	ΕΛΟΤ ΕΝ 196-2	CEM I	32,5	≤ 3,5
		CEM II	32,5 R	≤ 3,5
		CEM IV	42,5 R	≤ 3,5
		CEM V	52,5	≤ 3,5
		CEM III	όλες	≤ 4
Χλωριόντα	ΕΛΟΤ ΕΝ 196-21	όλοι	όλες	≤ 0,10
Ποζολανικότητα	ΕΛΟΤ ΕΝ 196-5	CEM IV	όλες	

1.2.2 Τα χημικά πρόσθετα στο σκυρόδεμα

Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 934 τα χημικά πρόσθετα του τσιμέντου κατατάσσονται στις κατηγορίες που φαίνονται παρακάτω.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.6 ΧΗΜΙΚΑ ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Type	Όνομασία	Name
A	Ρευστοποιητές	Water-reducers
B	Επιβραδυντές	Retarders
C	Επιταχυντές	Accelerators
D	Ρευστοποιητές- Επιβραδυντές	Water-reducers and retarders
E	Ρευστοποιητές- Επιταχυντές	Water-reducers and accelerators
F	Υπερρευστοποιητές	Superplasticizers
G	Υπερρευστοποιητές γενιάς	νεά Superplasticizers and retarders

❖ Ρευστοποιητές

Τα ρευστοποιητικά πρόσθετα χρησιμοποιούνται για την αύξηση της ρευστότητας χωρίς μεταβολή της αντοχής, για την αύξηση της αντοχής για δεδομένη ρευστότητα και για την μείωση του ποσοστού τσιμέντου για δεδομένη ρευστότητα και αντοχή. Οι ρευστοποιητές προκαλούν συνήθως επιβράδυνση της πήξης, έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μείωση του λόγου νερού/τσιμέντο και φυσικά ως επιβραδυντικά πήξης. Επίσης, προκαλούν αύξηση της αντοχής στις πρώιμες ηλικίες λόγω της ομοιόμορφης διασποράς των κόκκων του τσιμέντου.

Ως ρευστοποιητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά όπως η λιγνίνη, κάποια ανθρακοξυλικά οξέα και πολυσακχαρίνες. [22]

❖ Υπερρευστοποιητές

Τα υπερρρευστοποιητικά χημικά πρόσθετα αποτελούν ειδική κατηγορία προσθέτων επιφανειακής δράσης, τα οποία αυξάνουν την ρευστότητα στο σκυρόδεμα 3-4 φορές περισσότερο από τα συνήθη ρευστοποιητικά· επιτρέπουν, έτσι, την μείωση του νερού ανάμιξης έως και 25 % , ενώ παράλληλα δεν μειώνουν την εργασιμότητα του σκυροδέματος. Ακόμα προσφέρουν εξαιρετική διασπορά των κόκκων του τσιμέντου με αποτέλεσμα να επιταχύνεται η ενυδάτωση του χωρίς να προκαλούν επιβράδυνση στην πήξη. Συν τοις άλλοις η διασπορά των κόκκων αυξάνει σημαντικά την αντοχή του σκυροδέματος. Σαν υπερρρευστοποιητικά χρησιμοποιούνται συνήθως άλατα μελαμίνης και ενώσεις φορμαλδεΐδης.[22]

❖ **Επιταχυντές**

Η προσθήκη των επιταχυντών στο σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της ανάπτυξης των πρώιμων αντοχών του σκυροδέματος, επιταχύνοντας την πήξη του τσιμέντου. Συνήθως χρησιμοποιούνται όταν το σκυρόδεμα χυτεύεται υπο χαμηλές θερμοκρασίες 2° έως 4° C και επισπεύδουν την διεκπεραιωση της κατασκευής. Σε υψηλές θερμοκρασίες , αντίθετα, η προσθήκη επιταχυντών στο σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα να αναπτύσσονται πολύ υψηλοί ρυθμοί ενυδάτωσης, που με την σειρά τους προκαλούν ρηγμάτωση στο σκυρόδεμα λόγω συρρίκνωσης. Ο πιο συνήθης επιταχυντής είναι το CaCl_2 (χλωριούχο ασβέστιο) αλλά και διάφορα πυριτικά ιόντα που ευνοούν την διάλυση κατιόντων και ανιόντων του τσιμέντου. [22]

❖ **Επιβραδυντές**

Οι επιβραδυντές χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις σκυροδέτησης σε υψηλές θερμοκρασίες και για τον έλεγχο της πήξης του σκυροδέματος ώστε να αποφεύγονται αρμοί διακοπής όταν η σκυροδέτηση διαρκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Γενικότερα χρησιμοποιούνται όπου απαιτείται επιβράδυνση του ρυθμού πήξης. Η χρήση τους αυξάνει την αντοχή του σκυροδέματος, ειδικά τις πρώτες ημέρες λόγω της μείωσης της ποσότητας του νερού ανάμιξης και της αναστολής της ενυδάτωσης των χαμηλής αντοχής αργιλικών ενώσεων τσιμέντου. Ένα παράδειγμα επιβραδυντή είναι τα αργιλικά ιόντα που εμποδίζουν τη διάλυση κατιόντων και ανιόντων του τσιμέντου. [22]

* Θα ήταν φρόνιμο να σημειώσουμε ότι υπάρχουν κάποια χημικά πρόσθετα που ανάλογα την ποσότητα τους δρουν ως επιβραδυντικά ή ως επιταχυντικά. Η παρουσία ορισμένων ανιόντων (π.χ. Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) μειώνει τη διαλυτότητα των ιόντων πυριτίου και αργιλίου (φαινόμενο που επικρατεί για μικρές συγκεντρώσεις), αλλά ευνοεί τη διαλυτότητα των ιόντων ασβεστίου (φαινόμενο που επικρατεί για μεγάλες συγκεντρώσεις). Έτσι, μικρές συγκεντρώσεις, όπως 0,1% - 0,3% κ.β. τσιμέντου, αλάτων ασθενών βάσεων και ισχυρών οξέων (CaCl_2) ή ισχυρών βάσεων και ασθενών οξέων (π.χ. K_2CO_3) έχουν επιβραδυντικό χαρακτήρα, ενώ μεγαλύτερες συγκεντρώσεις συγκεντρώσεις (πάνω από 1%) έχουν επιβραδυντικό χαρακτήρα.

1.2.3 Νερό

Σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 1008 το νερό που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάμιξη και την συντήρηση του σκυροδέματος, πρέπει να είναι καθαρό, δηλαδή να μην περιέχει συστατικά που μπορούν να προκαλέσουν δυσμενείς επιρροές στην αντοχή και στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος ή να μειώσουν την προστασία του οπλισμού από την διάβρωση. Ύδατα που περιέχουν βοομηχανικά απόβλητα, ζωικά απορρίματα, ελαιώδεις ή λιπαρές ουσίες ή ανθρακικό κάλιο είναι ακατάλληλα για την παρασκευή σκυροδέματος.

Συνήθως, για την διαδικασία της παρασκευής του σκυροδέματος προτιμάται το νερό που χαρακτηρίζεται ως πόσιμο και πρέπει να πληρεί τις ακόλουθες προϋποθέσεις :

- το pH να είναι μεγαλύτερο του 4
- η περιεκτικότητα των αλάτων να είναι μικρότερη του 3.5 %
- η περιεκτικότητα σε θειικά να είναι μικρότερη του 0,5%
- η περιεκτικότητα σε νάτριο να είναι μικρότερη από 3 %
- η περιεκτικότητα σε διαλυμένες και αιωρούμενες οργανικές ουσίες να είναι χαμηλή
- και να απουσιάζουν κάθε είδους λίπη και ελαία

Τα όρια αναλογίας νερού προς τσιμέντο κυμαίνονται γενικά μεταξύ $w/c = 0.4$ και $w/c = 0.6$, ώστε να εξασφαλίζεται αφενός η εργασιμότητα του παραγόμενου σκυροδέματος αλλά και η αντοχή του στη διάβρωση. Θεωρητικά για την πλήρη ενυδάτωση του τσιμέντου ο λόγος w/c πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0,225 και 0,250 σε αυτές τις τιμές όμως το υλικό δεν είναι εργάσιμο. Από την άλλη μεριά με τιμές άνω του 0,6 η διαπερατότητα του σκυροδέματος αυξάνεται κατά πολύ και υπάρχει ο κίνδυνος χημικής προσβολής, λόγω της αύξησης του μεγέθους και του αριθμού των τριχοειδών πόρων. [23,24]

1.2.4 Αδρανή

Αδρανή υλικά σκυροδέματος αποκαλούμε τα λίθινα υλικά του σκυροδέματος που παραμένουν χημικά αδρανή, σε αντίθεση με το τσιμέντο και το νερό, στη διαδικασία της σκλήρυνσης του. Αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του όγκου του σκυροδέματος (έως και 70%) και επηρεάζουν τόσο την αντοχή όσο και τις φυσικές του ιδιότητες.

Ως αδρανή μπορούν να χρησιμοποιηθούν, θεωρητικά, οποιαδήποτε υλικά συγκεντρώνουν τις εξής τρεις βασικές ιδιότητες. Επαρκή αντοχή, επαρκή πρόσφυση και χημική ανεκτικότητα. Τα καταλληλότερα αδρανή προέρχονται είτε από πυριτικά είτε από ασβεστολιθικά πετρώματα. Ανάλογα την προέλευση τους διαχωρίζονται σε συλλεκτά και θραυστά. Τα συλλεκτά προέρχονται απ'ευθείας από την φύση (πχ από ρέματα) και είναι συνήθως στρογγυλόμορφα και λεία. Τα θραυστά τα λαμβάνουμε από την θραύση πετρωμάτων και είναι γενικά κυβόμορφα ή με γωνίες και έχουν τραχεία επιφάνεια.

Τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι η αντοχή τους (η αντοχή του πετρώματος που προέρχονται), η καθαρότητα τους (ύπαρξη ή μη προσμίξεων), η πρόσφυση με την κονία, η κοκκομετρική τους διαβάθμιση και η χημική συμπεριφοράς τους με τα άλλα συστατικά του σκυροδέματος.

Η ύπαρξη προσμίξεων στα αδρανή, είτε στην επιφάνεια τους, είτε μέσα στην μάζα τους μπορούν να εμποδίσουν την πρόσφυση με το κονίαμα ή να έχουν επιβλαβή χημική επίδραση στο τσιμέντο ή στον οπλισμό. Ουσίες, όπως η πυριτική παιπάλη, οργανικές προσμίξεις, θειούχες ενώσεις, χλωριούχες ή φωσφορικές ενώσεις δεν πρέπει να υπάρχουν στα αδρανή καθότι επηρεάζουν απόλυτα την καθαρότητα τους.

Όσον αφορά την χημική συμπεριφορά τους θα πρέπει οπωσδήποτε να ελέγχεται το κατά πόσον τα αδρανή περιέχουν ποσότητες πυριτίου που μπορούν να προσβληθούν από αλκάλια που προέρχονται από το τσιμέντο, ενώ το σκυρόδεμα εκτίθεται σε υγρό περιβάλλον. Σε αυτή την περίπτωση ενέχει ο κίνδυνος αντίδρασης μεταξύ αλκαλίων και αδρανών με αποτέλεσμα την καταστροφή του σκυροδέματος μέσω της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης.

Λόγω του ακανόνιστου σχήματος των αδρανών, αυτά δεν εφάπτονται μεταξύ τους κατά την παρασκευή του σκυροδέματος. Ανάμεσα στα κενά που δημιουργούνται εισέρχεται το κονίαμα και τα καλύπτει. Επομένως ο όγκος του κονιάματος πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τα κενά που δημιουργούν οι κόκκοι των αδρανών για να έχουμε πλήρη κάλυψη των κενών. Επειδή το κονίαμα είναι λιγότερο ανθεκτικό από τα αδρανή, προτιμάται τα κενά αυτά που υπάρχουν λόγω της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών να είναι όσο λιγότερα γίνεται, ώστε να αυξάνεται η αντοχή του σκυροδέματος. Προτιμώνται, λοιπόν, τα αδρανή όπου το κλάσμα κόκκων διαμέτρου από 250 μm είναι το 1/5 έως 1/4 της συνολικής ποσότητας.

Οι ιδιότητες που πρέπει να πληρούν, ελέγχονται ως προς τα γεωμετρικά και τα φυσικά τους χαρακτηριστικά. Για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ελέγχεται η συνολική επιφάνεια των αδρανών, το μέγεθος των κόκκων και το σχήμα τους, ενώ όσον αφορά τα φυσικά χαρακτηριστικά ελέγχονται η αντοχή του μητρικού πετρώματος, η αντοχή σε επιφανειακή φθορά και θράυση, η ανθεκτικότητα σε αποσάρθρωση και το πορώδες. [25]

Χρήσιμο είναι να πούμε ότι οτιδήποτε έχει να κάνει με τα αδρανή περιέχεται στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN12-620.

1.2.5 Οπλισμός Σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό με υψηλή αντοχή σε θλίψη αλλά με μικρή εφελκυστική αντοχή, γι αυτό και η ανάληψη των εφελκυστικών δυνάμεων στις κατασκευές σκυροδέματος γίνεται από τον χάλυβα οπλισμού, που είναι σε μορφή ράβδων κυκλικής διατομής. Στην Ελλάδα παράγεται και κυκλοφορεί χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος σε μορφή ευθύγραμμων ράβδων, ρολών, προκατασκευασμένων κλωβών συνδετήρων και προκατασκευασμένων ηλεκτροσυγκολλητών δικτυωμάτων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι από το 2005 η μόνη ποιότητα χάλυβα που πρακτικά χρησιμοποιείται στην Ελλάδα είναι ο B500C και για τα πλέγματα B500A. Οι χάλυβες για τον οπλισμό του σκυροδέματος κατατάσσονται σύμφωνα με τις κοινοτικές και ελληνικές διατάξεις στα υλικά ασφαλείας. Λόγο της έντονης σεισμικής δραστηριότητας που παρουσιάζει η Ελλάδα η ανάγκη έλεγχου της ποιότητας του χάλυβα είναι ύψιστης σημασίας.

Σήμερα η κατηγορία, οι διαστάσεις, οι αντοχές και οι λοιπές απαιτήσεις χαρακτηρισμών που πρέπει να ικανοποιούν οι χάλυβες του οπλισμένου σκυροδέματος προδιαγράφονται από τον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (ΚΤΧ-2000) τα πρότυπα του ΕΛΟΤ 959, ΕΛΟΤ 971. Σύμφωνα με τα πρότυπα του ΕΛΟΤ και τον ΚΤΧ-2000 οι χάλυβες οπλισμένου σκυροδέματος διακρίνονται [57, 58, 59]:

- Σύμφωνα με τη μορφή επιφάνειας σε λείες ράβδους κυκλικής διατομής και σε ράβδους με ανάγλυφες νευρώσεις (υψηλής συνάφειας).
- Σύμφωνα με τη μέθοδο παραγωγής, που μπορεί να είναι θερμή έλαση χωρίς περαιτέρω κατεργασία (ΘΕ-Χ), θερμή έλαση ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία (ΘΕ-Θ), και ψυχρή κατεργασία με στρέψη ή έλαση ή διέγκυση (ή συνδυασμό αυτών) του προϊόντος της θερμής έλασης (ΨΚ-Ο).
- Σύμφωνα με τη συγκολλησιμότητα σε χάλυβες συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις και σε χάλυβες συγκολλησίμους που φέρουν σήμανση “S”.

- Σύμφωνα με την πλαστιμότητα (στον Κ.Τ.Χ. χρησιμοποιείται ο όρος «ολκιμότητα», αντί του όρου «πλαστιμότητα», ο οποίος υπονοεί τον «δείκτη πλαστιμότητας υλικού, με», που ισούται με το λόγο της παραμόρφωσης στη μέγιστη τάση προς την παραμόρφωση διαρροής), σε χάλυβες υψηλής πλαστιμότητας (“H”) και σε χάλυβες συνήθους πλαστιμότητας (“N”).
- Σύμφωνα με την αντοχή σε διάβρωση σε κοινούς χάλυβες (κράματα σιδήρου- άνθρακα) και σε μικρές περιεκτικότητες σε άλλα στοιχεία και ανοξειδωτους χάλυβες (με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο 12%). [26,27,28]

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.7 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΛΟΤ

Κατηγορία Χάλυβα	Προδιαγραφή	Ελάχιστο όριο διαρροής [MPa]	Περίοδος χρήσης (Δεκαετίες)
S220	ΕΛΟΤ 959	220	έως '60
S400	ΕΛΟΤ 959	400	'60 έως '90
S400s	ΕΛΟΤ 971	400	αρχές '90
S500	ΕΛΟΤ 959	500	αρχές '90
S500s	ΕΛΟΤ 971	500	αρχές '90
S500A	ΕΛΟΤ 1421	500	από τέλη 2006
B500C	ΕΛΟΤ 1421	500	από τέλη 2006

1.3 Ιδιότητες σκυροδέματος

Βασικές ιδιότητες του σκυροδέματος θεωρούνται η ανθεκτικότητα σε διάρκεια, η εργασιμότητα και η αντοχή.

❖ Ανθεκτικότητα

Το πρόβλημα της ανθεκτικότητας σε διάρκεια αποτελεί τη σήμερα ημέρα το σημαντικότερο ζήτημα των κατασκευών από σκυρόδεμα. Το οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως και όλα τα δομικά υλικά, έχει πεπερασμένο χρόνο ζωής ο οποίος επηρεάζεται από τη διαπερατότητα, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις φυσικοχημικές ή μηχανικές επιδράσεις.

Η διαπερατότητα, η οποία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες είναι και αυτή που κατά κύριο λόγο επηρεάζει την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Η σύσταση του τσιμέντου, το πορώδες, η συμπύκνωση, ο λόγος νερού προς τσιμέντο, η ύπαρξη ρωγμών, αλλά και η συντήρηση μιας κατασκευής από σκυρόδεμα επηρεάζουν τη διαπερότητα. Όπως, επίσης, και οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η μηχανική φθορά και οι ακραίες θερμοκρασιακές μεταβολές. [29]

❖ **Αντοχή**

Η αντοχή στο σκυρόδεμα αναφέρεται στη μέγιστη τάση που μπορεί να ασκηθεί στο υλικό μέχρι να προκληθεί θραύση. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι μεγάλη και τα στοιχεία απο σκυρόδεμα σχεδιάζονται έτσι ώστε αυτή η ιδιότητα να εκμεταλλευθεί στο έπακρο. Ο μεγαλύτερος ρόλος στην τελική θλιπτική αντοχή μιας κατασκευής από σκυρόδεμα συντελείται από την 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. Η αντοχή ακόμη επηρεάζεται και από την ύπαρξη εγκλωβισμένου αέρα στη δομή του σκυροδέματος, που επίσης ευξάνει το πορώδες και κατ'επέκταση μείωνει την αντοχή. [29]

❖ **Εργασιμότητα**

Εργασιμότητα είναι η ιδιότητα η οποία καθορίζει το έργο που απαιτείται για την μεταφορά, διάστρωση, συμπύκνωση και συντήρηση του σκυροδεμάτος, χωρίς απόμιξη των υλικών. Εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ρευστότητα του νωπού σκυροδέματος και τη συνοχή της μάζας, δηλαδή από την συνεκτικότητα. Είναι γνωστό πλέον ότι σκυροδέματα που διαστρώνονται ή συμπυκνώνονται δύσκολα, παρουσιάζουν προβληματική αντοχή και ανθεκτικότητα σε διάρκεια. [29]

1.4 Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος

Από τη φύση του το σκυροδέμα είναι ανομοιογενές υλικό. Η ανομοιογένεια αυτή οφείλεται σε μικροδιαφορές στην ποιότητα των υλικών (κυρίως των αδρανών) και την αναλογία τους στο μίγμα (λόγω π.χ. απορρύθμισης των ζυγιστηρίων, του αναμικτήρα κλπ) και σε διαφορές στη διάστρωση, συμπύκνωση ή συντήρηση του σκυροδέματος από θέση σε θέση κατασκευής (π.χ. περιοχές μεγάλης ή μικρής πυκνότητας οπλισμού, επιφάνεια ή εσωτερικό ενός δομικού στοιχείου, κρυφή ή βάση ενός υποστυλώματος ή τοιχώματος κλπ). Λόγω της ανομοιομορφίας αυτής η ποιότητα, και πιο συγκεκριμένα η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε ένα σημείο της κατασκευής, f_c , θεωρείται σαν τυχαία μεταβλητή, χαρακτηρίζεται δηλ από μία πιθανοτική κατανομή, με μέσο όρο, f_{cm} , τυπική απόκλιση s κλπ.

Καθοριστικά για την ασφάλεια μιας κατασκευής είναι τα αδύναμα σημεία της. Γι' αυτό ο σχεδιασμός των δομικών στοιχείων βασίζεται όχι στη μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, f_{cm} , αλλά σε μία μικρότερη τιμή, τη χαρακτηριστική αντοχή, f_{ck} . Κατά γενικά αποδεκτή σήμερα σύμβαση, σαν χαρακτηριστική αντοχή ορίζεται η τιμή εκείνη κάτω από την οποία έχει πιθανότητα 5% να βρεθεί η αντοχή ενός τυχαίου δοκιμίου σκυροδέματος (δηλ. αν ολόκληρη η ποσότητα του σκυροδέματος μετατρεπόταν σε δοκίμια, μόνο το ποσοστό υποαντοχής $p=5\%$ των αντοχών αυτών των δοκιμίων θα ήταν κάτω από την χαρακτηριστική αντοχή και το υπόλοιπο 95 % θα ήταν πάνω απ' αυτήν). Έτσι αν η αντοχή του σκυροδέματος ακολουθεί την κανονική κατανομή πιθανοτήτων (κατανομή Gauss), με μέση τιμή f_{cm} και τυπική απόκλιση s , είναι : $f_{ck} = f_{cm} - 1,645 \cdot s$ όπου ο συντελεστής $-1,645$ αντιστοιχεί σε τιμή της σωρευτικής συνάρτησης κατανομής κατά Gauss ίση με 5%.

Έτσι δύο σκυροδέματα με διαφορετική διασπορά ή διαφορετικό έλεγχο ποιότητας και επομένως διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης, s , θεωρούνται ισοδύναμα από απόψεως ασφάλειας, αν έχουν την ίδια χαρακτηριστική αντοχή, f_{ck} . Αυτό σημαίνει πως αυτό που έχει τη μεγαλύτερη διασπορά ή το χειρότερο έλεγχο ποιότητας (δηλ. τη μεγαλύτερη τυπική

απόκλιση), θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη μέση τιμή f_{cm} και επομένως μεγαλύτερο κόστος. [5]

1.5 Κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος

Σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος του 1997, ορίζονται οι παρακάτω κατηγορίες σκυροδέματος ανάλογα με τις χαρακτηριστικές τιμές της συμβατικής αντοχής κυλίνδρου 150x300mm και κύβου 150mm: C8/10, C12/15, C16/20, C20/25, C25/30, C30/37, C35/45, C45/50, C45/55 και C50/60 (π.χ. το C16/20 έχει χαρακτηριστική τιμή συμβατικής αντοχής κυλίνδρου $f_{ck} = 16\text{MPa}$ και κύβου 20MPa). Ανάλογα με τη χαρακτηριστική τιμή της συμβατικής αντοχής κύβου 200mm, ο Γερμανικός Κανονισμός **DIN 1045** ορίζει τις εξής κατηγορίες: B15, B25, B35, B45 και B55. ενώ τέλος σύμφωνα με το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σκυροδέματος, το πρότυπο **ACI 318** ορίζει ως χαρακτηριστική αντοχή τη συμβατική αντοχή κυλίνδρου 150x300mm με ποσοστό υποαντοχής 10% αντί 5%, f'_c (που μπορεί να πάρει συνεχείς τιμές) [5,30,31]

Κλείνοντας, οφείλουμε να πούμε ότι έχει ολοκληρωθεί η διαβούλευση για τον νέο Κανόνα Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2015 (ΚΤΣ-15) ο οποίος μετά την ψήφιση του θα αντικαταστήσει τον ισχύοντα ΚΤΣ-97.

Κεφάλαιο 2: Διάβρωση σκυροδέματος

2.1 Εισαγωγή

Η διάβρωση του χάλυβα αποτελεί ένα παγκόσμιο πρόβλημα των κατασκευών στις οποίες το κύριο δομικό υλικό είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. Εξαιτίας της διάβρωσης του χάλυβα είναι δυνατόν να προκληθούν καταστροφές που κυμαίνονται από μικρές παραμορφώσεις μέχρι ολοκληρωτικές δομικές καταστροφές. Από καθαρά θεωρητική άποψη είναι υλοποιήσιμος ο σχεδιασμός και η παραγωγή σκυροδέματος με τρόπο που δεν θα υπάρχει διάβρωση στον ενσωματωμένο χάλυβα. Πρακτικά, ωστόσο, είτε λόγω κατασκευαστικών αναγκών που επιβάλλουν διακλαδώσεις, είτε λόγω αποκλίσεων από τις προδιαγραφές παρασκευής, δημιουργούνται στο σκυρόδεμα δίαυλοι διεισδύσεως οξυγόνου και υγρασίας, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο τις προϋποθέσεις διάβρωσης του οπλισμού.

Οι κατασκευές από σκυρόδεμα γενικά έχουν πολύ καλή συμπεριφορά στη διάβρωση και αντέχουν σε διάφορα περιβάλλοντα χρήσης. Έχουν παρατηρηθεί όμως περιπτώσεις, στις οποίες το σκυρόδεμα έχει υποστεί σημαντικές βλάβες και αυτό επηρεάζει άμεσα τη στατικότητα της κατασκευής. Η φθορά του σκυροδέματος όμως συνεπάγεται και διάβρωση του οπλισμού το οποίο έχει πιο καταστρεπτικά αποτελέσματα από αυτή του σκυροδέματος. Η αποσάθρωση που μπορεί να υποστεί το σκυρόδεμα κάποιες φορές οφείλεται σε περισσότερους από έναν παράγοντες ενώ σε κάποιες άλλες η παρουσία ενός μόνο παράγοντα είναι ικανή ώστε να προκύψει πρόβλημα ευστάθειας της κατασκευής. Επομένως το πρόβλημα της διάβρωσης είναι δυνατόν να καταλήξει στην αποκάλυψη του χάλυβα, την απομείωση της μάζας του και εν τέλει στην μείωση της αντοχής του σύνθετου συστήματος σκυρόδεμα-οπλισμού. Τα προβλήματα αυτά επιτείνονται με την παρουσία χλωριόντων.

Η διάβρωση του σκυροδέματος είναι ένα σύνθετο φαινόμενο, το οποίο οφείλεται συνήθως σε περισσότερα από ένα αίτια. Γενικά, η διάβρωση του

σκυροδεματος μπορεί να είναι φυσική ή χημική. Η φυσική διάβρωση σχετίζεται με φθορές από καθαρά μηχανικούς λόγους, ενώ η χημική διάβρωση με φαινόμενα χημικά ή φυσικοχημικά, χωρίς να αποκλείεται και η συνέργεια μηχανικών αιτίων. [32,33,34]

➤ **Χημική διάβρωση:** Σχετίζεται με φαινόμενα φυσικοχημικά ή χημικά, χωρίς να αποκλείεται και η συμμετοχή μηχανικών δράσεων. Η χημική δράση μπορεί να χωριστεί σε τρία είδη [32]:

- *Διάβρωση λόγω εκχύλισης ιόντων:* Τέτοια διάβρωση προκαλούν τα νερά με μικρή σκληρότητα που διαλύουν το υδροξείδιο του ασβεστίου.
- *Διάβρωση από ιοντοανταλλαγή:* Πραγματοποιείται μεταξύ του σκυροδέματος και του διαβρωτικού περιβάλλοντος μεταξύ ιόντων που έχουν παρόμοια ιοντική ακτίνα και περίπου το ίδιο μέγεθος ατόμων. Ως παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί η επίδραση του $MgCl_2$ στην υδράσβεστο προς παραγωγή $Mg(OH)_2$ και $CaCl_2$. Η ελάττωση της υδρασβέστου οδηγεί στην απώλεια των υδραυλικών ιδιοτήτων και των μηχανικών αντοχών του τσιμέντου.
- *Διάβρωση μέσω σχηματισμού μεγαλομοριακών ενώσεων.* Σχηματίζονται μόρια στο εσωτερικό των πόρων τα οποία έχουν μεγάλο όγκο με συνέπεια την καταστροφή του σκυροδέματος. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι ο εντριγκίτης που σχηματίζεται από την επίδραση θειικών αλάτων και ο δολομίτης $CaSO_4$ που δημιουργείται από άλατα πλούσια σε ιόντα μαγνησίου $Mg(OH)_2$.

Συνήθως στην πράξη παρατηρούνται πέραν του ενός τύπου χημικής διάβρωσης. Για παράδειγμα η επίδραση του $MgSO_4$ κατά την οποία παρατηρείται ανταλλαγή των ιόντων Mg^{2+} και Ca^{2+} ενώ παράλληλα το παραγόμενο $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (γύψος) δημιουργεί ρωγμές στο σκυρόδεμα.

➤ **Φυσική διάβρωση.** Οφείλεται σε μηχανικά αίτια που οδηγούν είτε σε αργή μείωση του όγκου του σκυροδέματος, είτε σε απότομη ρωγμάτωση. Τέτοιοι παράγοντες είναι:

- *Τριβή*. Μπορεί να δημιουργηθεί στην περίπτωση που το νερό ρέει κατά μήκος μιας επιφάνειας. Μεγαλύτερες φθορές παρατηρούνται σε ανομοιογένειες ή γωνίες που υπάρχουν στην κατασκευή λόγω της δημιουργίας δινών.
- *Ψύχος*. Σε περιόδους χαμηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος παρατηρείται συστολή του σκυροδέματος με αποτέλεσμα την καταστροφή του. Ακόμα, σε περιοχές με υψηλή υγρασία το νερό που υπάρχει στο εσωτερικό του σκυροδέματος μετατρέπεται σε πάγο και οι βελονοειδείς του κρύσταλλοι δημιουργούν τάσεις με αποτέλεσμα τη δημιουργία και την προέκταση των μικρορωγμών.

2.2 Μηχανισμός Διάβρωσης Μετάλλων

2.2.1 Ορισμός διάβρωσης μετάλλων.

Τα μέταλλα στο σύνολο τους υφίστανται διάφορες φθορές εξαιτίας του περιβάλλοντος στο οποίο εκτίθενται λόγω χημικών, μηχανικών ή μικροβιολογικών δράσεων. Η πλήρης κατανόηση του ορισμού της διάβρωσης παίζει καθοριστικό ρόλο στην προσπάθεια αποφυγής του φαινομένου, καθώς επίσης και την αποκατάσταση των φθορών που έχει υποστεί.

Γενικά, ο όρος διάβρωση περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες εκείνες κατά τις οποίες το υλικό οδηγείται σε υποβάθμιση των ιδιοτήτων του και μείωση του χρόνου ζωής του. Η διάβρωση ως διεργασία, είναι συνυφασμένη με την έννοια της ταχύτητας της διαβρωτικής δράσης, της προκαλούμενης φθοράς, αλλά και την έκταση και τη φύση της φθοράς σε σχέση με τη λειτουργία του σχετικού συστήματος.

Ένας ορισμός για την διάβρωση που θεωρείται πλήρης όπως δίνεται από την Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Διάβρωσης, της Διεθνούς Επιτροπής Θαλάσσιας Διάβρωσης και Ρύπανσης των Υφάλων είναι ο παρακάτω:

«Διάβρωση ονομάζεται η αυθόρμητη, κατ' επέκταση εκβιασμένη, ηλεκτροχημικής κατ' επέκταση χημικής, κατ' επέκταση μηχανικής, κατ' επέκταση βιολογικής φύσης, αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων και των κραμάτων, που οδηγεί σε απώλεια υλικού».

Τα μέταλλα στο περιβάλλον το οποίο βρίσκονται είναι δυνατόν να συμπεριφερθούν με τους εξής τρόπους:

- **Ενεργή κατάσταση.** Στην κατάσταση αυτή το μέταλλο διαβρώνεται σχηματίζοντας στην επιφάνεια του αδιάλυτα προϊόντα διάβρωσης (οξειδία και υδροοξειδία) τα οποία έχουν υποβαθμισμένες ιδιότητες σε σχέση με το μέταλλο.
- **Παθητική κατάσταση.** Το μέταλλο διαβρώνεται, σχηματίζοντας στην επιφάνεια του ένα λεπτό προστατευτικό φιλμ αδιάλυτου προϊόντος. Το φιλμ αυτό, εφόσον δεν έχει υποστεί φθορές στην επιφάνεια του, προστατεύει το μέταλλο και ελαττώνει σημαντικά την ταχύτητα της διάβρωσης.
- **Αδρανής κατάσταση.** Συμβαίνει σε ευγενή μέταλλα Au, Ag, Pt, και οφείλεται στη θερμοδυναμική σταθερότητα των μετάλλων αυτών. [33,35]

2.2.2 Μηχανισμός της διάβρωσης.

Τα περισσότερα μέταλλα δεν βρίσκονται σε ελεύθερη μορφή στη φύση αλλά με τη μορφή οξειδίων ή αλάτων (θειικών, ανθρακικών κτλ) και παράγονται με εμπλουτισμό των ενώσεων αυτών με κατανάλωση πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Η μεταλλική κατάσταση όμως είναι ασταθής και για το λόγο αυτό τα μεταλλικά υλικά τείνουν να επιστρέφουν στη κατάσταση των χημικών ενώσεων που βρίσκονταν αρχικά η οποία είναι από θερμοδυναμική απόψη σταθερότερη.

Ανάλογα με το διαβρωτικό περιβάλλον η διάβρωση διακρίνεται σε [36]:

- **Υγρή ή Ηλεκτροχημική,** κατά την οποία το υλικό εκτίθεται σε υγρό περιβάλλον.

➤ **Ξηρή ή χημική διάβρωση**, κατά την οποία το υλικό εκτίθεται, απουσία νερού ή υδατικού περιβάλλοντος, σε οξειδωτικό αέριο (π.χ οξυγόνο, αλογόνα κτλ.) σε θερμοκρασία δωματίου ή συνηθέστερα σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

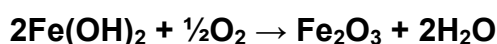
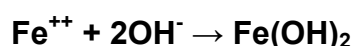
Η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας ΔG_0 των μετάλλων (κατά Gibbs) από την ελεύθερη κατάσταση στην ιοντική που βρίσκεται με τη μορφή οξειδίου, υποδηλώνει την τάση του μετάλλου να διαβρωθεί. Στην πραγματικότητα όμως η τάση για διάβρωση που έχουν τα μέταλλα δεν μπορεί να εκτιμηθεί μόνο βάση θερμοδυναμικών δεδομένων αλλά σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και το περιβάλλον έκθεσης. [π.χ. Ο χαλκός (Cu) ο οποίος έχει μικρή τάση για διάβρωση παρουσία H_2O , CO_2 και SO_2 διαβρώνεται έντονα [34]

Επίσης η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας δεν μπορεί να προβλέψει την ταχύτητα και το ρυθμό διάβρωσης διότι υπάρχουν μέταλλα που σχηματίζουν ένα προστατευτικό στρώμα στην επιφάνεια τους, ελαττώνοντας πολύ την ταχύτητα διάβρωσης όπως το αλουμίνιο (ανοδίωση).

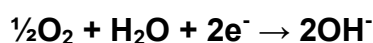
Η διάβρωση των μετάλλων είναι ηλεκτροχημικό φαινόμενο και εκδηλώνεται με την εμφάνιση κελιών διάβρωσης που προκύπτουν είτε από επαφή διαφορετικών μεταλλικών επιφανειών, είτε μεταξύ δύο τμημάτων της ίδιας επιφάνειας που είναι σε ηλεκτρική ή ηλεκτρολυτική επαφή, αλλά το δυναμικό του καθενός απουσία σύνδεσης είναι διαφορετικό. Ένα τυπικό ηλεκτρολυτικό κελί διάβρωσης περιλαμβάνει μια άνοδο στην οποία πραγματοποιείται αποβολή e^- , μια κάθοδο στην οποία υπάρχει πρόσληψη e^- και έναν ηλεκτρολύτη [37].

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν μέρος κατά την οξείδωση του σιδήρου δίνονται παρακάτω:

➤ **Άνοδος**



➤ **Κάθοδος**



Τα προϊόντα $\text{Fe}(\text{OH})_2$ και Fe_2O_3 είναι μη συνεκτικά και έχουν μεγαλύτερο όγκο από τον σίδηρο με αποτέλεσμα να δημιουργούν εφελκυστικές τάσεις και κατ'επέκταση ρωγμές στο οπλισμένο σκυρόδεμα.

2.2.3 Γαλβανικά στοιχεία και Μακροστοιχεία

➤ **Γαλβανικά στοιχεία.** Σύμφωνα με τη θεωρία των τοπικών γαλβανικών στοιχείων όταν ένα μέταλλο βυθιστεί σε ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη οποιασδήποτε φύσεως, τότε μέσα στο ίδιο το μέταλλο δημιουργούνται τοπικά, βραχυκυκλωμένα γαλβανικά μικροστοιχεία στα οποία οφείλεται η διάβρωση του μετάλλου. Η ύπαρξη τοπικών γαλβανικών στοιχείων στα μέταλλα, οφείλεται στις ατέλειες τους, στα κραματικά στοιχεία που τυχόν περιέχουν, στις προσμίξεις, στην ύπαρξη ενεργειακών κέντρων, στις ανομοιομορφίες της επιφάνειάς τους και στις περιοχές καλυμμένες με προϊόντα διάβρωσης σε σχέση με περιοχές που δεν επικαλύπτονται από προϊόντα διάβρωσης [32]. Σε όλες τις παραπάνω περιοχές δημιουργείται διαφορά δυναμικού μεταξύ των γειτονικών περιοχών, που είναι της τάξεως μερικών mV με αποτέλεσμα τη διάβρωση του μετάλλου.

➤ **Μακροστοιχεία.** Τα μακροστοιχεία εμφανίζονται σε μεγάλες περιοχές του οπλισμού και οφείλουν τη δημιουργία τους στην επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών σε όλο τον όγκο του οπλισμένου σκυροδέματος. Μεταξύ δυο διαφορετικών μετάλλων που έρχονται σε επαφή εμφανίζεται γαλβανική διάβρωση έτσι ώστε στο ένα μέταλλο να συμβαίνει ανοδική δράση και στο άλλο καθοδική. Ακόμη σε περιπτώσεις όπου μια περιοχή του σκυροδέματος είναι υγρή και μια άλλη όχι ή στην περίπτωση που σε μια περιοχή υπάρχει ακάλυπτος οπλισμός παρατηρείται ροή ρεύματος και ηλεκτρονίων από το ανοδικό στο καθοδικό τμήμα. Τα μακροστοιχεία μπορούν να δώσουν δυναμικό εκατοντάδων mV και η δράση τους είναι προσθετική σε αυτή των τοπικών γαλβανικών στοιχείων. [32].

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση οπλισμού.

Ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως το πορώδες και η διαπερατότητα, αλλά και αυτά καθ'αυτά τα υλικά που συνθέτουν το ίδιο το σκυρόδεμα είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν κατά κύριο λόγο την διάβρωση του οπλισμού.

2.3.1 Πορώδες και διαπερατότητα.

➤ **Διαπερατότητα.** Η διαπερατότητα ενός καλού ποιοτικά σκυροδέματος είναι περίπου 1×10^{-11} cm/s και μπορεί να μειωθεί περαιτέρω με τη χρήση ιπτάμενης τέφρας ή πυριτικής παιπάλης κατά την κατασκευή του σκυροδέματος. Για να μελετηθεί η διαπερατότητα θα πρέπει να είναι γνωστή η φύση του συστήματος των πόρων στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Οι πόροι που έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από 120-160 nm μπορούν να επεκταθούν, να ενωθούν και να δημιουργήσουν ρωγμές αυξάνοντας έτσι τη διαπερατότητα του σκυροδέματος. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι ο αυξημένος χρόνος συντήρησης μειώνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος [38].

Η αυξημένη διαπερατότητα του σκυροδέματος μπορεί να οφείλεται:

- Σε λανθασμένη και μικρού χρόνου διαστήματος συμπύκνωση κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης.
- Σε υψηλό λόγο W/C.
- Σε δημιουργία ρωγμών εξαιτίας κύκλων ψύξης-απόψυξης, σεισμών και διαδοχικών κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης.
- Μη επαρκή συντήρηση κατά τη διάρκεια λειτουργίας της κατασκευής.

➤ **Πορώδες.** Το σκυρόδεμα αποτελεί το προστατευτικό περίβλημα του οπλισμού και για το λόγο αυτό η ποιότητα του, διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στη διάβρωση του χάλυβα. Η δημιουργία των πόρων οφείλεται στην αλληλεπίδραση που έχουν τα αδρανή με την πάστα του τσιμέντου. Η ζώνη αυτή καταλαμβάνει το 1/3 ως 1/2 του συνολικού όγκου του σκυροδέματος και

έχει διαφορετική μικροδομή από αυτή του υπόλοιπου σκυροδέματος. Οι πόροι που δημιουργούνται εντός του σκυροδέματος διαχωρίζονται σε μικροπόρους (<2,5nm), μεσοπόρους (2,5-100nm,) και μακροπόρους (>100nm) ενώ ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας τους, σε πόρους πήγματος (gel pores) (<10nm) οι οποίοι αποτελούν μέρος της μικροδομής της τσιμεντόπαστας και σε τριχοειδείς πόρους (capillary pores) (>10nm) που δημιουργούνται από την εξάτμιση του νερού κατά την πήξη και σκλήρυνση του τσιμέντου. Η ελάττωση του πορώδους του σκυροδέματος αποτελεί μείζον θέμα στις κατασκευές και για την επίτευξη αυτού του σκοπού πραγματοποιείται συμπύκνωση κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης με κατάλληλους δονητές και χρήση προσθέτων τα οποία επιδρούν στις φάσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου. Επίσης, ο χαμηλός λόγος W/C οδηγεί σε μείωση των φυσαλίδων αέρα που δημιουργούνται από την εξάτμιση του νερού στο σκυρόδεμα [1]. Το μειωμένο πορώδες ελαττώνει τη διάχυση των διαβρωτικών παραγόντων οι οποίοι προκαλούν φθορά στον οπλισμό. Εκτός της διάβρωσης του οπλισμού όμως, το μειωμένο πορώδες οδηγεί σε βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του οπλισμένου σκυροδέματος [2].

2.3.2 Επίδραση των συστατικών του σκυροδέματος στη διάβρωση του οπλισμού.

➤ **Τσιμέντο.** Ταδιάφορα σύνθετα τσιμέντα [(τσιμέντο Portland με διάφορα πρόσθετα (σκωρίες, ποζολάνες κλπ.)] κατασκευάστηκαν για να προσφέρουν θωράκιση και βελτιστοποίηση στο δομικό υλικό. Αυτά τα τσιμέντα χρησιμοποιούνται ανάλογα το περιβάλλον, την χρήση και τις ιδιότητες που θέλουμε να προσδώσουμε στην κατασκευή μας.

Πέραν των θετικών επιπτώσεων που έχουν αυτά τα υλικά, συμβαίνει πολλές φορές η χρήση τους να αποβαίνει αρνητική στην αντοχή και την ανθεκτικότητα της κατασκευής. Για παράδειγμα τσιμέντα που είναι ανθεκτικά σε θειικά, σε περιβάλλον που περιέχει χλωριόντα, επιταχύνουν τη διάβρωση του σιδηροπλισμού. Αντίθετα τσιμέντα που περιέχουν ποζολάνες έχουν μειωμένο πορώδες και παρεμποδίζουν την διάβρωση με δέσμευση χλωριόντων εξαιτίας της περιεκτικότητάς τους σε Al_2O_3 . Ακόμη η χρήση της

σκωρίας υψικαμίνων και της ιπτάμενης τέφρας μειώνει τον κίνδυνο πραγματοποίησης αλκαλοπυριτικής αντίδρασης.[39]

➤ **Νερό.** Η ποσότητα και όχι η σύσταση του νερού που χρησιμοποιείται στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι αυτή που επηρεάζει κατά κύριο λόγο την ανθεκτικότητα και την αντοχή του σκυροδέματος.

Για να εξασφαλιστεί η ρευστότητα του παραγόμενου υλικού και η αντοχή του στη διάβρωση πρέπει τα όρια αναλογίας W/C να κυμαίνονται μεταξύ 0,6/1 και 0,4/1. Μια αναλογία μεταξύ 0,4/1 και 0,45/1 φαίνεται ιδανική, αφού εξασφαλίζει την μείωση του πορώδους και την αύξηση της μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος κατ'επέκταση. Όταν η αναλογία νερού/τσιμέντου ξεπερνά το 0,6/1 αυξάνεται η διαπρατότητα του σκυροδέματος και άρα και η πιθανότητα χημικής προσβολής.

Όσον αφορά την σύσταση, όταν πρόκειται για πόσιμο νερό, οι διαφορές στη χημική του σύσταση είναι μικρές, οπότε δεν προκύπτουν σημαντικές διαφορές στην ποιότητα του σκυροδέματος. Ωστόσο αν γίνει χρήση θαλασσινού νερού, η σύσταση είναι σημαντική, λόγω της περιεκτικότητας του σε χλωριόντα, η τιμή της οποίας πρέπει να είναι μικρότερη από 0,05% κ.β. W/C. Αν η περιεκτικότητα σε χλωριόντα υπερβαίνει το 0,15% αρχίζει η διάβρωση του σιδηροπλισμού. [23]

➤ **Αδρανή.** Τα αδρανή επιδρούν τόσο τη μηχανική αντοχή όσο και το πορώδες του σκυροδέματος. Αποτελούν περίπου το 70 % του συνολικού όγκου του σκυροδέματος και είναι η κοκκομετρική τους διαβάθμιση αυτή που έχει την μεγαλύτερη επίδραση στην ποιότητα του παραγόμενου υλικού.

Συμβαίνει, τα αδρανή, να φέρουν στην επιφάνεια τους επιβλαβείς χημικές ουσίες που όπως είναι φυσικό διαδραματίζουν αρνητικό ρόλο στη χημική σταθερότητα του σκυροδέματος. Σε περίπτωση που τα αδρανή δεν είναι συμπαγή, αλλά πορώδη, τότε επιτρέπεται η διέλευση των διαβρωτικών συστατικών μέσα από τους πόρους τους και έτσι αυξάνεται η διάβρωση. Ακόμη αν στα αδρανή περιέχεται πυρίτιο, άμορφο ή σε κρυσταλλική μορφή, υπάρχει ο κίνδυνος αλκαλοπυριτικής αντίδρασης, λόγω αντίδρασης με τα αλκάλια του τσιμέντου.

Ανάλογα τη χρήση του σκυροδέματος και ειδικά σε κατασκευές που διατρέχουν μεγάλο κίνδυνο χημικής προσβολής, η επιλογή των αδρανών πρέπει να υπακούει στις εκάστοτε προδιαγραφές. [40]

2.4 Παθητικοποίηση οπλισμού.

Ο σιδηροπλισμός που βρίσκεται μέσα στο σκυρόδεμα καλύπτεται από ένα επιφανειακό στρώμα οξειδίων το οποίο παθητικοποιεί την επιφάνεια του. Στην κατάσταση αυτή συμβάλλει και το pH του διαλύματος των πόρων, το οποίο λόγω της ύπαρξης του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ είναι έντονα αλκαλικό με τιμές 12.5-13.9 [37]. Οι κυριότεροι παράγοντες που επιδρούν στην καταστροφή του προστατευτικού στρώματος των οξειδίων είναι η ενανθράκωση του σκυροδέματος, η αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων και η συνεργιστική δράση Cl^- & CO_2 ενώ για τη δημιουργία και διατήρηση του παθητικού στρώματος, απαιτείται η παρουσία οξυγόνου.

Σύμφωνα με τον Wagner [41] η ηλεκτροχημική παθητικοποίηση του οπλισμού διακρίνεται σε:

- **Ανοδική παθητικοποίηση.** Το μέταλλο βρίσκεται σε παθητική κατάσταση όταν αυξάνει το δυναμικό του προς ηλεκτροθετικότερες τιμές με αποτέλεσμα ο ρυθμός της ανοδικής διάλυσης του μετάλλου να γίνει μικρότερος απ' ό,τι ήταν σε ηλεκτραρνητικότερες περιοχές δυναμικού.
- **Χημική παθητικοποίηση.** Η παθητικοποίηση του μετάλλου προκαλείται από τη δημιουργία ενός λεπτού στρώματος οξειδίων και υδροξειδίων που παράγονται από την επίδραση του περιβάλλοντος στη διάβρωση του χάλυβα, στρώμα το οποίο είναι αρκετά συνεκτικό με την επιφάνεια του μετάλλου [37]. Όταν το πάχος του στρώματος αυτού δεν ξεπερνά τα 100nm, τότε η ανοδική πυκνότητα του ρεύματος είναι πολύ χαμηλή και σύμφωνα με τον Vetter [42] εξαρτάται μόνο από τη διαφορά δυναμικού της διεπιφάνειας οξειδίου-διαλύματος σύμφωνα με την εξίσωση:

$$i_a = K \cdot \exp\left(\frac{\alpha z F}{RT} \Delta\Phi\right)$$

Όπου,

i_a : Ανοδική πυκνότητα ρεύματος,

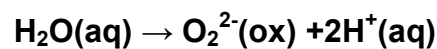
K : Σταθερά αναλογίας,

$\Delta\Phi$: Διαφορά δυναμικού στη διεπιφάνεια οξειδίου/διαλύματος,

T : θερμοκρασία,

α : παράγων συμμετρίας.

Από την ερμηνεία της παραπάνω εξίσωσης, προκύπτει ότι το ανοδικό ρεύμα διάλυσης του παθητικοποιημένου σιδήρου σε όξινα διαλύματα είναι ανεξάρτητο του δυναμικού του ηλεκτροδίου. Το δυναμικό στη διεπιφάνεια του οξειδίου/διαλύματος προσδιορίζεται από την παρακάτω ηλεκτροχημική αντίδραση:



Κατά συνέπεια προσδιορίζεται σαν συνάρτηση του pH:

$$\Delta\Phi = K + (RT/F) \ln [\text{H}^+]$$

από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$\log(i_a) = K' - \alpha * z * \text{pH}$$

Η σχέση της ανοδικής πυκνότητας ρεύματος με το pH που φαίνεται στην παραπάνω εξίσωση σύμφωνα με προηγούμενη έρευνα [43] επιβεβαιώνεται για τιμές pH < 5 ενώ για μεγαλύτερες το ρεύμα είναι ανεξάρτητο του pH.

2.5 Διάβρωση λόγω ενανθράκωσης.

2.5.1 Εισαγωγή

Η ενανθράκωση του σκυροδέματος ξεκινά αμέσως μόλις εκτεθεί το σκυρόδεμα στον ατμοσφαιρικό αέρα και το αποτέλεσμα του φαινομένου είναι η αύξηση της συστολής ξήρανσης και η μείωση της αλκαλικότητας του διαλύματος των πόρων. Η ελάττωση του pH παρουσία O_2 προκαλεί αποπαθητικοποίηση του χάλυβα, με αποτέλεσμα τη διάβρωση του. Η καταστροφή του προστατευτικού φιλμ των οξειδίων στον οπλισμό πραγματοποιείται μόνο όταν το μέτωπο της ενανθράκωσης φθάσει στον οπλισμό και για το λόγο αυτό οι διάφοροι κανονισμοί θέτουν ως πάχος επικάλυψης τα 20mm. Γενικά, σε κανονικό σκυρόδεμα που περιέχει τσιμέντο Portland, το βάθος ενανθράκωσης δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 13 mm στα 10 χρόνια λειτουργίας της κατασκευής. [44]

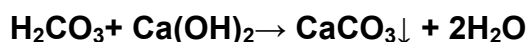
Συμφώνα με το πρότυπο EN 206-2000 για τη διάβρωση προερχομένη από ενανθράκωση διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις: [21]

- *Ξηρό (XC1)*. Αφορά το εσωτερικό τμήμα των οικοδομών με χαμηλό ποσοστό υγρασίας.
- *Υγρό σπάνια ξηρό (XC2)*. Αφορά τα θεμέλια που συγκρατούν υγρασία.
- *Ενδιάμεσης υγρασίας (XC3)*. Αφορά τα τμήματα των οικοδομών με ενδιάμεσο ή μεγάλο ποσοστό υγρασίας.
- *Συνεχείς κύκλοι υγρού και ξηρού περιβάλλοντος (XC4)*. Αφορά τα τμήματα εκείνα που υπόκεινται σε επαφή με νερό και έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία.

2.5.2 Μηχανισμός ενανθράκωσης.

Το διοξείδιο του άνθρακα διαλύεται στο νερό δημιουργώντας H_2CO_3 το οποίο αντιδρά με το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ που βρίσκεται στο πόρους του σκυροδέματος δημιουργώντας CaCO_3 .

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα δίνονται παρακάτω:



Το υδροξείδιο του ασβεστίου (CH) που σχηματίζεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου βρίσκεται χημικά δεσμευμένο στις φάσεις του τσιμέντου, ενώ ένα μέρος είναι ελεύθερο. Το ελεύθερο $\text{Ca}(\text{OH})_2$ διαλύεται στο υγρό των πόρων και είναι αυτό που αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα. [32]

2.5.3 Ρήξη παθητικού στρώματος λόγω ενανθράκωσης.

Το διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος, ως γνωστόν είναι έντονα αλκαλικό ($\text{pH} = 12.5-13.9$) εξαιτίας της δημιουργίας CH [$\text{Ca}(\text{OH})_2$]. Σε αυτές τις συνθήκες τα ένυδρα οξείδια του σιδήρου έχουν μικρή διαλυτότητα με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα παθητικό φιλμ στην επιφάνεια του χάλυβα που τον προστατεύει από τη διάβρωση. Σε συνθήκες χαμηλού pH όμως, η διαλυτότητα των οξειδίων αυξάνεται με συνέπεια τη ολοκληρωτική ρήξη του παθητικού στρώματος και την αποπαθητικοποίηση του μετάλλου. [32]

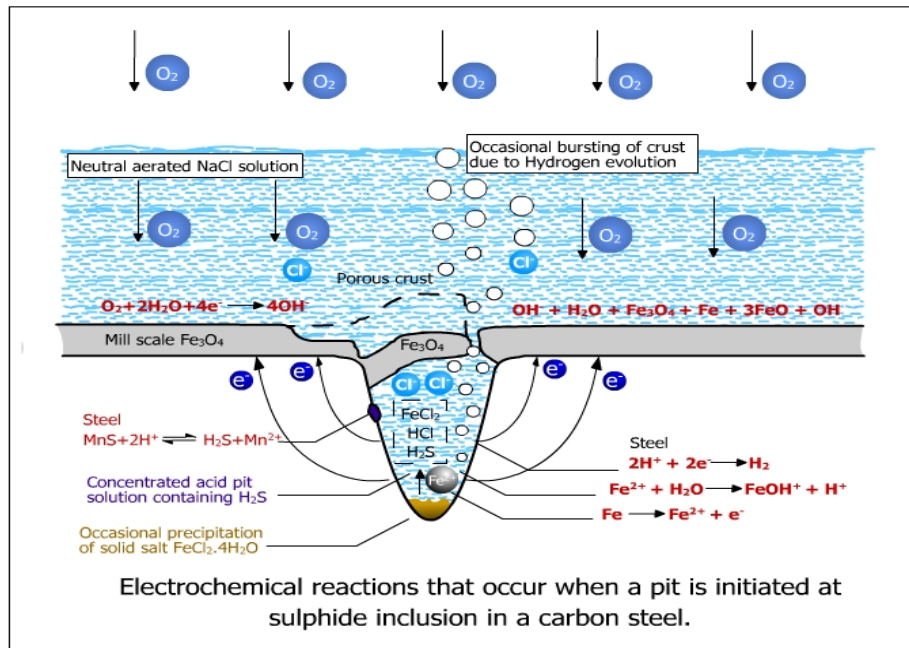
2.6 Διάβρωση οπλισμού σε θαλλάσιο περιβάλλον.

2.6.1 Διάβρωση με βελονισμούς.

Ένα από τα πιο καταστρεπτικά είδη διάβρωσης, είναι η διάβρωση με βελονισμούς. Προκαλεί καταστροφή των υλικών λόγω διάτρησης, ακόμα και για πολύ μικρό εκατοστιαίο ποσοστό απώλειας βάρους της κατασκευής. Είτε λόγω του μικρού τους μεγέθους, είτε γιατί συχνά καλύπτονται από προϊόντα διάβρωσης, είναι συχνά δύσκολο να διακριθούν οι βελονισμοί. Ακόμη, είναι δύσκολο να μετρηθεί ποσοτικά η έκταση του βελονισμού και να συγκριθεί με ανάλογες περιπτώσεις λόγω του μεταβαλλόμενου βάθους και αριθμού βελονισμών που εμφανίζονται σε πανομοιότυπες συνθήκες. Οι βελονισμοί εμφανίζονται περισσότερο σε οριζόντιες επιφάνειες παρά σε κατακόρυφες και συνήθως δεν είναι ορατοί αρχικά, παρά μόνο έπειτα από μεγάλο χρονικό διάστημα [45].

Συνήθως αναπτύσσονται σε μέταλλα ή κράματα που καλύπτονται από λεπτά στρώματα οξειδίων όπως το Al, Ti, Pb, Mg, χάλυβας κτλ. Πρέπει να σημειωθεί ότι βελονισμοί είναι δυνατό να δημιουργηθούν από τη δράση και άλλων στοιχείων της ομάδας των αλογόνων όπως το Br καθώς επίσης και από αλογονίδια διάφορων μετάλλων όπως Fe, Cu και Hg. [46]

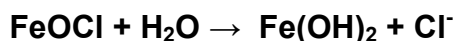
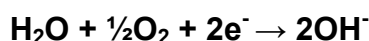
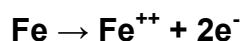
Για την αποφυγή των βελονισμών, ο μηχανικός οφείλει να κάνει σωστό σχεδιασμό της κατασκευής για την αποφυγή θηλωμάτων και κοιλοτήτων όπου συσσωρεύονται στάσιμα νερά και επιλογή κατάλληλων υλικών ανάλογα με το περιβάλλον έκθεσης της κατασκευής [45]. Συγκεκριμένα για το δομικό χάλυβα η ανθεκτικότητα του στην προσβολή λόγω Cl⁻ και η αντοχή του είναι δυνατό να βελτιωθούν με κραματοποίηση του (π.χ με Cr, Ni, Si-Mo).



Σχ. 2.1 ΟΙ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΤΙΦΡΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΧΩΡΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΒΕΛΟΝΙΣΜΟΥ ΟΤΑΝ Ο ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΙΝΑΙ ΕΚΤΕΘΕΙΜΕΝΟΣ ΣΕ ΔΙΑΛΥΜΑ ΧΛΩΡΙΟΥΧΟΥ ΝΑΤΡΙΟΥ.

2.6.2 Διάβρωση λόγω διείσδυσης χλωριόντων

Τα χλωριόντα μπορεί να βρεθούν μέσα στο σκυρόδεμα ως συστατικό της άμμου που προέρχεται από τη θάλασσα, μέσα σε πρόσθετο (π.χ CaCl_2), ή στο νερό ανάμιξης. Η επίδραση των χλωριόντων στο χάλυβα εξαρτάται από την παρουσία O_2 & H_2O . Επομένως σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα συνεχώς εμβαπτισμένο σε νερό με χλωριούχα άλατα, δεν εμφανίζεται διάβρωση με βελονισμούς. Επιπλέον, η διείσδυση των χλωριόντων πραγματοποιείται σε κατασκευές που διαβρέχονται από τη θάλασσα ή κοντά σε αυτές. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα όρια τιμών των ιόντων Cl^- και οι μέθοδοι ανίχνευσης τους διαφέρουν στις διάφορες περιοχές του σκυροδέματος. Τα ιόντα Cl^- προσβάλλουν τοπικά τον οπλισμό (pitting corrosion) σύμφωνα με τις παρακάτω χημικές αντιδράσεις:



Από τις παραπάνω αντιδράσεις προκύπτει το συμπέρασμα ότι με την υδρόλυση, τα χλωριόντα που είχαν δεσμευθεί επιστρέφουν στο διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος με ταυτόχρονη τοπική οξύνιση του διαλύματος. Στην περίπτωση αυτή, ακόμη και αν η περαιτέρω είσοδος των χλωριόντων παρεμποδιστεί από την ελάττωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος, η διάβρωση συνεχίζεται, γιατί η ποσότητα των χλωριόντων στην επιφάνεια του οπλισμού παραμένει σταθερή. Η αναγκαία ροή των ηλεκτρονίων πραγματοποιείται μέσω του χάλυβα, ενώ η μετακίνηση των ιόντων διαμέσου των διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος. Τα προϊόντα διάβρωσης προσβάλλουν τοπικά τον οπλισμό δημιουργώντας οπές και δημιουργώντας ρωγμές λόγω των δυνάμεων που προκαλούν στο σκυρόδεμα.

Η διείδυση των ιόντων χλωρίου καθορίζεται από τους εξής παράγοντες :

- *Το είδος και τη δομή του σκυροδέματος.* Η προσθήκη ποζολανών στο σκυρόδεμα ή η υψηλή συγκέντρωση C_3A δεσμεύουν χλωριόντα, δημιουργώντας άλατα μειώνοντας το πορώδες.
- *Το πάχος της επικάλυψης.* Το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού από σκυρόδεμα πρέπει να είναι τουλάχιστον 15-20mm. Η συγκέντρωση των χλωριόντων ελαττώνεται με το βάθος στο σκυρόδεμα
- *Η παρουσία νερού στο σκυρόδεμα.* Η παρουσία νερού διευκολύνει την κίνηση των ιόντων και αυξάνει την αγωγιμότητα του σκυροδέματος. Επίσης, σε περιόδους ξηρασίας το νερό εξατμίζεται με αποτέλεσμα την είσοδο των διαβρωτικών ιόντων.

- *Η ύπαρξη ρωγμών.* Για την αποφυγή της διείσδυσης των ιόντων Cl⁻ είναι σημαντική η σωστή συμπύκνωση κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης και η συντήρηση του σκυροδέματος καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας της κατασκευής.

Από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι ο οπλισμός διαβρώνεται μόνο όταν η συγκέντρωση των ελεύθερων ιόντων Cl⁻ ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή που συνήθως είναι 0,4g/100 g τσιμέντου. Η τιμή αυτή όμως υπάρχει περίπτωση να διαφέρει στην περίπτωση των σύνθετων τσιμέντων ή ακόμα και εντός του ίδιου σκυροδέματος. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το pH του διαλύματος των πόρων εξαρτάται από το χλωριούχο άλας στο οποίο εκτίθεται το οπλισμένο σκυρόδεμα. [47]

2.6.3 Ρήξη παθητικού στρώματος λόγω χλωριόντων.

Όταν το διάλυμα περιέχει χλωριόντα, τότε συνήθως δημιουργείται τοπική καταστροφή του παθητικού στρώματος στη μεταλλική επιφάνεια με αποτέλεσμα την τοπική διάλυση του μετάλλου στις περιοχές αποδόμησης και καταστροφής του παθητικού στρώματος. Ο μηχανισμός διάρρηξης του παθητικού στρώματος γίνεται ως εξής. Πρώτα υπάρχει ρόφηση των διαβρωτικών ιόντων στην επιφάνεια των οξειδίων, έπειτα τα ανιόντα αυτά διαχέονται στη μάζα των οξειδίων και έτσι έχουμε την δημιουργία σύμπλοκων ενώσεων. [48,49]

Η διαβρωτική δράση των χλωριόντων, καθίσταται ενεργός όταν η περιεκτικότητα των χλωριόντων στους πόρους του σκυροδέματος στην περιοχή γύρω από την επιφάνεια του χάλυβα υπερβεί την κρίσιμη συγκέντρωση. Τότε προκαλείται τοπική καταστροφή του παθητικού στρώματος προστασίας. [49]

Η κρίσιμη συγκέντρωση των χλωριόντων δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από το pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος, από την ποιότητα του σκυροδέματος, την ύπαρξη πρόσμικτων και την περιεκτικότητά του σε οξυγόνο.[50]

2.7 Διάβρωση λόγω εδάφους.

Η διάβρωση των μετάλλων στο έδαφος αποτελεί ένα σύνθετο φαινόμενο το οποίο εξαρτάται από τη φύση του μετάλλου και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Το έδαφος μπορεί να διαβρώσει το σκυρόδεμα στις περιπτώσεις που περιέχει θειικά άλατα, υψηλή συγκέντρωση μαγνησίας και $pH < 6$ [46]. Επίσης τα μολυσμένα εδάφη που περιέχουν οργανικά απόβλητα είναι δυνατό να επιταχύνουν την αποσάθρωση και τον κατακερματισμό του σκυροδέματος.

Η παρουσία θεικών ιόντων κατά κύριο λόγο προκαλεί βλάβες στο σκυρόδεμα και δευτερευόντως στο οπλισμό. Τα θειικά ιόντα εμφανίζονται σε εδάφη που προήλθαν από μαγματικά πετρώματα ή εξαιτίας της δημιουργίας σύμπλοκων χουμικών οξέων στον A- ορίζοντα του εδαφικού προφίλ. [51]

Ακόμα, ο οπλισμός είναι δυνατό να διαβρωθεί από συγκεκριμένο είδος βακτηριών προκαλώντας βακτηριακή διάβρωση. Τα βακτήρια αυτά μετατρέπουν τα σουλφίδια σε H_2SO_4 το οποίο προσβάλλει τον οπλισμό δημιουργώντας 'μαύρη σκουριά (black rust) στην επιφάνεια του. [52]

Άλλοι παράγοντες οι οποίοι παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαβρωτική ικανότητα των εδαφών στα μέταλλα είναι ο κορεσμός των εδαφών σε νερό, το ποσοστό αερισμού, το pH, η ειδική αντίσταση και η περιεκτικότητα σε ιόντα Cl^- . [51]

2.7 Διάβρωση λόγω παλαιότητας.

2.7.1 Συστολή σκυροδέματος

Με τον όρο «συστολή ξηράνσεως» δηλώνεται η προοδευτική με την πάροδο του χρόνου παραμόρφωση του σκυροδέματος ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις που οφείλεται στην απομάκρυνση των μορίων νερού που δεν είναι χημικά συνδεδεμένα με το τσιμέντο από τους πόρους του πήγματος. Τα μόρια αυτά, με την παρεμβολή τους μεταξύ των κρυστάλλων του πήγματος, αυξάνουν την απόσταση των τελευταίων και όταν απομακρυνθούν, οι κρύσταλλοι πλησιάζουν υπό την επιρροή των ελκτικών δυνάμεων (δεσμοί van der Waals) με συνέπεια τη συστολή του υλικού. [1,44]

Γενικά, οι δύο τύποι της συστολής είναι η «πλαστική συστολή» (plastic shrinkage) που πραγματοποιείται κατά τις πρώτες ώρες από την τοποθέτηση του σκυροδέματος και η «συστολή ξήρανσης» (drying shrinkage) που πραγματοποιείται μετά από ένα χρονικό διάστημα που έχει προχωρήσει η ενυδάτωση του σκυροδέματος και οφείλεται στην εξάτμιση του νερού. Επιπρόσθετα, υπάρχει και ένας τρίτος τύπος που είναι η «συστολή ενανθράκωσης» (carbonation shrinkage). Ο ρυθμός της συστολής ξήρανσης του σκυροδέματος μειώνεται με το χρόνο και γι' αυτό παλαιές κατασκευές εμφανίζονται περισσότερο ανθεκτικές στις περιβαλλοντικές δράσεις.

Οι παράγοντες που επιδρούν στο μέγεθος του φαινομένου της συστολής λόγω ξήρανσης είναι οι εξής [44,53]:

- *Η ποσότητα των αδρανών.*
- *Λόγος W/C. υψηλός λόγος αυξάνει τη συστολή λόγω ξήρανσης.*
- *Περιβαλλοντικές συνθήκες π.χ υγρασία, θερμοκρασία κτλ.*
- *Μέγεθος κατασκευής και η ύπαρξη ή η απουσία οπλισμού σε αυτήν.*
- *Ο τύπος του τσιμέντου και η ύπαρξη πρόσθετων.*

2.7.2 Ερπυσμός Σκυροδέματος

Ερπυσμός είναι η προοδευτική παραμόρφωση του σκυροδέματος με την πάροδο του χρόνου με επιβολή σταθερής θλιπτικής τάσης και οφείλεται κυρίως στη μετακίνηση των μορίων νερού στους πόρους του πηγματος από θέσεις υψηλής πίεσης προς θέσεις χαμηλότερης πίεσης. Ο ερπυσμός υπολογίζεται έμμεσα με αφαίρεση της συστολής και της ελαστικής παραμόρφωσης από τη συνολική παραμόρφωση.

$$\text{Total strain } (\epsilon_t) = \text{elastic strain } (\epsilon_e) + \text{creep } (\epsilon_{ct}) + \text{shrinkage } (\epsilon_{sh})$$

Ο ερπυσμός μπορεί να δημιουργήσει ρωγμές στα δομικά στοιχεία των κατασκευών και για την αποφυγή του φαινομένου πρέπει γίνουν τα εξής [53]:

- *Μείωση του λόγου W/C και της περιεκτικότητας του σκυροδέματος σε τσιμέντο,*
- *Αύξηση της ποσότητας και της σκληρότητας των αδρανών,*
- *Αύξηση του πάχους του δομικού στοιχείου όπου είναι εφικτό.*
- *Αύξηση του βαθμού ενυδάτωσης.*

Κεφάλαιο 3 Προστασία σκυροδέματος.

3.1 Προστασία μετάλλων

3.1.1 Εισαγωγή

Η εφαρμογή μεθόδων προστασίας από την διάβρωση επιβάλλεται τόσο για οικονομικούς λόγους όσο και για την ενίσχυση της ασφάλειας κατασκευών και εξοπλισμών και τη διαφύλαξη της σπατάλης των πλουτοπαραγωγικών πηγών. Λόγω των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα και της ευκολίας στην μορφοποίηση, βαφή, ανακύκλωση και το χαμηλό του κόστος, χρησιμοποιείται κατά κόρο στις κατασκευές και τον βιομηχανικό εξοπλισμό. Όμως η επιδεκτικότητά του στη διάβρωση παρουσία υγρασίας και στην οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες προϋποθέτει απαραίτητα κάποια μορφή προστασίας.

Η εφαρμογή κατάλληλης μεθόδου προστασίας ή συνδυασμού μεθόδων αποβλέπουν στη μείωση της ταχύτητας διάβρωσης μέσω της μεταβολής των θερμοδυναμικών ή των κινητικών στοιχείων της διαβρωτικής δράσης. Ωστόσο μια λάθος επιλογή μεθόδου προστασίας ή συνθηκών εφαρμογής μιας – σωστής κατά τα άλλα– μεθόδου, μπορούν να έχουν εντελώς αντίθετα από τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα και να οδηγήσουν σε επιτάχυνση της φθοράς του υλικού. [56].

Η προστασία των μετάλλων από την διάβρωση ακολουθεί δυο βασικές λογικές. Η πρώτη εστιάζει στη μείωση της θερμοδυναμικής προδιάθεσης για διάβρωση, ενώ η δεύτερη εστιάζει στον έλεγχο των κινητικών παραμέτρων της διάβρωσης. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι στην πρώτη περίπτωση εστιάζουμε σε στον έλεγχο και την παρεμπόδιση της ανοδικής ή/και καθοδικής δράσης, ενώ στη δεύτερη η εστίαση γίνεται στον έλεγχο της ηλεκτρικής

αντίστασης της διεπιφάνειας μετάλλου-διαβρωτικού περιβάλλοντος και, επόμενα, της έντασης του ρεύματος διάβρωσης.

Από τεχνική απόψη, οι κυριότερες μέθοδοι προστασίας που συνίστανται στην ελάττωση της ταχύτητας της διάβρωσης αφορούν [33]:

- *Βελτίωση των δομικών χαρακτηριστικών του μετάλλου ή/και της διεπιφάνειας μετάλλου-περιβάλλοντος.*
- *Παρεμβάσεις στο διαβρωτικό περιβάλλον.*
- *Τροποποιήσεις του ηλεκτροδιακού δυναμικού της ανόδου και της καθόδου του γαλβανικού στοιχείου της διάβρωσης.*

Οι πρώτες δυο επιλογές σχετίζονται, βασικά, με τη δεύτερη από τις δυο «λογικές» που προαναφέρθηκαν, ενώ η τρίτη σχετίζεται ακριβώς με την πρώτη «λογική». Πάντως, στην πράξη, υπάρχουν μέθοδοι και τεχνικές που ενσωματώνουν στοιχεία και από τις δυο αυτές βασικές λογικές.

3.1.2 Παρεμβάσεις για την προστασία των μετάλλων

➤ **Παρεμβάσεις στο διαβρωτικό περιβάλλον.** Οι κυριότεροι τρόποι επέμβασης στο διαβρωτικό περιβάλλον για την προστασία από την διάβρωση είναι οι παρακάτω [33, 54]:

- Απομάκρυνση των αλάτων με ιοντοεναλλαγή.
- 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.
- Ελάττωση της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος αέρα με αύξηση της θερμοκρασίας.
- Ελάττωση της ταχύτητας εκτός γενικά από τα παθητικά μέταλλα.
- Απομάκρυνση του νερού από τον αέρα με αφύγρανση.

- Απομάκρυνση στερεών σωματιδίων από το νερό ή τον αέρα με φιλτράρισμα ή άλλη κατάλληλη τεχνική.
-
- **Παρεμβάσεις στα χαρακτηριστικά του μετάλλου** Ο κυριότερος παράγοντας για την επιλογή ενός μετάλλου είναι η αντίστασή του στη διάβρωση. Η αντίσταση μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με προσθήκες ή και διεργασίες που τροποποιούν την σύστασή του (κραματοποίηση ή καθαρισμός), την δομή του (θερμική κατεργασία), ή τις εσωτερικές του τάσεις (θερμική κατεργασία ή κατεργασία διαμόρφωσης εν ψυχρώ). Ο σκοπός των προσθηκών είναι, είτε οι ίδιες να παθητικοποιήσουν, είτε να διευκολύνουν την παθητικοποίηση του μετάλλου και να μειώσουν τις κρυσταλλικές του ατέλειες. Η διαδικασία καθαρισμού, καθώς και οι θερμικές κατεργασίες επιλέγονται βάσει της φύσης του υλικού [55].

3.1.3 Μέθοδοι Ελέγχου Δυναμικού

- **Η μέθοδος της ανοδικής προστασίας.** Ακολουθώντας τη μέθοδο αυτή, η ταχύτητα διάβρωσης του μετάλλου μειώνεται σημαντικά λόγω επιβολής εξωτερικού δυναμικού το οποίο οδηγεί το μέταλλο σε κατάσταση παθητικοποίησης. Το δυναμικό του υπό προστασία μετάλλου (που αποτελεί την άνοδο του ηλεκτρολυτικού κελιού) μετατοπίζεται σε ηλεκτροθετικότερες τιμές και οδηγείται στην παθητική περιοχή, ενώ η πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης μειώνεται σημαντικά σε σχέση με το i_{corr} στην ισορροπία προ της εφαρμογής της εξωτερικής τάσης. Προϋπόθεση για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι το μέταλλο ή το κράμα να εμφανίζει ενεργη-παθητική συμπεριφορά με σημαντικό εύρος δυναμικού στην παθητική ζώνη και ρεύμα διάβρωσης στην παθητική περιοχή σημαντικά μικρότερο από αυτό του ρεύματος ισορροπίας. Εφόσον πληρούνται οι συνθήκες αυτές, ως δυναμικό εφαρμογής επιλέγεται συνήθως το μέσον της παθητικής ζώνης δυναμικών.

Πρακτικά, η υπό προστασία εγκατάσταση συνδέεται με το θετικό πόλο πηγής συνεχούς ρεύματος μέσω ποτενσιοστάτη, ηλεκτροδίου αναφοράς και βοηθητικού ηλεκτροδίου. Η αρχική επιτάχυνση της ανοδικής δράσης οδηγεί

στη δημιουργία ενός σταθερού, υψηλής αντίστασης προστατευτικού στρώματος οξειδίου στην επιφάνεια του μετάλλου, το οποίο αποτρέπει την παραπέρα συνέχιση της ανοδικής δράσης και έτσι η πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης ελαττώνεται σημαντικά.

Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί συνεχή καταγραφή του δυναμικού και του ρεύματος διάβρωσης, ώστε να αποφευχθεί το ενδεχόμενο αστοχιών, λόγω διακυμάνσεων στις ιδιότητες του διαβρωτικού περιβάλλοντος ή λόγω αστοχίας υλικού (π.χ. του ποτενσιοστάτη). Σε περίπτωση που το δυναμικό ξεφύγει από τα όρια της παθητικής περιοχής, για οποιοδήποτε λόγο, το παθητικό στρώμα οξειδίων διαλύεται και η διάβρωση αρχίζει και πάλι με επιταχυνόμενο ρυθμό. Από την άποψη αυτή η ανοδική προστασία είναι μια μέθοδος που πρέπει να εφαρμόζεται με προσοχή και απαιτεί πολύ καλό σχεδιασμό και έλεγχο των παραμέτρων της.

➤ **Η μέθοδος της καθοδικής προστασίας.** Η μέθοδος αυτή είναι δυνατό να εφαρμοστεί οπουδήποτε λαμβάνει χώρα ηλεκτροχημική διάβρωση και μπορεί να την εμποδίσει ολοκληρωτικά ή να την περιορίσει σε εκ των προτέρων προβλεπτό και αποδεκτό επίπεδο [36].

Η βασική ιδέα της καθοδικής προστασίας είναι η παροχή –από εξωτερική πηγή– ηλεκτρονίων στο μέταλλο. Το δυναμικό του μετάλλου μετατοπίζεται, έτσι, σε πιο ηλεκτραρνητικές τιμές, ώστε να μετατραπεί σε κάθοδο ενός ηλεκτρολυτικού κελιού. Πρέπει να ληφθεί υπόψη, ωστόσο, ότι αν το δυναμικό του μετάλλου μετατοπιστεί πολύ αρνητικά, προκαλείται υπερπροστασία με την έννοια των αυξημένων τιμών της ταχύτητας καθοδικής αντίδρασης. Αποτέλεσμα της υπερπροστασίας είναι, είτε η αύξηση του pH με δυσμενείς συνέπειες στην αντοχή των χρωμάτων, είτε η καθοδική έκλυση υδρογόνου που προκαλεί ευθραυστοποίηση του μετάλλου.

Η καθοδική προστασία εφαρμόζεται με τους εξής δύο τρόπους: [33]

- **Με θυσιαζόμενες ανόδους.** Βασίζεται στη δημιουργία γαλβανικού κελιού μεταξύ του μετάλλου που λειτουργεί ως κάθοδος και της θυσιαζόμενης ανόδου που είναι από υλικό πιο ανοδικό (πιο ηλεκτραρνητικό) σε σχέση με το

μέταλλο. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει το πλεονέκτημα της ευκολίας στην εγκατάσταση και την ελάχιστη ως ασήμαντη συντήρηση. Παρουσιάζει, ωστόσο, τα μειονεκτήματα της μικρής διάρκειας ζωής των ανόδων, του μεγάλου αριθμού των ανόδων που απαιτούνται για να εξασφαλιστεί πλήρης προστασία στο σύνολο της κατασκευής και στις δυσκολίες που προκύπτουν από την συχνή αντικατάστασή τους. [57]

- **Με επιβαλλόμενα εξωτερικά ρεύματα.** Με τον τρόπο αυτό παρέχεται, μέσω μιας εξωτερικής πηγής συνεχούς ρεύματος (ανορθωτής), συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα σύστημα που αποτελείται από βοηθητικό ηλεκτρόδιο (ως αναλώσιμο) που είναι η άνοδος (+), από το μέταλλο υπό προστασία που λειτουργεί ως κάθοδος (-) και από το ηλεκτρόδιο αναφοράς που είναι απαραίτητο για τη ρύθμιση και έλεγχο του επιβαλλόμενου (καθορισμένου) ηλεκτροδιακού δυναμικού. Ως μέθοδος προστασίας έχει το πλεονέκτημα ότι μπορούν να δοθούν ποικίλες τιμές ρεύματος ώστε να αναστείλουμε πλήρως την διάβρωση του χάλυβα. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι το σύστημα είναι δυνατόν να υπόκειται σε διακοπές ρεύματος, έτσι καθίσταται απαραίτητος ο τακτικός έλεγχος και η ρύθμισή του από εξειδικευμένο προσωπικό. [36]

3.2 Μέθοδοι προστασίας οπλισμένου σκυροδέματος.

3.2.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι κυριότερες μέθοδοι προστασίας και αποκατάστασης του οπλισμένου σκυροδέματος από διάβρωση, εξειδικεύοντας τις γενικές κατευθύνσεις προστασίας των μετάλλων από διάβρωση που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Σύμφωνα με τα νέα Ευρωπαϊκά πρότυπα ο χρόνος ζωής στις συνήθεις κατασκευές από σκυρόδεμα είναι 50 χρόνια, ενώ για τις γέφυρες εκτείνεται στα 120 χρόνια. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η πρόβλεψη του χρόνου ζωής αυτών των κατασκευών με τις μέχρι τώρα γνώσεις για τη φθορά του σκυροδέματος είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα για την πραγματοποίηση ενός

συστήματος καταγραφής και διαχείρισης των φθορών και ανάπτυξης μεθόδων προστασίας από αυτές έτσι ώστε να αποφεύγονται τυχόν αστοχίες λόγω διάβρωσης οι οποίες μερικές φορές έχουν δείξει ότι το μέγεθος της καταστροφής που μπορούν να επιφέρουν έχει τεράστιο κόστος.

Για καινούργιες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα η λήψη προληπτικών μέτρων, όπως: κατάλληλη επιλογή του είδους του τσιμέντου και των αδρανών, μείωση του λόγου τσιμέντου / νερό, σωστή δόνηση του σκυροδέματος, σωστή συντήρηση του σκυροδέματος και σωστή επιλογή του πάχους επικάλυψης, μπορούν να μειώσουν σημαντικά τη φθορά του οπλισμένου σκυροδέματος. Όταν όμως λόγω του «επιθετικού» περιβάλλοντος έκθεσης της κατασκευής τα μέτρα αυτά δεν είναι αρκετά για να διασφαλίσουν τον απαιτούμενο χρόνο ζωής της, τότε θα πρέπει να σχεδιάζονται και να λαμβάνονται επιπρόσθετα μέτρα προστασίας όπως:

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

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

- *Καθαίρεση και αποκατάσταση των σαθρών δομικών στοιχείων σκυροδέματος.*
- *Επικαλύψεις με μονωτικά χρώματα.*
- *Καθοδική προστασία.*
- *Ηλεκτροχημική επαν-αλκαλοποίηση του σκυροδέματος.*
- *Ηλεκτροχημική αφαίρεση των χλωριόντων.*
- *Χρήση αναστολέων διάβρωσης.*

Η βέλτιστη, κάθε φορά, τεχνική (ή τεχνικές) εξαρτάται από τον βαθμό της φθοράς και το περιβάλλον διάβρωσης της κατασκευής. Σε πολλές

περιπτώσεις, συνδυασμός περισσότερων από δύο τεχνικών μπορεί να εφαρμοστεί για την αποκατάσταση των φθορών όπως καθαίρεση και αποκατάσταση των σαθρών σκυροδεμάτων και προστασία της κατασκευής με σύστημα καθοδικής προστασίας ή εφαρμογή καθοδικής προστασίας με ταυτόχρονη χρήση αναστολέων διάβρωσης. Σε κάθε περίπτωση όμως ο στόχος και ο σκοπός είναι η παρεμπόδιση, η μείωση ως και η εξάλειψη του προβλήματος της διάβρωσης.

3.2.2 Ειδικόι Χάλυβες

Μία μέθοδος προστασίας για την αντιμετώπιση των προβλημάτων διάβρωσης στο οπλισμένο σκυρόδεμα σε έντονο διαβρωτικό περιβάλλον, είναι η χρήση ειδικών χαλύβων. Με τον όρο «ειδικόι χάλυβες» αναφέρονται οι χάλυβες με επικαλύψεις και οι ανοξειδωτοί χάλυβες. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αναφορές με διάφορα επιστρώματα (ανόργανα, όπως κεραμικά ή οργανικά, όπως PVC) καθώς και άλλα μέταλλα [22].

Από προηγούμενες έρευνες [19] προέκυψε μεγάλη διακύμανση στην ανθεκτικότητα των χαλύβων ανάλογα της χημικής τους σύστασης και του τρόπου δημιουργίας τους ενώ τα προϊόντα διάβρωσης που προέκυψαν στην επιφάνεια των οπλισμών ήταν πορώδη, μειώνοντας τη συνάφεια χάλυβα - σκυροδέματος.

Μια ιδιαίτερη περίπτωση μεταλλικού επιστρώματος αποτελεί ο γαλβανισμός κατά τον οποίο γίνεται θερμή εμβάπτιση του χάλυβα σε τήγμα ψευδαργύρου με αποτέλεσμα στις εσοχές που τυχόν δημιουργούνται να υπάρχει γαλβανική διάβρωση των δυο μετάλλων με τον ψευδάργυρο να διαβρώνεται ενώ ο οπλισμός να προστατεύεται.

Η χρήση ειδικών χαλύβων περιορίζεται από το κόστος το οποίο αυξάνει ανάλογα με το βαθμό προστασίας που προσφέρει. Ο παρακάτω πίνακας δίνει τις σχετικές τιμές κόστους σε σχέση με τον κοινό δομικό χάλυβα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 ΕΙΔΗ ΧΑΛΥΒΑ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ

Είδη χάλυβα	Σχετικό κόστος
Κοινός δομικός χάλυβας	1,0
Επιψευδαργυρωμένος (γαλβανιζέ) χάλυβας	1,5 – 2,0
Χάλυβας με εποξειδική επικάλυψη	2,0
Χάλυβας με επικάλυψη ανοξειδωτου χάλυβα	4,0
Ανοξειδωτος χάλυβας	8,0

3.2.3 Επανακαλοποίηση σκυροδέματος.

Η αύξηση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος στα επίπεδα του διαλύματος των πόρων (σε τιμή pH > 12) οδηγεί στην επαναδημιουργία και την αποκατάσταση του παθητικού στρώματος οξειδίων στην επιφάνεια του χάλυβα. Ένας τρόπος επαναφοράς της αρχικής αλκαλικότητας του σκυροδέματος είναι η μέθοδος της ηλεκτροχημικής επανακαλοποίησης.

Με τον ψεκασμό αλκαλικού διαλύματος πάνω στην επιφάνεια της κατασκευής στην οποία έχει αγκυρωθεί προσωρινό δίκτυο/πλέγμα ανόδων, διαμέσου ηλεκτρολύτη, επιτυγχάνεται η αύξηση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος. Το διάλυμα του ηλεκτρολύτη με το οποίο γίνεται ο ψεκασμός της επιφάνειας είναι συνήθως διάλυμα Na₂CO₃ με C=1M [62]. Τόσο το πλέγμα των ανόδων, όσο και ο οπλισμός συνδέονται στους πόλους μετασχηματιστή/ανορθωτή εναλλασσόμενου ρεύματος. Η τάση τροφοδοσίας κυμαίνεται από 4-40V και εξαρτάται από το πάχος επικάλυψης των οπλισμών στην εκάστοτε κατασκευή αλλά και από την αντίσταση του σκυροδέματος. Η απαιτούμενη πυκνότητα ρεύματος κυμαίνεται στην περιοχή από 0,8 – 2 A/m² επιφάνειας σκυροδέματος [62]

Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της ηλεκτροχημικής επανακαλοποίησής του σκυροδέματος λαμβάνουν χώρα δράσεις που συμβαίνουν ταυτόχρονα με την ηλεκτρόλυση όπως είναι η τριχοειδής

αναρρίχηση του αλκαλικού διαλύματος και η διάχυση του στο σκυρόδεμα λόγω διαφοράς συγκέντρωσης, μεταφορά φορτίου λόγω ηλεκτρικού πεδίου, φαινόμενα ηλεκτρώσμωσης και η ηλεκτρόλυση.

3.2.4 Καθοδική προστασία οπλισμένου σκυροδέματος.

Τα κριτήρια σχεδιασμού για την εφαρμογή της μεθόδου της καθοδικής προστασίας στο οπλισμένο σκυρόδεμα είναι τελείως διαφορετικά από αυτά που εφαρμόζονται για τον σχεδιασμό συστημάτων καθοδικής προστασίας χάλυβα στο έδαφος ή στο θαλασσινό νερό. Η καθοδική προστασία είναι μια ενδεδειγμένη αποτελεσματική μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων διάβρωσης σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος με υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων στη μάζα τους, σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους προστασίας [58,59].

Στην πράξη, για την αντιστροφή της πολικότητας του ηλεκτροχημικού στοιχείου και τη μετατροπή των οπλισμών σε καθόδους, επιβάλλεται ένα σχετικά χαμηλό ρεύμα (συνήθως 2-10 mA/m² επιφάνειας σκυροδέματος) μεταξύ των ανόδων και των οπλισμών, έτσι ώστε το δυναμικό του οπλισμού να πάρει ηλεκτραρνητικότερες τιμές. Θα πρέπει να τονιστεί ότι το σύστημα καθοδικής προστασίας (άνοδοι, ηλεκτρόδια αναφοράς) τοποθετείται μόνιμα στην κατασκευή.

Ο οπλισμός συνδέεται με τον αρνητικό πόλο συνεχούς πηγής ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ ο θετικός πόλος με κατάλληλη άνοδο. Οι άνοδοι που χρησιμοποιούνται ευρύτατα είναι αυτές που έχουν μορφή πλέγματος. Τα πλέγματα κατασκευάζονται από σύρμα τιτανίου και στην επιφάνεια του υπάρχουν διάφορα οξειδία και ευγενή μέταλλα. Το πάχος του σύρματος καθορίζει το ποσό του ρεύματος που θα περάσει και επομένως την επιφάνεια του οπλισμού που προστατεύεται.

Η χημική σταθερότητα του τιτανίου και των οξειδίων σε συνθήκες ανοδικής φόρτισης είναι το πλεονέκτημα που έχουν τα πλέγματα σε σχέση με άλλους τύπους ανόδων. Επίσης η ευκολία στη χρήση, η αντικατάσταση

τμήματος των ανόδων και η μεγάλη διάρκεια ζωής τους είναι μερικά ακόμα προτερήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους προστασίας [32].

Τα πλεονεκτήματα από αυτή τη μέθοδο προστασίας είναι τα εξής [45]: Δυνατότητα επίτευξης υψηλών τιμών δυναμικού με αποτέλεσμα την προστασία μεγάλων και ακάλυπτων κατασκευών, καλύτερη ρύθμιση των συνθηκών προστασίας, ύπαρξη λιγότερων ανόδων, ρύθμιση της τιμής του δυναμικού μέσω ειδικού οργάνου. Τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι το υψηλό κόστος ηλεκτροδίων, ο μεγάλος όγκος τους για την εξασφάλιση υψηλών τιμών ρεύματος, η μόλυνση του περιβάλλοντος από την κατανάλωση μερικών τύπων ηλεκτροδίων και η συχνή τους αντικατάσταση.

3.2.5 Αναστολείς διάβρωσης.

Ως αναστολείς διάβρωσης ορίζονται όλες οι χημικές ουσίες που όταν προστίθενται στο σκυρόδεμα, κοντά στον οπλισμό, μειώνουν τον ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα. Οι αναστολείς διάβρωσης ενεργούν στο ανοδικό ή καθοδικό τμήμα της ηλεκτροχημικής δράσης επιβραδύνοντάς το σημαντικά και η ενέργεια τους εντοπίζεται στη διεπιφάνεια μεταξύ μετάλλου και διαβρωτικού περιβάλλοντος. Ακόμα οι αναστολείς αποτρέπουν την κίνηση ή τη διάχυση των ιόντων στη μεταλλική επιφάνεια ενώ παράλληλα αυξάνουν την ηλεκτρική αντίσταση του μετάλλου. [60]

Οι αναστολείς διάβρωσης ανάλογα με τον τρόπο που δρουν στο χάλυβα χωρίζονται σε:

- **Ανοδικούς.** Δρουν πάνω στη διάλυση του χάλυβα μειώνοντας το ρυθμό διάβρωσης και αυξάνοντας το δυναμικό διάβρωσης. Οι πιο συνηθισμένοι αναστολείς αυτής της κατηγορίας είναι το νιτρώδες ασβέστιο, νιτρώδες νάτριο, βενζοϊκό νάτριο και το χρωμικό νάτριο.[61]
- **Καθοδικούς.** Δρουν στο καθοδικό τμήμα (στο οξυγόνο) της αντίδρασης στην επιφάνεια του οπλισμού ελαττώνοντας το ρυθμό διάβρωσης. Οι συνηθέστεροι αναστολείς αυτής της κατηγορίας είναι NaOH, Na₂CO₃ τα

οποία αυξάνουν το pH στην περιοχή κοντά στον σπλισμό και μειώνουν τη μεταφορά του O₂ στην επιφάνεια του χάλυβα. [61]

Ανάλογα με τη σύσταση τους χωρίζονται σε ανόργανους όπως το νιτρώδες ασβέστιο, και σε οργανικούς όπως οι αμινοαλκοόλες, μίγματα αμινών με εστέρες κ.α. [61]

3.2.6 Ηλεκτροχημική αφαίρεση χλωριόντων.

Η αφαίρεση των χλωριόντων επιτυγχάνεται με ηλεκτροχημικό τρόπο χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλο ηλεκτρολύτη, μια ρητίνη ανταλλαγής ιόντων και ένα μεταλλικό πλέγμα το οποίο εφαρμόζεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Στο ηλεκτροχημικό κύκλωμα, ο σπλισμός δρα ως κάθοδος και το πλέγμα ως άνοδος. Με την εφαρμογή δυναμικού, τα χλωριόντα έλκονται από την θετικά φορτισμένη άνοδο, όπου και δεσμεύονται από την ρητίνη.

Η μέθοδος παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα [39]:

- *Απαιτεί την εφαρμογή υψηλού δυναμικού το οποίο αναπτύσσει μεγάλες θερμοκρασίες στο σκυρόδεμα (περίπου 90°C), με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρηγματώσεων.*
- *Αυξάνει την διαπερατότητα του σκυροδέματος,*
- *Μειώνει την αντοχή του σκυροδέματος στην περίπτωση χρήσεως μεγάλων πυκνοτήτων ρεύματος,*
- *Έχει υψηλό κόστος.*

3.3 Προστασία οπλισμένου σκυροδέματος μέσω επικαλύψεων και εμποτισμών.

Εξ αιτίας της φύσεως του ερευνητικού ενδιαφέροντος που ανακύπτει από την παρούσα διπλωματική εργασία κρίνεται σκόπιμη η ξεχωριστή θεωρητική διερεύνηση της προστασίας του οπλισμένου σκυροδέματος μέσω επικαλύψεων και εμποτισμών. Ως εκ τούτου δίνεται μεγαλύτερο βάρος σε αυτές τις μεθόδους προστασίας, σε σχέση με τις προαναφερθείσες. Ο μεγαλύτερος όγκος θεωρητικών πληροφοριών, λοιπόν, δεν αποσκοπεί στο να δημιουργήσει την εντύπωση ότι η μέθοδος αυτή είναι είτε η σημαντικότερη είτε η πλέον ερευνημένη, αλλά στο να δημιουργήσει το θεωρητικό υπόβαθρο που θα απαντά στα ερωτήματα που ενδεχομένως να ανάκουσιν από το πειραματικό μέρος.

3.3.1 Εισαγωγή

Η χρήση επικαλύψεων αποτελεί την πιο κοινή, και ενδεχομένως την παλιότερη, μέθοδο αντιδιαβρωτικής προστασίας. Μέσω των επικαλύψεων προκαλείται ο διαχωρισμός του μετάλλου από το διαβρωτικό του περιβάλλον, γεγονός στο οποίο οφείλεται, κατά κύριο λόγο, η αντιδιαβρωτική τους προστασία. Μέσω των επικαλύψεων συντελείτε, ωστόσο, και η αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος ή η μεταβολή της ανοδικής ή/και της καθοδικής πόλωσης, προστατεύοντας έτσι τον οπλισμό. Το μέγεθος της προστασίας που προσφέρουν οι επικαλύψεις εξαρτάται από το πάχος τους και τις ιδιότητές τους, όπως η αντοχή, η πρόσφυση, η διαπερατότητα. [63,64].

Από χημικής άποψης οι επικαλύψεις είναι δυνατόν να διακριθούν σε [36]:

- **Οργανικές.** Διαφόρων τύπων οργανικά χρώματα, πολυμερή, ρητίνες κλπ.
- **Ανόργανες, μεταλλικές.** Ως προς τη διάβρωση τις διαχωρίζουμε σε περισσότερο ευγενή σε σχέση με το υπό προστασία μέταλλο και σε

λιγότερο ευγενή (θυσιαζόμενα επιστρώματα Zn, Cd, Sn, Al πάνω σε χάλυβα).

- **Ανόργανες, μη μεταλλικές:** Επικαλύψεις χημικής μετατροπής (όπως οξειδία, φωσφορικά, χρωμικά, εμαγιέ) και η τσιμεντοκονία.

Η επιφανειακή προστασία του σκυροδέματος μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους. Οι μέθοδοι αυτοί, που είναι ικανές να προστατεύσουν τόσο τον οπλισμό, όσο και το σκυρόδεμα, οι εξής:

- **Διαποτισμός.** Είναι η δημιουργία ενός λεπτού στρώματος στην επιφάνεια του σκυροδέματος χωρίς την κάλυψη των πόρων του σκυροδέματος.
- **Σφράγιση.** Είναι η δημιουργία ενός λεπτού στρώματος στην επιφάνεια του σκυροδέματος, πάχους 300μm, με μερική ή ολική κάλυψη των πόρων του σκυροδέματος.
- **Υδροφοβισμός ή Υδροφοβικός εμποτισμός.** Υδροφοβισμός ή αλλιώς “Υδροφобος Εμποτισμός” καλείται η ειδική επεξεργασία του σκυροδέματος (και/ή όποιου άλλου πορώδους υποστρώματος), για την παραγωγή μιας επιφάνειας με υδρο-απωθητικές ιδιότητες. Η διαδικασία δεν αφήνει επιφανειακό film (υμένα) στην όψη του σκυροδέματος, υπάρχει δε μία ανεπαίσθητη ή ως συνήθως καμία οπτική αλλαγή στην εμφάνιση του. Τα συνδετικά μέσα τέτοιων στρώσεων βασίζονται συνήθως σε οργανικά πολυμερή. (σύμφωνα με EN 1504-1:1998 & EN 1504-8:2004)
- **Εμποτισμός.** Ως εμποτισμός ορίζεται η επεξεργασία του σκυροδέματος για την μείωση του επιφανειακού πορώδους και την ενίσχυση της επιφάνειάς του. Με τον εμποτισμό οι πόροι και τα τριχοειδή πληρούνται σε μεγάλο βαθμό. Στην επιφάνεια του σκυροδέματος δημιουργείται υμένας πάχους μεταξύ 10 και 100 μm, ο οποίος παρεμποδίζει την εισχώρηση επιβλαβών ουσιών
- **Επικάλυψη.** Είναι ο σχηματισμός ενός ομοιόμορφου στρώματος στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Η επικάλυψη μπορεί επιμέρους να διακριθεί σε:
 - ο *Λεπτή επικάλυψη.* Με πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 0,3~1,0 mm. (Είναι πιθανό να μην καλυφθούν όλες οι ανωμαλίες της επιφάνειας του σκυροδέματος)

- *Χονδρή επικάλυψη.* Με πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 1,0~5,0 mm. (Θεωρείται αρκετό για την κάλυψη όλων των ανωμαλιών.)
- *Επικάλυψη με κονιάματα.* Με πάχος που είναι μεγαλύτερο από 5,0 mm.
- **Βαφή – επίστρωση.** Εφαρμογή επιστρώσεων με προϊόντα βελτίωσης της επιφανείας του σκυροδέματος να την επίτευξη αυξημένης αντίστασης ή την εξασφάλιση λειτουργίας υπό συγκεκριμένες εξωτερικές επιδράσεις. Οι λεπτές επιφανειακές ρωγμές εύρους έως 0,3 mm μπορούν να επισκευαστούν και ακολούθως να σφραγιστούν, χωρίς να παρεμποδίζεται η αυξομείωση του εύρους τους, με την χρήση βαφών οι οποίες εμφανίζουν ελαστικότητα, έχουν την δυνατότητα γεφύρωσης ρηγματώσεων και είναι αδιάβροχες και ανθεκτικές σε ενανθράκωση. Η επεξεργασία αυτή διασφαλίζει τις θερμικές και δυναμικές παραμορφώσεις των κατασκευών εντός ενός ευρέως φάσματος θερμοκρασιακών διακυμάνσεων, δονήσεων και μπορεί να αντιμετωπίσει προβλήματα οφειλόμενα στον σχεδιασμό των αρμών ή την εφαρμογή των συστημάτων αρμοκάλυψης.

3.3.2 Γενικά περί επικαλύψεων με οργανικά και ανόργανα χρώματα

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

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

Τα χρώματα των υδατικών διασπορών είναι τα πλέον συνηθισμένα στην προστασία του σκυροδέματος. Οι ακρυλικές διασπορές είναι οι πλέον γνωστές. Η προσεκτική εφαρμογή του κατάλληλου ασταριού δίνει μεγάλες

τιμές συνάφειας. Τα χρώματα της κατηγορίας αυτής εμφανίζουν μεγάλη διαπερατότητα σε υδρατμούς, πολύ μικρή διαπερατότητα σε CO₂ και SO₂, αλλά συνήθως εμφανίζουν μεγαλύτερη διαπερατότητα σε νερό από τις επόμενες κατηγορίες χρωμάτων. Επίσης διατίθενται προϊόντα που σχηματίζουν ελαστικό στρώμα επικάλυψης ικανό για την κάλυψη των ρωγμών.

Ρητίνες από ακρυλικά και μεθακρυλικά συμπολυμερή, διαλυτές σε οργανικούς διαλύτες, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παραγωγή προστατευτικών χρωμάτων στο σκυροδέμα. Τα χρώματα της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν πολύ καλή διαπερατότητα σε νερό και διοξείδιο του άνθρακα, καθώς και καλή αντοχή στην ακτινοβολία UV. Επίσης παρουσιάζουν πολύ καλή διεισδυτικότητα στους πόρους του σκυροδέματος και καλή συνάφεια.

Χρώματα δύο συστατικών με βάση τις εποξειδικές και πολυουρεθανικές ρητίνες έχουν χρησιμοποιηθεί για την προστασία του σκυροδέματος. Η σκληρυνσή τους γίνεται με την αρχή της πολυπροσθήκης. Τα δύο συστατικά, ρητίνη και σκληρυντής, αναμιγνύονται λίγο πριν την εφαρμογή και αντιδρούν σχηματίζοντας ένα υψηλού μοριακού βάρους πολυμερές. Ακόμη, ακόρεστοι πολυεστέρες και μεθακρυλικές ρητίνες που σκληρύνονται με πολυμερισμό, βρίσκουν εφαρμογή στην προστασία του σκυροδέματος. Τα χρώματα της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν πολύ καλή αντοχή σε αλκαλικά και όξινα διαλύματα, διαλύτες οργανικούς, αλλά και πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. [65]

➤ **Σύνθεση οργανικών επιστρωμάτων**

Τα οργανικά επιστρώματα είναι μίγματα των παρακάτω συστατικών:

- Συνδετικού
- Διαλύτη
- Πιγμέντου
- Πληρωτικών ουσιών
- Προσθέτων

Το ρευστό μίγμα διαλυτών και συνδετικής ουσίας ονομάζεται φορέας (vehicle) ή μέσο (medium) του επιστρώματος. [65]

❖ **Συνδετικό**

Γενικότερα ως συνδετικό ορίζεται το μη πτητικό συστατικό του ρευστού φορέα ενός επιστρώματος. Εξασφαλίζει, τη συνοχή μέσα στο στρώμα του επιστρώματος συνδέοντας και συγκρατώντας τα διάφορα συστατικά του και την προσκόλλησή του με το υλικό στο οποίο αυτό εφαρμόζεται. Η ικανότητα της συνδετικής ουσίας να σχηματίζει πυκνά και στεγανά φιλμ εξαρτάται από το μοριακό βάρος της και την πολυπλοκότητα του μορίου. Οι συνδετικές ουσίες με μεγάλο μοριακό βάρος είναι αυτές που σχηματίζουν φιλμ μόνο από εξάτμιση του διαλύτη.

❖ **Διαλύτες**

Οι διαλύτες χρησιμοποιούνται με σκοπό τη μείωση του ιξώδους της συνδετικής ουσίας, όταν η ουσία αυτή είναι υψηλού ιξώδους και έτσι επιτρέπουν την εφαρμογή του χρώματος σε υγρή κατάσταση. Συγχρόνως βοηθούν στη δημιουργία του υμένα του επιστρώματος με την εξάτμισή τους. Τα περισσότερα οργανικά επιστρώματα περιλαμβάνουν μίγμα διαλυτών αντί μόνο ενός διαλύτη. Η επιλογή του διαλύτη επηρεάζει το ιξώδες, τις ρεολογικές ιδιότητες, την ταχύτητα ξήρανσης και τη στιλπνότητα του επιστρώματος. Δεν υπάρχει ένας ιδανικός διαλύτης για όλα τα οργανικά επιστρώματα αλλά και για κάθε σύστημα ο ιδανικός διαλύτης είναι διαφορετικός. Κακή επιλογή διαλύτη οδηγεί σε μειωμένη πρόσφυση και σε προβληματική σκλήρυνση.

❖ **Πιγμέντα**

Τα πιγμέντα, ή αλλιώς χρωστικές ουσίες, είναι ξηρές σκόνες, αδιάλυτες στο συνδετικό, δεν επηρεάζονται φυσικά ή χημικά και διασπείρονται σε αυτό με μια τεχνική αλέσματος. Προέρχονται από φυσικά μεταλλεύματα ή από οργανικές ενώσεις, και συνηθέστερα από μεταλλικά οξειδία.

Τα πιγμέντα βρίσκονται συνήθως σε μορφή λεπτής σκόνης (με μέγεθος κόκκων συνήθως από 1-10μm) χωρίς όμως να αποκλείεται και άλλη μορφή όπως φυλλίδια. Υπάρχουν και τα διεσπαρμένα πιγμέντα που μπορεί να είναι

ανόργανα ή οργανικά αλλά αντί να είναι μόνα τους σε μορφή σκόνης είναι διεσπαρμένα μέσα σε ένα άλλο υλικό. Χρησιμοποιούνται κυρίως για τη βελτίωση των αντιδιαβρωτικών και των μηχανικών ιδιοτήτων, καθώς και της εμφάνισης του επιστρώματος. Αυτά δίνουν το χρώμα, την καλυπτικότητα και τη γεμιστικότητα (ικανότητα να καλύπτουν κοιλότητες της επιφάνειας που βάφεται). Επίσης αυξάνουν τον χρόνο ζωής του χρώματος. Αυτό οφείλεται στην απορρόφηση ή αντανάκλαση της υπεριώδους ακτινοβολίας και την μετατροπή της σε αβλαβή παράγοντα.

❖ Πληρωτικά υλικά

Οι πληρωτικές ουσίες είναι φθηνές σκόνης που χρησιμοποιούνται για την ελάττωση του συνολικού κόστους παραγωγής του χρώματος συνεισφέροντας ταυτόχρονα στη σταθερότητά του κατά την αποθήκευση του, στον έλεγχο ροής, στη μείωση της υδατοπερατότητας και στις μηχανικές του αντοχές.

❖ Πρόσθετα

Τα πρόσθετα είναι βοηθητικές ουσίες, οι οποίες προστίθενται σε μικρές ποσότητες στα επιστρώματα, έτσι ώστε να δώσουν ορισμένες επιθυμητές ιδιότητες στο επίστρωμα. Χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν τη σταθερότητα των οργανικών επιστρωμάτων στα δοχεία, να αποτρέψουν την ιζηματοποίηση των πιγμένων, να επιταχύνουν την ξήρανση, να εμποδίσουν την ανάπτυξη μυκήτων στο οργανικό επίστρωμα, να εξασφαλίσουν και να βελτιώσουν την πρόσφυση και την συνοχή μετά την εφαρμογή του οργανικού επιστρώματος, να σταθεροποιήσουν το ιξώδες και να προβάλλουν εμπόδιο στη δημιουργία κρούστας κατά την αποθήκευση των οργανικών επιστρωμάτων.

➤ **Ανόργανα χρώματα.** Τα ανόργανα χρώματα έχουν σαν συνδετικό μέσο την *υδρύαλο* και ως χρωστικές, συνήθως, ανόργανα πιγμένα. *Υδρύαλος* είναι η συνήθης ονομασία των πυριτικών αλάτων των αλκαλίων με γενικό τύπο $Me_2O_x \cdot nSiO_2$ όπου το Me είναι K ή Na και σπανίως Li, που

άλλωστε είναι τα μόνα υδατοδιαλυτά πυριτικά άλατα με υψηλό pH μεταξύ 11-13. Η υδρύαλος δεν έχει καθορισμένο χημικό τύπο και η αναλογία του SiO_2 είναι κυμαινόμενη μεταξύ 2 και 4. Όσο μεγαλύτερο είναι το 'n' τόσο πιο δυσδιάλυτη στο νερό είναι η υδρύαλος [32].

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



δηλαδή η υδρύαλος, η οποία έρχεται σε επαφή λόγω διάχυσης με ιόντα ασβεστίου και με την ενεργό συμμετοχή του ατμοσφαιρικού CO_2 μεταβάλλεται σε πυριτικό ασβέστιο και ανθρακικό κάλιο. Τα ανόργανα πιγμέντα που περιέχονται στην υδρύαλο συγκρατούνται στο σχηματιζόμενο πλέγμα από την προαναφερθείσα αντίδραση.

➤ **Προϋποθέσεις χρήσης χρωμάτων.** Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω για να χρησιμοποιηθεί ένα χρώμα σαν επικάλυψη (οργανική ή ανόργανη) θα πρέπει να πληροί τις ακόλουθες προϋποθέσεις [22]:

- Να αποτρέπει τη διείσδυση του νερού στο σκυρόδεμα.
- Να αποτρέπει τη διείσδυση του διοξειδίου του θείου (SO_2), και του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στο σκυρόδεμα.
- Να αποτρέπει την είσοδο των χλωριόντων στο σκυρόδεμα.
- Να επιτρέπει τη διείσδυση των υδρατμών.
- Να παρουσιάζει υψηλή συνάφεια με το σκυρόδεμα.
- Να έχει αντοχή στα άλατα και στην υψηλή αλκαλικότητα του σκυροδέματος.
- Να είναι ανθεκτικό στην ακτινοβολία του ήλιου.
- Να μπορεί να διεισδύει μέσα στο σκυρόδεμα.
- Να είναι ελαστικό ώστε να ακολουθεί τις παραμορφώσεις του σκυροδέματος.

➤ **Η εφαρμογή όλων αυτών των χρωμάτων ακολουθεί την ίδια διαδικασία:**

- Προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος με απομάκρυνση όλων των ξένων σωμάτων καθώς και των σαθρών τμημάτων σκυροδέματος.
- Ένα χέρι υπόστρωμα (αστάρι) με το ίδιο συνδετικό μέσο με το χρώμα που θα επικαλυφθεί.
- Δύο χέρια χρώματος.

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

3.3.3 Υδροφοβικός εμποτισμός

Όπως έχουμε επισημάνει, οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ευάλωτες και εκτεθειμένες στις δράσεις διαβρωτικών παραγόντων, όμβριων υδάτων και επιβλαβών ρύπων. Οι εξωγενείς αυτοί παράγοντες εκμεταλλεύονται την απορροφητικότητα του σκυροδέματος, δρύνε μέσω του πορώδους του υποστρώματος που αποτελεί ουσιαστικά τις διόδους μέσα από τις οποίες εισχωρούν, εκμεταλλευόμενοι την υγρασία (νερό) που λειτουργεί ως ηλεκτρολύτης, συντελώντας τα μέγιστα στη διάβρωση των οπλισμών, τη δημιουργία ανθρακικών αλάτων (φαινόμενο ενανθράκωσης) και λοιπών ζημιών – παθολογίας. [66]

Μια λύση προστασίας από καιρικές συνθήκες και βλάβες είναι ο **Υδρο-απωθητικός Εμποτισμός**.

❖ **Υδροφοβισμός ή αλλιώς “Υδρόφοβος Εμποτισμός”** καλείται η ειδική επεξεργασία του σκυροδέματος (και/ή όποιου άλλου πορώδους υποστρώματος), για την παραγωγή μιας επιφάνειας με υδρο-απωθητικές ιδιότητες. Η διαδικασία δεν αφήνει επιφανειακό film (υμένα) στην όψη του σκυροδέματος, υπάρχει δε μία ανεπαίσθητη ή ως συνήθως καμία οπτικά αλλαγή στην εμφάνιση του. Τα συνδετικά μέσα τέτοιων στρώσεων βασίζονται συνήθως σε οργανικά πολυμερή. (EN 1504-1:1998 & EN 1504-8:2004)

❖ **Εμποτισμός.** Εμποτισμός καλείται η επιφανειακή επεξεργασία του σκυροδέματος για την μείωση του πορώδους και την ενίσχυσή της. Οι πόροι και τα τριχοειδή αγγεία είναι συμπληρωμένα μερικώς ή καθ’ ολοκληρίαν. Η Μέθοδος αυτή συνήθως συνδυάζεται με δημιουργία και εμφάνιση λεπτού υμένα. (EN 1504-1:1998 & EN 1504-8:2004, EN 1504-9:1997)

➤ **Διαδεδομένα συστήματα εμποτισμών.** Πρόκειται για ειδικές στρώσεις «ασταρώματος», με ή χωρίς την παρουσία διαλυτών.

- Οι **εμποτισμοί χωρίς διαλύτες** είναι συνήθως υδατικής βάσης. Οι εμποτισμοί με δυνατότητα σφράγισης πορώδους είναι συνήθως πολυμερή (ακρυλικά) ή/και εποξειδικά χαμηλού ιξώδους.
- Οι **εμποτισμοί με διαλύτες** ανάλογα με τον βαθμό πτητικότητας και την πυκνότητα από πλευράς συγκεντρώσεως, δηλαδή της περιεκτικότητας της βασικής ύλης, δημιουργούν υμένα μικρού, μέσου ή υψηλού πάχους.

➤ **Αποτελέσματα συστημάτων εμποτισμών.** Συνήθως οι εμποτισμοί με δυνατότητα σφράγισης πορώδους με βάση τα πολυμερή (ακρυλικά διαλύτου ή νερού) ή/και εποξειδικά χαμηλού ιξώδους, παρουσιάζουν μειωμένη ικανότητα διαπνοής, ενώ η προστατευτική ικανότητα μιας στρώσης εμποτισμού στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική. [67]

- **Ακρυλικοί Εμποτισμοί (Impregnations):** Ειδικά αν το συνδετικό μέσο είναι βάσης SBR, παρουσιάζει μειωμένη σημαντικά δυνατότητα διαπνοής και εκτόνωσης εσωτερικής υγρασίας, ενώ παράλληλα, το πολυμερές, αντιδρά με την υπεριώδη ακτινοβολία (UV) εξωθώντας το

προς την επιφάνεια της στρώσης, εκτονώνοντάς το προς τα έξω. Σε περίπτωση εφαρμογής επιπλέον στρώσης αυξάνεται μεν το πάχος της διαμορφώνοντας υμένα, όμως περιορίζεται ακόμα περισσότερο η διαπνοή, το κυριότερο όμως όλων είναι ο κίνδυνος απολέπισης του υμένα (αποφλοίωση), καθώς και πιθανότητα διαστρωμάτωσης μεταξύ των στρώσεων

- **Εμποτισμοί Εποξειδικών, χαμηλού ιξώδους:** Δραστικά περιορισμένη δυνατότητα διαπνοής και εκτόνωσης εσωτερικής υγρασίας, φαινόμενο «μουμιοποίησης», ενώ παράλληλα, οι αμίνες, αντιδρούν με την υπεριώδη ακτινοβολία (UV) και ως επακόλουθο είναι η δημιουργία – παρατήρηση φαινόμενου «κιμωλίωσης», γνωστό και ως “chalking effect” . Σε περίπτωση εφαρμογής επιπλέον στρώσης αυξάνεται μεν το πάχος της στρώσης διαμορφώνοντας υμένα, όμως το κυριότερο όλων είναι ο κίνδυνος απολέπισης του υμένα (αποφλοίωση), καθώς και πιθανότητα διαστρωμάτωσης μεταξύ των στρώσεων.

➤ **Επιλογή συστημάτων εμποτισμού.** Η επιλογή των συστημάτων εμποτισμού για την προστασία από τις καιρικές συνθήκες και τις δυσμένειες περιβάλλοντος και την πρόληψη έναντι μόνιμης έκθεσης σε υδάτινο στοιχείο και/ή περιπτώσεων χημικής προσβολής γίνεται με τα εξής κριτήρια [66]:

- Το είδος & η σύνθεση του υποστρώματος που εξετάζεται.
- Την ποιότητα / κατηγορία του σκυροδέματος.
- Τον λόγο N/T (Σκυρόδεμα) και την περιεκτικότητα σε τσιμέντο.
- Το πορώδες και/ή το βαθμό απορροφητικότητας του υποστρώματος.
- Αν είναι ή δεν είναι επιθυμητή η διαπνοή.
- Τις δράσεις επιθετικών παραγόντων λόγω δυσμέτειας περιβάλλοντος.
- Την παγοπληξία και τους εναλλασσόμενους κύκλους ψύξης και απόψυξης.
- Την service-life expectancy / βαθμό αποτελεσματικότητας.
- Το κόστος σε συνάρτηση με το χρονικό βάθος λειτουργίας.

➤ **Βασικοί Παράγοντες που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα της δράσης των Υδροφοβικών Εμποτισμών.**

- Το πορώδες (έννοια συνυφασμένη με τον βαθμό απορροφητικότητας).
- Το ποσοστό συγκέντρωσης της βασικής ύλης (concentration).
- Ο χρόνος επέμβασης (timing).
- Ο βαθμός κορεσμού, η ποιότητα & η δομή του υποστρώματος .

Ομολογουμένως, οι παράγοντες αυτοί είναι σε θέση να επηρεάσουν θετικά ή αρνητικά το βάθος διείσδυσης και την αποτελεσματικότητα του υδροαπωθητικού υλικού, με το πορώδες και το ποσοστό συγκέντρωσης να παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος εφαρμογής.

➤ **Συμπεριφορά Υδρο-αποθητικών Εμποτισμών στο σκυρόδεμα.**

Όταν το σκυρόδεμα αντιμετωπίζεται μέσω εμποτισμού με υδροαπωθητικά συστήματα, οι ιδιότητες του επιφανειακού στρώματος γίνονται **υδρόφοβες**. Σκοπός είναι να **μειωθεί ο βαθμός απορροφητικότητας** του υποστρώματος, ώστε να περιοριστεί η διείσδυση όμβριων υδάτων, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα δυνατότητα υψηλού βαθμού διαπνοής κι εκτόνωσης εσωτερικής υγρασίας. Η διαφοροποίηση αυτή της κατάστασης μπορεί να περιορίσει δραστικά και να **μειώσει** σημαντικά την **διείσδυση χλωριόντων** και να σταματήσει την εισχώρηση όμβριων υδάτων από τις εκτεθειμένες επιφάνειες στο εσωτερικό του σκυροδέματος. [66,68]

➤ **Τεχνολογίες Υδρόφοβων Εμποτισμών**

- **Σιλάνια:**

Τα Σιλάνια, είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά σε αλκάλια, εμφανίζουν υψηλή ικανότητα διάχυσης, και είναι κατάλληλα για κατασκευές σκυροδέματος. Έχουν την ικανότητα μέσω διήθησης να εισχωρήσουν βαθιά μέσα στο υπόστρωμα, μιας κι έχουν υψηλό βαθμό πτητικότητας. Λόγω της ιδιότητας αυτής όμως, ως προς την ποσότητα που απαιτείται, χρειάζεται αρκετή συγκέντρωση προϊόντος από πλευράς συμπυκνωμένης ύλης. Στην αγορά υπάρχουν διάφοροι τύποι υδρόφοβων εμποτισμών, από καθαρό σιλανίο (σχεδόν 100%), μέχρι και γαλακτώματα υδατικής βάσης αραιωμένα όμως κατά πολύ (αναλογίες αραιώσεως 1:4–1:5 κ.ο., δηλαδή >20% περιεκτικότητας

ενεργού συστατικού), τα οποία ως αναμένεται, διαφέρουν ως προς τις χρήσεις και τις επιδόσεις τους. [66,67]

- **Σιλοξάνια (ή Πολυ-σιλάνια).**

Το Σιλοξάνιο και/ή τα Πολυ-σιλάνια, είναι ίδιου σχεδόν μεγέθους από πλευράς μικρο-μοριακής δομής όπως τα Σιλάνια αλλά, σε σύγκριση με αυτά δεν μπορούν να εισχωρήσουν το ίδιο αποτελεσματικά σε βάθος μέσα σε πορώδες υπόστρωμα, λόγω της πολυπλοκότητας του δεσμού τους. Για τον λόγο αυτό, δεν χρησιμοποιείται απευθείας η πρώτη ύλη σε υψηλά ποσοστά συγκέντρωσης (συμπυκνωμένη ουσία), παρά μόνο αραιωμένη (αναλογίες διάλυσης 1:7–1:9 κ.ο.), προκειμένου να εξασφαλίζεται ικανοποιητικός βαθμός διήθησης πάντοτε σε συνδυασμό με διαλύτες (ή νερό). Είναι επίσης ανθεκτικά σε αλκάλια. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σκυρόδεμα, αλλά κυρίως λόγω του χαμηλότερου βαθμού διεύθυνσης, σε περισσότερο πορώδη ορυκτά υποστρώματα, όπως το κεραμικά, τούβλα και φυσική και τεχνητή πέτρα. [66,67]

- **Άλατα Πολυμερούς Πυριτίου.**

Το Άλατα Πολυμερούς Πυριτίου (Siliconates), είναι ακόμα μικρότερου μεγέθους από πλευράς μικρο-μοριακής δομής από τα αλλά συστήματα. Ομοίως, λόγω της πολυπλοκότητας του δεσμού τους, δεν μπορούν να εισχωρήσουν σε βάθος μέσα σε ορυκτά υποστρώματα. Σε σχέση με το προηγούμενα συστήματα τα Άλατα Πολυμερούς Πυριτίου δεν είναι ιδιαίτερα σταθερά σε αλκάλια. Χρήση ιπτάμενης τέφρας και σκωρίας υψικαμίνου στο ξηρό μίγμα του τσιμέντου, με σκοπό την μείωση των αλκαλίων στους πόρους του σκυροδέματος αποτελεί λύση αντιμετώπισης. Χρησιμοποιούνται σε ανόργανα υποστρώματα (στρώσεις υδραυλικής ωρίμανσης), κυρίως σε κατασκευές σκυροδέματος με σκοπό να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής του Δομήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με την παροχή προστασίας των ράβδων οπλισμού σε περιβάλλον με δράσεις χλωριόντων, αλλάζοντας συνάμα την περιεκτικότητα του ποσοστού εσωτερικής υγρασίας. [66,67]

3.3.4 Χρήση ψυχρών υλικών για επικαλύψεις και εμποτισμούς με σκοπό την αντιμετώπιση του φαινομένου «Αστικής Θερμικής Νησίδας». [75]

Η ανάγκη για προστασία των δομικών κατασκευών από τις υψηλές θερμοκρασίες και την διατήρηση ενός φυσιολογικού περιβάλλοντος εντός τους οδήγησε στην δημιουργία ψυχρών υλικών. Η χρήση ψυχρών υλικών στις κατασκευές έχει διπλό όφελος. Από την μια μεριά οικονομικό (εξοικονόμηση χρημάτων από την χρήση συσκευών ψύξης) και από την άλλη περιβαλλοντικό (εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων). [74]

➤ Θερμικές ιδιότητες των υλικών επικάλυψης κτιρίων και επιστρώσεων

Οι βασικές θερμικές ιδιότητες των υλικών επικάλυψης και επιστρώσεων είναι οι ακόλουθες:

❖ Η θερμοχωρητικότητα

Ορίζεται από την ικανότητα ενός υλικού να αποθηκεύει θερμότητα και καθορίζει τη δυνατότητα θέρμανσης ή ψύξης αυτού του υλικού. Υλικά με υψηλές τιμές θερμοχωρητικότητας, για παράδειγμα το σκυρόδεμα και τα ασφαλτικά υλικά, θερμαίνονται υπερβολικά, ενώ ταυτόχρονα αργούν να ψυχθούν τη νύχτα. Υλικά με χαμηλές τιμές θερμοχωρητικότητας, για παράδειγμα το ξύλο, θερμαίνονται λιγότερο και υφίστανται γρήγορη θερμική αποφόρτιση.

❖ Η θερμική αγωγιμότητα

Ορίζεται ως ο μηχανισμός μεταφοράς της θερμότητας από τη μία περιοχή ή σύστημα υψηλής θερμοκρασίας σε μια άλλη (ή άλλο) χαμηλότερης θερμοκρασίας, μέσω ενός μέσου (όπως στερεού, υγρού ή αέριου σε ηρεμία), υπό την προϋπόθεση της φυσικής επαφής. Η θερμική αγωγιμότητα προσδιορίζει δηλαδή την ευκολία ή τη δυσκολία μετάδοσης της θερμότητας στο εσωτερικό ενός υλικού.

❖ **Η ανακλαστικότητα - η απορροφητικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας.**

Ορίζεται το ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, που ανακλά η επιφάνεια αυτή και επηρεάζεται κυρίως από το χρώμα και την υφή της. Υλικά με ίδιες θερμικές ιδιότητες, αλλά διαφορετικό χρώμα, αναπτύσσουν διαφορετικές θερμοκρασίες, με τις σκουρόχρωμες αποχρώσεις να απορροφούν μεγαλύτερα ποσά ακτινοβολίας. Η διαφορά μεταξύ των επιφανειακών θερμοκρασιών ενός υλικού σε διαφορετικές αποχρώσεις φτάνει έως και 20 °C.

❖ **Η θερμική εκπομπή**

Θερμική εκπομπή ενός υλικού είναι η ικανότητα της επιφάνειας του να εκπέμπει υπέρυθη (θερμική) ακτινοβολία. Συντελεστής θερμικής εκπομπής είναι ο λόγος της θερμικής ενέργειας, που ακτινοβολεί ένα σώμα, προς τη θερμική ενέργεια που ακτινοβολεί ένα θεωρητικά μαύρο σώμα ίδιας θερμοκρασίας. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής θερμικής εκπομπής ενός υλικού, τόσο ευκολότερα αποβάλλεται η θερμότητα που έχει απορροφήσει και τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα της θερμότητας που εκπέμπει.

➤ **Θερμότητα, θερμοκρασία και θερμική ενέργεια**

Η έννοια της θερμότητας δεν θα πρέπει να συγχέεται με την έννοια της θερμικής ενέργειας. Όλα τα σώματα, ακόμη και αυτά που η θερμοκρασία τους πλησιάζει στο απόλυτο μηδέν έχουν θερμική ενέργεια. Η θερμική ενέργεια οφείλεται στην διαρκή, αέναη και άτακτη κίνηση των μορίων τους (θερμική κίνηση). Από την άλλη με τον όρο θερμότητα εννοούμε την ενέργεια που μεταφέρεται από ένα σώμα με υψηλή θερμοκρασία (δηλ. ένα σώμα με μεγάλη κινητική ενέργεια των μορίων του) σε ένα σώμα με χαμηλή θερμοκρασία (με μικρή κινητική ενέργεια των μορίων του) μέχρι τη στιγμή που θα αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασία (δηλ. μέχρι τη στιγμή που τα μόρια και των δύο σωμάτων θα έχουν την ίδια κινητική ενέργεια). Για τη θερμότητα μιλάμε μέχρι

τη στιγμή, που θα εξισωθούν οι θερμοκρασίες των δυο σωμάτων, τη στιγμή δηλαδή, που θα υπάρξει θερμική ισορροπία.

➤ Μηχανισμοί μεταφοράς της θερμότητας

Η θερμότητα διαδίδεται με τρεις τρόπους: με αγωγή, με συναγωγή και με ακτινοβολία

❖ «**Αγωγή (Conduction)**» είναι η μεταφορά θερμότητας, από μόριο σε μόριο, διαμέσου ενός στερεού σώματος. Τα μόρια ενός υλικού, που βρίσκονται πλησιέστερα σε μία πηγή θερμότητας, σταδιακά αποκτούν μεγαλύτερη κινητική ενέργεια. Η κινητοποίηση αυτών των μορίων επιδρά στην κατάσταση των υπολοίπων με τρόπο, που η μεταφορά της θερμότητας αφορά τελικά όλο το στερεό σώμα. Η ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται θα εξαρτηθεί από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των μορίων και επιπλέον από την ικανότητα αντίστασης του στερεού σώματος στη ροή της θερμότητας.

❖ Η μετάδοση θερμότητας με **συναγωγή (convection)** είναι σύνθεση δύο μηχανισμών. Εκτός από τη μεταφορά ενέργειας με αγωγή, μεταξύ των μορίων, έχουμε και μεταφορά ενέργειας λόγω της μακροσκοπικής κίνησης του ρευστού. Η συναγωγή είναι ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς της θερμότητας στα ρευστά, όπου η ύλη μπορεί να μετακινηθεί ελεύθερα: στοιχεία της μάζας του ρευστού μετακινούνται από μία περιοχή σε άλλη, μεταφέροντας, με αυτό τον τρόπο, μαζί με τη μάζα τους (συνάγουν) όλες τους τις ιδιότητες, όπως: ορμή, θερμική ενέργεια, τα συστατικά τους.

❖ Όλα τα σώματα εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία που βρίσκονται, τον συντελεστή εκπομπής τους αλλά και διάφορες άλλες παραμέτρους. Η ηλιακή ενέργεια φτάνει στην γη αποκλειστικά με αυτό τον μηχανισμό μεταφοράς. Η **μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία** μεταδίδεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα και δεν απαιτείται η παρουσία ενός ενδιάμεσου μέσου. Όταν η ακτινοβολία προσπέσει σε ένα άλλο σώμα ή θα απορροφηθεί, ή θα ανακλαστεί, ή θα μεταφερθεί. Η θερμότητα που απορροφάται εμφανίζεται ως αύξηση της θερμοκρασίας ενός σώματος. Επιπλέον όλοι οι οργανισμο λαμβάνουν ακτινοβολία από άλλους

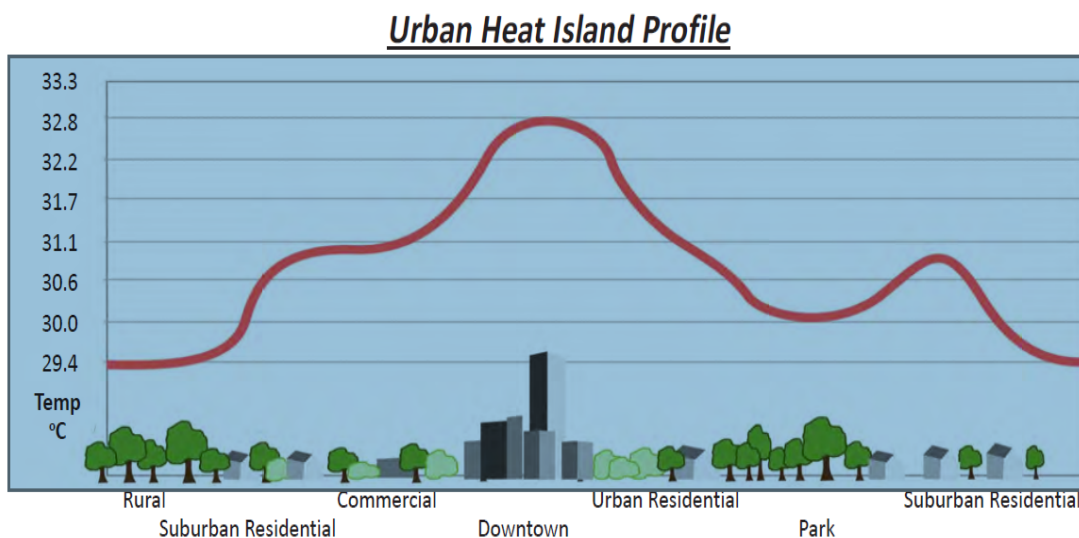
οργανισμούς. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία ενός σώματος, τόσο μεγαλύτερο το ποσό της ενέργειας το οποίο ακτινοβολεί.

➤ **Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, κτίρια, αστική θερμική νησίδα και ρύπανση**

Στις αστικές περιοχές οι εξωτερικές επιφάνειες κτιρίων, δρόμων και υπαίθριων χώρων αποτελούνται κυρίως από υλικά με μεγάλη θερμοχωρητικότητα και με μικρή ανακλαστικότητα. Τα υλικά αυτά λειτουργούν ως αποθήκες θερμότητας. Όσο πυκνότερη είναι η αστική δόμηση, τόσο μεγαλύτερα είναι τα θερμικά φορτία που συσσωρεύει και τόσο πιο δύσκολη είναι, κατά συνέπεια, η διαφυγή στην ατμόσφαιρα της θερμικής ακτινοβολίας, που εκπέμπουν τα υλικά κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Το χειμώνα το φαινόμενο αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί ήπιο και μπορεί να λειτουργήσει θετικά. Το καλοκαίρι τα θερμικά φορτία της επόμενης ημέρας προστίθενται σε αυτά της προηγούμενης, που δεν αποβλήθηκαν κατά τη διάρκεια της νύχτας, με αποτέλεσμα, για κάθε επόμενη ημέρα, τα θερμικά φορτία της πόλης να αυξάνονται με προοδευτικό ρυθμό. Ταυτόχρονα, σε σχέση με την ύπαιθρο δημιουργείται ένα διαφοροποιημένο θερμικό ισοζύγιο, όπου η παγίδευση μεγάλων ποσοτήτων θερμικής ενέργειας οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας του αστικού χώρου.

Το φαινόμενο της «αστικής θερμικής νησίδας» αναφέρεται στην ύπαρξη υψηλότερων θερμοκρασιών στα αστικά κέντρα σε σχέση με τις γύρω ημιαστικές ή αγροτικές περιοχές. Υψηλότερες περιβαλλοντικές θερμοκρασίες οδηγούν σε μεγαλύτερη αύξηση της ενεργειακής ζήτησης για χρήση κλιματιστικών. Δεδομένου ότι οι εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας θα καταναλώνουν περισσότερα καύσιμα, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των επιπέδων ρύπανσης.



ΕΙΚ. 3.3.1 «ΑΣΤΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΝΗΣΙΔΑ»

Η θερμική συμπεριφορά των υλικών καθορίζεται επίσης από τον τρόπο έκθεσης των επιφανειών τους στην ηλιακή ακτινοβολία. Ο προσανατολισμός των αστικών επιφανειών διαφοροποιεί τη χρονική διάρκεια έκθεσης τους στον ήλιο. Η κλίση τους, σε σχέση με την γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων, διαφοροποιεί την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται.

Ως αποτέλεσμα, το έδαφος καθώς και οι οριζόντιες επιφάνειες των κτιρίων (τα δώματα) είναι οι περιοχές, που δέχονται τη μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία με μεγάλη ένταση κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.

Ο περιορισμός της θερμοσυσσώρευσης των υλικών προϋποθέτει την προστασία της μάζας τους από την ηλιακή ακτινοβολία και μπορεί να επιτευχθεί με 2 μέτρα:

- Με εξωτερική θερμομόνωση των κτιρίων, που περιορίζει τη μετάδοση θερμότητας από το περιβάλλον και από την εξωτερική τους επιφάνεια προς την μάζα τους.
- Με μείωση της θερμόαπορροφητικότητας της εξωτερικής τους επιφάνειας.

Ενώ κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου είναι προτιμότερη η χρήση υλικών, που παρουσιάζουν συγκριτικά μεγαλύτερη θερμοκρασία επιφανείας, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, καταλληλότερα είναι τα υλικά με συγκριτικά χαμηλότερη επιφανειακή θερμοκρασία. Οι επιλογές

προτεραιότητας, βελτίωσης του θερινού ή του χειμερινού αστικού κλίματος καθορίζονται με βάση μία σειρά από παράγοντες, που σχετίζονται τόσο με το κλίμα και τις δυνατότητες των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά όσο και με το γενικότερο οικονομικό, πολιτισμικό ή κοινωνικό περιβάλλον μιας περιοχής. Για παράδειγμα, σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από έντονα μεσογειακό κλίμα, ο βαθμός δυσφορίας είναι μεγαλύτερος κατά την διάρκεια της θερινής περιόδου λόγω της ζέστης (σε σύγκριση με τη χειμερινή περίοδο λόγω του ψύχους) και γίνεται απαγορευτικός τόσο για την ημερήσια χρήση ακάλυπτων υπαίθριων χώρων όσο και για την μακρά παραμονή μας μέσα σε κτίρια. Σε συνδυασμό με την επίταση της έντασης του φαινομένου της «αστικής θερμικής νησίδας», σε αυτή την περίπτωση, σαφή προτεραιότητα αποκτούν οι επιλογές, που βελτιώνουν το θερινό αστικό κλίμα.

Το έδαφος στις περισσότερες αστικές περιοχές είναι κυρίως τεχνητό και όχι φυσικό και αφορά κατά πλειοψηφία σε επιστρωμένες από σκυρόδεμα ή ασφαλτικό σκυρόδεμα επιφάνειες. Τέτοιες επιφάνειες είναι για παράδειγμα τα πεζοδρόμια, δρόμοι κυκλοφορίας οχημάτων, πεζοδρόμοι, πλατείες και πάρκα. Τα παραπάνω υλικά επιστρώσεων είναι συνήθως σκουρόχρωμα και με μεγάλη θερμοχωρητικότητα. Ένα ποσοστό, από την ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται οι αστικές επιστρώσεις θα ανακλαστεί πίσω στο περιβάλλον, ενώ το υπόλοιπο αποθηκεύεται, αυξάνοντας τόσο την επιφανειακή τους θερμοκρασία όσο και τη θερμοκρασία του υπερκείμενου αέρα. Η ικανότητα ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοχωρητικότητα των παραπάνω υλικών χαρακτηρίζει τόσο την θερμική τους συμπεριφορά, όσο και του αστικού χώρου που τα περιλαμβάνει.

Κατά τη διάρκεια μίας ζεστής καλοκαιρινής μέρας οι επιφανειακές θερμοκρασίες που αναπτύσσει ένα σκουρόχρωμο ασφαλτικό υλικό μπορεί να είναι της τάξης των 80 °C.



Εικ.3.3.2 ΣΚΟΥΡΟΧΡΩΜΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Το φαινόμενο της «αστικής θερμικής νησίδας» οφείλεται σε πληθώρα διαφορετικών παραγόντων, που έχουν άμεση σχέση με τα χαρακτηριστικά των σύγχρονων πόλεων. Οι παράγοντες αυτοί αφορούν κυρίως σε:

- αυξημένη επανεκπομπή θερμικής ακτινοβολίας από τον ουρανό.
- μειωμένη κυκλοφορία αέρα στον αστικό ιστό.
- ανθρωπογενής θερμότητα.
- γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αστικών δρόμων.
- μειωμένη εξάτμιση και διαπνοή.
- υλικά που χρησιμοποιούνται στις εξωτερικές επιφάνειες των κτιρίων και των υπαίθριων χώρων.

➤ **Αντιμετώπιση της θερμικής νησίδας με χρήση ψυχρών υλικών**

Ο όρος «ψυχρά υλικά» αναφέρεται στις οπτικές ιδιότητες τεχνητών κυρίως υλικών και πιο συγκεκριμένα στην ιδιαίτερη ικανότητα που έχουν αυτά τα υλικά να ανακλούν συγκριτικά μεγαλύτερα ποσά της ηλιακής ακτινοβολίας, (σε σύγκριση με συνήθη υλικά του ίδιου χρώματος), σε συνδυασμό με υψηλή ικανότητα εκπομπής, (Εικόνα 3.3.3).



ΕΙΚ.3.3.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΨΥΧΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα υλικά με «ψυχρές ιδιότητες», κατά συνέπεια έχουν τη δυνατότητα να παραμένουν συγκριτικά πιο δροσερά κατά την έκθεση τους στην ηλιακή ακτινοβολία καθώς και να αποβάλλουν γρηγορότερα κατά τις πρώτες απογευματινές ώρες (με τη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα) την θερμότητα που έχουν απορροφήσει.

Τα υλικά με «ψυχρές ιδιότητες» χαρακτηρίζονται από τα παρακάτω στοιχεία:

- υψηλή ανακλαστικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία (SR).
- υψηλό συντελεστή θερμικής εκπομπής (ϵ).

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί μία σειρά από έγχρωμα υλικά που παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλούς συντελεστές ανακλαστικότητας και θερμικής εκπομπής σε σύγκριση με συμβατικά υλικά του ίδιου χρώματος. Τα υλικά αυτά (χωρίς να εξαντλείται εδώ το εύρος των εφαρμογών) αφορούν κυρίως σε ειδικές προστατευτικές επικαλύψεις (χρώματα, κονιάματα) του κτιριακού κελύφους (δώματα, εξωτερικοί τοίχοι), είτε σε υλικά δαπεδοστρώσεων αστικών χώρων (πλακίδια, κυβόλιθοι, συνθετικά ασφαλτικά).

Η χρήση αυτών των υλικών είναι αρκετά διαδεδομένη εδώ και δεκαετίες κυρίως στις Η.Π.Α, ενώ τα τελευταία χρόνια παρατηρείται επίσης η ταχεία

διάδοση τους σε ολόκληρο τον κόσμο και στην Ευρώπη, κυρίως μέσω ανάπτυξης και προώθησης πολιτικών που έχουν ως στόχο τον περιορισμό του φαινομένου της «αστικής θερμικής νησίδας», την εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς και την μείωση του φαινομένου της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Από Ελληνικής πλευράς, η χρήση των «ψυχρών υλικών» έχει θεσμοθετηθεί με υπουργική απόφαση (ΚΥΑ Αριθμ. Δ6/Β/14826) για τα κτίρια του Δημόσιου τομέα. Ταυτόχρονα, έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στη χαρτογράφηση των πιθανών εφαρμογών και των ελάχιστων προδιαγραφών που πρέπει να πληρούν διάφορα δομικά υλικά με «ψυχρές» ιδιότητες, (μέσω του εξαιρετικού έργου που παράχθηκε στο πλαίσιο σύνταξης των ΠΕΤΕΠ).

Η επιλογή ενός δομικού υλικού με «ψυχρές ιδιότητες» θα πρέπει πρώτα και κύρια να λαμβάνει υπόψη της το σύνολο των ελάχιστων απαιτήσεων, που πρέπει να πληροί συνολικά ως δομικό υλικό, με βάση την χρήση για την οποία προορίζεται και τις ανάγκες του έργου στο οποίο πρόκειται να ενσωματωθεί.

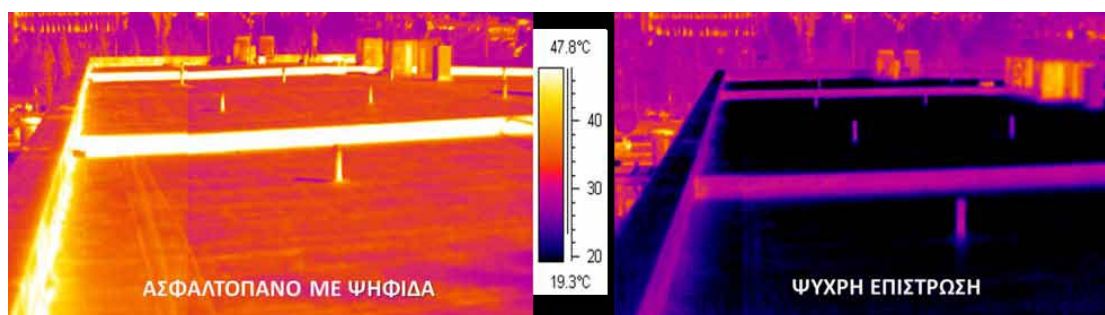
➤ **«Ψυχρά Υλικά» θερμικής προστασίας κτιριακού κελύφους**

Η χρήση υλικών με «ψυχρές ιδιότητες» στη θερμική προστασία κτιρίων έχει σημειώσει τα τελευταία χρόνια πολύ σημαντικά και μετρήσιμα αποτελέσματα στον τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας από τις ανάγκες δροσισμού των κτιρίων, στη βελτίωση του επιπέδου θερμικής άνεσης, κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, καθώς και στην προσπάθεια περιορισμού της εκπομπής CO₂.

Σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από σχετικά θερμό κλίμα (μεγάλες ανάγκες δροσισμού, ήπιες ανάγκες θέρμανσης) η χρήση υλικών με «ψυχρές ιδιότητες» στο κτιριακό κέλυφος αποτελεί μία σημαντική τεχνική, που μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά οφέλη τόσο από πλευράς μείωσης του βαθμού και των ωρών δυσφορίας, όσο και από πλευράς εξοικονόμησης ενέργειας από τις ανάγκες ψύξης, (Εικόνα 3.3.4). Τα οφέλη ή τα μειονεκτήματα που μπορεί να

προκύπτουν από τη χρήση «ψυχρών υλικών» στο κτιριακό κέλυφος εξαρτώνται επιπλέον και από άλλους σημαντι-κούς παράγοντες, όπως είναι:

- Η απουσία ή ελλιπής θερμομόνωση.
- Ο προσανατολισμός του κτιρίου.
- Η τυπολογία του κτιρίου.
- Η ποιότητα των «ψυχρών υλικών».
- Η ύπαρξη επιβαρυντικών για τα υλικά περιβαλλοντικών παραγόντων (θαλάσσιο περιβάλλον, βιομηχανικοί ρύποι).



ΕΙΚ. 3.3.4 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΨΥΧΡΟΥ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

➤ **Εξοικονόμηση ενέργειας και θεσμικό πλαίσιο**

Οι προκλήσεις, στις οποίες καλούνται να ανταπεξέλθουν τα δομικά υλικά, που σχετίζονται με την εξοικονόμηση ενέργειας, καθορίζονται με βάση τις δύο τελευταίες κοινοτικές οδηγίες: 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου της 19ης Μαΐου 2010, για την «Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων» και 2010/30/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου της 19ης Μαΐου 2010, για την «Επισήμανση με πινακίδες και πληροφορίες για τις προδιαγραφές του προϊόντος, της κατανάλωσης ενέργειας και άλλων πηγών των ενεργειακών προϊόντων». Σύμφωνα με την πρώτη Οδηγία καθορίζονται νέες απαιτήσεις

για την ψύξη και την θέρμανση των κτιρίων, τα οποία κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την περίοδο κατασκευής τους. Προβλέπεται επίσης, η κατασκευή των νέων κτιρίων και η αναβάθμιση του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος,

να γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο του παθητικού κτιρίου[7]. Παράλληλα, για το 2021, τίθενται νέοι στόχοι που θέλουν όλα τα νέα κτίρια να έχουν σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας. Ιδιαίτερα για νέα κτίρια του δημοσίου, που στεγάζουν δημόσιες αρχές ή είναι ιδιοκτησίας τους, οι παραπάνω στόχοι πρέπει να επιτευχθούν από τις αρχές του 2019. Από τα παραπάνω γίνεται σαφές, πως τα δομικά υλικά, που σχετίζονται με την εξοικονόμηση ενέργειας, καλούνται να αποτελέσουν τον βασικό μοχλό, αποτελεσματικής εφαρμογής των Ευρωπαϊκών οδηγιών και στόχων.

Σε διεθνές επίπεδο, τα «ψυχρά υλικά» έχουν ενταχθεί στον κανονισμό ενεργειακής απόδοσης διαφόρων χωρών, ως μέθοδος εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια και βελτίωσης των συνθηκών μικροκλίματος. Σε κάθε περίπτωση, ο προσδιορισμός των ελάχιστων ορίων ανακλαστικότητας και εκπομπής, εναπόκειται στους εμπλεκόμενους φορείς και οργανισμούς.

Στην Ελλάδα, ο νέος Κανονισμός για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (KENAK) στοχεύει στην ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων με επεμβάσεις είτε στο κέλυφος, είτε στις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις του. Μια από τις παραμέτρους που εξετάζει είναι και η τοποθέτηση «ψυχρών υλικών» σε στέγες και τοιχοποιίες, δεδομένου ότι οι ιδιότητες της ανακλαστικότητας και του συντελεστή εκπομπής επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων. Συγκεκριμένα, στο Άρθρο 9: Τεχνικά χαρακτηριστικά του κτιρίου αναφοράς, το κτίριο αναφοράς περιλαμβάνει εξωτερικές επιφάνειες με συντελεστή απορροφητικότητας ηλιακής ακτινοβολίας 0,40 (SR=0.6) για τοιχοποιίες, 0,40 (SR=0.6) για δώματα και 0,60 (SR=0.4) για επικλινείς στέγες. Αντίστοιχα, ο συντελεστής εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας για τις εξωτερικές επιφάνειες του κτιρίου αναφοράς είναι 0,80.

➤ **Θερμομόνωση και «ψυχρά υλικά»**

Με την θερμομονωτική προστασία των δομικών στοιχείων των κτιριακών κατασκευών επιδιώκεται ο περιορισμός στο ελάχιστο δυνατό των ανταλλαγών θερμότητας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος και η επίτευξη

ενός ευχάριστου «εσωκλίματος» στο εσωτερικό των κτιρίων με τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Έτσι, κατά μεν τη χειμερινή (ψυχρή) περίοδο περιορίζονται οι θερμικές απώλειες προς το εξωτερικό περιβάλλον, κατά δε τη θερινή (θερμή) περίοδο περιορίζεται η υπερθέρμανση λόγω θερμικών προσόδων από την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Ταυτόχρονα όμως με τη θερμομονωτική προστασία των κτιρίων ελαχιστοποιείται και ο κίνδυνος εκδήλωσης του φαινομένου της επιφανειακής συμπύκνωσης των υδρατμών (δρόσου) και προστατεύονται οι κατασκευές από φαινόμενα υγρασίας του εσωτερικού χώρου. Σε γενικότερο επίπεδο περιορίζεται η απαίτηση για κατανάλωση ενέργειας και κατά συνέπεια μειώνεται η κατανάλωση των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων και η ρύπανση του περιβάλλοντος από την παραγωγή αέριων ρύπων.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, όταν γίνεται συζήτηση για την αναγκαιότητα θερμομόνωσης μίας κατασκευής, τείνουμε να παραγνωρίζουμε τη σημασία της ακτινοβολίας. Αυτό έχει αποτυπωθεί και στο επίπεδο της σχετικής τεχνικής ορολογίας, με αποτέλεσμα, η θερμομόνωση να αναφέρεται στα υλικά με βάση τους παρακάτω δείκτες:

❖ **Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας (λ)**

Είναι η ποσότητα της θερμότητας ανά μονάδα του χρόνου, που περνά μέσα από τις απέναντι πλευρές ομοιογενούς υλικού πάχους 1m, όταν η διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών αυτών είναι ίση με 10K. (W/mK).

❖ **Συντελεστής Θερμοπερατότητας (U-Value)**

Είναι η ποσότητα θερμότητας ανά μονάδα χρόνου, που περνά μέσα από 1m² στοιχείου κατασκευής με πάχος d(m) όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών αυτών είναι ίση με 10K. (W/m²K).

❖ **Θερμική Αντίσταση (R)**

Είναι η αντίσταση των στοιχείων στην ροή θερμότητας διαμέσου ομοιογενούς υλικού για διαφορά θερμοκρασίας στις δυο πλευρές του στοιχείου 10K. (m²K/W).

Διάφορες μελέτες[9] αποδεικνύουν πως ο συνδυασμός ενός θερμομονωτικού υλικού με μία προστατευτική επικάλυψη με «ψυχρές

ιδιότητες» αυξάνει την ακεραιότητα και την απόδοση της θερμομόνωσης. Ας σκεφτούμε για παράδειγμα μία κλασική περίπτωση συμβατικής θερμομόνωσης δώματος, όπου η θερμομόνωση βρίσκεται πίσω από μία ασφαλική μεμβράνη: Κατά τη διάρκεια μιας ζεστής καλοκαιρινής μέρας, η επιφανειακή θερμοκρασία της ασφαλικής μεμβράνης μπορεί να φτάσει τους 70 °C[10]. Συνέπεια αυτής της μεγάλης θερμοκρασίας θα είναι η μείωση της χαρακτηριστικής απόδοσης του θερμομονωτικού υλικού.

➤ **Ιδιότητες ψυχρών υλικών**

Οι βασικές ιδιότητες που επιτυγχάνουν ή επιδιώκουν είναι:

❖ **Υψηλή ανακλαστικότητα**

Επίτευξη έγχρωμων υλικών με μεγάλη ανακλαστικότητα στο κοντινό υπέρυθρο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας (θερμική ενέργεια) και επιλεκτική απορρόφηση στο ορατό φάσμα (χρώμα).

❖ **Διαπερατότητα**

Υλικά που έχουν τη δυνατότητα να επιτρέπουν τη διέλευση του νερού και των υδρατμών μέσω των ανοιχτών πόρων τους, ή που έχουν τη δυνατότητα απορρόφησης και αποθήκευσης τους με τη μορφή υγρασίας. Τα υλικά αυτά ψύχονται αξιοποιώντας την εξάτμιση. (Εικόνα 3.3.5)

❖ **Μικρό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας**

Τα υλικά με χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας αναπτύσσουν γρήγορα υψηλή επιφανειακή θερμοκρασία, αλλά δεν θα αποθηκεύσουν μεγάλα ποσά θερμότητας, σε σύγκριση με υλικά υψηλού συντελεστή.

❖ **Υψηλό συντελεστή εκπομπής**

Τα υλικά εκπέμπουν γρήγορα στο περιβάλλον την θερμότητα που έχουν απορροφήσει.

3.3.5 Χρήση πολυσιλοξάνων για επικαλύψεις

Από την εισαγωγή τους στο εμπόριο πριν από τρεις δεκαετίες οι επικαλύψεις πολυσιλοξάνης συνέχισαν να αυξάνουν, τόσο την ανάπτυξη όσο και την εφαρμογή τους. Πλέον αναγνωρίζονται ως διακριτή κατηγορία προϊόντων στην βιομηχανία επικαλύψεων και, σύμφωνα με καταχωρήσεις σε ένα σημαντικό περιοδικό του εμπορικού κλάδου, ο αριθμός των κατασκευαστών επιστρώσεων πολυσιλοξανίων τριπλασιάστηκε μεταξύ 2000 και 2004. Το σημαντικότερο είναι ότι τα πολυσιλοξάνια φέρονται πλέον να είναι το προτιμώμενο μέσο επικάλυψης για πολλές βιομηχανικές και στρατιωτικές εφαρμογές, καθώς και διάφορων υποδομών, συμπεριλαμβανομένων των θαλάσσιων σκαφών, εξέδρων πετρελαίου, δεξαμενών νερού, γεφυρών και άλλων δομών. Η χρήση τους, λοιπόν, εστιάζεται σε περιπτώσεις δομικών έργων που χαρακτηρίζονται από προβλήματα τριβής, διάβρωσης, υψηλής U-V ακτινοβολίας και υψηλών θερμοκρασιών. [69]

Ο όρος πολυσιλοξάνιο αναφέρεται σε ένα ένα πολυμερές με σκελετό σιλικόνης-οξυγόνου. Ο σκελετός σιλικόνης-οξυγόνου εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη αντίσταση στις επιδράσεις της U-V ακτινοβολίας από ότι ο σκελετός άνθρακα-άνθρακα.

Χαρακτηριστικά επικαλύψεων με πολυσιλοξάνες.

- Εξαιρετική αντίσταση στην τριβή
- Εξαιρετική αντίσταση στη διάβρωση
- Καλή χημική αντίσταση
- Αντίσταση στη βρωμιά
- Χαμηλή εκπομπή VOCs (Πτητικές Οργανικές Ενώσεις)

Η ανάπτυξη των εφαρμογών των πολυσιλοξανίων έχουν καταλήξει στην διαμόρφωση τριών βασικών κατηγοριών πολυσιλοξανικών επικαλύψεων [69]:

➤ **Ανόργανες πολυσιλοξάνες:** Με την κατάλληλη προσθήκη additives και πιμέντων οι επικαλύψεις με ανόργανες πολυσιλοξάνες είναι ικανές να

αντέξουν θερμοκρασίες έως 760 °C. Επίσης με χρήση άλλων πιγμένων δημιουργούν επικαλύψεις με υψηλή αντίσταση σε διαλύτες. Δρουν προστατεύοντας τις επιφάνειες μέσω υδρολυτικής πολυσυμπύκνωσης.

➤ **Υβρίδια εποξεικών-Πολυσιλοξανών:** Δημιουργούνται μέσω συνδυασμού αλειφατικών εποξειδικών ρητίνων , ενδιάμεσων σιλικόνης , οξυσιλάνιων και αμινοσιλάνιων. Τα υβρίδια αυτά έχουν την ιδιότητα να προστατεύουν τόσο έναντι των καιρικών συνθηκών όσο και από την διάβρωση. Δρουν προστατεύοντας τις επιφάνειες μέσω υδρολυτικής πολυσυμπύκνωσης αλλά και άλλων πιο συμβατικών εποξυ-αμινικών μηχανισμών. Αποτέλεσμα των δράσεων αυτών είναι η δημιουργία των καλούμενων *interpenetrating polymer networks* (διαδιεισδύοντα δίκτυα πολυμερών). Τα υβρίδια αυτά προσδίδουν καλύτερη αντίσταση στις καιρικές συνθήκες από ότι οι συμβατικές εποξεικές επικαλύψεις.

➤ **Υβρίδια ακρυλικών-Πολυσιλοξανών:** Με τον συνδυασμό ακρυλικών και σιλοξανικών ρητινών, παράγεται ένα προϊόν χαμηλό σε VOCs και με υψηλή αντοχή στις καιρικές συνθήκες. Αυτά τα συστήματα μπορούν να παραχθούν ως μονοσυστατικά ή δισυστατικά συστήματα.

3.3.6 Φωτοκαταλυτικά χρώματα

Η εναπόθεση ρύπων στην επιφάνεια των δομικών κατασκευών από την αιθάλη, τα καυσαέρια των οχημάτων και άλλα είδη καυσαέριων είχαν ως αποτέλεσμα την ανάγκη καθαρισμού των επιφανειών των κτιρίων. Η ανάπτυξη μικροοργανισμών, όπως βακτήρια, άλγη και μύκητες παραμορφώνει τις προσόψεις των κτιρίων και τα οδηγεί σε μηχανική εξασθένιση και ενδεχόμενη καταστροφή. Για να αποφευχθεί αυτό, τα κτίρια μπορούν να επιακλυφθούν με ένα στρώμα φωτοκαταλύτη.

Η φωτοκατάλυση λαμβάνει χώρα με την παρουσία φωτός και ενέργειας, η οποία αντιστοιχεί στο ενεργειακό χάσμα του φωτοκαταλύτη. Η αντίδραση αυτή προκαλεί την επικάλυψη να «διαλύσει» με χημικό τρόπο τα προσροφημένα στην επιφάνεια του καταλύτη οργανικά σωματίδια. Επίσης, η γωνία επαφής του νερού αυξάνεται, καθιστώντας την επιφάνεια υδρόφοβη γεγονός που επιτρέπει οι βρωμιές να αφαιρεθούν εύκολα [70].

Η γενική ιδέα της ικανότητας αυτοκαθαρισμού του TiO_2 είναι γνωστή και η εφαρμογή των επικαλύψεων σε TiO_2 σε δομικές κατασκευές για χρήση αυτοκαθαρισμού είναι σημαντικού ενδιαφέροντος[71].

Εάν ένα φιλμ TiO_2 κατεργαστεί με ένα ορισμένο ποσοστό του SiO_2 , αποκτά υδρόφιλες ιδιότητες μετά από φωτισμό με UV-ακτίνες. Σε αυτήν την περίπτωση, τα ηλεκτρόνια και οι οπές εξακολουθούν να παράγονται, αλλά αντιδρούν με διαφορετικό τρόπο από τους κανονικούς φωτοκαταλύτες. Τα ηλεκτρόνια τείνουν να μειώνουν τα κατιόντα Ti (IV) προς Ti (III), και οι οπές οξειδώνουν το O^{2-} ανιόντα. [71,72]

Σε αυτή τη διαδικασία, τα άτομα οξυγόνου εκτινάσσονται, δημιουργώντας κενές θέσεις οξυγόνου. Τα μόρια του νερού καταλαμβάνουν στην συνέχεια αυτές τις κενές θέσεις οξυγόνου και παράγουν προσροφημένες ομάδες OH που τείνουν να κάνουν την επιφάνεια υδρόφιλη. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια που ακτινοβολείται με υπεριώδες φως, τόσο μικρότερη γίνεται η γωνία επαφής του νερού. Μετά από περίπου 30 λεπτά υπό μια πηγή υπεριώδους φωτός μέτριας έντασης, η γωνία επαφής προσεγγίζει το μηδέν, πράγμα που σημαίνει ότι το νερό έχει την τάση να εξαπλώνεται τέλεια σε όλη την επιφάνεια [73].

Οι Toma et al. [72] ανέφεραν την υποβάθμιση ρύπων από αέρια οξειδία του αζώτου όπως NO και NO_x από επικαλύψεις που ψεκάστηκαν με TiO_2 (Περίπου 52% για το NO και το 34% για τα NO_x). [16]

3.3.7 Πολυστρωματικά συστήματα

Η αύξηση του πάχους ενός επιστρώματος γενικά αυξάνει και την αντιδιαβρωτική του ικανότητα. Πολλές φορές όμως, η δράση μιας επικάλυψης δεν είναι ικανή να ανταπεξέλθει σε όλους τους διαβρωτικούς παράγοντες προστατεύοντας το υπόστρωμα. Επίσης, σε επικαλύψεις ενός στρώματος με μεγάλο πάχος εμφανίζονται αρκετές φορές φαινόμενα όπως ρωγμές λόγω εσωτερικών μηχανικών τάσεων.

Καλύτερη αντιδιαβρωτική προστασία επιτυγχάνεται με χρήση συστημάτων πολλαπλών επικαλύψεων.

Ένα πολυστρωματικό σύστημα επικάλυψης γενικά περιλαμβάνει τα εξής στρώματα:

- Το Αστάρι (primer): Εξασφαλίζει καλή πρόσφυση με τη μεταλλική επιφάνεια και επιπλέον παρέχει αντιδιαβρωτική προστασία μέσω των επιλεγέντων ανά περίπτωση αντιδιαβρωτικών πιγμέντων.
- Το Ενδιάμεσο στρώμα (intermediate coat): εφαρμόζεται μετά το αστάρι, απομονώνει το σύστημα υπόστρωμα-αστάρι από το περιβάλλον και χρησιμοποιείται κυρίως για κάλυψη ατελειών της επιφάνειας επικάλυψης όταν απαιτούνται λείες και ομοιόμορφες επιφάνειες.
- Το τελικό στρώμα (top coat): Προστατεύει τα προηγούμενα στρώματα από τους διαβρωτικούς παράγοντες του περιβάλλοντος π.χ. υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία κ.λ.π. Ελέγχει ιδιότητες της επιφάνειας του χρώματος, όπως είναι η απόχρωση και η στιλπνότητα.

3.3.8 Κριτήρια επιλογής ενός συστήματος επικάλυψης

Τα κριτήρια με τα οποία επιλέγεται ένα σύστημα επικάλυψης έχουν να κάνουν με τους παρακάτω παράγοντες:

- Τα χαρακτηριστικά του επιστρώματος (π.χ. αντίσταση σε τριβή, σε δόνηση, σε πρόσκρουση, ευκαμψία, απόχρωση του χρώματος και στιλπνότητα, χρόνος ξήρανσης του, αντίσταση στη μούχλα, αντίσταση στο νερό ή στα καύσιμα, διαβρεξιμότητα κ.α.)
- Τη φύση του υποστρώματος στο οποίο επικαλύπτεται το επίστρωμα (Ξύλο, σίδηρο, παλιό επίστρωμα κ.λ.π)
- Τους περιβαλλοντικούς παράγοντες (Θερμοκρασία, υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, βιολογικά προβλήματα, αντίσταση σε χημικά σε π.χ. οξέα, διαλύτες, άλατα, αλκάλια, κ.λ.π.)
- Το κόστος κύκλου ζωής του συστήματος επικάλυψης
- Το κόστος εργασίας για την προκατεργασία της επιφάνειας, την εφαρμογή και την επιδιόρθωση του επιστρώματος

Τοποθέτηση προβλήματος

Η ανθεκτικότητα κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες επιδρούν στην κατασκευή εσωτερικά και εξωτερικά. Σε χώρες που περιβάλλονται από θάλασσα και με ζεστό κλίμα όπως η χώρα μας η επίδραση της θερμοκρασίας, η σχετική υγρασία, τα χλωριόντα και άλλοι αέριοι ρύποι όπως το διοξείδιο του άνθρακα CO₂, διοξείδιο του θείου SO₂ και τα οξειδία του αζώτου NO_x, είναι παράγοντες θεμελιώδους σημασίας για τη φθορά και κατά συνέπεια την καταστροφή του σκυροδέματος, η οποία προκαλείται κατά κύριο λόγο από τη διάβρωση του οπλισμού.

Η Ελλάδα ως γνωστό είναι χώρα, η οποία περιβρέχεται από θάλασσα. Η μεταφορά του χλωριούχου νατρίου από τη θάλασσα με τον άνεμο έχει διαπιστωθεί ακόμη και σε ορεινές περιοχές. Ιδιαίτερα στις παραθαλάσσιες περιοχές, τα υψηλά ποσοστά υγρασίας που επικρατούν, σε συνδυασμό με τις υψηλές μέσες ετήσιες θερμοκρασίες και το χλωριούχο νάτριο της θάλασσας, δημιουργούν τις δυσμενείς προϋποθέσεις για επιτάχυνση της διάβρωσης του οπλισμού των κατασκευών από σκυρόδεμα.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η διερεύνηση της προστασίας του οπλισμού του σκυροδέματος από την διάβρωση, με χρήση συστημάτων οργανικών και ανόργανων υλικών επικάλυψης και υδροφοβικού εμποτισμού στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

Προς τούτο προετοιμάστηκαν δύο τύποι δοκιμίων :

- Κυλινδρικά δοκίμια εγκιβωτισμένου οπλισμένου σκυροδέματος με χάλυβα B500σδιαμέτρου 12mmκαι σκυρόδεμα τύπου C_{16/20}με πάχος επικάλυψης 10mm. Από ένα σύνολο 9 δοκιμίων οπλισμένου σκυροδέματος τα 7 εργάστηκαν με μεθόδους επικάλυψης ή/και υδροφοβικού εμποτισμού με ψυχρά υλικά.
- Ράβδοι διφασικού χάλυβα B500σδιατομής Φ12 (μη εγκιβωτισμένοι στο σκυρόδεμα), δοκίμια (Bare).

Όλα τα δοκίμια (σκυροδετημένα και μη) τοποθετήθηκαν σε θάλαμο επιταχυνόμενης διάβρωσης (θάλαμος αλατονέφωσης) όπου παρέμειναν για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα 1000 ωρών. Ακολούθησε η αφαίρεση του σκυροδέματος, τα δοκίμια χάλυβα καθαρίστηκαν και μετρήθηκε η απώλεια μάζας, το βάθος και το εμβαδόν των βελονισμών του χάλυβα και πραγματοποιήθηκαν μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού. Για την παραλαβή έγκυρων δοκιμίων, πριν την δοκιμή διάβρωσης , όλα τα άκρα των ράβδων επικαλύφτηκαν προστατευτικά με κερί. Οι ακολουθηθείσες δράσεις ήταν σύμφωνες με συγκεκριμένες διεθνείς προδιαγραφές.

Πιο συγκεκριμένα σκοποί ήταν, μετά την έκθεση των δοκιμίων που δημιουργήσαμε σε περιβάλλον αλατονέφωσης,

1. Η μελέτη της τάσης προς διάβρωση των δοκιμίων.
2. Η μελέτη της απώλειας μάζας του οπλισμού του σκυροδέματος σε αυτά τα δοκίμια.
3. Η μελέτη της διαβρωτικής δράσης των χλωριόντων που εκδηλώθηκε μέσω της ανάπτυξης βελονισμών με χρήση μικροσκοπίου.
4. Η μελέτη της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων του οπλισμού των δοκιμίων, μέσω πειραμάτων εφελκυσμού.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 4: Δοκίμια και Υλικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε στα πειράματά μας, καθώς και τη μεθοδολογία κατασκευής των δοκιμών.

4.1 Διαδικασία παρασκευής 9 δοκιμών οπλισμένου σκυροδέματος.

Παρασκευάστηκαν 9 κυλινδρικά δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος με χάλυβα $\Phi 12$ τύπου B500c και σκυρόδεμα τύπου C16/20 με πάχος επικάλυψης 10mm.



ΕΙΚ. 4.1 ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ ISO 15630-1, ΤΟ ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΜΗΚΟΣ ΡΑΒΔΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΣΕ 460MM.

Για την παρασκευή των δοκιμίων οπλισμένου σκυροδέματος, απαιτήθηκε η ακόλουθη προεργασία.

➤ **Βήμα Πρώτο: Ζύγιση, μέτρηση και κωδικοποίηση χαλύβων.**

Για την παρασκευή των 9 δοκιμίων οπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν ισάριθμες ράβδοι χάλυβα και κωδικοποιήθηκαν. Όπως δείχνεται στον πίνακα, έκαστη ράβδος χάλυβα, μετρήθηκε ως προς το μήκος και την μάζα της. Τα άκρα κάθε ράβδου χάλυβα καλύφθηκαν με κερί σε μήκος 9 cm προς αποφυγή διάβρωσης και πιθανής αστοχίας (invalid test) στη θέση συγκράτησης της από την αρπάγη (στην δοκιμή εφελκυσμού).

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΜΗΚΟΣ(mm)	ΜΑΖΑ(gr)
1	533	472,06
2	535	483,66
3	534	479,49
4	533,5	482,46
5	537	485,21
6	537	483,57
7	537	480,59
8	536	481,03
9	537,5	482,99

➤ **Βήμα Δεύτερο: Αναγνώριση υλικών σκυροδέματος C_{16/20}**

Οι αναλογίες των υλικών που απαιτεί η σύσταση για τύπο σκυροδέματος C_{16/20} φαίνεται ακολούθως :

ΝΕΡΟ	ΤΣΙΜΕΝΤΟ	ΑΜΜΟΣ	ΣΚΥΡΑ
185 kg/m	270 kg/m ³	1020 kg/m ³	850 kg/m ³

*Άμμος λατομείου

*Τα σκύρα έχουν μέγιστη διάμετρο μικρότερη από 10mm

*Τύπος Τσιμέντου: IV/B-(W-P)32,5 N

➤ **Βήμα Τρίτο: Προετοιμασία σκυροδέματος**

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω αναλογίες προχωρήσαμε στην προετοιμασία των υλικών και των ξυλοτύπων (πλαστικά καλούπια).

Λόγω του μικρού πάχους επικάλυψης, απαιτήθηκε η χρήση σκύρων με μικρή κοκκομετρία, αντίστοιχα, έτσι ώστε να ξεπεραστεί η τεχνική δυσκολία που θα προέκυπτε κατά τη σκυροδέτηση. Για το λόγο αυτό, μέσω του κόσκινου διαχωρίστηκαν τα σκύρα με τη μικρή κοκκομετρία.



Άποψη του κόσκινου για τον διαχωρισμό των σκύρων.

Η διαγώνιος επιτρέπει την διέλευση σκύρων ως 7 mm.

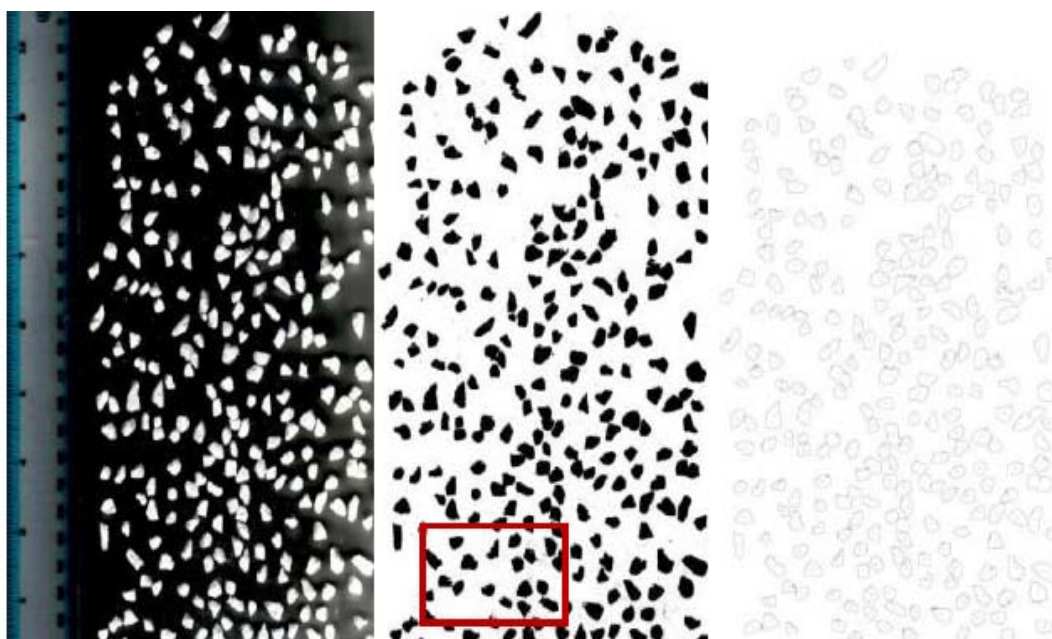


Σκύρα διαφόρων μεγεθών.

Σκύρα πριν τη διαλογή.

Με τη χρήση ειδικού μηχανήματος σάρωσης, δείγμα 240 σκύρων φωτογραφήθηκε ώστε να μετρηθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σκυρων έσω προγράμματος επεξεργασίας φωτογραφίας. Τα βήματα και τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω

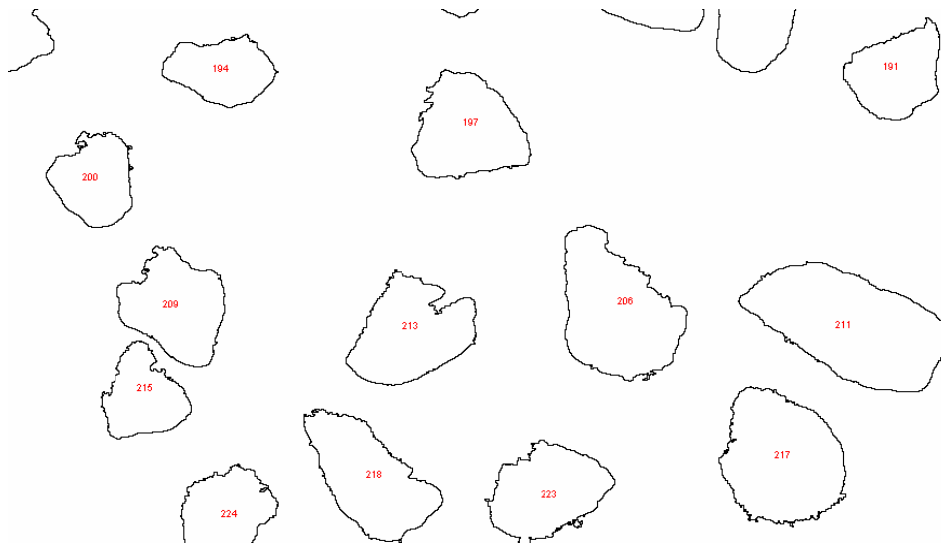
1. Κατά τη σάρωση αποφεύχθηκε η επαφή μεταξύ δύο ή περισσότερων σκύρων.
2. Μέσω του λογισμικού, έγινε μετατροπή της εικόνας επιλέγοντας το κατάλληλο φίλτρο το οποίο δημιουργεί έντονες χρωματικές αντιθέσεις με ξεκάθαρα τα όρια των διαφόρων particles μεταξύ τους.
3. Τα σκύρα αναγνωρίστηκαν με την λειτουργία analyze particles.



Βήμα 1

Βήμα 2

Βήμα 3



Βήμα 3

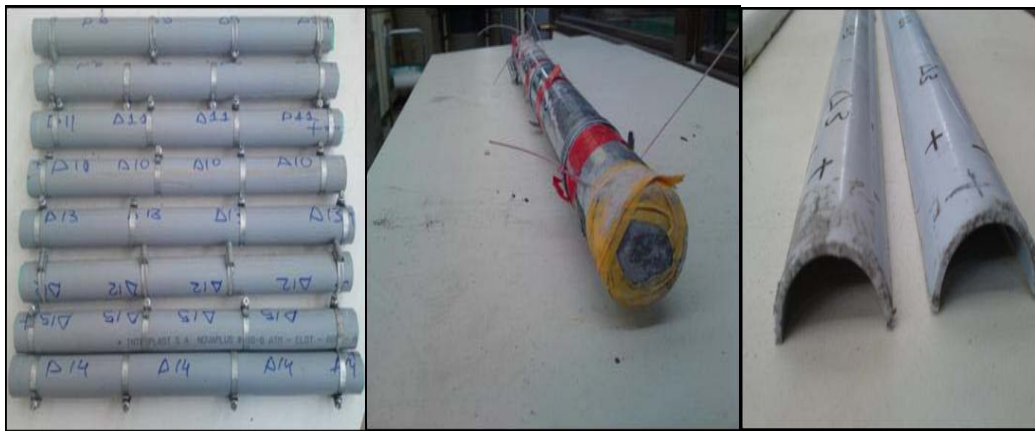
Στη συνέχεια μετρήθηκαν τα υπόλοιπα υλικά του σκυροδέματος, δηλαδή η άμμος, το τσιμέντο, το νερό και ετοιμάστηκε το μίγμα.



➤ Βήμα Τέταρτο: Προετοιμασία καλουπιών

Για την κατασκευή των κυλινδρικών δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν επίσης κυλινδρικά πλαστικά καλούπια, της απαιτούμενης διαμέτρου.

Για τη σωστή κατασκευή των δοκιμίων απαιτήθηκε ευθυγράμμιση του χάλυβα στο σκυρόδεμα κατά την τοποθέτηση στα πλαστικά καλούπια, απαίτηση η οποία επιτεύχθηκε με την χρήση ξύλινων πωμάτων.



Πλαστικότυποι σκυροδέτησης. Κεντρική τοποθέτηση χάλυβα στον πλαστικότυπο. Διαμήκης τομή των πλαστικότυπων.



Ξύλινα πώματα

➤ **Βήμα Πέμπτο: Αφαίρεση πλαστικότυπων.**

Μετά την πήξη του σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε η αφαίρεση του πλαστικότυπου και τα δοκίμια, αφού εξετάστηκαν για τυχόν αστοχίες, τοποθετήθηκαν στη συντήρηση.



Τελικό προϊόν



Το μήκος των ράβδων είναι 56 cm.



Η χαλύβδινη ράβδος ισαπέχει από τα άκρα του κυλίνδρου διατηρώντας σταθερό το πάχος της επικάλυψης (10mm).

- **Βήμα Έκτο:** Τα άκρα του οπλισμού κερώθηκαν εκ νέου



- **Βήμα Έβδομο:** Κατεργασία των δοκιμίων με επικαλύψεις ή/και υδροφοβικούς εμποτισμούς με ψυχρά υλικά του εμπορίου.

4.2 Υλικά εμποτισμού και επικαλύψεων

❖ Υδροαπωθητικό Primer (αστάρι) με υδατικό διάλυμα σιλοξάνης (ποσοστό στερεών σιλοξάνης 15%)

➤ Γενικά Χαρακτηριστικά

Το γαλάκτωμα αυτό είναι ένα αστάρι που στηρίζεται σε ένα μίγμα σιλάνων και σιλοξάνων, χωρίς διαλύτες, και προορίζεται για υδροαπωθητική κατεργασία επιφανειών, οι οποίες στη συνέχεια επικαλύπτονται χρησιμοποιώντας άλλες επιστρώσεις. Το προϊόν διακρίνεται από εξαιρετικές ιδιότητες διείδυσης. Σταθεροποιεί αμμώδεις και ασβεστολιθικές επιφάνειες και μειώνει την απορροφητικότητα τους.

Ο όρος «υδροαπωθητική κατεργασία επιφανειών» αναφέρεται στην κατεργασία ορυκτών υποστρωμάτων, ιδιαίτερα της εμφανούς τοιχοποιίας και σκυροδέματος, με παράγοντες υδροφοβικού εμποτισμού.

Ο σκοπός της υδροαπωθητικής κατεργασίας επιφανειών είναι να προστατεύσει τις εκτεθειμένες επιφάνειες από την υγρασία και τη συνακόλουθη βλάβη, με την εφαρμογή ενός άχρωμου παράγοντα, που δεν δημιουργεί φιλμ στην επιφάνεια που επικαλύπτει και που αποτρέπει την τριχοειδή απορρόφηση του νερού και των επιθετικών ουσιών που βρίσκονται διαλυμένες εντός του.

Το προϊόν αυτό, μειώνει την τριχοειδή απορρόφηση της κατασκευής που στην οποία έχει εμποτιστεί, αλλά δεν φράζει τους πόρους ή τα τριχοειδή αγγεία. Υπάρχει, συνεπώς, ελάχιστη ή και μηδενική βλάβη στην «αναπνοή» των υλικών της κατασκευής.

Αντίθετα με τις επικαλύψεις που δημιουργούν φιλμ, επικαλύψεις δηλαδή που βασίζονται σε ακρυλικές, πολυουρεθανικές και εποξεικές ρητίνες, το υδροαπωθητικό αυτό γαλάκτωμα δεν κλείνει τους πόρους των κατασκευών. Μέσω του υδροφοβικού εμποτισμού δημιουργεί ένα πολύ λεπτό υδροαπωθητικό στρώμα στους πόρους των κατασκευών που επικαλύπτει.

Το γαλάκτωμα αυτό εξασφαλίζει:

- Δραστική μείωση της πρόσληψης νερού
- Διατήρηση της υψηλής διαπερατότητας υδρατμών
- Εκτενής διείδυση
- Επαρκή αντοχή σε αλκάλια
- Αντίσταση στην U-V ακτινοβολία
- Οι επιφάνειες δεν καθίστανται γυαλιστερές ή κολλώδεις και δεν κίτρινίζουν

- Συμβατότητα με το περιβάλλον

➤ Τεχνικά Χαρακτηριστικά

- ✓ **Κατάλληλοτητα επιφανειών:** Χρησιμοποιείται εξωτερικά και εσωτερικά σε ασβεστολιθικές, αμμώδεις και πολύ απορροφητικές επιφάνειες.
- ✓ **Τρόπος εφαρμογής:** βούρτσα, ρολό ή ψεκασμός
- ✓ **Προετοιμασία επιφάνειας:** Η επιφάνεια πριν να γίνει η εφαρμογή του γαλακτωματος πρέπει να είναι στεγνή και χωρίς προσμίξεις. Τα «χαλαρά» στρώματα πρέπει να απομακρύνονται.
- ✓ **Τρόπος επικάλυψης:** Το υλικό πρέπει να χρησιμοποιείται αδιάλυτο. Οι έντονα απορροφητικές επιφάνειες πρέπει να «περνιούνται» δύο φορές, ενώ η επιφάνεια είναι ακόμα υγρή.
- ✓ **Θερμοκρασία εφαρμογής:** Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και της επιφάνειας πρέπει να είναι άνω των +5 °C κατά τη διάρκεια της εφαρμογής και του στεγνώματος.
- ✓ **Κατανάλωση:** 1 λίτρο καλύπτει 4,0 – 5,0 m² επιφάνειας. Αυτό ισούται με περίπου 150-200 ml/m²σε κάθε «χέρι». Ακριβείς ποσότητες καθορίζονται μέσω δοκιμών.
- ✓ **Αποθήκευση:** Διάρκεια ζωής σε σφραγισμένα δοχεία, τουλάχιστον 12 μήνες σε σύνθηκες χωρίς παγετό.
- ✓ **Καθαρισμός εργαλείων:** Τα εργαλεία πρέπει να καθαρίζονται αμέσως μετά την χρήση με νερό.
- ✓ **Στέγνωμα:** Η επιφάνειανη στεγνώνει και μπορεί να επικαλυφθεί ξανά μετά από περίπου 8-10 ώρες σε θερμοκρασία 20 °C και σχετική υγρασία 65%.
- ✓ **Συμβατότητα:** Να μην αναμειγνυέται με άλλα προϊόντα.
- ✓ **Μορφή:** Υγρή
- ✓ **Χρώμα:** Ημιδιαφανές
- ✓ **Πυκνότητα:** 1 kg/L
- ✓ **Συγκέντρωση υδροφοβικού παράγοντα:** 15%

❖ Υδατοαπωθητικό Primer (αστάρι) με σιλοξάνη υψηλής συγκέντρωσης (ποσοστό στερεών 80%)

➤ Γενικά Χαρακτηριστικά

Το προϊόν αυτό είναι ένα υδατικό, χωρίς διαλύτες, κρεμώδες, υδατοαπωθητικό με βάση τις σιλάνες. Είναι ένα προϊόν υψηλής ποιότητας ειδικό για υδροφοβικό εμπότισμού άοπλου και οπλισμένου σκυροδέματος.

Το προϊόν αυτό χαρακτηρίζεται από:

- *Εξαιρετική διείσδυση*
- *Υψηλή αντίσταση σε αλκάλια*
- *Συμβατότητα με το περιβάλλον*
- *Χαμηλή μεταβλητότητα*
- *Είναι θιξοτροπικό και ως εκ τούτου μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς απώλεια υλικού*

Το σκυρόδεμα, το οποίο θα κατεργαστεί με αυτό το υλικό, θα έχει τις εξής μόνιμες ιδιότητες:

- Η απορρόφηση χλωριόντων και νερού στο σκυρόδεμα θα καθυστερήσει σημαντικά.
- Καμία απώλεια στην ικανότητα διαπνοής
- Βελτιωμένη ανθεκτικότητα σε κύκλους ψύξης απόψυξης και σε καταπόνηση λόγω αποπάγωσης αλάτων
- Ενισχυμένη αντοχή
- Προσδίδει καλή πρόσφυση για χρωματικές επικαλύψεις

Σε αντίθεση με άλλα υγρά υλικά υδροφοβικού εμπότισμού, το προϊόν αυτό μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα «χέρι» του απαιτούμενου πάχους. Οι σιλάνες διεισδύουν στο υπόστρωμα σε διάστημα από μισής ώρας έως αρκετών ωρών που εξαρτάται από την ποιότητα του σκυροδέματος. Αντιδρώντας με το υπόστρωμα, απελευθερώνει αιθανόλη και μετατρέπεται σε μια πολυμερική σιλικονική ρητίνη. Αρχικά δημιουργείται ένα κρεμώδες στρώμα, το οποίο εξαφανίζεται τελείως αργότερα. Μιας και περιέχει τον ίδιο υδροφοβικό παράγοντα με τα συμβατικά υλικά και αυτό δεν εμποδίζει την διαπνοή του σκυροδέματος, αφού δεν κλείνει τους πόρους και τα τριχοειδή αγγεία.

Το προϊόν είναι σχεδιασμένο ώστε να διεισδύει βαθιά στο σκυρόδεμα και να προσφέρει προστασία ενάντια στην απορρόφηση νερού, τους αέριους ρυπαντές και τους κύκλους ψύξης απόψυξης.

➤ **Τεχνικά Χαρακτηριστικά**

- ✓ **Κατάλληλες εφαρμογές:** Προτείνεται ειδικά για εμποτισμό και αστάρωμα άοπλου και οπλισμένου σκυροδέματος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή γεφυρών, δρόμων και κτηρίων. Κατα κανόνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί πάνω σε οποιοδήποτε αλκαλικό υπόστρωμα το οποίο προηγουμένως έχει κατεργαστεί με συμπυκνωμένους ή αδιάλυτους παράγοντες εμποτισμού, όπως οι αλκοξυσιλάνες
- ✓ **Προετοιμασία επιφάνειας:** Το σκυρόδεμα δεν πρέπει να εμποτίζεται τουλάχιστον για 4 εβδομάδες από την δημιουργία του. Νέες επιφάνειες που είναι ακόμα ακατέργαστες πρέπει να καθαριστούν από τα χοντρά σωματίδια και τη σκόνη με σκούπισμα ή εάν είναι απαραίτητο, με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα. Επιφάνειες ήδη κατεργασμένες, που περιέχουν πετρέλαια, κατάλοιπα από καουτσούκ κλπ πρέπει να καθαρίζονται με τη χρήση υπέρθερμου ατμού πριν από την κατεργασία με το προϊόν για να αποφευχθεί ο κορεσμός του σκυροδέματος. Η επιφάνεια πρέπει να είναι απολύτως στεγνή και να μετριέται η υγρασία της που δεν πρέπει να υπερβαίνει το 4% κβ.
- ✓ **Τρόπος επικάλυψης:** Το υλικό πρέπει να χρησιμοποιείται αδιάλυτο και να εφαρμόζεται με airless ψεκασμό και στο πάχος το οποίο επιθυμούμε. Για δύσκολα σημεία μπορεί να χρησιμοποιηθεί βούρτσα για δεύτερο χέρι.
- ✓ **Θερμοκρασία εφαρμογής:** Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και της επιφάνειας πρέπει να είναι άνω των +5 °C κατά τη διάρκεια της εφαρμογής και του στεγνώματος.
- ✓ **Κατανάλωση:** Μέχρι 400 g/m² μπορούν να εφαρμοστούν σε οριζόντιες ή κάθετες επιφάνειες χωρίς απώλεια προϊόντος.
- ✓ **Αποθήκευση:** Διάρκεια ζωής σε σφραγισμένα δοχεία, αναγράφεται επάνω τους.
- ✓ **Μορφή:** Υγρή
- ✓ **Χρώμα:** Λευκή ή κιτρινωπή κρέμα
- ✓ **Συγκέντρωση υδροφοβικού παράγοντα 80%**
- ✓ **Πυκνότητα:** περ. 0,9 g.cm³

❖ **Ακρυλικό γαλάκτωμα επιφανειακής προστασίας με κολλοειδή νανοδομημένο διοξείδιο του πυριτίου (ποσοστό στερεών 15%)**

➤ **Γενικά Χαρακτηριστικά**

Νανοδομημένο ακρυλικό γαλάκτωμα με βάση το νερό κατάλληλο για στεγάνωση οριζόντιων ή κάθετων ορυκτών υποστρωμάτων. Σταθεροποιεί αμμόδεις και ασβεστολιθικές επιφάνειες και μειώνει την απορροφητικότητα τους.

Το προϊόν δρά, αποτρέποντας την εμφάνιση τριχοειδών ρωγμών, την ανάπτυξη μυκήτων και μούχλας και την εμφάνιση αλάτων. Συμβάλλει στη διατήρηση της αισθητικής τελειότητας των επιφανειών χωρίς να προσθέτη γυαλάδα ή να επηρεάζει τη φυσική ομορφιά και την υφή τους. Προστατεύει τις επιφάνειες για μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ διευκολύνει τον τακτικό καθαρισμό τους από βροχή με λάσπη. Αποτρέπει την διείσδυση ατμοσφαιρικών ρύπων και αιθαλομίχλης στην επιφάνεια του πορώδους. Είναι άοσμο, και φιλικό προς το χρήστη και το περιβάλλον.

Χάρη στις ειδικές ιδιότητες των νανοσωματιδίων που περιλαμβάνονται στη σύνθεση του, το προϊόν προσκολλάται βαθιά μέσα στην επιφάνεια, χωρίς να εμποδίζει τη διαπνοή και ταυτόχρονα γεμίζει το πορώδες του υποστρώματος, δημιουργώντας μια ομαλή βάση για την τελική επικάλυψη.

Το νανοδομημένο αυτό γαλάκτωμα εξασφαλίζει:

- *Δραστική μείωση της πρόσληψης νερού*
- *Διατήρηση της υψηλής διαπερατότητας υδρατμών*
- *Πολύ καλή διείσδυση*
- *Επαρκή αντοχή σε αλκάλια*
- *Οι επιφάνειες δεν καθίστανται γυαλιστερές ή κολλώδεις και δεν κιτρινίζουν*
- *Εξαιρετική πρόσφυση και συνοχή*
- *Συμβατότητα με το περιβάλλον*

➤ **Τεχνικά Χαρακτηριστικά**

Θα πρέπει να αναδεύεται καλά και να εφαρμόζεται ομοιόμορφα επάνω στο υπόστρωμα με βούρτσα, ρολό ή ψεκασμό, μέχρι πλήρους εμποτισμού. Στις περισσότερες από τις επιφάνειες μια δεύτερη στρώση είναι απαραίτητη. Η δεύτερη στρώση εφαρμόζεται όταν η πρώτη στρώση έχει στεγνώσει τελείως.

- ✓ **Καταλληλότητα επιφανείων:** Χρησιμοποιείται εξωτερικά και εσωτερικά σε ασβεστολιθικές, αμμώδεις και πολύ απορροφητικές επιφάνειες.
- ✓ **Τρόπος εφαρμογής:** βούρτσα, ρολό ή ψεκασμός
- ✓ **Κατανάλωση:** 1 λίτρο καλύπτει 4,0 – 5,0 m² επιφάνειας. Αυτό ισούται με περίπου 150-200 ml/m²σε κάθε «χέρι». Ακριβείς ποσότητες καθορίζονται μέσω δοκιμών.
- ✓ **Αποθήκευση:** Διάρκεια ζωής σε σφραγισμένα δοχεία, τουλάχιστον 12 μήνες σε σύνθηκες χωρίς παγετό.
- ✓ **Καθαρισμός εργαλείων:** Τα εργαλεία πρέπει να καθαρίζονται αμέσως μετά την χρήση με νερό.
- ✓ **Θερμοκρασία εφαρμογής:** Η εφαρμογή πρέπει να γίνεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 5 °C και 30 °C.
- ✓ **Στέγνωμα:** Η επιφάνειανη στεγνώνει και μπορεί να επικαλυφθεί ξανά μετά από περίπου 8-10 ώρες σε θερμοκρασία 20 °C και σχετική υγρασία 65%. Μετά το στέγνωμα το γαλάκτωμα είναι άορατο και για αυτό θα πρέπει πάντα να γίνεται έλεγχος στις επιφάνειες για αλλαγή της όψης του χρώματος σε περίπτωση που δεν υπάρξει επιπλέον επικάλυψη.
- ✓ **Προετοιμασία επιφάνειας:** Η επιφάνεια πριν να γίνει η εφαρμογή του γαλακτωματος πρέπει να είναι στεγνή και καθαρή από σκόνη, γράσα, βρωμιά κλπ.
- ✓ **Μορφή:** Υγρή
- ✓ **Χρώμα:** Ημιδιαφανές
- ✓ **Πυκνότητα:** 1,00 kg/L
- ✓ **pH:** 8,5
- ✓ **Περιεκτικότητα σε VOC's :** (Directive 2004/42/EK) [Κατηγορία A/g: , τύπος Υ]: 40 gr/lit (2010) Το προϊόν όταν είναι έτοιμο προς χρήση περιέχει max 20gr/litVOC's.

❖ **Ανακλαστικό χρώμα-ελαστομερές (anticarbonation) προστασίας έναντι διεισδύσεων**

➤ **Γενικά Χαρακτηριστικά**

Το προϊόν αυτό είναι μια εξαιρετικής ποιότητας, με χαμηλές εκπομπές, διακοσμητική και προστατευτική επικάλυψη, με βάση την τεχνολογία των ψυχρών υλικών. Σχηματίζει μια εξαιρετικά υψηλή ανακλαστική επιφάνεια ματ που εμποδίζει την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και παραμένοντας ψύχρη, συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση ενέργειας για τις ανάγκες ψύξης. Η βελτιωμένη σύνθεση επικάλυψης του επιτρέπει την εφαρμογή της ακόμα και σε κατακόρυφες επιφάνειες όπου η βελτιστοποίηση της αντίστασης στην βρωμιά είναι κρίσιμη.

Διατηρεί την ελαστικότητά του, ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ -20°C έως 80°C , καλύπτει πλήρως όλα τα τριχοειδή αγγεία ή τις μικρές ρωγμές και αντέχει σε δύσκολες καιρικές συνθήκες, όπως βροχή, χιόνι, και έντονη ακτινοβολία UV. Αποτρέπει μούχλα και πράσινα σημεία. Πραγματοποιεί μια εξαιρετικής ποιότητας anti-carbonation επικάλυψη γεφύρωσης ρωγμών. Είναι κατάλληλο για την προστασία δομών από σκυρόδεμα σύμφωνα με το πρότυπο EN 1504 απαιτήσεις.

Ειδικά Χαρακτηριστικά:

- *Μειώνει τη θερμοκρασία του κελύφους του κτηρίου*
- *Βελτιώνει τις θερμοκρασιακές συνθήκες*
- *Αντιμετωπίζει το φαινόμενο του θερμοκηπίου*
- *Εξοικονόμηση ενέργειας από ψύξη*
- *Συμβάλλει στη μείωση της ρύπανσης του αέρα.*
- *Συμβάλλει στον περιορισμό του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας.*

➤ Τεχνικά Χαρακτηριστικά

- ✓ **Καταλληλότητα επιφανείων:** Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε νέο ή παλιό ορυκτό υπόστρωμα, σε κεραμικές επιφάνειες και σε σκυρόδεμα.
- ✓ **Τρόπος εφαρμογής:** βούρτσα, ρολό ή ψεκασμός
- ✓ **Θερμοκρασία εφαρμογής:** Πάνω από 5°C .
- ✓ **Κατανάλωση:** 1 λίτρο καλύπτει 3 m^2 επιφάνειας για το καλύτερο αποτέλεσμα
- ✓ **Αποθήκευση:** 6 μήνες σε κατάλληλες συνθήκες
- ✓ **Καθαρισμός εργαλείων:** Τα εργαλεία πρέπει να καθαρίζονται αμέσως μετά την χρήση με νερό.
- ✓ **Στέγνωμα:** Η επιφάνεια στεγνώνει σε 6 ώρες το καλοκαίρι και μπορεί να επικαλυφθεί ξανά μετά από περίπου 24 ώρες. Ο χρόνος στεγνώματος εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες .
- ✓ **Προετοιμασία επιφάνειας:** Η επιφάνεια πρέπει να είναι στεγνή και καθαρή από σκόνη, γράσα, βρωμιά και οτιδήποτε άλλο εμποδίζει την πρόσφυση της βαφής.
- ✓ **Γενικά:** Η εφαρμογή πρέπει να γίνεται σε 6-8 mm πάχος και να επιτυγχάνεται σε 2-3 χέρια.
- ✓ **Μορφή:** Υγρή

- ✓ **Χρώμα:** Κλασικό λευκό και άλλα χρώματα ανοιχτών σκιάσεων.
- ✓ **Περιεκτικότητα σε VOC's :** (Directive 2004/42/EK) [Κατηγορία A/g: , τύπος Υ]: 40 gr/lit (2010) Το προϊόν όταν είναι έτοιμο προς χρήση περιέχει max 38 gr/litVOC's.

❖ **Ανόργανο φωτοκαταλυτικό χρώμα υψηλής διαπνοής**

➤ **Γενικά Χαρακτηριστικά**

Το προϊόν αυτό είναι μια φωτοκαταλυτική βαφή που βασίζεται σε συνδετικά με βάση το νερό και χρήση ψυχρών υλικών.

Η βαφή αυτή επιδεικνύει μια διπλή συνεχή δράση: Όταν εφαρμόζεται τακτικά σε εξωτερικούς τοίχους, μετατρέπει τη ρύπανση του αέρα σε αβλαβή υπολείμματα και ταυτόχρονα εκτελεί ένα ανακλαστικό φράγμα, το οποίο επιτρέπει τον περιορισμό της χρήσης της ενέργειας για την ψύξη.

Ως εσωτερική επικάλυψη εμποδίζει το σχηματισμό αποικιών βακτηρίων σε τοίχους και ταυτόχρονα λειτουργεί ως «καθαριστικό» του αέρα. Είναι μια απλή λύση που προσφέρει βελτίωση της ποιότητας του αέρα και των συνθηκών θερμικής άνεσης. Είναι κατάλληλη για κάθε είδους ορυκτή επιφάνεια. Περιορισμένη περιεκτικότητα σε VOC's, χωρίς συντηρητικά ή βαρέα μέταλλα.

Χαρακτηριστικά:

- *Μειώνει τη θερμοκρασία του κελύφους του κτηρίου*
- *Βελτιώνει τις θερμοκρασιακές συνθήκες*
- *Εξοικονόμηση ενέργειας από ψύξη*
- *Συμβάλλει στη μείωση της ρύπανσης του αέρα.*
- *Συμβάλλει στον περιορισμό του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας.*
- *Βελτιώνει την ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους.*
- *Βοηθά στη διατήρηση της αισθητικής επιλογή των εξωτερικών τοίχων.*

➤ **Τεχνικά Χαρακτηριστικά**

- ✓ **Καταλληλότητα επιφανειών:** Η επιφάνεια πρέπει να είναι σταθερή, καθαρή και ελεύθερη από οτιδήποτε μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στην πρόσφυση του χρώματος.
- ✓ **Τρόπος εφαρμογής:** βούρτσα, ρολό ή ψεκασμός
- ✓ **Κατανάλωση:** 250 ml/m², ανάλογα την επιφάνεια. Ακριβείς ποσότητες καθορίζονται μέσω δοκιμών.
- ✓ **Καθαρισμός εργαλείων:** Τα εργαλεία πρέπει να καθαρίζονται αμέσως μετά την χρήση με νερό.
- ✓ **Θερμοκρασία εφαρμογής:** Η εφαρμογή πρέπει να γίνεται σε θερμοκρασίες άνω των 5 °C .
- ✓ **Στέγνωμα:** Η επιφάνεια στεγνώνει μετά από 2-3 ώρες και μπορεί να επικαλυφθεί ξανά μετά από περίπου 12 ώρες σε θερμοκρασία 20 °C και σχετική υγρασία 65%. Στεγνώνει πλήρως σε 5-7 μέρες
- ✓ **Μορφή:** Υγρή
- ✓ **Περιεκτικότητα σε VOC's :** (Directive 2004/42/EK) [Κατηγορία A/g: , τύπος Υ]: 40 gr/lit (2010) Το προϊόν όταν είναι έτοιμο προς χρήση περιέχει max 25gr/litVOC's.

Κεφάλαιο 5: Τεχνικές

5.1 Υδροφοβικός εμποτισμός και επικαλύψεις των δοκιμίων.

Μετά την δημιουργία των δοκιμίων τα δοκίμια καλύφθηκαν με τα ακόλουθα συστήματα επικαλύψεων και υδροφοβικού εμποτισμού. Για την δημιουργία των συστημάτων αυτών έγινε χρήση των προϊόντων που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.2. Όλες οι επικαλύψεις και οι εμποτισμοί έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο **ΕΛΟΤ EN-1504 02** και ενσωματώθηκαν στα δοκίμια με την μέθοδο brushing (με βούρτσα).



ΕΙΚ 5.1 ΟΛΑ ΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ

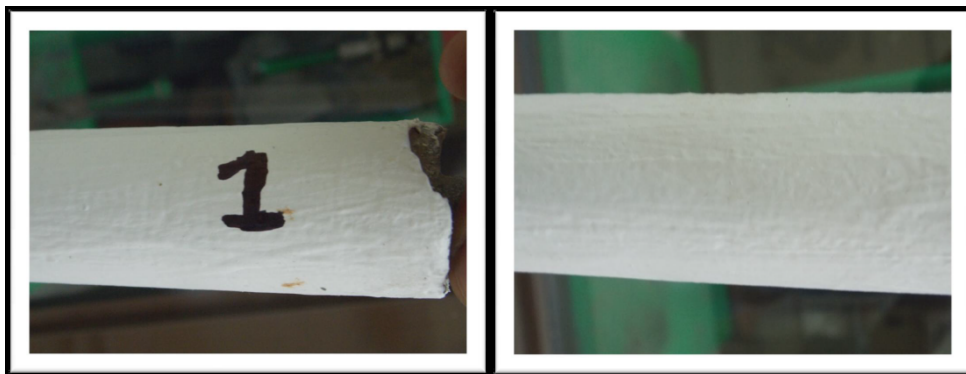
❖ Δοκίμιο [1]

Για το **δοκίμιο [1]** δημιουργήθηκε ένα προστατευτικό σύστημα επικάλυψης για την δημιουργία του οποίου έγιναν οι παρακάτω ενέργειες:

- **Πρώτη Στρώση: Υδροφοβικός εμποτισμός** με το Primer υδατικού διαλύματος σιλοξάνης (ποσοστό στερεών σιλοξάνης 15%)
 - Κατανάλωση: $0,125 \text{ L/m}^2$

- **Δεύτερη στρώση: Εμποτισμός** με το ακρυλικό γαλάκτωμα επιφανειακής προστασίας με κολλοειδή νανοδομημένο διοξείδιο του πυριτίου (ποσοστό στερεών 15%)
 - Κατανάλωση: $0,125 \text{ L/m}^2$

- **Τρίτη Στρώση : Επικάλυψη** με ανακλαστικό χρώμα- ελαστομερές (anticarbonation) προστασίας έναντι διεισδύσεων.
 - Κατανάλωση: $0,330 \text{ L/m}^2$
 - Πάχος στεγνού φιλμ 250 μικρά.



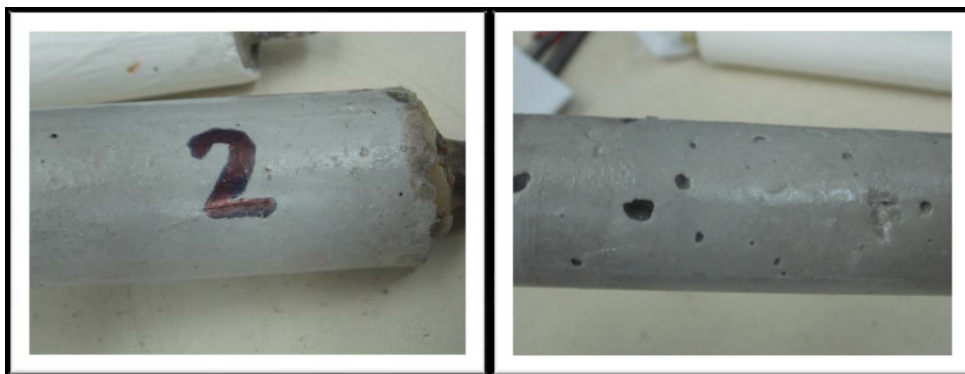
ΕΙΚ. 5.2 ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ [1] ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ

❖ **Δοκίμιο [2]**

Για το **δοκίμιο [2]** δημιουργήθηκε ένα προστατευτικό σύστημα επικάλυψης για την δημιουργία του οποίου έγιναν οι παρακάτω ενέργειες:

- *Πρώτη στρώση: Εμποτισμός* με το ακρυλικό γαλάκτωμα επιφανειακής προστασίας με κolloειδή νανοδομημένο διοξείδιο του πυριτίου (ποσοστό στερεών 15%)

○ Κατανάλωση: $0,250 \text{ L/m}^2$



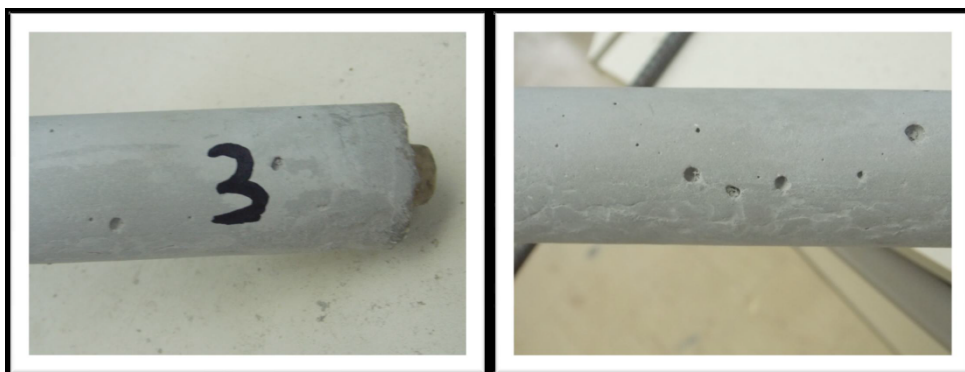
ΕΙΚ. 5.3 ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ [2] ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ

❖ **Δοκίμιο [3]**

Για το **δοκίμιο [3]** δημιουργήθηκε ένα προστατευτικό σύστημα επικάλυψης για την δημιουργία του οποίου έγιναν οι παρακάτω ενέργειες:

- *Πρώτη Στρώση: Υδροφοβικός εμποτισμός* με το Primer με σιλοξάνη υψηλής συγκέντρωσης (ποσοστό στερεών 80%).

○ Κατανάλωση: $0,200 \text{ L/m}^2$

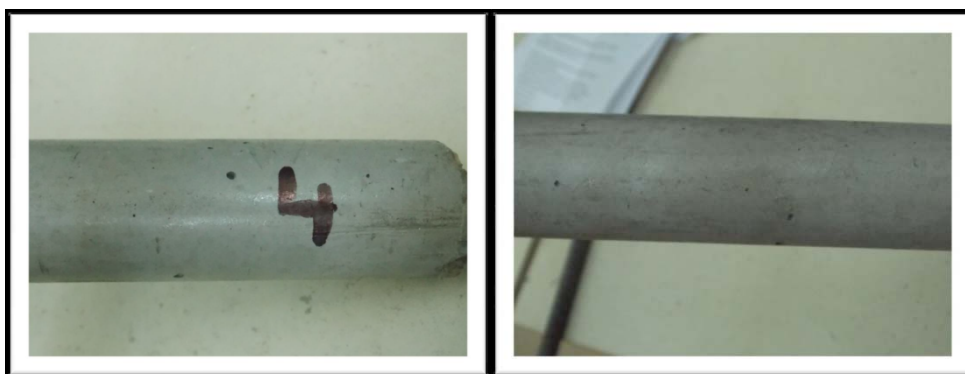


ΕΙΚ. 5.4 ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ [3] ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ

❖ **Δοκίμιο [4]**

Για το **δοκίμιο [4]** δημιουργήθηκε ένα προστατευτικό σύστημα επικάλυψης για την δημιουργία του οποίου έγιναν οι παρακάτω ενέργειες:

- **Πρώτη Στρώση: Υδροφοβικός εμποτισμός** με το Primer υδατικού διαλύματος σιλοξάνης (ποσοστό στερεών σιλοξάνης 15%)
 - Κατανάλωση: 0,250 L/m²



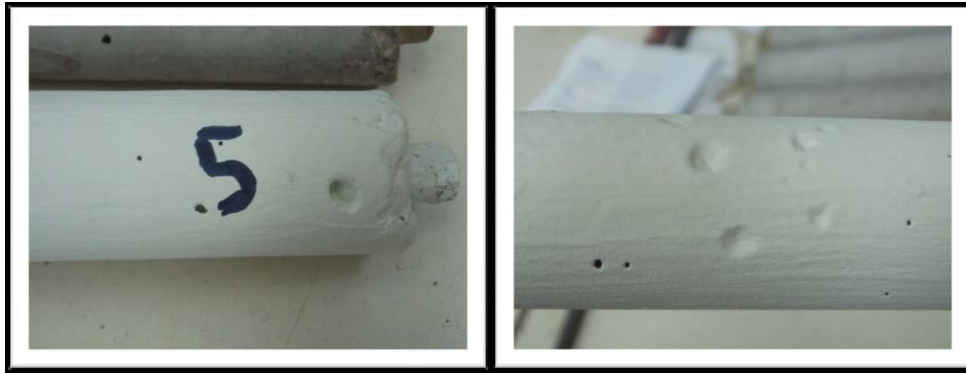
ΕΙΚ. 5.5 ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ [4] ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ

❖ **Δοκίμιο [5]**

Για το **δοκίμιο [5]** δημιουργήθηκε ένα προστατευτικό σύστημα επικάλυψης για την δημιουργία του οποίου έγιναν οι παρακάτω ενέργειες:

- **Πρώτη Στρώση: Υδροφοβικός εμποτισμός** με το Primer υδατικού διαλύματος σιλοξάνης (ποσοστό στερεών σιλοξάνης 15%)
 - Κατανάλωση: 0,250 L/m²

- **Δεύτερη στρώση: Επιφανειακή προστασία** με ανόργανο φωτοκαταλυτικό χρώμα υψηλής διαπνοής
 - Κατανάλωση: 0,250 L/m²
 - Πάχος ξηρού φιλμ 90 μικρά



ΕΙΚ. 5.6 ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ [5] ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ

❖ **Δοκίμιο [6]**

Για το **δοκίμιο [6]** δημιουργήθηκε ένα προστατευτικό σύστημα επικάλυψης για την δημιουργία του οποίου έγιναν οι παρακάτω ενέργειες:

- **Πρώτη Στρώση: Υδροφοβικός εμποτισμός** με το Primer με σιλοξάνη υψηλής συγκέντρωσης (ποσοστό στερεών 80%).
 - Κατανάλωση: $0,200 \text{ L/m}^2$

- **Δεύτερη στρώση: Επιφανειακή προστασία** με ανόργανο φωτοκαταλυτικό χρώμα υψηλής διαπνοής
 - Κατανάλωση: $0,250 \text{ L/m}^2$
 - Πάχος ξηρού φιλμ 90 μικρά



ΕΙΚ. 5.7 ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ [6] ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ

❖ Δοκίμιο [7]

Για το **δοκίμιο [7]** δημιουργήθηκε ένα προστατευτικό σύστημα επικάλυψης για την δημιουργία του οποίου έγιναν οι παρακάτω ενέργειες:

- **Πρώτη στρώση: Εμποτισμός** με το ακρυλικό γαλάκτωμα επιφανειακής προστασίας με κολλοειδή νανοδομημένο διοξείδιο του πυριτίου (ποσοστό στερεών 15%)
 - Κατανάλωση: $0,250 \text{ L/m}^2$
- **Δεύτερη στρώση: Επιφανειακή προστασία** με ανόργανο φωτοκαταλυτικό χρώμα υψηλής διαπνοής
 - Κατανάλωση: $0,330 \text{ L/m}^2$
 - Πάχος ξηρού φιλμ 250 μικρά



ΕΙΚ. 5.8 ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ [7] ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ

❖ **Δοκίμιο [8] και Δοκίμιο [9]**

Τα δοκίμια 8 και 9 δεν τα επικαλύψαμε για να τα χρησιμοποιήσουμε ως δοκίμια αναφοράς (reference).



ΕΙΚ. 5.9 ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ [8]



ΕΙΚ. 5.10 ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ [9]

5.2 Θάλαμος επιταχυνόμενης διάβρωσης (αλατονέφωση)

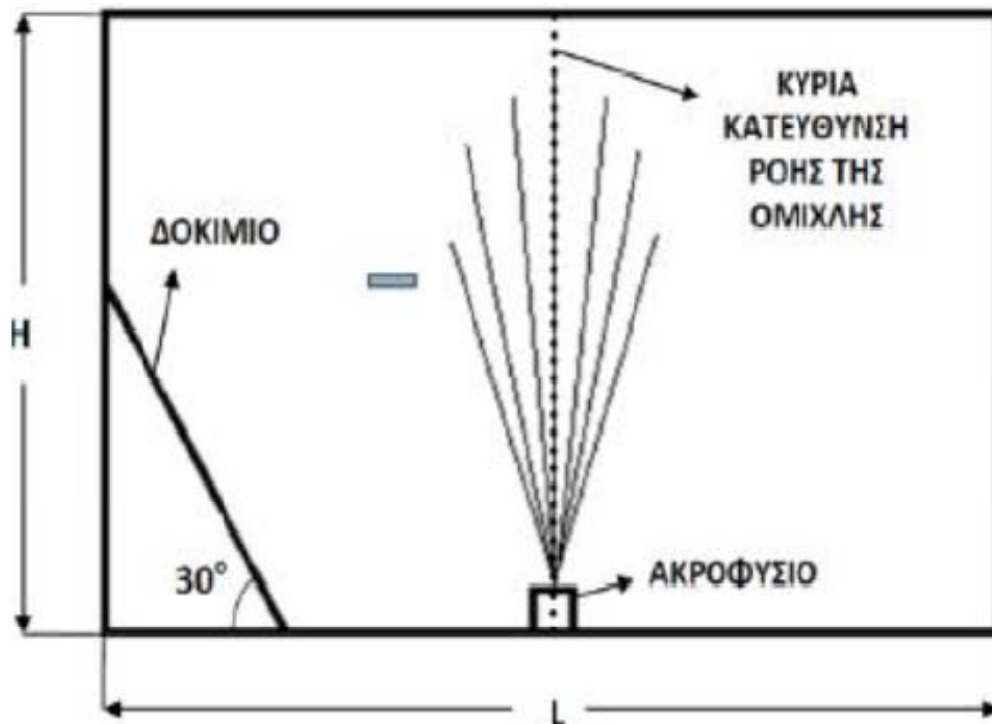
Η αλατονέφωση είναι μία συσκευή η οποία βοηθά στην τεχνητή διάβρωση δοκιμίων, μέσω νέφους αλατόνευρου. Αποτελείται από δύο θαλάμους, από τους οποίους ο πρώτος είναι όγκου 100 λίτρων, στον οποίο τοποθετείται το μίγμα αλατόνευρου το οποίο ψεκάζεται στον δεύτερο θάλαμο, όπου και βρίσκονται τα προς διάβρωση δοκίμια. Στο θάλαμο αυτό δημιουργείται τεχνητά, μέσω θέρμανσης και ψεκασμού, ένα νέφος από διάλυμα χλωριούχου νατρίου (NaCl) με περιεκτικότητα 5% κατά μάζα σε αποσταγμένο νερό. Η παραγωγή του νέφους γίνεται με βαλβίδες ψεκασμού σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση (10-25 psi). Το pH του παραγόμενου νέφους μετά την υγροποίηση του και σε θερμοκρασία 25°C πρέπει να έχει τιμές από 6,5-7,2 και ρυθμίζεται με μικρές ποσότητες νιτρικού οξέος.

Η συσκευή της αλατονέφωσης έχει δύο λειτουργίες. Στη μία πραγματοποιείται ψεκασμός του αλατόνευρου με τον τρόπο τον οποίο περιγράφηκε παραπάνω. Στη δεύτερη λειτουργία πραγματοποιείται ψεκασμός μόνο με ξηρό αέρα περιβάλλοντος, σε θερμοκρασία 49°C. Σκοπός αυτής της λειτουργίας είναι να στεγνώνονται οι διαβρωτικοί παράγοντες από την επιφάνεια των δοκιμίων έτσι ώστε το επόμενο μίγμα να έχει ισχυρότερη δράση. Οι δύο λειτουργίες αυτές (υγρή και στεγνή) εναλλάσσονται μεταξύ τους κάθε 1,5 ώρα.

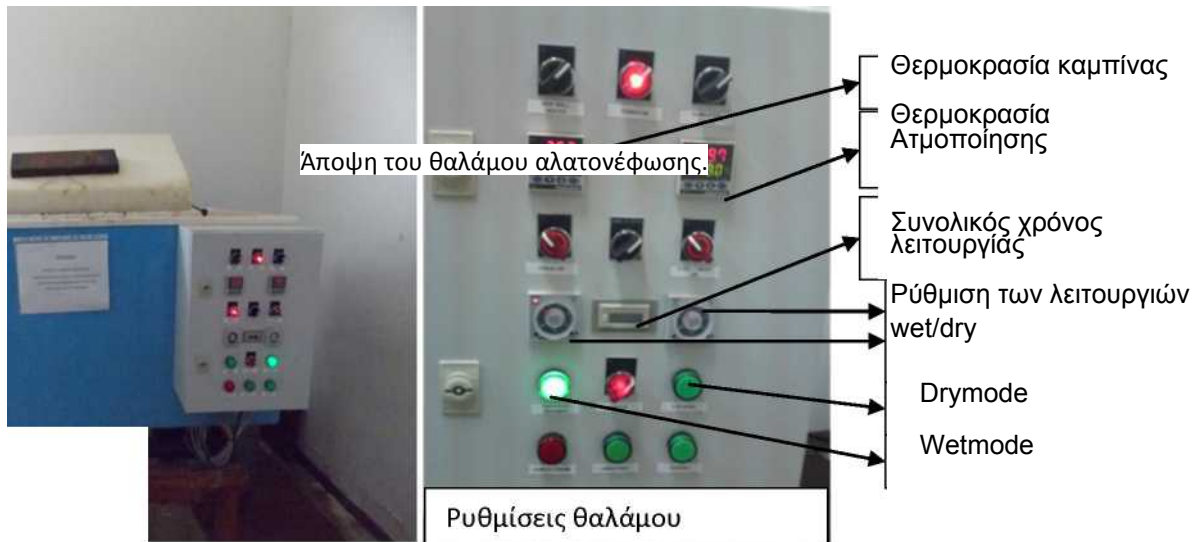
Όλες οι διαδικασίες επιταχυνόμενης διάβρωσης πραγματοποιήθηκαν με βάση την προδιαγραφή B117 της ASTM. Σύμφωνα με την προδιαγραφή, τα υπό εξέταση δοκίμια τοποθετούνται σε θάλαμο του οποίου η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή στους $35 \pm 1,1-1,7^{\circ}\text{C}$, υπό γωνία κλίσης 30° ως προς το οριζόντιο επίπεδο, επιτρέποντας στο νέφος να επιδράσει ομοιόμορφα και ελεύθερα στην επιφάνεια τους.



ΕΙΚ. 5.11 ΣΥΣΚΕΥΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (ΑΛΑΤΟΝΕΦΩΣΗ), ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΔΙΑΚΡΙΝΟΥΜΕ ΤΟ ΔΟΧΕΙΟ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΑΛΑΤΟΝΕΡΟΥ(ΑΣΠΡΟ ΔΟΧΕΙΟ), ΣΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΦΑΙΝΕΤΑΙ Ο ΚΑΔΟΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (ΓΑΛΑΖΙΟΣ ΚΑΔΟΣ) ΚΑΙ ΔΕΞΙΑ Ο ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ.



ΕΙΚ 5.12 ΤΡΟΠΟΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΤΟ ΘΑΛΑΜΟ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΝΕΦΩΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ ASTM B117



ΕΙΚ 5.13 CONTROL PANEL ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΑΛΑΤΟΝΕΦΩΣΗΣ

Στο χρονικό διάστημα των 1000 ωρών τα δοκίμια βρίσκονταν, κάτω από ημερήσια παρακολούθηση (καθημερινή περιστροφή γύρω από τον άξονα τους κατά 90 μοίρες).



Μετά το πέρας της συγκεκριμένης διαδικασίας, θα ακολουθήσει ελεγχόμενη αποσκυροδέτηση των δοκιμίων χάλυβα , αξιολόγησή του και κατ' επέκταση αξιολόγηση των διαφορετικών επικαλύψεων προστασίας.

5.3 Ελεγχόμενη αποσκυροδέτηση

Για την αξιολόγηση της προστασίας των οπλισμών των δοκιμίων από την διάβρωση μέσω των συστημάτων επικαλύψεων που χρησιμοποιήσαμε ήταν αναγκαία η αποσκυροδέτηση των δοκιμίων για την διεξαγωγή των μετρήσεων.

Παρακάτω παρουσιάζονται χαρακτηριστικές λήψεις από την αποσκυροδέτηση των δοκιμίων [1] και [9] όπου φαίνεται ξεκάθαρα η προστασία που είχε το δοκίμιο [1] εναντίον της διάβρωσης σε σύγκριση με το δοκίμιο [9] που δεν είχε επικαλυφθεί.

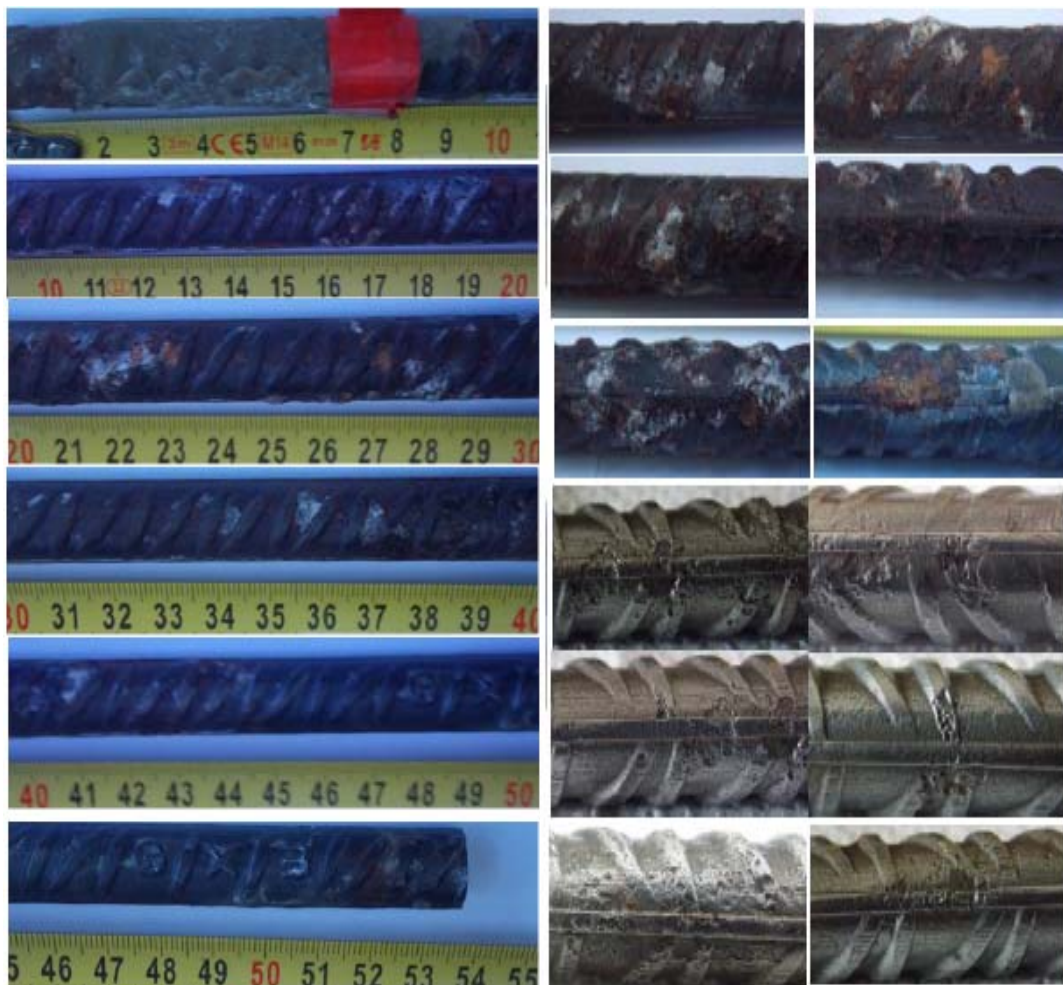


ΕΙΚ 5.14 ΔΟΚΙΜΙΟ [1] ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ



ΕΙΚ 5.15 ΔΟΚΙΜΙΟ [9] ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ

Μετά την αποσκυροδέτηση τα δοκίμια χωρίς επικάλυψη [8] και [9] φωτογραφήθηκαν κατά μήκος και πραγματοποιήθηκε η καταγραφή της βλάβης τους πριν και μετά τον καθαρισμό.



ΕΙΚ 5.16 ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ

Κεφάλαιο 6: Μέθοδοι Μετρήσεων

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τις μεθόδους μέτρησης που εφαρμόστηκαν για την ποσοτική εκτίμηση της συμπεριφοράς ως προς τη διάβρωση των οπλισμών των δοκιμίων οπλισμένου σκυροδέματος.

6.1 Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης

Το δυναμικό διάβρωσης E_{corr} ή δυναμικό ανοικτού κυκλώματος είναι το δυναμικό που αποκτά αυθόρμητα ένα μέταλλο όταν εκτεθεί στο περιβάλλον, μετράται ως προς ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς ενώ παράλληλα είναι απαραίτητη η απουσία ρεύματος διότι σε αντίθετη περίπτωση θα έδινε μια επιπλέον διαφορά δυναμικού η οποία θα προστίθετο στη μετρούμενη τιμή [52].

Η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση που βρίσκεται ο οπλισμός μέσα στο σκυρόδεμα. Έτσι, μετατόπιση του δυναμικού προς ηλεκτροθετικές τιμές σημαίνει ότι ο χάλυβας προστατεύεται και δείχνει προδιάθεση μειωμένης διάβρωσης ενώ η μετατόπιση του δυναμικού διάβρωσης προς πιο ηλεκτραρνητικές τιμές δηλώνει προδιάθεση αυξημένης διάβρωσης δηλαδή ότι ο χάλυβας βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει την κατάσταση του οπλισμού σε σχέση με το δυναμικό διάβρωσης σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C876/87**.

Πιν. [6.1] ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΙΔΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Ηλεκτρόδιο Cu/CuSO ₄	Ag/AgCl C _{KCl} =4M	Πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου	Ηλεκτρόδιο καλομέλανα (SCE)	Πιθανότητα διάβρωσης
> -200 mV	> -106 mV	> +116 mV	> -126 mV	Χαμηλή (10% πιθανότητα διάβρωσης)
-200 ως -350 mV	-106 ως -256 mV	+116 mV ως -34mV	-126 mV ως -276 mV	Ενδιάμεση πιθανότητα διάβρωσης
< -350 mV	< -256 mV	< -34 mV	< -276 mV	Υψηλή (<90% πιθανότητα διάβρωσης)
< -500 mV	< -406 mV	< -184 mV	< -426 mV	Έντονη διάβρωση

Η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός βολτόμετρου και ενός ηλεκτροδίου αναφοράς SCE (καλομέλανας). Το ηλεκτρόδιο αναφοράς συνδέεται με ψηφιακό πολύμετρο υψηλής εσωτερικής αντίστασης του οποίου ο θετικός πόλος συνδέεται με τον σπλισμό. η καλή ηλεκτρολυτική επαφή του ηλεκτροδίου αναφοράς με το σκυρόδεμα επιτυγχάνεται με ένα βρεγμένο σπόγγο ο οποίος μπαίνει στη διεπιφάνεια μεταξύ του σκυροδέματος και του ηλεκτροδίου αναφοράς. και βυθιζόταν μέσα στο διάλυμα που βρισκόταν ο χάλυβας ενώ στον αρνητικό πόλο συνδεόταν ο σπλισμός μέσω ειδικού καλωδίου. Μετρώντας και καταγράφοντας το δυναμικό σε όλη την κατασκευή δημιουργούνται οι χάρτες δυναμικών των ενεργών και παθητικών περιοχών στην κατασκευή. [52]

6.2 Μέτρηση Απώλειας Μάζας

Η μέτρηση της απώλειας μάζας των δοκιμίων γίνεται σύμφωνα με τον **Κ.Τ.Χ. 2008 κεφάλαιο 10.3** και ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία :

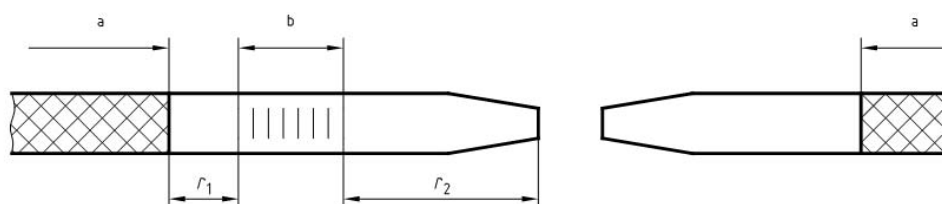
- Μέτρηση αρχικής μάζας των μη διαβρωμένων ράβδων χάλυβα με ζυγαριά ακριβείας $\pm 0,01\text{gr}$.
- Καθαρισμός ράβδων χάλυβα με συρματόβουρτσα για να φύγει μεγάλο ποσοστό της σκουριάς μετά την εξαγωγή των δοκιμίων από το θάλαμο της αλατονέφωσης.
- Παρασκευή διαλύματος περιεκτικότητας 12% υδροχλωρικού οξέως και 0,35% εξαμεθυλενοτετραμίνης (ουροτροπίνης)
- Εισαγωγή των ράβδων χάλυβα στο παραπάνω διάλυμα και ζύγισμα τους κάθε 30 λεπτά έως ότου η διαφορά μάζας μεταξύ δύο διαδοχικών ζυγισμάτων να είναι αμελητέα.
- Ξέπλυμα των ράβδων και καθαρισμός με συρματόβουρτσα.
- Ζύγισμα ράβδων χάλυβα για εύρεση τελικής μάζας

Υπολογισμός ποσοστιαίας απώλειας μάζας που δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta M = \frac{\text{Αρχική μάζα} - \text{Τελική μάζα}}{\text{Αρχική μάζα}} \cdot 100$$

6.3 Μηχανικές προδιαγραφές εφελκυσμού.

Οι μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιούνται σύμφωνα με την προδιαγραφή ISO 15630-1. Πιο συγκεκριμένα, η εν λόγω προδιαγραφή ορίζει ότι πρέπει να είναι δυνατή η μέτρηση της ομοιόμορφης παραμόρφωσης σε ένα μήκος αναφοράς $b=100\text{mm}$ και σε απόσταση $r_2=50\text{mm}$ από το σημείο αστοχίας και σε $r_1=20\text{mm}$ από τις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού. Έτσι ένα ελάχιστο μήκος των δοκιμών ορίστηκε στα 460mm . Σύμφωνα με την προδιαγραφή, τα δοκίμια δεν πρέπει να έχουν υποστεί καμία μηχανουργική διεργασία πριν τη δοκιμή του εφελκυσμού. Επιπλέον τα δοκίμια πριν τον εφελκυσμό έχουν μαρκαριστεί ανά 5mm με σκοπό τη μέτρηση της παραμόρφωσης (manually) με τη χρήση ενός παχυμέτρου.



- a Grip length
- b Gauge length 100 mm

Διάσταση δοκιμών εφελκυσμου σύμφωνα με ISO 15630-1.

Για τις δοκιμές εφελκυσμού χρησιμοποιείται μια σερβουδραυλική μηχανή **MTS-100kN**. Η μηχανή έχει δυνατότητα εξάσκησης δύναμης έως 250 kN . Τα πειράματα διεξάγονται σε θερμοκρασία δωματίου 24°C .



Μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα εφελκυσμού

Τα βήματα που ακολουθούνται για την πραγματοποίηση του πειράματος είναι τα εξής :

1. Τοποθετούνται οι κατάλληλες σφήνες στις αρπάγες της μηχανής. Ρυθμίζεται η θέση της πάνω αρπάγης, η οποία κατά τη διάρκεια του πειράματος παραμένει σταθερή και η θέση της κάτω αρπάγης ώστε να τοποθετηθεί το δοκίμιο.
2. Τοποθετείται το δοκίμιο στις αρπάγες και έπειτα το επιμηκυνσιόμετρο μήκους αναφοράς 50mm πάνω στο δοκίμιο προκειμένου να παρθεί ακριβέστερη μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας
3. Γίνεται ο προγραμματισμός του πειράματος μέσω του υπολογιστή. Στο πρόγραμμα ρυθμίζονται οι παράμετροι της δοκιμής. Αυτές είναι :
 - ο ρυθμός μετατόπισης της αρπάγης , ο οποίος είναι 2mm/min
 - η ονομασία του αρχείου καταγραφής
 - ο ρυθμός με τον οποίο καταγράφονται οι μετρήσεις

Κατά τη διάρκεια του εφελκυσμού

- ❖ καταγράφονται τα εξής μεγέθη :

- ο χρόνος
- η θέση της κάτω αρπάγης
- η ορθή παραμόρφωση
- η δύναμη
- ❖ πραγματοποιείται θραύση του δοκιμίου
- ❖ σύμφωνα με την προδιαγραφή ISO 15630-1 το σημείο της θραύσης πρέπει να απέχει από τις σφήνες της κάθε αρπάγης τουλάχιστον 20mm, αλλιώς η δοκιμή θεωρείται άκυρη
- ❖ Απαγκίστρωση του δοκιμίου από τις αρπάγες μετά τη θραύση του και τοποθέτηση του σε ειδικό αποθηκευτικό χώρο

Η πειραματική διαδικασία του εφελκυσμού ολοκληρώνεται με την επεξεργασία των δεδομένων της μηχανής μέσω του προγράμματος επεξεργασίας δεδομένων ORIGIN-LAB. Με αυτό το πρόγραμμα βρίσκουμε για τα δοκίμια το όριο διαρροής R_p και το όριο θραύσης R_m και την ειδική ενέργεια παραμόρφωσης U_d

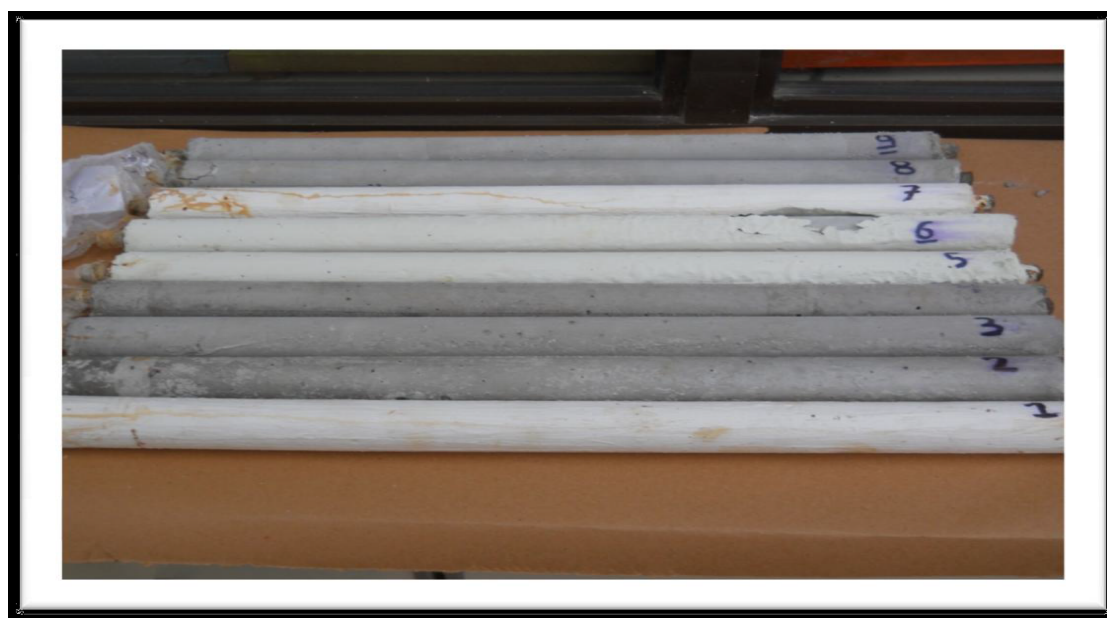
Επιπλέον με ένα ψηφιακό παχύμετρο μετράται η παραμόρφωση θραύσης A_g του δοκιμίου μετά τον εφελκυσμό.

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα της Πειραματικής Διαδικασίας και Παρατηρήσεις

7.1 Οπτικός έλεγχος δοκιμίων

Κατά τη διάρκεια της αλατονέφωσης υπήρξε συνεχής οπτικός έλεγχος των δοκιμίων μας. Στις 24 μέρες (580 ώρες περ.), στις 37 μέρες (890 ώρες περ.) και στις 1000 ώρες (τέλος αλατονέφωσης) τα δοκίμια εξήλθαν από τον θάλαμο επιταχυνόμενης διάβρωσης, ώστε να εξεταστούν ενδελεχώς και να φωτογραφηθούν. Μετά τις 37 ημέρες τα δοκίμια 2,5 και 6 αφαιρέθηκαν από τον θάλαμο αλατονέφωσης, εξαιτίας της οφθαλμοφανούς φθοράς που είχαν υποστεί οι επικαλύψεις τους.

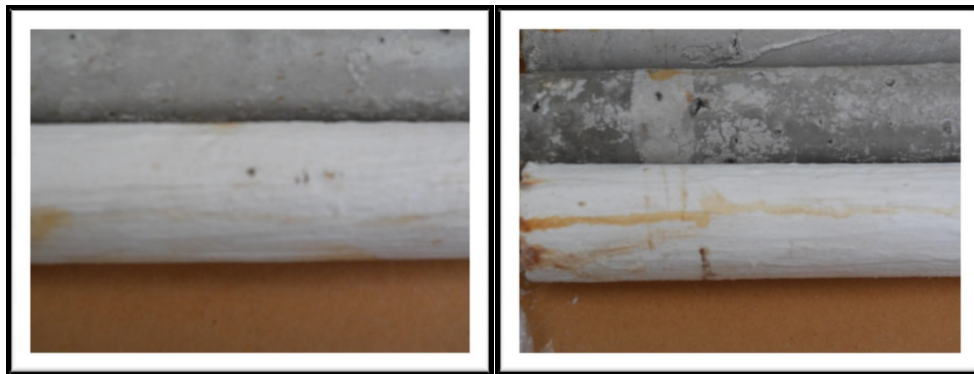
➤ Απόψεις των δοκιμίων στις 24 μέρες εντός του θαλάμου.



Όλα τα δοκίμια παρατεταγμένα μετά από έκθεση 24 ημερών σε περιβάλλον αλατονέφωσης.

❖ **Δοκίμιο [1]:** [Σύστημα επικάλυψης με υδροφοβικό εμπότισμό υδατικού διαλύματος σιλοξάνης (ποσοστό στερεών σιλοξάνης 15%), ακρυλικό γαλάκτωμα επιφανειακής προστασίας με κolloειδή νανοδομημένο διοξειδίο

του πυριτίου (ποσοστό στερεών 15%) και ανακλαστικό χρώμα-ελαστομερές (anticarbonation) προστασίας έναντι διεσόδσεων , πάχους στεγνού φιλμ 250 μικρά.]



❖ **Δοκίμιο [2]:** [Ακρυλικό γαλάκτωμα επιφανειακής προστασίας με κολλοειδή νανοδομημένο διοξείδιο του πυριτίου (ποσοστό στερεών 15%)]



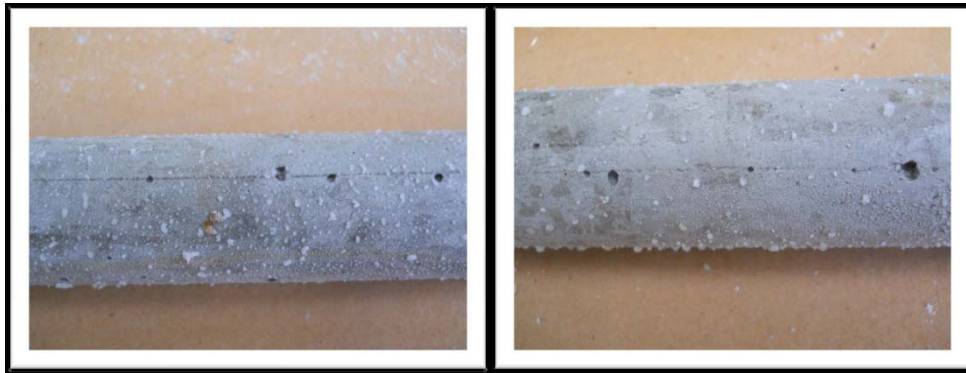


✓ **Παρατήρηση.** Όπως μπορεί να διακριθεί από τις παραπάνω φωτογραφίες, το δοκίμιο 2 έχει αρχίσει να παρουσιάζει «τοπικά φουσκώματα» στην επικάλυψη του. Δεν παρατηρείται αποκόλληση της επικάλυψης.

❖ **Δοκίμιο [3]:** [Υδροφοβικός εμποτισμός με σιλοξάνη υψηλής συγκέντρωσης –(ποσοστό στερεών 80%)]



- ❖ **Δοκίμιο [4]:** [Υδροφοβικός εμποτισμός με υδατικό διάλυμα σιλοξάνης (ποσοστό στερεών σιλοξάνης 15%)]



- ❖ **Δοκίμιο [5]:** [Σύστημα επικάλυψης με υδροφοβικός εμποτισμό με υδατικό διάλυμα σιλοξάνης (ποσοστό στερεών σιλοξάνης 15%) και επιφανειακή προστασία με ανόργανο φωτοκαταλυτικό χρώμα υψηλής διαπνοής σε πάχος ξηρού φιλμ 90 μικρά]





✓ **Παρατήρηση.** Το δοκίμιο 5 παρουσιάζει τα πρώτα έντονα ίχνη εκτεταμένων φουσκωμάτων και αποκόλλησης της προστατευτικής του επικάλυψης.

❖ **Δοκίμιο [6]:** [Σύστημα υδροφοβικού εμποτισμού με σιλοξάνη υψηλής συγκέντρωσης (ποσοστό στερεών 80%) και επιφανειακής προστασίας με ανόργανο φωτοκαταλυτικό χρώμα υψηλής διαπνοής σε πάχος ξηρού φιλμ 90 μικρά]





✓ **Παρατήρηση.** Το δοκίμιο 6 έχει υποστεί τη μεγαλύτερη φθορά εξαιτίας του περιβάλλοντος αλατονέφωσης μέχρι ώρας. Έχει ήδη ξεκινήσει σε σημαντικό βαθμό η αποκόλληση της προστατευτικής του επικάλυψης και υπάρχει πιθανότητα πλήρους απμακρυνσής της.

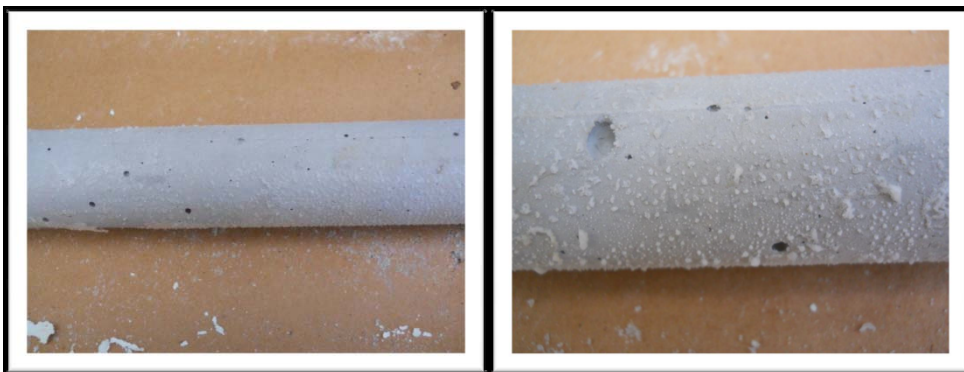
❖ **Δοκίμιο [7]:** [Σύστημα επικάλυψης με ακρυλικό γαλάκτωμα επιφανειακής προστασίας με κολλοειδή νανοδομημένο διοξείδιο του πυριτίου (ποσοστό στερεών 15%) και ανακλαστικό χρώμα-ελαστομερές (anticarbonation) προστασίας έναντι διεισδύσεων πάχους στεγνού φιλμ 250 μικρά.]



❖ **Δοκίμιο [8]** Χωρίς επικάλυψη



❖ **Δοκίμιο [9]** Χωρίς επικάλυψη



➤ Απόψεις των δοκιμίων στις 37 μέρες εντός του θαλάμου.



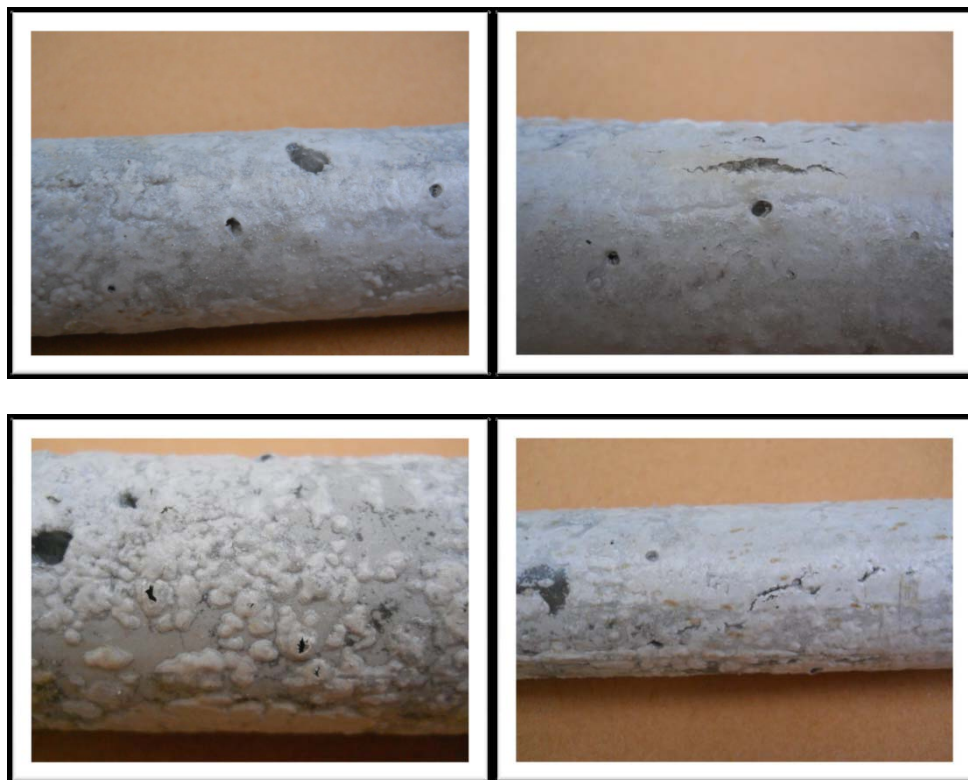
Όλα τα δοκίμια παρατεταγμένα μετά από έκθεση 37 ημερών σε περιβάλλον αλατονέφωσης.

❖ Δοκίμιο [1]



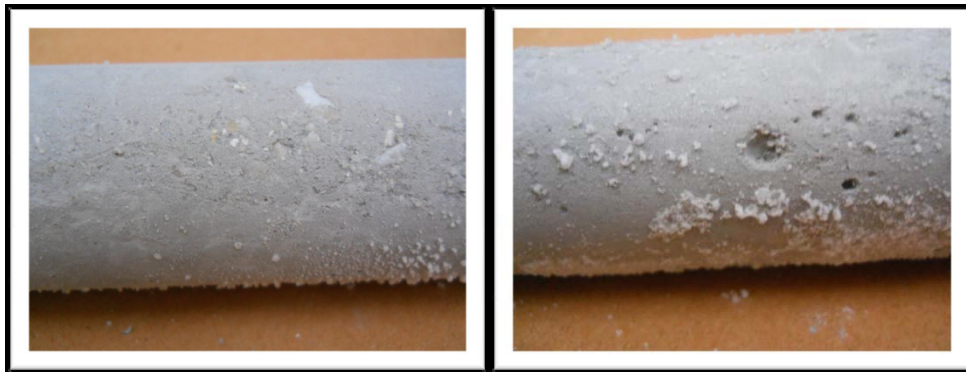
✓ **Παρατήρηση.** Το δοκίμιο [1] δεν παρουσιάζει κάποιο πρόβλημα στο στρώμα της επικάλυψης του. Η μόνη παρατήρηση που έχουμε είναι ότι έπειτα από 37 ημέρες στο θάλαμο είναι ότι φαίνεται να διαγράφεται η φορά με την οποία επικαλύφθηκε το δοκίμιο. Δεν φαίνεται ωστόσο να οδηγούμαστε σε θρυμματισμό ή αποκόλληση της επικάλυψης.

❖ **Δοκίμιο [2]**



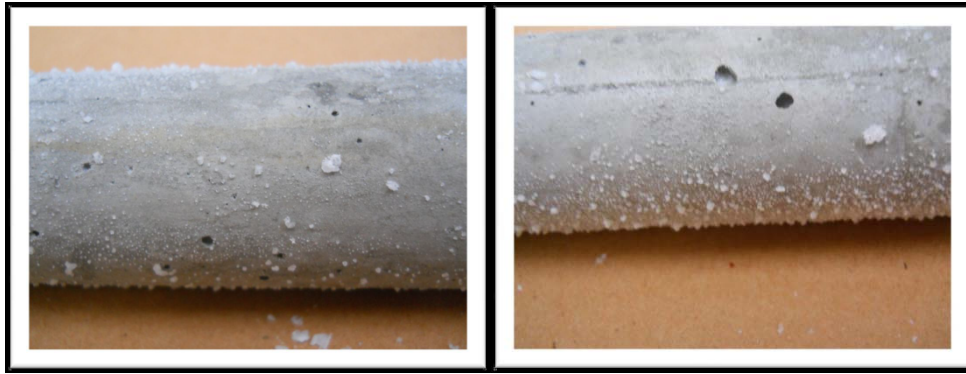
✓ **Παρατήρηση.** Παρατηρείται από τις παραπάνω φωτογραφίες ότι το δοκίμιο [2] παρουσιάζει κατά τόπους φουσκώματα στην επικάλυψη του που οδηγούν σε αποκόλληση της.

❖ **Δοκίμιο [3]**



❖ **Δοκίμιο [4]**



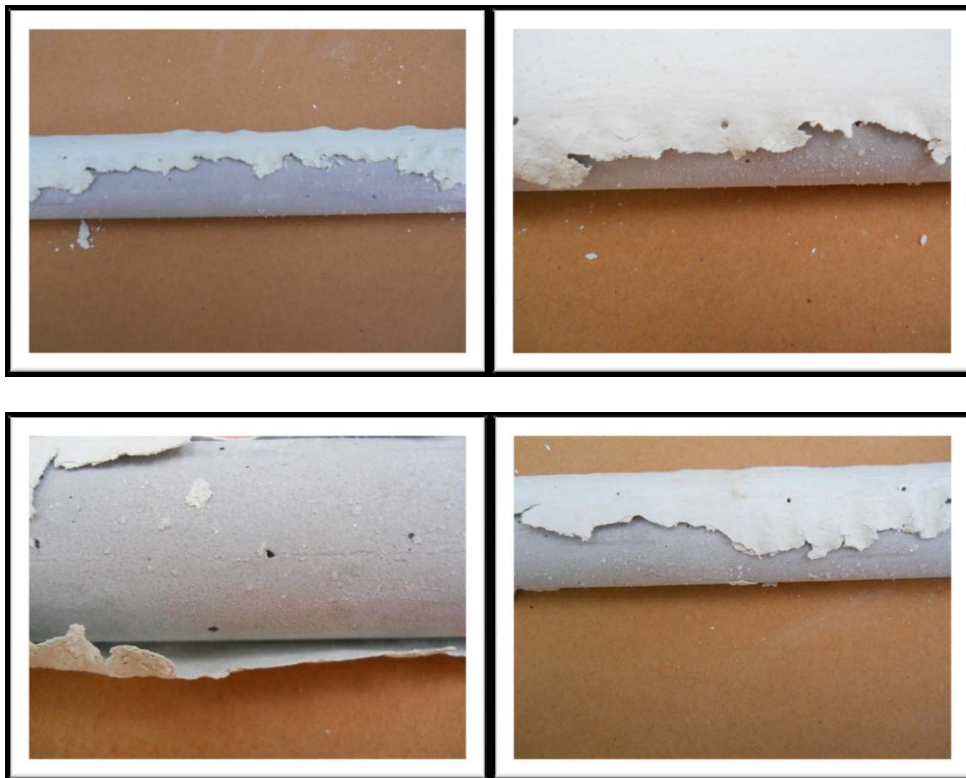
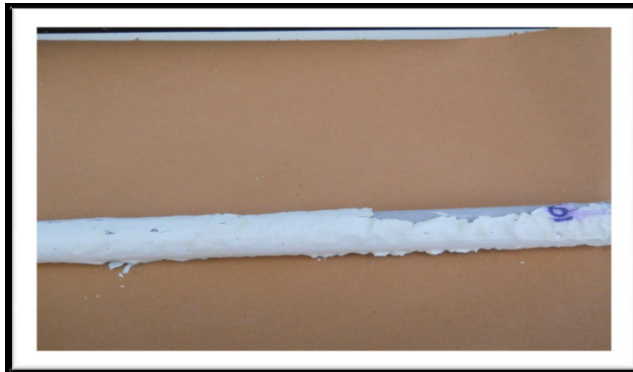


❖ **Δοκίμιο [5]**



✓ **Παρατήρηση.** Όπως είδαμε πιο πριν το δοκίμιο [5] είχε αρχίσει να παρουσιάζει προβλήματα ήδη από τις 24 μέρες στο θάλαμο. Έπειτα από 37 ημέρες παρατηρείται ότι έχει ξεκινήσει εμφανώς η αποκόλληση της επικάλυψης.

❖ **Δοκίμιο [6]**



✓ **Παρατήρηση.** Έπειτα από 37 ημέρες στο θάλαμο αλατονέφωσης το δοκίμιο [6] έχει μείνει σχεδόν ακάλυπτο όπως φαίνεται ξεκάθαρα παραπάνω.

❖ **Δοκίμιο [7]**



✓ **Παρατήρηση.** Το δοκίμιο [7] παρουσιάζει ίδια συμπεριφορά περίπου με το δοκίμιο [1]. Δεν παρατηρείτε αποκόλληση, αλλά παρατηρείται εντονότερα η φορά με την οποί εφαρμόστηκε η επικάλυψη.

❖ Δοκίμιο [8]



❖ Δοκίμιο [9]



➤ **Απόψεις των δοκιμίων μετά από 1000 ώρες εντός του θαλάμου.**

Όπως αναφέραμε και παραπάνω μετά τις 37 μέρες τα δοκίμια 2, 5 και 6 αφαιρέθηκαν από το θάλαμο. Ακολουθεί ο οπτικός έλεγχος στα εναπομείναντα δοκίμια.



Τα εναπομείναντα δοκίμια παρατεταγμένα μετά από έκθεση 1000 ωρών σε περιβάλλον επιταχυνόμενης διάβρωσης.

❖ **Δοκίμιο [1]**





❖ **Δοκίμιο [3]**





❖ **Δοκίμιο [4]**



✓ **Παρατήρηση.** Στο δοκίμιο με στοιχεία 4, παρουσιάζεται ένα ελαφρύ "ξεφλούδισμα" έπειτα από 1000 ώρες στο θάλαμο της αλατονέφωσης, το οποίο οδηγεί σε σταδιακή απομάκρυνση της προστατευτικής επίστρωσης που είχε εφαρμοσθεί σε αυτό

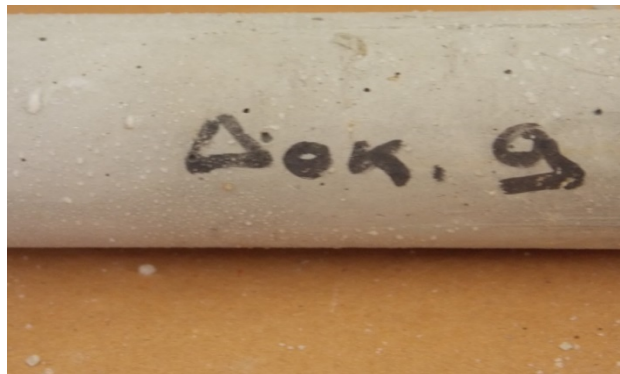
❖ **Δοκίμιο [7]**



❖ Δοκίμιο [8]



❖ Δοκίμιο [9]



7.2 Αποτελέσματα μετρήσεων δυναμικού

Μετά την αφαίρεση των δοκιμίων [2], [5] και [6] από τον θάλαμο αλατονέφωσης στις 37 ημέρες λόγω της εκτεταμένης φθοράς που είχε η επικάλυψη τους, προχωρήσαμε στην εξακρίβωση της τάσης προς διάβρωση αυτών των δοκιμίων. Μέτρηση δυναμικού έγινε και στο δοκίμιο [9] (reference).

Για την εξακρίβωση της τάσης προς διάβρωση μετρήσαμε το δυναμικό διάβρωσης E_{corr} των οπλισμών των δοκιμίων χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδιο αναφοράς $Cu/CuSO_4$.

Οι μετρήσεις σε κάθε δοκίμιο, πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος του άξονα σε πέντε ισομεγέθεις περιοχές και λάβαμε τα ακόλουθα αποτελέσματα.

ΠΙΝ [7.1] ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ.

	I	II	III	IV	V
Δοκίμιο [2]	-520(μV)	-440 μV)	-510 (μV)	-520 (μV)	-420 (μV)
Δοκίμιο [5]	-440 (μV)	-395 (μV)	-345 (μV)	-330 (μV)	-350 (μV)
Δοκίμιο [6]	-345 (μV)	-305 (μV)	-325 (μV)	-310 (μV)	-320 (μV)
Δοκίμιο [9]	-515 (μV)	-470 (μV)	-465 (μV)	-440 (μV)	-380 (μV)

Σχολιάζοντας τις τιμές του δοκιμίου [9] φαίνεται ότι μεγάλες αρνητικές τιμές αναπτύσσονται στα 3/5 του δοκιμίου και συμπίπτουν με την ύπαρξη επιφανειακών πόρων (φουσαλίδων) στις ίδιες θέσεις. Συγκρίνοντας τις τιμές των μετρήσεων μας με τον πίνακα [6.1] της ενότητας 6.1 βλέπουμε ότι έχουμε υψηλή πιθανότητα διάβρωσης {<90 %} σε όλο το δοκίμιο, είτε ακόμα και σημεία με ήδη έντονη διάβρωση. Τα ίδια ισχύουν και για το δοκίμιο [2]

Όσον αφορά τα δοκίμια [5] και [6] οι τιμές των δυναμικών κυμαίνονται μεταξύ ενδιάμεσης πιθανότητας διάβρωσης και υψηλής πιθανότητας διάβρωσης με ροπή προς της υψηλή. Σε σύγκριση με τα δοκίμια [2] και [9],

λοιπόν φαίνονται να έχουν προστατευτεί καλύτερα. Παρόλα αυτά και πάλι η πιθανότητα διάβρωσης είναι σχεδόν σίγουρη.

✓ **Παρατήρηση.** Παρόλο που η σύγκριση των τιμών (δηλαδή της μεταβολής του δυναμικού) είναι παρακινδυνευμένη αφού γίνεται με βάση ένα δοκίμιο, φαίνεται ξεκάθαρα η τάση των δοκιμίων προς διάβρωση και επομένως ορθώς αφαιρέθηκαν από το θάλαμο αλατονέφωσης μετά το «σπάσιμο» των επικαλύψεων τους.

Λόγω της αναπόφευκτης διασποράς των τιμών του πορώδους από δοκίμιο σε δοκίμιο, «φρόνιμο» είναι να λαμβάνεται μια μέση τιμή από τρία τουλάχιστον δοκίμια κάθε κατηγορίας coating καθώς επίσης και των (reference) δοκιμίων αναφοράς.

7.3 Αποτελέσματα μέτρησεων απώλειας μάζας

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει η μέτρηση της απώλειας μάζας των δοκιμίων γίνεται σύμφωνα με τον **Κ.Τ.Χ. 2008 κεφάλαιο 10.3**. Μετά από την διαδικασία που προαναφέρθηκε λοιπόν υπολογίσαμε την ποσοστιαία απώλεια μάζας στα δοκίμια μας που δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta M = \frac{\text{Αρχική μάζα} - \text{Τελική μάζα}}{\text{Αρχική μάζα}} \cdot 100$$

Λόγω της χρήσης κεριού πραγματοποιήθηκε αναγωγή υπολογισμών βάσει του καθαρού μήκους ράβδου. Έτσι η τελική απώλεια μάζας του χάλυβα έπειτα από 1000 ώρες διάβρωσης επί τεσσάρων επικαλυμμένων δοκιμίων (1,3,4,7) και δύο μη επικαλυμμένων δοκιμίων (8,9). είναι:

ΠΙΝ [7.2] ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΜΑΖΑΣ

Δοκίμια	Μήκος (mm)	Μάζα (gr)	Μάζα/ Μήκος (gr/mm)	Μάζα προστατ. με κερί (gr)	Τελική Μάζα (gr)	ΔM (gr)	Μάζα Διαβ. Περιοχής (gr)	Απώλεια Μάζας (%)
1	533	472,06	0,885666	159,42	471,78	0,28	312,64	0,090
3	534	479,49	0,897921	161,63	479,19	0,3	317,86	0,094
4	533,5	482,46	0,90433	162,78	482,18	0,28	319,68	0,088
7	537	480,59	0,894953	161,09	480,23	0,36	319,50	0,113
8	535	481,03	0,899121	161,84	478,35	2,68	319,19	0,840
9	537,5	482,99	0,898586	161,75	478,77	4,22	321,24	1,314

**Μέση Τιμή
1,01%**

✓ **Παρατήρηση.** Η αυξημένη αντίσταση των επικαλύψεων έναντι φθοράς και αποφλοίωσης επιβεβαιώνεται εσωτερικά και από τη κατάσταση του χάλυβα. Συγκεκριμένα, για 1000 ώρες παραμονής σε περιβάλλον επιταχυνόμενης διάβρωσης, η απώλεια μάζας των ράβδων χάλυβα στην περίπτωση αυτή είναι περίπου 10 φορές χαμηλότερη έναντι των εγκιβωτισμένων δοκιμών δίχως επικάλυψη. Η διαπίστωση αυτή ισχύει με την προϋπόθεση της αρηγμάτωσης επιφάνειας σκυροδέματος. Στη περίπτωση όμως που αναπτυχθούν ρηγματώσεις στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος (των απλών δοκιμών χωρίς επικάλυψη) η διαφορά αναμένεται να αυξηθεί ιδιαίτερα.

7.4 Εντοπισμός Βελονισμών

Είναι γνωστό ότι στον χάλυβα, η διαβρωτική δράση των χλωριόντων εκδηλώνεται κυρίως με βελονισμούς (pits). Για το έλεγχο λοιπόν της επάρκειας των επικαλύψεων κρίθηκε απαραίτητη η διερεύνηση και η καταγραφή των βελονισμών στις εγκιβωτισμένες ράβδους χάλυβα καθώς επίσης και η αναγνώριση της βλάβης των βελονισμών στα γυμνά δοκίμια.

Όπως φαίνεται από τους επισυναπτόμενους πίνακες της επόμενης σελίδας, από την μέτρηση των βελονισμών στα γυμνά δοκίμια των ράβδων χάλυβα (βάθος και επιφάνεια βελονισμού) προέκυψαν:

Στο δοκίμιο **[BARE-3]** για απώλεια μάζας 3.19%, μέσο βάθος βελονισμού 268,67μm και μέση επιφάνεια βελονισμού 1,19 mm².

Αντίστοιχα, η μέγιστη τιμή του βάθος βελονισμού 380μm και μέγιστη επιφάνεια βελονισμού 2.253mm².

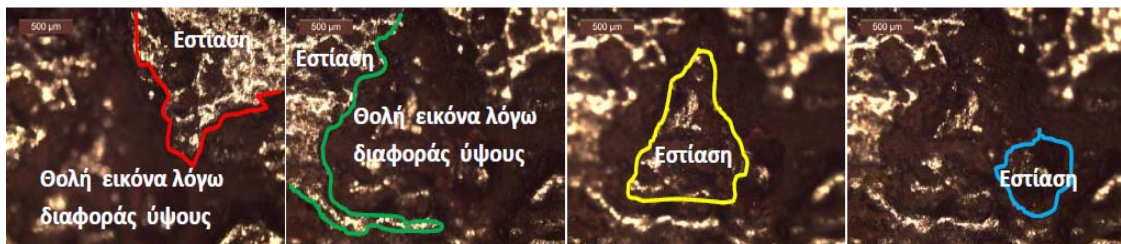
Στο δοκίμιο **[BARE-4]** για απώλεια μάζας 4.25%, μέσο βάθος βελονισμού 236,25μm και μέση επιφάνεια βελονισμού 1,55 mm²

➤ **Μετρήσεις βελονισμών σε γυμνά δοκίμια**

Διαδικασία μέτρησης βάθους και επιφάνειας βελονισμών:

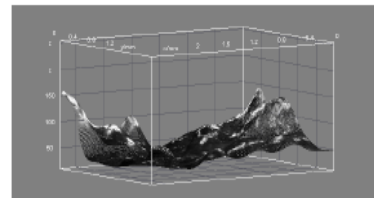
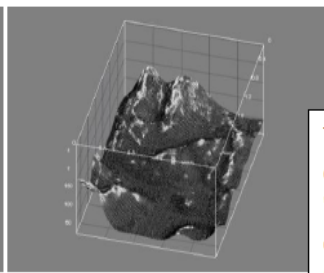
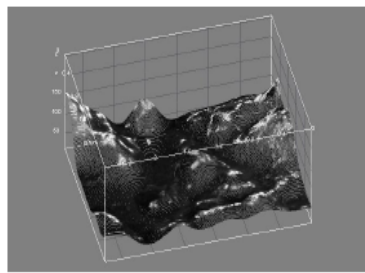


Μέσω της εστίασης του μικροσκοπίου και του βαθμονομημένου μηχανικού στελέχους για την ανύψωση του εξεταζόμενου δείγματος πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του βάθους των βελονισμών και της επιφάνειας σε διαφορετικά επίπεδα.



ΔΟΚ 3 BARE (3.19%)-1000Ωρες		
PIT	ΒΑΘΟΣ(μm)	ΕΜΒΑΔΟΝ(mm2)
1	264	0,787
2	260	0,491
3	180	0,483
4	220	2,139
5	280	1,599
6	300	2,013
7	260	0,72
8	220	0,881
9	360	2,253
10	220	1,483
11	380	0,637
12	280	0,737
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	268,67	1,19
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ	380	2,253

ΔΟΚ 4 BARE (4.25%)-1000Ωρες		
PIT	ΒΑΘΟΣ(μm)	ΕΜΒΑΔΟΝ(mm2)
1	240	1,872
2	280	2,239
3	210	1,25
4	190	1,428
5	170	1,07
6	220	1,906
7	300	2,115
8	280	0,523
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ	236,25	1,55



Τρισδιάστατη απεικόνιση του βελονισμού από 3 διαφορετικές οπτικές γωνίες. Οι "χαραμάδες" φιλοξενούν τη διάβρωση οδηγώντας τον μηχανισμό ανάπτυξης σε βαθείς και αιχμηρούς βελονισμούς. (pit corrosion)

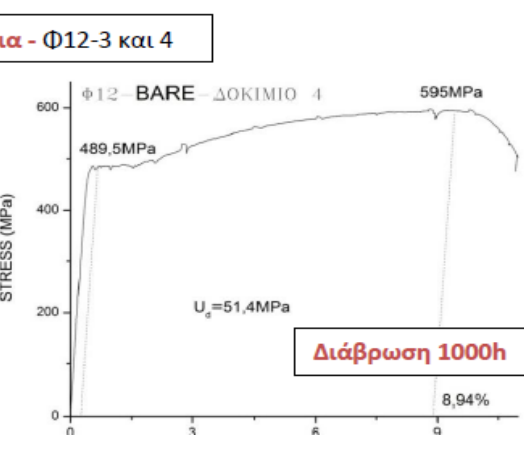
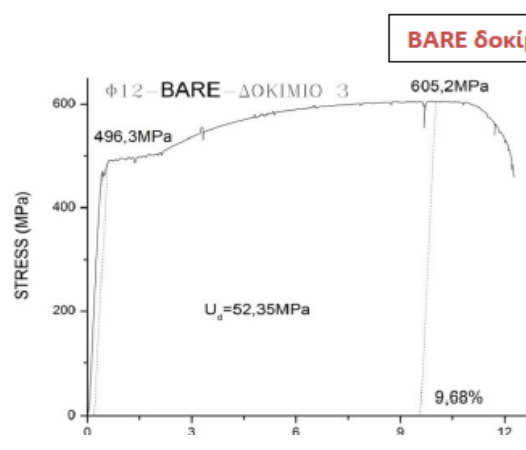
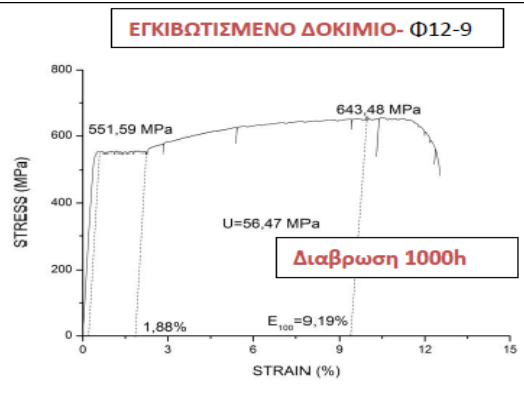
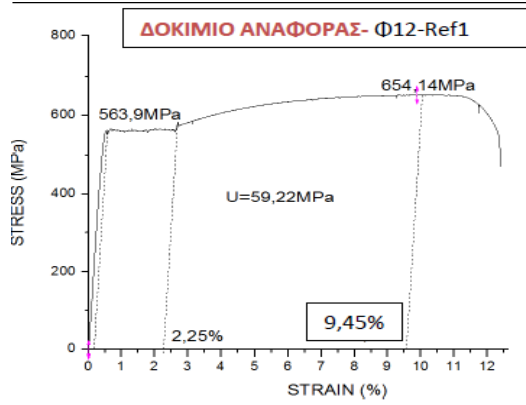
✓ **Παρατήρηση.** Από τον στερεοσκοπικό έλεγχο των επιφανειών των ράβδων των δοκιμίων [1], [3], [4] και [7] τα οποία (πριν την διαδικασία έκθεσης στη αλατονέφωση) είχαν προστατευτεί με επιφανειακή επικάλυψη, δεν προέκυψε εμφάνιση (συγκριτικά με την αρχική τους κατάσταση παρέμειναν ανέπαφα) μετρήσιμου βάθους βελονισμών

7.5 Αποτελέσματα πειραμάτων εφελκυσμού

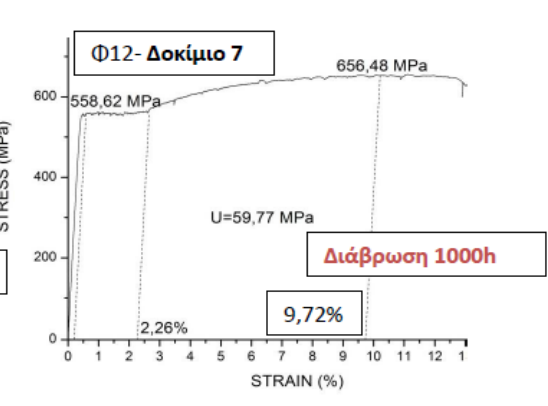
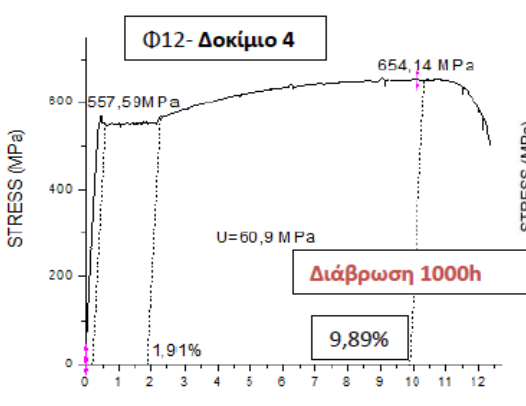
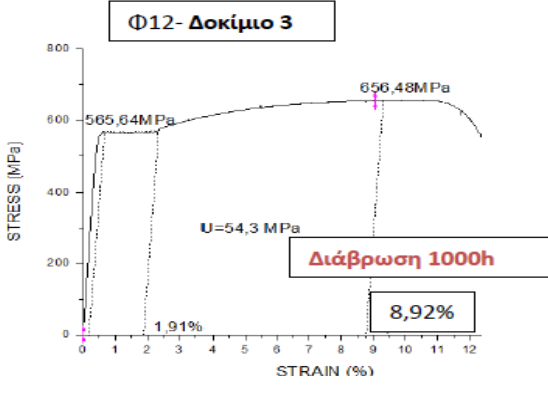
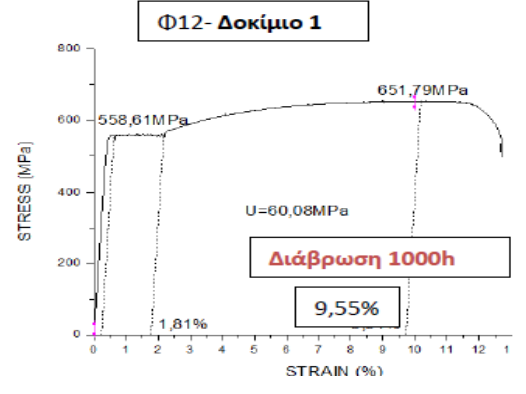
Στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα, φαίνονται τα αποτελέσματα που πήραμε από τις μετρήσεις που έγιναν σύμφωνα με όσα γράψαμε στην ενότητα 6.3 για τις μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού. Με το πρόγραμμα Origin-Lab κατασκευάστηκαν οι καμπύλες εφελκυσμού και ορίστηκε το όριο διαρροής [R_p (MPa)], το όριο θραύσης [R_m (MPa)], η παραμόρφωση θραύσης [E_{100} (%)] και η ειδική ενέργεια παραμόρφωσης [U_d (MPa)].

ΠΙΝ [7.3] ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΑΣΗΣ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (Μη Διαβρωμένα)					
Όνομασία Δοκιμίου	Απώλεια Μάζας (%)	Όριο Διαρροής [R_p] (Mpa)	Όριο Αντοχής [R_m] (Mpa)	Παραμόρφωση Θραύσης [E_{100}] (%)	Ενέργεια Παραμόρφωσης [U] (MPa)
Φ12-Ref1	-	563,9	654,14	9,45	59,22
Φ12- Ref2	-	573	658,4	10,25	62,35
Φ12- Ref3	-	558	651,2	9,63	58,32
Μέση τιμή	-	564,97	654,58	9,78	59,96
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΥΜΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (Διάβρωση 1000 Ώρες)					
Φ12-Bare-3	3,19	496,63	605,19	9,10	52,35
Φ12-Bare-4	4,25	489,85	594,9	8,94	51,41
Μέση τιμή	3,72	493,24	600,05	9,02	51,88
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΧΩΡΙΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ (Διάβρωση 1000 Ώρες)					
Φ12-8	0,84	551,59	643,48	9,19	56,47
Φ12-9	1,314	548	641	9,27	56,89
Μέση τιμή		549,795	642,24	9,23	56,68
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ (Διάβρωση 1000 Ώρες)					
Φ12-1	0,090	558,61	651,79	9,55	60,08
Φ12-3	0,094	565,64	656,46	8,92	54,3
Φ12-4	0,088	557,59	654,14	9,89	60,9
Φ12-7	0,113	558,62	656,48	9,72	59,77



*** ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ***



✓ **Παρατήρηση.** Από τον πίνακα των αποτελεσμάτων των μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού προέκυψε ότι όλες οι μηχανικές ιδιότητες των εγκιβωτισμένων ράβδων χάλυβα των δοκιμίων με προστατευτική επικάλυψη που εκτέθηκαν επί 1000 ώρες στην διάβρωση (δηλαδή των **δοκιμίων [1], [3], [4] και [7]**), συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα αναφοράς (Reference) δεν παρουσίασαν μεταβολή.

Τελικά Συμπεράσματα

Κεντρικό συμπέρασμα της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι ότι τα συστήματα επικαλύψεων στην επιφάνεια του σκυροδέματος με οργανικά και ανόργανα υλικά, είναι ικανά να προστατεύσουν σε μεγάλο βαθμό τον οπλισμό του σκυροδέματος, αρκεί να γίνει η σωστή επιλογή συστήματος.

➤ Τα συστήματα των δοκιμών:

[1] (Αστάρι υδατικού διαλύματος σιλοξάνης, ακρυλικό γαλάκτωμα με νανοδομημένο διοξείδιο του πυριτίου και ανακλαστικό χρώμα ελαστομερούς),

[3] (Αστάρι με σιλοξάνη υψηλής συγκέντρωσης),

[4] (Αστάρι με υδατικό διάλυμα σιλοξάνης) και

[7] (ακρυλικό γαλάκτωμα νανοδομημένου διοξειδίου του πυριτίου και ανόργανο φωτοκαταλυτικό χρώμα υψηλής διαπνοής)

προστάτευσαν αποτελεσματικά τον οπλισμό.

❖ Η αυξημένη αντίσταση των συστημάτων επικαλύψεων έναντι φθοράς και αποφλοιώσεων των δοκιμών [1], [3], [4] και [7] επιβεβαιώνεται εσωτερικά και από τη κατάσταση του χάλυβα. Συγκεκριμένα, για 1000 ώρες παραμονής σε περιβάλλον επιταχυνόμενης διάβρωσης, η απώλεια μάζας των ράβδων χάλυβα στην περίπτωση αυτή είναι περίπου 10 φορές χαμηλότερη έναντι των εγκιβωτισμένων δοκιμών δίχως επικάλυψη.

❖ Από τον στερεοσκοπικό έλεγχο των επιφανειών των ράβδων των δοκιμών [1], [3], [4] και [7] τα οποία (πριν την διαδικασία έκθεσης στη αλατονέφωση) είχαν προστατευτεί με επιφανειακή επικάλυψη, δεν προέκυψε εμφάνιση (συγκριτικά με την αρχική τους κατάσταση παρέμειναν ανέπαφα) μετρήσιμου βάθους βελονισμών.

❖ Από τον πίνακα των αποτελεσμάτων των μηχανικών δοκιμών εφελκυσμού προέκυψε ότι όλες οι μηχανικές ιδιότητες των εγκιβωτισμένων ράβδων χάλυβα των δοκιμών με προστατευτική επικάλυψη που εκτέθηκαν επί 1000 ώρες στην διάβρωση (δηλαδή των **δοκιμών [1], [3], [4] και [7]**), συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα αναφοράς (Reference) δεν παρουσίασαν μεταβολή.

➤ **Τα συστήματα των δοκιμών**

[2] (Ακρυλικό γαλάκτωμα με νανοδομημένο διοξείδιο του πυριτίου),
[5](Ασάρι υδατικού διαλύματος σιλοξάνης και ανόργανο
φωτοκαταλυτικό χρώμα υψηλής διαπνοής), και
[6](Ασάρι με σιλοξάνη υψηλής συγκέντρωσης και ανακλαστικό χρώμα
ελαστομερούς υψηλής διαπνοής)

δεν προστάτευσαν αποτελεσματικά τον οπλισμό.

Τα συστήματα επικαλύψεων των δοκιμών [2], [5], και [6] στις 37 ημέρες στο θάλαμο αλατονέφωσης είχαν διαραγεί με αποτέλεσμα να μην είναι ικανά να προστατεύσουν τον οπλισμό, όπως φάνηκε και από τις μετρήσεις δυναμικού.

➤ **Δεν έχει σημασία το υλικό επικάλυψης αυτό καθ'αυτό, αλλά ο συνδυασμός τους.**

Πρακτικά, είδαμε το ακρυλικό γαλάκτωμα επιφανειακής προστασίας με κολλοειδή νανοδομημένο διοξείδιο του πυριτίου να αποτυγχάνει να προστατεύσει τον οπλισμό του σκυροδέματος, από μόνο του, στο δοκίμιο [2] και το ανόργανο φωτοκαταλυτικό χρώμα υψηλής διαπνοής να αποτυγχάνει να προστατεύσει τον οπλισμό του σκυροδέματος σε συνδυασμό με το Ασάρι υδατικού διαλύματος σιλοξάνης στο δοκίμιο [5] και σε συνδυασμό με το Ασάρι υψηλής συγκέντρωσης σιλοξάνης στο δοκίμιο [6].

Όστόσο ο συνδυασμός ακρυλικού γαλάκτωματος επιφανειακής προστασίας με κολλοειδή νανοδομημένο διοξείδιο του πυριτίου και ανόργανου φωτοκαταλυτικού χρώματος υψηλής διαπνοής στο δοκίμιο [7] προστάτευσαν αποτελεσματικά τον οπλισμό.

Αντίστοιχα το Ασάρι υδατικού διαλύματος σιλοξάνης προστάτευσαν μόνο του τον οπλισμό του δοκιμίου [4] και το ασάρι υψηλής συγκέντρωσης σιλοξάνης προστάτευσαν μόνο του τον οπλισμό του δοκιμίου [3].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Σ. Τσίμας, Σ. Τσιβιλής Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου- Αθήνα Ε.Μ.Π., 2004
2. Neville, A.M. Brooks, J.J., "Concrete Technology", Longman, 1987
3. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, « Κανονισμός για την Μελέτη και Κατασκευή Έργων από Σκυρόδεμα
4. Δαπόντες Ι., «Παραδόσεις Τεχνολογίας Δομικών Υλικών: Σκυροδέματα», 2^η έκδοση, Θεσσαλονίκη, 1991
5. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος-97, Αιτιολογική Έκθεση, Εγκύκλιος Ε7, Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., Αθήνα, 1997
6. Σιοβα Χ. Ελενη «ανθεκτικότητα σκωριοσιμέντων τύπου SR, διπλωματική αθηνά 2005»
7. Ιστορία του Τσιμέντου και του Σκυροδέματος, Παν. Αγνωστόπουλος
8. Τσακαλάκης Κώστας- Καθηγητης ΕΜΠ, Τεχνολογία Παραγωγης Τσιμέντου και Σκυροδεματος, Σημειώσεις Μαθηματος, Αθηνά Μαιος 2010
9. Carolyn M.Hanson "Concrete: The advanced industrial materials of the 21st century", Edward Demille Campell
10. BS 12, SPECIFICATION FOR PORTLAND CEMENT 1991
11. ASTM Standard C150, Standard SPECIFICATION FOR PORTLAND CEMENT, astm international, west conshochocken, PA, USA, 2005
12. Παρισάκης, Γ., Κασελούρη, Β., Τσίμας, Σ., Φτίκος, Χ., «Χημεία και Τεχνολογία Τσιμέντου», Αθήνα, 1981
13. Bogue, R. H., "The Chemistry of Portland Cement", 2cd Edition, New York Publishing Corp., 1955
14. Carolyn M.Hanson "Concrete: The advanced industrial materials of the 21st century", Edward Demille Campell
15. N. Kouloumbi, G. Batis, P. Pantazopoulou, «Efficiency of Natural Greek Pozzolan in Chloride Induced Corrosion of Steel Reinforcement», Cement, Concrete and Aggregates, No 1, Vol. 17, 18-25, 1995.
16. Κατσιωτης Μαριος, Μελέτη του πορώδους νανοκρυσταλλικών υλικών και της ενυδάτωσης φωτοκαταλυτικών κονιαμάτων που περιέχουν

- Τιτανία με Φασματοσκοπία Πυρηνικού Μαγνητικού Συντονισμού και Μικροσκοπία Ατομικών Δυνάμεων, Αθήνα 2009
17. Ρούτουλας, Α. Π., «Έλεγχος Ποιότητας και Τεχνολογία δομήσιμων Υλικών», ΑΤΕΙ Πειραιά, Οκτώβριος 2010
 18. Cheng, A., Huang, R., Wu, J.-K., Chen, C.-H., “Influence of GGBS on Durability and Corrosion Behavior of Reinforced Concrete”, *Materials Chemistry and Physics*, 93 (2-3), 2005, pp. 404-411
 19. Batis, G., Grigoriadis, G., “Anti-corrosive Performance of various Inhibitors in Lightweight Concrete”, *International Conference “Infrastructure, Regeneration and Rehabilitation: Improving the Quality of Life Through Better Construction”*, Sheffield, 1999, pp. 591-599
 20. Μπατής, Γ., Μελετίου, Κ., Ρούτουλας, Αθ., «Η Προστασία του Οπλισμού του Σκυροδέματος με Ορυκτά Πρόσθετα», *Πρακτικά 13ου Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος*, Vol. 2, Ρέθυμνο, 1999, pp 345-352
 21. Τσίμας, Σ., «Δομικά Υλικά (Τσιμέντο – Ασβέστης – Σκυρόδεμα – Κονιάματα)», Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2001
 22. Ρακαντά-Ζαχαρίου, Ε., «Διερεύνηση της χρήσης ειδικών προσθέτων για την προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα», *Διδακτορική διατριβή*, ΕΜΠ, 2010
 23. Massazza, F., “Concrete Resistance to Sea Water and Marine Environment”, *Il Cemento*, Vol. 1, 1985, pp. 3-26
 24. ΕΛΟΤ 345, «Το ύδωρ αναμίξεως και συντηρήσεως σκυροδέματος», Αθήνα, 1979
 25. ΕΛΟΤ EN 12620, «Αδρανή για σκυρόδεμα», Ημερομηνία έκδοσης 23/10/2002
 26. Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (ΚΤΧ-2000), Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., Αθήνα, 2000
 27. ΕΛΟΤ 959, «Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος», 1996
 28. ΕΛΟΤ 971, «Συγκολλησιμοι Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος», 1996
 29. Κ. Τριανταφύλλου, *Δομικά Υλικά*, 5^η Έκδοση, Πάτρα 2002
 30. DIN 1045-1, “Plain, Reinforced and Prestressed Concrete Structures - Design and Construction”, Publication date: 2005-06

31. DIN 1045-2, "Concrete, Reinforced and Prestressed Concrete Structures - Part 2: Concrete; Specification, Properties, Production and Conformity; Application Rules for DIN EN 206-1", Publication date: 2001-07]
32. ΜΠΑΤΗΣ Γ. 1999. Φθορά και προστασία υλικών', ΑΘΗΝΑ, ΕΜΠ.
33. Κουλουμπή, Ν., «Διάβρωση και Προστασία», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2010
34. Υφαντής, Δ., Κ., «Υλικά – Διάβρωση και Προστασία», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2000
35. DAVIS J. R. 2004. Corrosion: Understanding the Basics, U.S.A, ASM International, The Materials Information Society
36. ΝΤΑΦΛΟΥ, Ε. 2012. Ανθεκτικότητα οργανικών επικαλύψεων που περιέχουν αναστολεις διάβρωσης, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, ΕΜΠ
37. ΚΟΥΛΟΥΜΠΗ Ν. 2005. Ηλεκτροχημεία, Αθήνα, εκδοσεις Συμεών.
38. SCHWARZ, N., CAM, H. & NEITHALATH, N. 2008. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. Cement and Concrete Composites, 30, 486-496.
39. Κ.Π. Τάσιος, Κ. Αλιγιζάκη, Ανθεκτικότητα Οπλισμένου Σκυροδέματος, Αθήνα 1992
40. Σίδερης, Κ. Κ., «Τεχνολογία Δομικών Υλικών», Τομ. Β', Δημοκρίτειο Παν/μιο Θράκης, Ξάνθη, 1984
41. WAGNER, C. 1965. Passivity and inhibition during the oxidation of metals at elevated temperatures. Corrosion Science, 5, 751-764.
42. VETTER K.J. 1955. Die Korrosion des passiven Eisens in saurer Lösung. Zeitschrift für Elektrochemie, pp.67-72.
43. SATO, N. & OKAMOTO, G. 1981. "Electrochemical Passivation of Metals" in: Mockris, O. M., Conway, B. E., Yeager, E. B., White, R. E. (eds.), "Comprehensive Treatise of Electrochemistry", Plenum Press, vol.4.
44. NAWY E.W. 2006. Concrete Construction Engineering Handbook, 2nd edition, USA, New Jersey, CRC Press.
45. ΚΟΥΛΟΥΜΠΗ Ν. 1999. Διάβρωση και προστασία, ΑΘΗΝΑ, ΕΜΠ.
46. SCHWEITZER P.A. 2009. Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods, CRC Press

47. ANN, K. Y. & SONG, H.-W. 2007. Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science*, 49, 4113-4133.
48. LIN, L. F., CHAO, C. Y. & MCDONALD, D. D. 1981. A Point Defect Model for Anodic Passive Films: II. Chemical Breakdown and Pit Initiation. *Journal of the Electrochemical Society*, 128, 1194-1198.
49. SATO, N. 1971. A theory for breakdown of anodic oxide films on metals. *Electrochimica Acta*, 16, 1683-1692
50. SCHIEGG, Y., HUNKELER, F. & UNGRICHT, H. 2007. 18 - Effectiveness of corrosion inhibitors – a field study. In: RAUPACH, M. (ed.) *Corrosion of Reinforcement in Concrete*. Woodhead Publishing.
51. ΒΑΛΑΒΑΝΙΔΗΣ ΑΘ. 2006. Οικοτοξικολογία και Περιβαλλοντική Τοξικολογία, Έρευνητική Μεθοδολογία και Εκτίμηση Οικολογικού Κινδύνου από Επικίνδυνες Χημικές Ουσίες', Αθήνα, ΕΚΠΑ, τμήμα Χημείας
52. BROOMFIELD, J. P. 1997. *Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair*, E&FN SPON.
53. ΒΑΜΒΑΤΣΙΚΟΣ, Β., ΒΟΥΓΙΟΎΚΑΣ, Ε. & ΑΒΡΑΑΜ, Τ. Οπλισμένο Σκυρόδεμα – Μεταλλικές Κατασκευές, κεφ.2, Αθήνα, ΕΜΠ.
54. Jones, D. A., "Principles and Prevention of Corrosion", Prentice – Hall, 1992
55. Trethewey, K. R., Champerlain, J., "Corrosion for Science and Engineering", Longman 2nd Edition, London, 1998
56. Chandler, K. A., Bayliss, B. A., "Corrosion Protection of Steel Structures", Elsevier Applied Science, 1985
57. Μπατής, Γ., Ντάφλος, Ε., «Μελέτη Καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενες ανόδους υποστηλωμάτων κτηρίου Τράπεζας», 2006
58. Glass, G. K., "Technical Note. The 100-mV Decay Cathodic Protection Criterion", *Corrosion*, 55, 1999, pp. 289-290
59. NACE RP0290, "Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures", NACE, Houston, TX, USA, 1990
60. ROBERGE P.R. 2012. *handbook of corrosion engineering'* N.Y, McGraw-hill handbooks.

61. RAKANTA, E., ZAFEIROPOULOU, T. & BATIS, G. 2013. Corrosion protection of steel with DMEA-based organic inhibitor. *Construction and Building Materials*, 44, 507- 513.
62. ΓΡΗΓΟΡΙΑΔΗΣ Γ. 2014. Σχεδιασμός τσιμεντών υψηλής ανθεκτικότητας με χρήση παραπροϊόντων της τσιμεντοβιομηχανίας, Αθήνα, ΕΜΠ
63. Bierwagen, G. P., “Reflections on corrosion control by organic coatings”, *Progress in Organic Coatings*, Vol. 28, 1996
64. Molera, P., Oller, X., del Vale, M., González, F., “Formulation and characterization of anticorrosive paints”, *Pigment and Resin Technology*, 33 (2), 2004, pp. 99-104
65. Almusallam, A. A., Khan, F. M., Dulaijan, S. U., Al-Amoudi, O. S. B., “Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability”, *Cement & Concrete Composites*, 25, 2003, pp. 473-481
66. 2010, «*Hydrophobic Impregnation of Concrete Structures*» /*Effects on concrete properties/ A.SELANDER*
67. 2013, «*Silane Sealers /Hydrophobic Impregnation–The European Perspective*» /*A.SYED & M.DONADIO*
68. 2001, «Penetration depth of hydrophobic impregnation agents from concrete» / 3rd International Conference on surface Technology with water-repellent agents, Hannover / M. BOFELDT & B. NYMAN
69. The Polysiloxanes James E. Mark, Dale W. Schaefer, and Gui Lin
70. Parkin I P, Palgrave R G. Self-cleaning coatings. *J Mater Chem*, 2005, 15: 1689–1695
71. Mills A, Hodgen S, Lee S K. Self-cleaning titania films: An overview of direct, lateral and remote photo-oxidation processes. *Res Chem Intermed*, 2005, 31: 295–308
72. Toma F L, Bertrand G, Klein D, et al. Development of photocatalytic active TiO₂ surfaces by thermal spraying of nanopowders. *J Nanomater*, 2008, 1–8
73. Fujishima A, Rao T N, Tryk D A. Titanium dioxide photocatalysis. *J Photochem Photobiol C Photochem Rev*, 2000, 1: 1–21
74. California Energy Commission. 2008. “2008 Building energy efficiency standards for residential and nonresidential buildings.” December.

75. Προκόπης Περδίκης, άρθρο στο περιοδικό Αρχιμήδης, Ο ρόλος των υλικών στο αστικό μικροκλίμα, στην εξοικονόμηση ενέργειας και στον περιορισμό των συνεπειών της «αστικής θερμικής νησίδας», Αρχιμήδης, Αύγουστος 2014, σελ. 26-34.