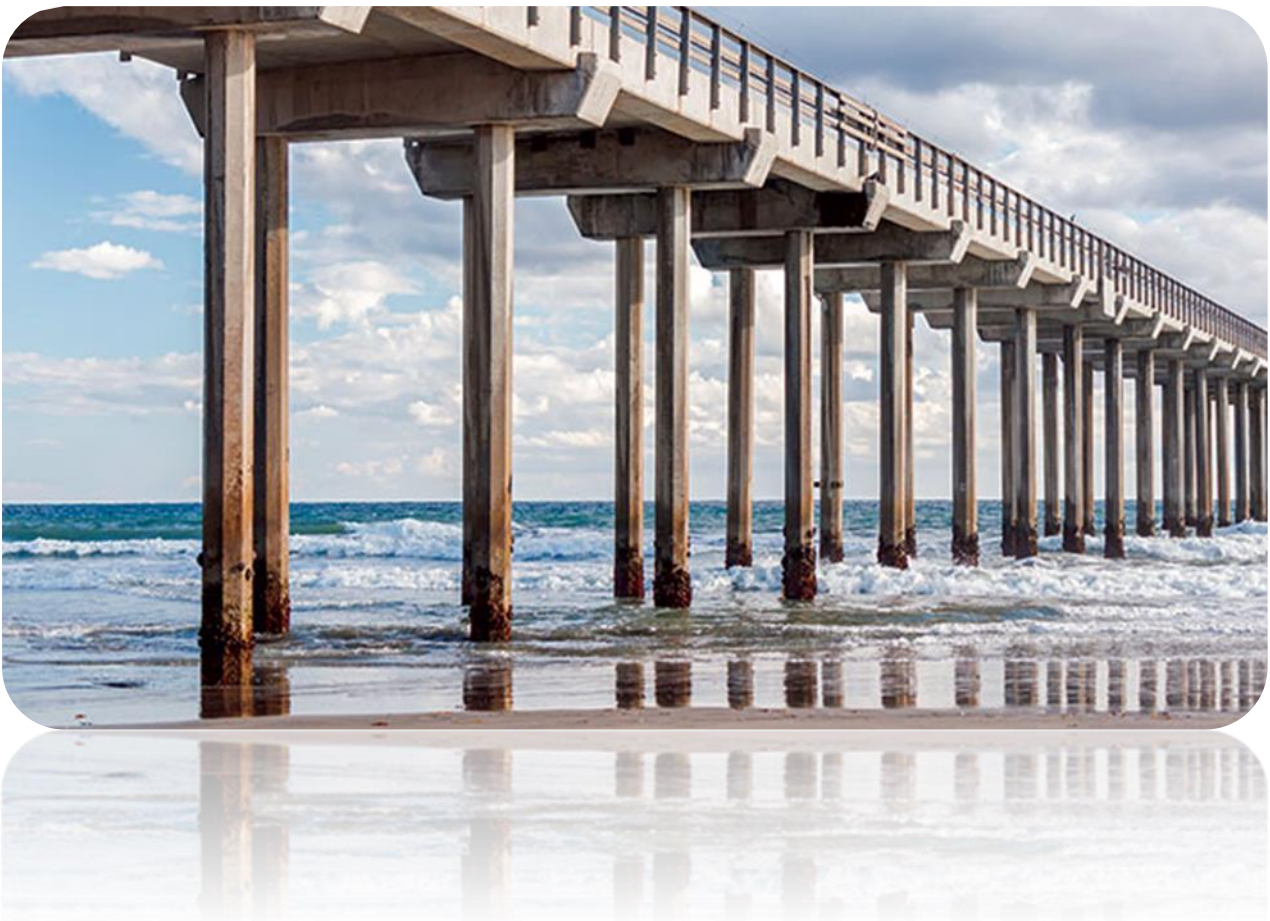


ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΧΡΗΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ του ΜΑΡΚΟΥ

ΕΜΠ, Σεπτέμβριος 2019

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Ι Χημικών Επιστημών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με Επιβλέπουσα Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. την κ. Μαργαρίτα Μπεάζη-Κατσιώτη.

Πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν κυρίως στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Ε.Τ.Σ.) του εργοστασίου (περιοχή Μεταμόρφωση Αττικής) της εταιρίας ΚΟΥΡΟΣ Α.Ε., καθώς και στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Ε.Τ.Σ.) του εργοστασίου (περιοχή Καμάρι Βοιωτίας) του ομίλου TITAN και στον εργαστηριακό χώρο της εταιρίας DOMYLCO στη Μεταμόρφωση.

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- Την κ. Μ. Μπεάζη-Κατσιώτη, Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και την πολύτιμη καθοδήγησή της σε όλα τα στάδια εκπόνησής της.
- Τον κ. Η. Κατσαφάδο, το προσωπικό του εργοστασίου ΚΟΥΡΟΣ και την ίδια την εταιρία για την αμέριστη συμβουλευτική, γνωστική και υλικοτεχνική υποστήριξή τους.
- Το προσωπικό του εργαστηρίου της εταιρίας DOMYLCO για την πολύτιμη βοήθειά τους στην πειραματική διαδικασία της υδατοπερατότητας και κυρίως τον κ. Λ. Σκόνδρα.
- Το προσωπικό του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Σκυροδέματος (TITAN) για την πολύτιμη βοήθειά τους στην πειραματική διαδικασία του Proovelt.
- Το Πολυτεχνείο της Ξάνθης και ιδιαιτέρως τον καθηγητή κ. Σιδερη που φιλοξένησε στο εργαστήριο του τη διαδικασία του θάλαμου ενανθράκωσης.
- Ευχαριστώ τέλος τον κ. Λουκά Καραβοκυρό για τη συμβολή του στην επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας, τη συμπαράσταση και την καίρια επιστημονική υποστήριξη που μου προσέφερε.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2019

Χριστόπουλος Ιωάννης του Μάρκου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της συγκεκριμένης Διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη και βελτιστοποίηση των συνθέσεων σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον. Συγκεκριμένα μελετάται η συμπεριφορά των συνθέσεων και οι ιδιότητές που σχετίζονται με την εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης κυρίως μέσω της προσβολής τους από χλωριόντα και διοξείδιο του άνθρακα. Η προσβολή των κατασκευών από τη διείσδυση χλωριόντων αποτελεί καίριο πρόβλημα και στη χώρα μας καθώς αφορά κυρίως παραθαλάσσιες κατασκευές που προσβάλλονται από το θαλασσινό νερό. Επιπλέον εξετάζονται και ιδιότητες των συνθέσεων που σχετίζονται με την εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης όπως πορώδες και υδατοπερατότητα. Καθώς οι νέοι κανονισμοί τεχνολογίας σκυροδέματος επιβάλουν για πρώτη φορά περιορισμούς στην ποιότητα της κατασκευής με βάση τις περιβαλλοντικές δράσεις, καθίσταται απαραίτητο τόσο για την έρευνα όσο και για την παραγωγή να εστιάσει και να προσαρμοστεί στις αλλαγές. Οι συνθέσεις που θα εξετασθούν επιλέχθηκαν με βάση τα όρια που βάζει ο νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ 2016). Αυτές είναι: αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, συμβατικό σκυρόδεμα (ποιότητας C30/37), σκυρόδεμα με αναστολέα διάβρωσης ως πρόσμικτο, σκυρόδεμα με επιφανειακό ψεκάσμο αναστολέα διάβρωσης και γαρμπυλόδεμα. Η ποιότητα και σχετική ποσότητα των συστατικών αλλά και τα προστατευτικά πρόσμικτα και πρόσθετα που θα χρησιμοποιηθούν αναμένονται να επηρεάσουν το φαινόμενο και να μας δώσουν δεδομένα που θα βοηθήσουν στην εύρεση της βέλτιστης λύσης για τη χρήση κατάλληλων δομικών υλικών στη δημιουργία νέων παραθαλάσσιων κατασκευών.

ABSTRACT

The subject of this thesis is the study and optimization of the concrete compositions used in a highly corrosive environment. Specifically, the behavior of the compositions and the properties related to the evolution of the erosion phenomenon are mainly studied through their chlorination (coastal construction). Structure infiltration by chlorite penetration is a major problem in our country as it concerns mainly seafloor structures that are affected by seawater. Additionally, properties of the compositions associated with the development of the erosion phenomenon such as porosity, water permeability are also examined. As new concrete technology regulations impose for the first time limitations on the quality of construction based on environmental actions, it is necessary for both research and production to focus and adapt to change. The compositions to be tested were selected based on the limits set by the new Concrete Technology Regulation (CTR 2016). These are: self-compacting concrete, conventional concrete (grade C30 / 37), concrete with corrosion inhibitor as an additive, concrete with surface spray erosion inhibitor and small-gravel concrete. The quality and relative quantity of the ingredients and also the protective additives, to be used, are expected to influence the phenomenon and give us data that will help to find the optimal solution for the use of suitable building materials for the creation of new seafront constructions.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ABSTRACT

1. ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	9
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	9
1.1.1 Τσιμέντο.....	12
1.1.1.1 Συστατικά τσιμέντου.....	13
1.1.1.2 Τύποι τσιμέντου.....	14
1.1.1.3 Μηχανικές, φυσικές και χημικές απαιτήσεις του τσιμέντου.....	16
1.1.1.4 Τσιμέντο Portland.....	17
1.1.1.5 Ενυδάτωση των τσιμέντων Portland.....	17
1.1.2 Αδρανή υλικά.....	19
1.1.3 Το νερό.....	22
1.1.4 Πρόσθετα και πρόσμικτα σκυροδέματος.....	24
1.1.4.1 Ορυκτά πρόσμικτα.....	24
1.1.4.2 Χημικά Πρόσθετα.....	28
1.2 ΧΑΛΥΒΕΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	31
1.2.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Λειτουργικές Ιδιότητες.....	33
1.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	34
1.3.1 Εργασιμότητα.....	34
1.3.2 Θερμοκρασία.....	36
1.3.3 Αντοχές.....	38
1.3.4 Πορώδες.....	39
1.3.5 Διαπερατότητα.....	40
1.3.6 Ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.....	41

1.4 ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	42
1.4.1 Βασικές Αρχές Σχεδιασμού Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος.....	44
1.5 ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (EN-206,ΚΤΣ-2016).....	46
1.5.1 Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο για το Σκυρόδεμα EN 206.....	46
1.5.2 Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-2016).....	47
1.5.2.1 Κατηγορίες έκθεσης στο περιβάλλον σύμφωνα με τον ΚΤΣ-2016...47	
 2 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	55
2.1 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ.....	55
2.1.1 Διάταξη ενός διαβρωτικού συστήματος.....	56
2.1.2 Ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα.....	57
2.1.3 Ατμοσφαιρική διάβρωση μετάλλων.....	58
2.1.4 Διάβρωση μετάλλων στο νερό.....	59
2.1.5 Προστασία των μεταλλικών κατασκευών.....	60
2.1.5.1 Καθοδική προστασία με εφαρμοζόμενο ρεύμα.....	60
2.1.5.2 Καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους.....	62
2.2 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	64
2.2.1 Διαβρωτικό περιβάλλον.....	66
2.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση του σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα.....	67
2.2.2.1 Το είδος και η δομή του σκυροδέματος.....	68
2.2.2.2 Το πάχος επικάλυψης.....	68
2.2.2.3 Η παρουσία νερού στο σκυρόδεμα.....	69
2.2.2.4 Η παρουσία ρωγμών.....	69
2.2.3 Αίτια και μηχανισμοί διάβρωσης.....	69
2.2.3.1 Ενανθράκωση.....	72
2.2.3.2 Επίδραση χλωριόντων.....	74
2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	81
2.3.1 Μέτρηση διαπερατότητας χλωριόντων κατά NT BUILD 492.....	81

2.3.2 Μέτρηση διαπερατότητας χλωριόντων κατά ASTM C 1202.....	82
2.3.3 Σταθμικός προσδιορισμός απώλειας μάζας.....	84
2.3.4 Μετρήσεις βάθους ενανθράκωσης σκυροδέματος.....	84
2.3.5 Προσδιορισμός ολικών ιόντων χλωρίου.....	85
2.3.6 Ηλεκτρονική μικροσκόπια σάρωσης (SEM).....	86
2.3.7 Περίθλαση ακτίνων χ (X-ray diffraction).....	86
2.3.8 Μέτρηση πορώδους με ποροσιμετρία Hg.....	87
2.3.9 Μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας σκυροδέματος.....	87
2.3.10 Μετρήσεις τριχοειδούς απορροφητικότητας.....	88
2.3.11 Διείσδυση νερού υπό πίεση (water penetration under pressure).....	89
2.3.12 Ηλεκτροχημικές μετρήσεις.....	89

3. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....90

3.1 ΤΡΟΠΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....90

3.1.1 Χρήση Ορυκτών Πρόσθετων.....	91
3.1.1.1 Ιπτάμενη Τέφρα.....	91
3.1.1.2 Σκωρία υψικαμίνων.....	92
3.1.1.3 Διογκωτικά ή μειωτικά της συρρίκνωσης του σκυροδέματος.....	93
3.1.1.4 Ρυθμιστές ιξώδους.....	93
3.1.2 Καθοδική Προστασία.....	93
3.1.2.1 Καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους.....	94
3.1.2.2 Καθοδική προστασία με επιβαλλόμενα εξωτερικά ρεύματα.....	95
3.1.2.3 Προστασία σκυροδέματος από την διάβρωση σε θαλάσσιο περιβάλλον με την μέθοδο της καθοδικής προστασίας.....	97
3.1.3 Αναστολείς διάβρωσης.....	98
3.1.3.1 Ανοδικοί αναστολείς (anodic inhibitors).....	100
3.1.3.2 Καθοδικοί αναστολείς (cathodic inhibitors).....	101
3.1.3.3 Μικτοί αναστολείς.....	104

3.1.3.4 Οργανικοί και ανόργανοι αναστολείς.....	104
3.1.3.5 Ιζηματοποιοί αναστολείς (Precipitation inducing inhibitors).....	105
3.1.3.6 Πτητικοί αναστολείς (Volatile corrosion inhibitors).....	106
3.1.3.7 Μηχανισμός προστασίας μέσω αναστολέων διάβρωσης.....	106
3.1.3.8 Αξιολόγηση των αναστολέων διάβρωσης.....	107
3.1.3.9 Αναστολείς διάβρωσης στο σκυρόδεμα.....	108
3.1.4 Προστασία μέσω επικαλύψεων – στεγανωτικών.....	108
3.1.4.1 Επικάλυψη με ανόργανα χρώματα.....	110
3.1.4.2 Επικάλυψη με οργανικά χρώματα.....	110
3.1.5 Χρήση ειδικών χαλύβων.....	113
3.1.6 Επεμβάσεις σε οπλισμό και σκυρόδεμα.....	115
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	119
4.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	119
4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	120
4.2.1 Παρασκευή και Συντήρηση δοκιμίων.....	120
4.3 ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ.....	122
4.3.1 Παραγόμενες συνθέσεις.....	122
4.3.2 Ιδιότητες νωπής φάσης.....	124
4.3.2.1 Θερμοκρασία σκυροδέματος.....	124
4.3.2.2 Κάθιση-Εξάπλωση σκυροδέματος.....	125
4.3.3 Ιδιότητες σκληρυμένης φάσης.....	128
4.3.3.1 Θλιπτικές αντοχές.....	128
4.3.3.2 Υδατοπερατότητα.....	131
4.3.3.3 Επιταχυνόμενη διείσδυση χλωριόντων (ASTM.1202-Proovelt).....	136
4.3.3.4 Διείσδυση CO ₂ (Θάλαμος Ενανθράκωσης).....	142
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	143

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....146

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....149

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκυρόδεμα είναι το πιο διαδεδομένο δομικό υλικό παγκοσμίως. Η ευρύτατη εφαρμογή του σε κάθε μορφή δόμησης έχει ως αποτέλεσμα η κατανάλωση σε σκυρόδεμα μίας χώρας, σε κυβικά μέτρα ανά κάτοικο, να χρησιμοποιείται ως δείκτης ανάπτυξης.

Είναι ένα τεχνητό δομικό υλικό που παρασκευάζεται με την ανάμιξη τσιμέντου, αδρανών σκύρων και νερού το οποίο στερεοποιείται με την χημική ένωση του νερού με το τσιμέντο (ενυδάτωση), εγκλωβίζοντας μέσα στην μάζα του τα αδρανή υλικά. Ο όρος αδρανή περιλαμβάνει γενικά την άμμο, το γαρμπίλι και τα σκύρα ή χαλίκια. Εκτός από τα υλικά αυτά, με το νέο Ευρωπαϊκό πρότυπο (EN 206), προβλέπεται η προσθήκη και άλλων ομάδων συστατικών (βελτιωτικά πρόσθετα και πρόσθετα συστατικά) οι οποίες, με διαφορετική αποστολή και με διαφορετικό μηχανισμό κάθε μία, τροποποιούν κατά συγκεκριμένο τρόπο μερικές από τις ιδιότητες του.

Το σκυρόδεμα έχει ευρύτατη αποδοχή στη δόμηση παγκοσμίως, σε όλο το εύρος των κλιματολογικών και οικονομικών συνθηκών. Αυτό οφείλεται στις παρακάτω βασικές του ιδιότητες:

- Έχει αντοχή στη δράση του νερού που δεν παρέχεται από άλλα δομικά υλικά όπως το ξύλο και ο σίδηρος.
- Επειδή στην αρχή είναι ρευστό παρέχει τεράστια ευελιξία στη μεταφορά, τη διακίνηση και τη διάστρωση, καθώς έχει τη δυνατότητα να μορφώνεται σε οποιοδήποτε επιθυμητό σχήμα. Έτσι έχει ένα ευρύτατο φάσμα κατασκευαστικών εφαρμογών όπως κάθε είδους κτιριακά και έργα υποδομής, καθώς και έργα προστασίας του κοινωνικού συνόλου.
- Είναι ένα ιδιαίτερα φθηνό και ευέλικτο δομικό υλικό που είναι εύκολο να παραχθεί και να διαμορφωθεί επί τόπου, κάτω από οποιοδήποτε συνθήκες και σε οποιοδήποτε περιβάλλον δόμησης, ακόμη και μέσα στη θάλασσα, είτε σε συνθήκες ελεγχόμενης βιομηχανικής παραγωγής είτε όχι.
- Έχει μεγάλη θερμική αδράνεια, γεγονός που το καθιστά αποδοτικότερο από άλλα δομικά υλικά ως προς το ενεργειακό κόστος λειτουργίας των κατασκευών.
- Οι ιδιότητές του το καθιστούν το βέλτιστο υλικό σε συνθήκες πυρκαγιάς.
- Παρουσιάζει πολύ υψηλή αντοχή στη θλίψη, αλλά τα όριά του στον εφελκυσμό είναι χαμηλά.

Για να παρασκευασθεί καλής ποιότητας σκυρόδεμα, δεν αρκεί μόνο η καλή διαλογή και σύνθεση των συστατικών του. Εξίσου σημαντικό είναι η παρασκευή του, η διάστρωση του και η συντήρηση του μετά την διάστρωση να γίνουν σύντομα με τις ισχύουσες προδιαγραφές. Στην Ελλάδα σχετικές λεπτομερείς οδηγίες υπάρχουν στον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-16), όπου επίσης δίδονται πολλές πληροφορίες για τον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος.

Είναι απαραίτητη η γνώση των ιδιοτήτων των υλικών που συνθέτουν το σκυρόδεμα. Επισταμένη έρευνα έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη του ως το σημαντικότερο δομικό υλικό, καθώς και στην έκταση

που αυτό σήμερα έχει καταλάβει στον τομέα των κατασκευών τόσο ως άοπλο, όσο και ως οπλισμένο σκυρόδεμα. Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να τονισθεί στο σημείο αυτό η διαφορά μεταξύ τσιμέντου και σκυροδέματος. Το τσιμέντο δεν είναι δομικό υλικό ενώ το σκυρόδεμα είναι.

Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται σε ένα αρκετά εκτεταμένο εύρος διαφορετικών ποιοτήτων για το σύνολο σχεδόν των κατασκευαστικών έργων. Η σπουδαιότητα των ιδιοτήτων του σκυροδέματος στην ασφάλεια ενός δομικού έργου είναι διαφορετική και εξαρτάται από το είδος της κατασκευής, το περιβάλλον που αυτή θα εκτεθεί και την ειδική χρήση που αυτή θα έχει. Έτσι άλλες απαιτήσεις υπάρχουν για το σκυρόδεμα από το οποίο θα κατασκευασθεί ένα φράγμα, άλλες για μία οικοδομή, για μία υποθαλάσσια κατασκευή, για μία γέφυρα ή για το πηγάδι μιας γεώτρησης. Οι διαφορές επίσης στις ιδιότητες του σκυροδέματος εξαρτώνται από την μεθοδολογία της παρασκευής του, την ποιότητα των πρώτων του υλών και μεταβάλλονται σημαντικά σε συνάρτηση με την βασική του ιδιότητα που είναι οι αντοχές του. Κεφαλαιώδους όμως σημασίας για την πρόβλεψη όλης της μετέπειτα συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων του σκυροδέματος είναι η εμφάνιση στην βασική του πρώτη ύλη που είναι το τσιμέντο και το οποίο σε πολύ μεγάλο βαθμό είναι υπεύθυνο για την ανθεκτικότητα της κατασκευής από το σκυρόδεμα. Για τον λόγο αυτό, για τα ειδικών απαιτήσεων σκυροδέματα, συνεχώς δημιουργούνται νέοι τύποι ειδικών τσιμέντων. Είναι προφανές όμως ότι υπάρχουν και άλλοι, πέραν του τσιμέντου, παράγοντες που διαφοροποιούν τα σκυροδέματα μεταξύ των, υπάρχουν διαφοροποιημένες αρχές στις οποίες στηρίζεται η προτυποποίηση τους και υπάρχουν άλλες δοκιμές και άλλα όρια με τα οποία ελέγχεται η ποιότητα των σκυροδεμάτων. [2]

Ορολογία σκυροδέματος.

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

- Νωπό σκυρόδεμα είναι το σκυρόδεμα που μόλις έχει παρασκευασθεί περιέχοντας όλα τα συστατικά του και το οποίο είναι ακόμα σε πλαστική κατάσταση δυνάμενο να συμπυκνωθεί και να μορφοποιηθεί στα καλούπια.
- Σκληρυμένο σκυρόδεμα είναι αυτό που βρίσκεται σε στερεά κατάσταση και έχει ήδη αναπτύξει αντοχές.
- Επιτόπου παρασκευασμένο σκυρόδεμα είναι αυτό που δημιουργείται στον τόπο της εφαρμογής.
- Έτοιμο σκυρόδεμα είναι αυτό που έχει παρασκευασθεί σε ένα σταθερό ή κινούμενο αναμικτήρα και προσάγεται φρέσκο στον τόπο της εφαρμογής του.
- Κανονικού βάρους σκυρόδεμα είναι αυτό που έχει μία πυκνότητα μεταξύ 2100 και 2600 Kg/m³, ενώ ελαφροβαρές είναι το σκυρόδεμα με πυκνότητα μεταξύ 800 και 2100 Kg/m³ που προκύπτει από την χρησιμοποίηση ελαφροβαρών αδρανών και βαρύ σκυρόδεμα όταν η πυκνότητα του είναι μεγαλύτερη των 2600 Kg/m³.

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

Πίνακας 1.1. Κατηγορίες Σκυροδέματος

Κατηγορίες Σκυροδέματος

Κατηγορία Σκυροδέματος	f_{ck} κυλίνδρου (Μpa)	f_{ck} κύβου (Μpa)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55

f_{ck} Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος. Εκείνη η τιμή της αντοχής σε θλίψη κάτω της οποίας υπάρχει 5% πιθανότητα να βρεθεί η τιμή της αντοχής (f_{28}) ενός τυχαίου δοκιμίου.

11

Ωστόσο, η χαμηλή αντοχή του σκυροδέματος σε κατάσταση εφελκυσμού επιβάλλει την ενίσχυση του με μεταλλικό οπλισμό (χαλύβδινες ράβδους ή πλέγμα) προκειμένου να αυξηθούν οι μηχανικές του ιδιότητες, οδηγώντας έτσι στη δημιουργία του οπλισμένου σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα γνωρίζει τεράστια τεχνολογική ανάπτυξη, σαν ένα ποιοτικό υλικό υψηλής επιτελεστικότητας. Προκειμένου να ανταποκριθούν οι κατασκευαστές στις όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις των οικοδομών, δημιουργούνται συνεχώς νέοι τύποι ειδικών τσιμέντων, ενισχυμένης σύστασης χάλυβες και ειδικά πρόσθετα, με συνεχώς βελτιούμενες ιδιότητες και εφαρμογές για οικονομικότερη και μακροβιότερη διάρκεια ζωής των κατασκευών. [2]

Κατηγορίες ειδικών σκυροδεμάτων

Υπάρχουν πολλές κατηγορίες ειδικών σκυροδεμάτων, ανάλογα με την εφαρμογή και τις απαιτήσεις, με κατάλληλη κάθε φορά σύνθεση, και με ανάλογα πλεονεκτήματα, όπως [3]:

- Αντλήσιμο Σκυρόδεμα
- Σκυρόδεμα για Περιοχές με Κίνηση Οχημάτων
- **Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ)**
- Σκυρόδεμα με αντοχή σε Παγετό και Κύκλους Πήξης/Τήξης

- Σκυρόδεμα Υψηλής Αντοχής
- Σκυρόδεμα παραγόμενο με Ολισθαίνοντα Καλούπια
- Στεγανό Σκυρόδεμα
- Εμφανές Σκυρόδεμα
- Σκυρόδεμα Μεγάλου Όγκου
- Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα
- Σκυρόδεμα μεγάλου ειδικού βάρους
- Σκυρόδεμα υποβρύχιων κατασκευών
- Ελαφροσκυρόδεμα
- Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα
- Έγχρωμο Σκυρόδεμα
- Ύφυγρο Σκυρόδεμα για Προκατασκευασμένα Στοιχεία Σκυροδέματος
- Σκυρόδεμα με αυξημένη Πυραντίσταση
- Σκυρόδεμα Επένδυσης Σηράγγων
- Μονολιθικό Σκυρόδεμα
- Γρανολιθικό Σκυρόδεμα

1.1.1 Τσιμέντο

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

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

- $2(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$
- $2(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$
- $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Ca}(\text{OH})_2 + 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Από τα σχηματιζόμενα σύμφωνα με τις παραπάνω αντιδράσεις προϊόντα, η στερεότητα του σκυροδέματος οφείλεται στο $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ και η αλκαλική φύση του στο $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Στη χημεία του τσιμέντου, ακολουθούνται συχνά οι εξής συντμήσεις για κωδικοποίηση των βασικών του συστατικών :

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

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

υψηλές αντοχές, γι' αυτό έχει ευρεία χρήση στις δομικές κατασκευές, όπως επίσης και στα υδραυλικά έργα.

1.1.1.1 Συστατικά τσιμέντου

Το τσιμέντο συνίσταται από τα κύρια συστατικά του, από τα δευτερεύοντα συστατικά του, από το θειικό ασβέστιο και τα πρόσθετα.

Ως **κύρια συστατικά**, εκτός του κλίνκερ (K) το οποίο έχει και τον σημαντικότερο ρόλο, χρησιμοποιούνται η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων (S), διάφορα ποζολανικά υλικά φυσικά (P) ή τεχνητά (Q), διάφορες πυριτικές τέφρες (V) ή ασβεστικές (W), burnt shale (T), ασβεστόλιθος (L) και πυριτική παιπάλη (D). Τα **δευτερεύοντα συστατικά** επιτρέπεται να προστεθούν σε μικρά ποσοστά (minor additional constituents-mac) μέσα στο τσιμέντο και σε αυτά περιλαμβάνονται και τα υλικά που είναι γνωστά και ως γεμιστικά (φίλερς – fillers). Επιτρέπεται η ενσωμάτωση των δευτερευόντων συστατικών έως 5% κατά βάρος στο τσιμέντο. Τα **Fillers** είναι ειδικά επιλεγμένα φυσικά ή τεχνητά ανόργανα ορυκτά υλικά τα οποία μετά από κατάλληλη προετοιμασία που στοχεύει στη διαμόρφωση της κοκκομετρικής τους κατανομής, βελτιώνουν φυσικές ιδιότητες του τσιμέντου όπως π.χ. είναι η εργασιμότητά του, ενώ παράλληλα δεν αυξάνουν την απαίτησή του σε νερό και δεν επηρεάζουν αρνητικά την ανθεκτικότητα των σκυροδεμάτων ή των κονιαμάτων. Είναι αδρανή ή έχουν ασθενείς υδραυλικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ή ποζολανικές ιδιότητες χωρίς να πρέπει να υπακούουν σε συγκεκριμένες απαιτήσεις. Το **θειικό ασβέστιο** προστίθεται στα άλλα συστατικά του τσιμέντου κατά την τελική άλεση του κλίνκερ με σκοπό να ρυθμίσει την πήξη του τσιμέντου. Το ακριβές ποσοστό προσθήκης εξαρτάται από την περιεκτικότητα των κύριων συστατικών σε SO₃ καθώς και από τα θειικά του καυσίμου. Το θειικό ασβέστιο μπορεί να προστεθεί κυρίως ως γύψος, που είναι και η περισσότερο συνηθισμένη μορφή. Ως **πρόσθετα** χαρακτηρίζονται τα συστατικά που προστίθενται στο τσιμέντο και δεν ανήκουν σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες και έχουν σκοπό τη βελτίωση είτε της παραγωγικής διαδικασίας είτε των ιδιοτήτων του τσιμέντου. Η ποσότητα των προσθέτων δεν πρέπει να υπερβαίνει σε ξηρή βάση το 1% κ.β. του τσιμέντου για ανόργανα πρόσθετα ή το 0.5% κ.β. για οργανικά πρόσθετα. Τα πρόσθετα αυτά δεν πρέπει να προκαλούν διάβρωση του οπλισμού ή να επιβαρύνουν τις ιδιότητες του τσιμέντου καθώς και των σκυροδεμάτων ή κονιαμάτων που προκύπτουν από αυτό. ^[4] Τα τσιμέντα περιέχουν προσμίξεις, οι οποίες με τη φυσική ή χημική δράση τους επηρεάζουν τις ιδιότητες του τσιμέντου.

Οι προσμίξεις που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι :

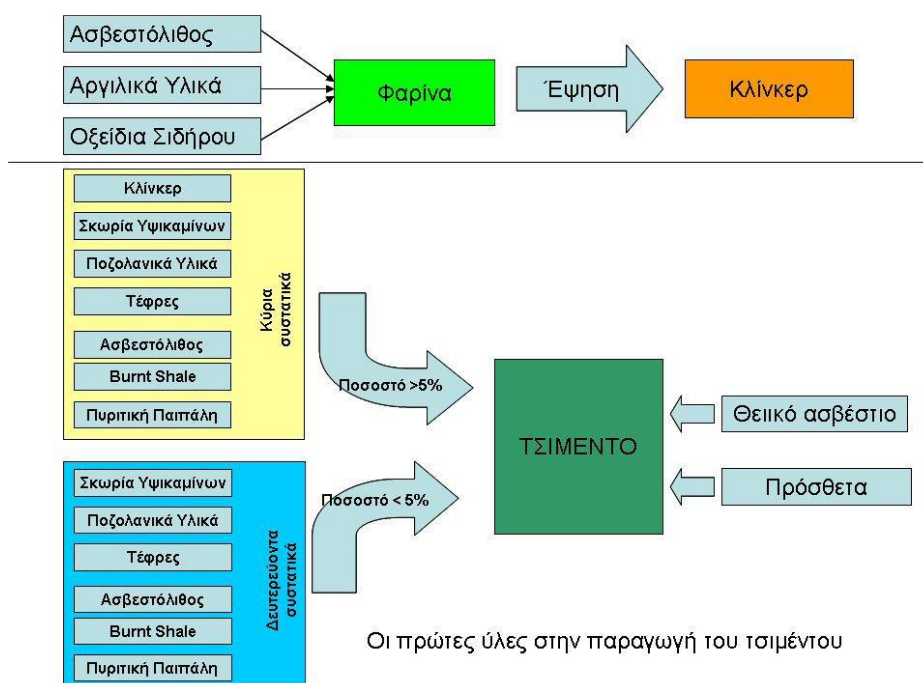
1. Φυσικές ποζολάνες
2. Τεχνητές ποζολάνες όπως :
 - Ιπτάμενες τέφρες
 - Πυριτική παιπάλη
3. Φυσικοί ηφαιστειακοί λίθοι
4. Σκωρίες υψικαμίνων
5. Τέφρα κελύφους ρυζιού

1.1.1.2 Τύποι τσιμέντου

Στο πλαίσιο της έκδοσης κοινών Ευρωπαϊκών κανονισμών για όλες τις χώρες της CEN (Committee Europeenne de Normalisation) στην οποία μετέχει και η Ελλάδα, έχουν διαμορφωθεί σειρές προτύπων που αφορούν το τσιμέντο και το σκυρόδεμα. Το πρότυπο αυτό έχει τεθεί σε ισχύ στην Ελλάδα από το 2001 (ΕΛΟΤ EN 197-1).

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

1. CEM I, Τσιμέντο Portland
2. CEM II, Σύνθετα τσιμέντα Portland
3. CEM III, Σκωριοτσιμέντα
4. CEM IV, Ποζολανικά τσιμέντα
5. CEM V, Σύνθετα τσιμέντα



Σχήμα 1.2. Οι πρώτες ύλες στην παραγωγή του τσιμέντου

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

Πίνακας 1.3: Τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1

Κυριότεροι Τύποι Τσιμέντου			Σύνθεση (% μέρη κατά βάρος) ¹										
			Κύρια συστατικά									Δευτερεύοντα συστατικά	
			Κλίνκερ τσιμέντου Portland	Σκωρία	Πυριτική Παιπάλη	Ποζολάνη		Ιπτάμενη Τέφρα		Ψημένος σχιστόλιθος	Ασβεστόλιθος		
						Φυσική	Τεχνητή	Πυριτική	Ασβεστούχος				
-Όνομασία	Τύπος Τσιμέντου	K	S	D ²	P	Q	V	W	T	L ⁴	LL ⁵		
CEM I	Τσιμέντο Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Τσιμέντο Portland με σκωρία υφικαμίνων	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Τσιμέντο Portland με πυριτική παιπάλη	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	0-5
Τσιμέντο Portland με ποζολάνη	Τσιμέντο Portland με ποζολάνη	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
Τσιμέντο Portland με ιπτάμενη τέφρα	Τσιμέντο Portland με ιπτάμενη τέφρα	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
Τσιμέντο Portland με ψημένο σχιστόλιθο	Τσιμέντο Portland με ψημένο σχιστόλιθο	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
Τσιμέντο Portland με ασβεστόλιθο	Τσιμέντο Portland με ασβεστόλιθο	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
Τσιμέντο Portland - σύνθετο ³	Τσιμέντο Portland - σύνθετο ³	CEM II/A-M	80-94	6-20							—	—	0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35							—	—	0-5
CEM III	Σκωριοτσιμέντο	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ποζολανικό Τσιμέντο ³	CEM IV/A	65-89	—	11-35				—	—	—	0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	36-55				—	—	—	0-5	
CEM V	Σύνθετο Τσιμέντο	CEM V/A	40-64	18-30	—	18-30		—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-39	31-50	—	31-50		—	—	—	—	0-5	

1.1.1.3 Μηχανικές, φυσικές και χημικές απαιτήσεις του τσιμέντου

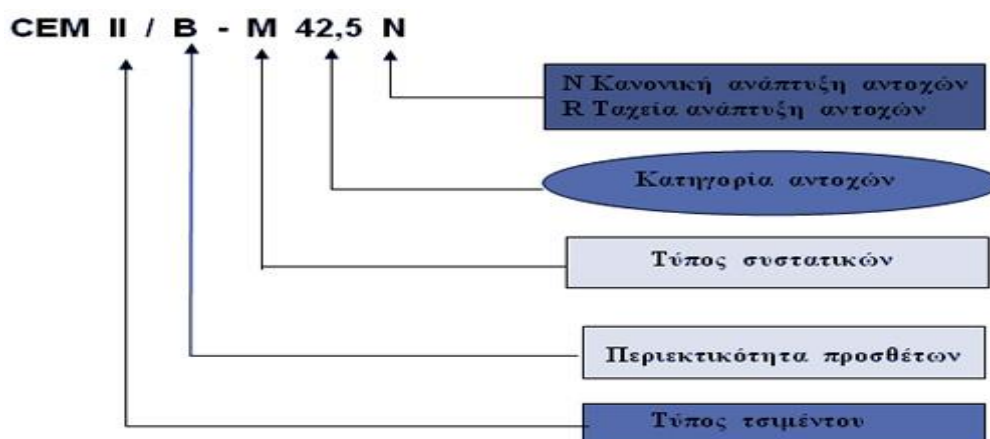
Το σύνολο των τσιμέντων πρέπει να καλύπτουν ένα σύνολο ιδιοτήτων προκειμένου να είναι αποδεκτά. Οι κανονικές αντοχές του τσιμέντου είναι οι θλιπτικές που προσδιορίζονται σύμφωνα με το EN 196-1 στις 28 ημέρες και θα πρέπει να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις που δίνονται στον πίνακα 1.4. Όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες προβλέπεται ο έλεγχος μόνο της αρχής χρόνου πήξης και της σταθερότητας του όγκου και θα πρέπει να καλύπτουν τις απαιτήσεις του παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.4: Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις τσιμέντων

Κατηγορία αντοχής	Αντοχή σε θλίψη, MPa (N/mm ²)				Αρχικός χρόνος πήξης min	Διόγκωση (Διαστολή) mm
	Αρχική αντοχή		Τοπική αντοχή (όρια)			
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες			
32.5 N	-	≥ 16.0	≥ 32.5	≤ 52.5	≥ 75	≤ 10
32.5 R	≥ 10.0	-				
42.5 N	≥ 10.0	-	≥ 42.5	≤ 62.5	≥ 60	
42.5 R	≥ 20.0	-				
52.5 N	≥ 20.0	-	≥ 52.5	-	≥ 45	
52.5 R	≥ 30.0	-				

Όσον αφορά τις χημικές απαιτήσεις ελέγχονται μόνο η απώλεια πύρωσης, το αδιάλυτο υπόλειμμα, τα SO₃, τα χλωριόντα και η ποζολανικότητα. Ο συμβολισμός των διαφόρων τσιμέντων, σύμφωνα με το πρότυπο EN 197-1, άρα και με το ΕΛΟΤ EN 197-1, καθορίζεται από:

- τον κύριο τύπο τσιμέντου,
- το ποσοστό clinker που περιέχεται στο τσιμέντο,
- τον τύπο του δεύτερου κύριου συστατικού,
- την κατηγορία αντοχής,
- το επίπεδο της πρώιμης αντοχής.

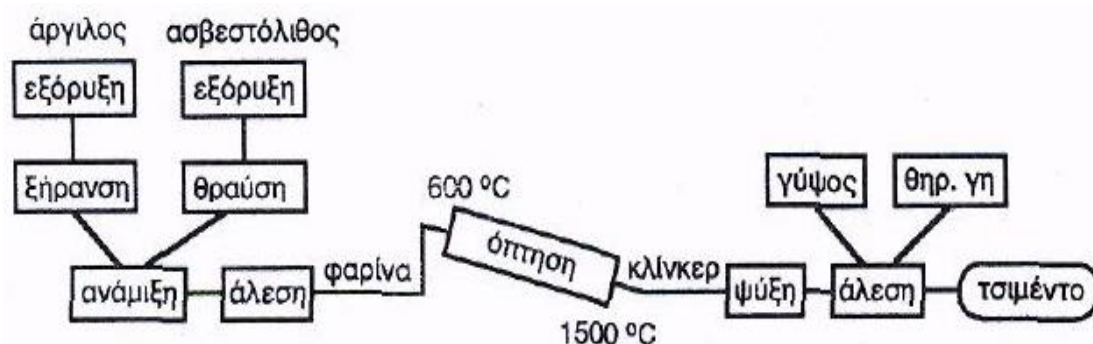


Σχήμα 1.5. Συμβολισμός των διαφόρων τύπων τσιμέντου του ευρωπαϊκού προτύπου

1.1.1.4 Τσιμέντο Portland

Υπάρχουν διάφορα είδη τσιμέντων αλλά σήμερα στην αγορά κυριαρχεί ένα είδος τσιμέντου, το τσιμέντο Portland. Το τσιμέντο Portland και οι διάφοροι τύποι του είναι υδραυλικές κονίες, αφού δεν απαιτούν τη χρησιμοποίηση ποζολανικού υλικού για να αναπτύξουν αντοχές κάτω από το νερό. Ως τσιμέντο Portland ορίζεται το προϊόν που προκύπτει μετά από έψηση σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης (1380-1420 °C) ενός κατάλληλα αλεσμένου και πλήρως ομογενοποιημένου μίγματος που αποτελείται από 75% περίπου ασβεστολιθικά υλικά και 25% περίπου αργυλοπυριτικά υλικά και συνάλεση του προκύπτοντος προϊόντος, που καλείται κλίνκερ, με την κατάλληλη ποσότητα γύψου ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). [1]

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



Σχήμα 1.6: Σχηματικό διάγραμμα παρασκευής του τσιμέντου Portland.

1.1.1.5 Ενυδάτωση των τσιμέντων Portland

Η ενυδάτωση του τσιμέντου είναι μια διαδικασία περισσότερο πολύπλοκη από την απλή μετατροπή άνυδρων ενώσεων στις αντίστοιχες ενυδατωμένες και περιλαμβάνει ένα σύνολο χημικών και φυσικο-μηχανικών μεταβολών που έχουν ως αποτέλεσμα την πήξη και την ανάπτυξη αντοχών του συστήματος τσιμέντο-νερό. Μερική ενυδάτωση του τσιμέντου μπορεί να προκαλέσει ακόμα και η αυξημένη υγρασία του χώρου, αλλά για πλήρη ενυδάτωση απαιτείται η ανάμιξη με ικανή ποσότητα νερού. Ο λόγος νερού προς τσιμέντο καθορίζει τη ρεολογία του μίγματος, την πορεία της ενυδάτωσης και τις ιδιότητες του ενυδατωμένου υλικού και κυμαίνεται συνήθως από 0.3 έως 0.6. Η ενυδάτωση του τσιμέντου Portland είναι μια σειρά αντιδράσεων μεταξύ των επιμέρους φάσεων του κλίνκερ, της γύψου και του νερού, οι οποίες προχωρούν είτε παράλληλα είτε διαδοχικά με διαφοροποιημένους ρυθμούς και αλληλεπιδράσεις. Οι αντιδράσεις ενυδάτωσης που λαμβάνουν χώρα όταν το τσιμέντο αναμιχθεί με το νερό είναι σύνθετες και αλληλεξαρτώμενες. Τα συστατικά που συμμετέχουν στις αντιδράσεις αυτές είναι:

- Αλίτης (C3S με προσμίξεις ξένων ιόντων)
- Βελίτης (C2S με προσμίξεις ξένων ιόντων)

- Αργιλική φάση
- Φερριτική φάση
- Ελεύθερο CaO
- Θεϊκά αλκάλια
- Θεϊκό ασβέστιο ως διωδρίτης, ημιωδρίτης ή ανυδρίτης
- Νερό

Το C3S συνεισφέρει στην γρήγορη ενυδάτωση του τσιμέντου, στην καλή αρχική και τελική αντοχή και στην ανάπτυξη υψηλής θερμότητας ενυδάτωσης. Αντίστοιχα, το C2S συνεισφέρει στην αργή ενυδάτωση, στην καλή τελική αντοχή και στην ανάπτυξη χαμηλής θερμότητας ενυδάτωσης. Το αργιλικό τριασβέστιο (C3A) συνεισφέρει στην γρήγορη ενυδάτωση, στην ανάπτυξη υψηλής θερμότητας ενυδάτωσης και στην αρχική αντοχή. Τέλος το αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο (C4AF) συνεισφέρει ελάχιστα στην ενυδάτωση, προκαλεί ασήμαντη ανάπτυξη αντοχής και προσδίδει έντονο χρώμα (σκούρο καφέ ή γκριζοπράσινο). Με λίγα λόγια επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό τις ιδιότητες του τσιμεντοπολτού. Στην αρχή της ενυδάτωσης, η διαδικασία ελέγχεται από το ρυθμό διαλυτοποίησης των άνυδρων συστατικών του κλίνκερ και της γύψου, στη συνέχεια από το ρυθμό σχηματισμού των ενυδατωμένων ενώσεων και στο τέλος από το ρυθμό διάχυσης του νερού και των ιόντων.

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

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

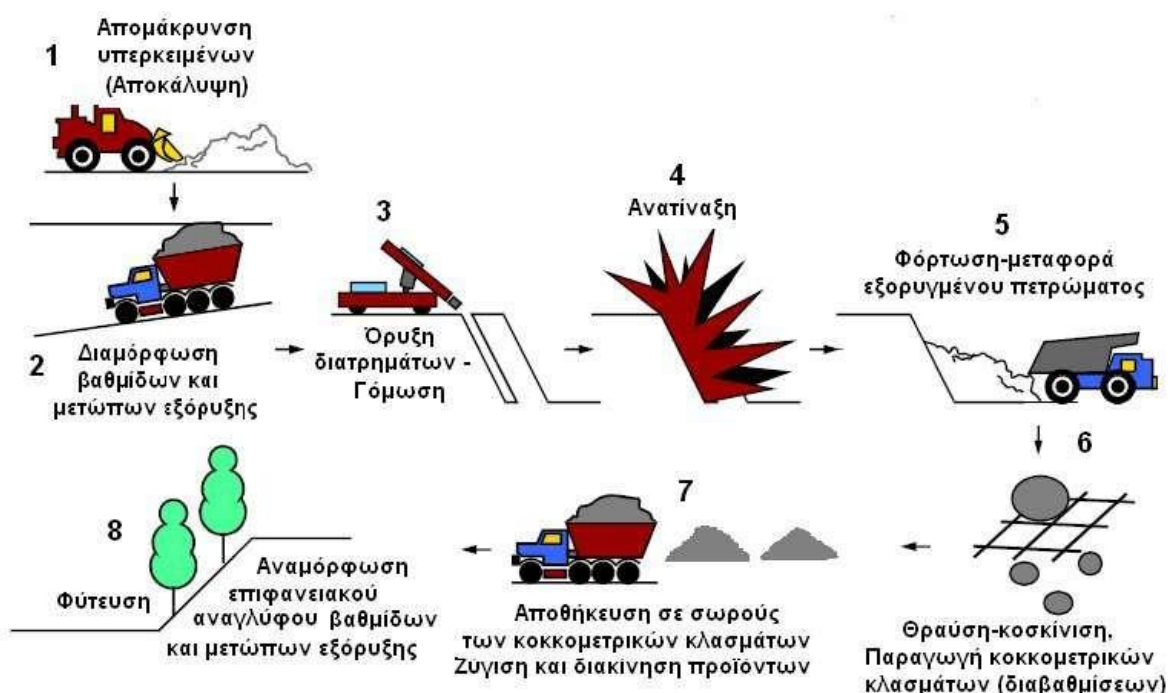
Λόγω της διαφορετικής σύνθεσής τους, τα συστατικά του τσιμέντου ενυδατώνονται με διαφορετικούς ρυθμούς. Έτσι τα αργιλικά συστατικά είναι υπεύθυνα κυρίως για την απώλεια ρευστότητας και την πήξη του τσιμεντοπολτού, ενώ τα πυριτικά παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην σκλήρυνση, δηλαδή στο ρυθμό ανάπτυξης της αντοχής. Ο ρυθμός ενυδάτωσης εξαρτάται κυρίως από τη σύσταση του αλίτη και ειδικότερα από τις προσμίξεις του, καθώς και από τις συνθήκες έψησης του κλίνκερ. Ο ρυθμός αυξάνεται με αύξηση των SO₃ στο τσιμέντο και ελαττώνεται με αύξηση του λόγου β-C2S / C3S στο κλίνκερ. Οι αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου είναι εξώθερμες με αποτέλεσμα να παρατηρείται έκλυση θερμότητας ιδιαίτερα κατά τα πρώτα στάδια. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ακολουθεί προσεγγιστικά το ρυθμό ενυδάτωσης του τσιμέντου και

επηρεάζεται από τους ίδιους παράγοντες, δηλαδή τη σύσταση και τη λεπτότητα του τσιμέντου. Η συνολική θερμότητα που εκλύεται είναι περίπου ίδια με το άθροισμα της θερμότητας που αντιστοιχεί στην ενυδάτωση καθεμιάς από τις επιμέρους φάσεις του τσιμέντου. Σε ένα τυπικό τσιμέντο Portland το 50% περίπου της συνολικής θερμότητας εκλύεται μέχρι την τρίτη μέρα, το 75% περίπου μέχρι την έβδομη και το 85-90% περίπου μέχρι τους 6 μήνες.

1.1.2 Αδρανή υλικά

Αδρανή υλικά ονομάζονται τα λίθινα υλικά που δεν επιφέρουν χημικές μεταβολές στις σύνθετες τεχνητές ύλες του μίγματος. Σαν αδρανή, στην περίπτωση του σκυροδέματος, χαρακτηρίζονται τα προστιθέμενα υλικά διαφόρου μεγέθους που δεν αντιδρούν με την άσβεστο και το μίγμα τσιμέντου-νερού. Τα αδρανή αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του όγκου του σκυροδέματος (60-70 %) και επηρεάζουν τόσο την αντοχή του όσο και τις φυσικές του ιδιότητες [5]. Τα αδρανή στην Ελλάδα είναι κατά κανόνα, χημικώς αδρανή τεμάχια ασβεστολιθικών κυρίως πετρωμάτων τα οποία χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σκυροδέματος και ως υλικά οδοστρωσίας, ενώ τα μεγάλοι μεγέθους τεμαχίων ως σκύρα σιδηροδρομικών γραμμών.

Η ολοκληρωμένη διαδοχή φάσεων παραγωγής αδρανών υλικών δίνεται στο Σχήμα 1.7.



Εικόνα 1.7 Αλληλουχία φάσεων εξόρυξης και παραγωγής αδρανών υλικών

Η κύρια χρήση των αδρανών είναι στην παραγωγή σκυροδέματος. Αυτά, λόγω γωνιώδους και ακανόνιστου σχήματος συνδέονται μεταξύ τους και συγκρατούνται στο σκυρόδεμα με τη βοήθεια της τσιμεντόπαστας (μείγμα τσιμέντου και νερού). Όμως, επειδή το τσιμέντο είναι πολύ ακριβό ως υλικό (μεγάλο κόστος παραγωγής), η περιεχόμενη ποσότητά του στο σκυρόδεμα πρέπει να ελαχιστοποιείται υπό την προϋπόθεση βέβαια διατήρησης ικανοποιητικής της αντοχής του. Το 70-80% κατά βάρος του σκυροδέματος αποτελείται από αδρανή, γεγονός που συμβάλλει στο να

διατηρείται χαμηλό το κόστος του σκυροδέματος, επειδή τα αδρανή είναι σχετικώς φθηνά υλικά, τόσο ως πρώτη ύλη όσο και ως διαδικασία παραγωγής. Δρουν δηλαδή ως «πληρωτικά» στο σκυρόδεμα. Αυτό δεν είναι το μοναδικό πλεονέκτημα από τη χρήση αδρανών.

Τα αδρανή, εκτός των άλλων, προσφέρουν αξιόλογα πλεονεκτήματα και από τεχνικής άποψης στο σκυρόδεμα. Επηρεάζουν θετικά τη στατική συμπεριφορά των κατασκευών από σκυρόδεμα, εξασφαλίζουν μεγάλη “σταθερότητα όγκου” και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των κατασκευών σε σχέση με την περίπτωση χρήσης μόνο τσιμεντοκονιάματος. Τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά (προδιαγραφές αντοχής και χρήσης) του σκυροδέματος καθορίζουν τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των αδρανών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Είναι γνωστό ότι, χαμηλής πυκνότητας αδρανή με μεγάλο πορώδες παράγουν ασθενές (χαμηλής αντοχής) σκυρόδεμα με μικρή αντίσταση σε φθορά, ενώ μεγάλης πυκνότητας και σκληρά αδρανή συμβάλλουν στην παραγωγή σκυροδέματος μεγάλης αντοχής (σε θλίψη και εκτριβή). Τα αδρανή του σκυροδέματος πρέπει να είναι καθαρά, χωρίς επιφανειακή σκόνη, άργιλο και οργανικές ύλες (συνήθως πλυμένα), σκληρά και μεγάλης αντοχής. Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή σκυροδέματος έχουν διάφορα μεγέθη και ακανόνιστο σχήμα.

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

Πίνακας 1.8 Κατάταξη αδρανών με βάση το μέγεθος του κόκκου

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

Οι κόκκοι μπορεί να είναι στρογγυλοί, κυβόμορφοι, γωνιώδεις, πλακόμορφοι ή επιμήκεις με τον περιορισμό το πλάτος προς το μήκος να είναι 1/3. Από πλευράς εργασιμότητας καλύτεροι είναι οι στρογγυλοί ή κυβόμορφοι κόκκοι ενώ από πλευράς μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος, οι κόκκοι με ανώμαλη επιφάνεια. Δηλαδή συνολικά καλύτερα είναι τα θραυστά αδρανή με κόκκους που δεν είναι επιμήκεις και πλακοειδείς. Το κυριότερο χαρακτηριστικό των αδρανών που επηρεάζει την ποιότητα του σκυροδέματος είναι η κοκκομετρική τους διαβάθμιση και στη συνέχεια οι περιεχόμενες επιβλαβείς ουσίες, η αντοχή τους σε θλίψη και τριβή, το σχήμα και η υφή της επιφάνειάς τους, η απορρόφηση νερού και τέλος η αντοχή τους σε φυσικές μεταβολές και χημικές επιδράσεις. Ανάλογα με τη χρήση του σκυροδέματος και κυρίως σε ειδικές περιπτώσεις κατασκευών που διατρέχουν μεγάλο κίνδυνο χημικής προσβολής, η επιλογή των αδρανών πρέπει να πληροί τις διεθνείς προδιαγραφές DIN EN 12620/A1, EN 12620:2002 (DIN EN 12620/A1, 2002). Η καταλληλότητα των αδρανών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του σκυροδέματος στην Ελλάδα προδιαγράφεται από τις απαιτήσεις του ΕΛΟΤ 408, ΕΛΟΤ EN 12620 «Αδρανή για σκυρόδεμα» και του ΚΤΣ-2016.

Οι ιδιότητες που πρέπει να πληρούν ελέγχονται ως προς τα εξής χαρακτηριστικά ^[6] :

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη σύνθεση και την αντλησιμότητα του σκυροδέματος (συνολική επιφάνεια αδρανών-μέγεθος των κόκκων και το σχήμα αυτών).
- Φυσικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.
- Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά (καθαρότητα). Δεν πρέπει να επηρεάζουν δυσμενώς την πήξη, τη σκλήρυνση, την αντοχή, τη σταθερότητα του όγκου και την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση. [2]

Για αδρανή υλικά μπορούν θεωρητικά να χρησιμοποιηθούν οποιαδήποτε υλικά συγκεντρώνουν τρεις βασικές ιδιότητες: επαρκή αντοχή, επαρκή πρόσφυση και χημική ανθεκτικότητα. Τα καταλληλότερα πετρώματα είναι τα πυριτικά και τα ασβεστολιθικά [4].

Τα αδρανή μπορεί να είναι φυσικά ή τεχνητά. Φυσικά θεωρούνται αυτά που χρησιμοποιούνται όπως έχουν συλλεχθεί από τη φύση, ενώ τεχνητά θεωρούνται εκείνα τα οποία λαμβάνονται από πετρώματα μετά από θραύση σε κατάλληλα μηχανήματα. Υπάρχουν και κατηγορίες αδρανών όπου κατασκευάζονται από βιομηχανίες για ειδική χρήση. Από τις ιδιότητες του σκυροδέματος που επηρεάζονται από τα αδρανή, η πλέον σημαντική για τη διάβρωση είναι το πορώδες. Αυτό εμφανίζεται χαμηλότερο στην περίπτωση των φυσικών αδρανών, πράγμα που προσδίδει στο σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με αυτά, μεγαλύτερη αντοχή στην διάβρωση.

Ως προς την κοκκομετρική σύνθεση ή διαβάθμιση θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι κόκκοι των αδρανών υλικών στηρίζονται ο ένας πάνω στον άλλο, αλλά λόγω του ακανόνιστου πολυγωνικού σχήματος που έχουν δεν εφάπτονται απόλυτα μεταξύ τους παρά αφήνουν ενδιάμεσα κενά. Τα κενά αυτά μεταξύ των αδρανών τα γεμίζει το κονίαμα που συνδέει με αυτό τον τρόπο τους κόκκους σε ένα συμπαγές υλικό. Η ποσότητα του κονιάματος πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τα μεταξύ των κόκκων κενά. Επειδή από την άλλη μεριά το κονίαμα είναι περισσότερο πορώδες και λιγότερο ανθεκτικό από το πέτρωμα των αδρανών, όσο λιγότερα είναι τα παραπάνω κενά, τόσο αυξάνεται η αντοχή και η πυκνότητα του σκυροδέματος. Προτιμώνται τα αδρανή υλικά όπου το κλάσμα κόκκων διαμέτρου μικρότερης από 250 μm είναι το 10-25 % της συνολικής ποσότητας. Τα αδρανή δεν πρέπει να έχουν στην επιφάνειά τους, μέσα στη μάζα τους ή μεταξύ τους ξένες ουσίες που μπορεί να εμποδίσουν την πρόσφυση με το κονίαμα ή να έχουν επιβλαβή χημική επίδραση στο τσιμέντο ή στο χαλύβδινο οπλισμό. Επίσης θα πρέπει να ελέγχεται κατά πόσο τα αδρανή περιέχουν ποσότητες πυριτίου επιδεκτές σε προσβολή από τα αλκάλια (Na_2O και K_2O) που προέρχονται από το τσιμέντο, ενώ παράλληλα το σκυρόδεμα εκτίθεται σε υγρό περιβάλλον. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει ο κίνδυνος αντίδρασης μεταξύ των αλκαλίων και των αδρανών με αποτέλεσμα τη φθορά ή και την καταστροφή του σκυροδέματος. [7]

Τα αδρανή υλικά πρέπει να είναι:

- σταθερά ώστε να μην θρυμματίζονται εύκολα
- ανθεκτικά από σκληρά πετρώματα (γρανίτες και ασβεστόλιθοι)
- καθαρά και απαλλαγμένα από φυτικές και άλλες επιβλαβείς προσμίξεις (πηλός, χημικά δραστικές ουσίες, άνθρακες).
- σταθερά στις καιρικές αλλαγές (μεταβολές θερμοκρασίας και υγρασίας)

- απαλλαγμένα από παιπάλη με διάμετρο μικρότερη από 0,075 mm
- καλά διαβαθμισμένα.

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

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

1.1.3 Το νερό

Το νερό που προστίθεται στο τσιμέντο για τη δημιουργία άλλης τσιμεντόπαστας, είναι απαραίτητο για άλλης αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου, οπότε ξεκινούν η πήξη και σκλήρυνση του σκυροδέματος με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας. Η ποιότητα και η ποσότητα του νερού επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα του σκυροδέματος. Το νερό δεν πρέπει να περιέχει ουσίες που μπορούν να βλάψουν ή να επηρεάσουν άλλης αντιδράσεις ενυδάτωσης ή να προκαλέσουν διάβρωση του εγκιβωτισμένου οπλισμού.

Ποιότητα Νερού

Το νερό ανάμιξης που χρησιμοποιείται στην παραγωγή σκυροδέματος πρέπει να ικανοποιεί άλλης απαιτήσεις του προτύπου ΕΛΟΤ EN 1008. Στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 1008 γίνεται διάκριση «τύπων νερού», ανάλογα με την προέλευση του νερού. Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι μπορεί να διακριθούν οι ακόλουθοι «τύποι νερού»: πόσιμο νερό, νερό που ανακτάται από άλλης διάφορες διεργασίες στη μονάδα παραγωγής σκυροδέματος, υπόγειο νερό, επιφανειακό νερό και νερό βιομηχανικών αποβλήτων, θαλασσινό νερό ή υφάλμυρο νερό, νερό αποχετεύσεων. Νερό που είναι αποδεδειγμένα πόσιμο, άλλης είναι αυτό που προέρχεται από το δίκτυο ύδρευσης, θεωρείται κατάλληλο και δεν χρειάζεται έλεγχο. Νερό άλλης προέλευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο εφ' όσον ελεγχθεί και διαπιστωθεί ότι πληρούνται οι απαιτήσεις του προτύπου ΕΛΟΤ 1008.

Οι έλεγχοι που γίνονται στο νερό είναι ^[3] :

- Το νερό πρέπει πρώτα να αναλυθεί για ίχνη λιπαρών ουσιών και ελαίων, αφρογόνες ουσίες (απορρυπαντικά), αιωρούμενα συστατικά, οσμές (π.χ. χωρίς οσμή υδρόθειου μετά από προσθήκη υδροχλωρικού οξέος), οξύτητα ($\text{pH} \geq 4$) και χουμικές ενώσεις.
- Το περιεχόμενο του νερού σε χλώριο δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 500 mg/l, εάν πρόκειται για προεντεταμένο σκυρόδεμα ή κονίαμα χυτών αγκυρώσεων, τα 1000 mg/l για σκυρόδεμα με οπλισμό ή εμβαπτισμένα μεταλλικά στοιχεία τα επίπεδα ή τέλος τα 4500 mg/l για σκυρόδεμα χωρίς οπλισμό ή εμβαπτισμένα μεταλλικά στοιχεία.

- Το περιεχόμενο του νερού σε θειικά δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2000 mg/l. Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα αδρανή ευαίσθητα σε αλκάλια, πρέπει να ελέγχεται το περιεχόμενο του νερού σε αλκάλια. Το περιεχόμενο σε αλκάλια (ισοδύναμο Na₂O) δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 1500 mg/l. Σε περίπτωση που το όριο αυτό ξεπεραστεί, το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε περίπτωση που αποδειχθεί ότι έχουν ληφθεί κατάλληλα μέτρα για να αποτραπούν οι επιζήμιες αντιδράσεις αλκαλίων-αδρανών.
- Τέλος το νερό ελέγχεται για επιβλαβείς ρύπους, οπότε διεξάγονται ποιοτικοί έλεγχοι για σάκχαρα, φωσφορικά οξείδια, νιτρικά οξέα, μόλυβδο και ψευδάργυρο. Σε περίπτωση που τα αποτελέσματα είναι θετικά πρέπει είτε να καθοριστεί το περιεχόμενο ποσοστό της εντοπισμένης ουσίας, είτε να διεξαχθούν έλεγχοι για τον χρόνο πήξης και τη θλιπτική αντοχή. Τα όρια ουσιών κατά τη χημική ανάλυση είναι:
 - Σάκχαρα 100 mg/l
 - Φωσφορικά άλατα, εκφρασμένα σε P₂O₅ 100 mg/l
 - Νιτρικά άλατα, εκφρασμένα σε NO⁻ 3500 mg/l
 - Μόλυβδος, εκφρασμένος σε Pb₂⁺ 100 mg/l
 - Ψευδάργυρος, εκφρασμένος σε Zn₂⁺ 100 mg/l

Η αρχή της πήξης κατά τον έλεγχο των δοκιμών με το νερό πρέπει να γίνει το νωρίτερο σε 1 ώρα και δεν πρέπει να διαφέρει περισσότερο από 25% από τον αρχικό χρόνο πήξης σε δοκίμια με απιονισμένο ή απεσταγμένο νερό. Η ολοκλήρωση της πήξης δεν πρέπει να ξεπερνά τις 12 ώρες και δεν πρέπει να διαφέρει περισσότερο από 25% από τον χρόνο ολοκλήρωσης της πήξης σε δοκίμια με απιονισμένο ή απεσταγμένο νερό. [7]

Η μέση θλιπτική αντοχή μετά από 7 ημέρες σε δοκίμια που έχουν παραχθεί με τη συγκεκριμένη ποιότητα νερού πρέπει να φτάνει τουλάχιστον το 90% της θλιπτικής αντοχής αντίστοιχων δοκιμών που έχουν παραχθεί με απιονισμένο ή απεσταγμένο νερό.

Το νερό μπορεί να θερμανθεί κατά την ανάμιξη ή να ψυχθεί (παγάκια) για να επιτευχθεί η σωστή θερμοκρασία του σκυροδέματος κατά την παράδοση, όταν πρέπει να γίνει σκυροδέτηση σε κρύο ή ζεστό καιρό αντίστοιχα ($5^{\circ}\text{C} \leq T \leq 32^{\circ}\text{C}$) [8].

Τέλος, τα νερά που δρουν εξωτερικά και μόνιμα στο σκυρόδεμα, όπως το θαλάσσιο νερό ή τα νερά των αποχετεύσεων, επηρεάζουν σημαντικά το σκυρόδεμα εφόσον η δράση τους είναι μόνιμη και η ποσότητα των επιβλαβών ουσιών ανεξάντλητη, αφού τα νερά αυτά ανανεώνονται συνεχώς [9].

Ο λόγος νερού / τσιμέντο (N/T ή W/C), είναι ο λόγος, κατά μάζα, της περιεκτικότητας σε ενεργό νερό προς την περιεκτικότητα σε τσιμέντο, στο νωπό σκυρόδεμα, ενώ περιεκτικότητα σε ενεργό νερό (effective water content) είναι διαφορά μεταξύ του συνολικού νερού που υπάρχει στο νωπό σκυρόδεμα και του νερού που απορροφάται από τα αδρανή έως την κορεσμένη και επιφανειακά ξηρή κατάσταση. Τα όρια αναλογίας νερού προς τσιμέντο κυμαίνονται γενικά μεταξύ 0.6 και 0.4, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ρευστότητα του παραγόμενου υλικού προκειμένου να είναι κατάλληλο για κατασκευές αλλά και η αντοχή του στη διάβρωση. Όταν η αναλογία νερού προς τσιμέντο ξεπεράσει το 0.6, η διαπερατότητα του σκυροδέματος, άρα και η πιθανότητα χημικής προσβολής, αυξάνεται δυσανάλογα, εξαιτίας της μεγάλης αύξησης του μεγέθους και του αριθμού

των τριχοειδών πόρων. Όταν η αναλογία νερού προς τσιμέντο κυμαίνεται μεταξύ 0.40 και 0.45, εξασφαλίζεται τόσο η μείωση του πορώδους όσο και η αύξηση της μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος [10].

1.1.4 Πρόσθετα και πρόσμικτα σκυροδέματος

1.1.4.1 Ορυκτά πρόσμικτα

Φυσικές ποζολάνες

Φυσικές ποζολάνες ονομάζονται οι "ηφαιστειακές γαίες" πλούσιες σε πυρίτιο και φτωχές σε ασβέστιο. Τέτοια υλικά είναι η κίσηρης, η ηφαιστειακή σποδός, η ηφαιστειακή τέφρα κλπ. Οι ποζολάνες αντιδρούν με το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (C-H) δημιουργώντας ένυδρο πυριτικό ασβέστιο (C-S-H). Η φυσική ποζολάνη μπορεί να προστεθεί είτε με συνάλεση κατά την παραγωγή τσιμέντου, είτε με ανάμιξη εκ των υστέρων κατά την παραγωγή του σκυροδέματος, αφού πρώτα έχει αλεστεί σε κλάσμα παρόμοιο με αυτό του τσιμέντου. Ο πίνακας 1.9 παρουσιάζει τη χημική σύσταση των κυριότερων φυσικών ποζολανών στην Ελλάδα [4].

Πίνακας 1.9: Χημική σύσταση σε οξείδια (%) διαφόρων ποζολανών που παράγονται στην Ελλάδα

	Μηλαϊκή γη				Θηραϊκή γη				Ποζολάνη Έδεσσας
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO_2	67.0	68.0	63.0	65.1	66.0	56.9	64.7	63.6	62.2
Al_2O_3	13.30	12.80	1-2.20	13.25	13.04	16.84	15.80	16.70	19.78
Fe_2O_3	2.00	1.60	2.00	2.41	4.26	9.33	3.60	4.10	3.99
CaO	2.00	1.40	1.50	2.05	3.58	7.65	4.10	3.60	4.57
MgO	0.71	0.50	1.50	1.10	1.10	4.07	2.10	1.40	2.70
K_2O	3.30	3.30	3.10	2.66	2.94	1.22	2.00	3.50	2.25
Na_2O	3.60	3.80	5.60	3.18	3.29	2.49	3.80	2.10	1.58
L.O.I	7.70	8.40	10.80	8.32	5.30	1.40	3.80	4.00	2.20

Η προσθήκη ποζολάνης στο σκυρόδεμα έχει τα παρακάτω θετικά αποτελέσματα [7] :

- Μείωση της θερμότητας ενυδάτωσης από την κατανάλωση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ μέσω της ποζολανικής αντίδρασης,
- Βελτίωση της αντοχής σε όξινο περιβάλλον λόγω της δέσμευσης του CH,
- Υστέρηση μηχανικών αντοχών στις πρώιμες ηλικίες διότι η ποζολανική αντίδραση είναι βραδεία,
- Μείωση πορώδους του σκυροδέματος λόγω της δημιουργίας C-H-S,
- προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση από τα ιόντα Cl^- εξαιτίας της δέσμευσης τους από την ποζολάνη,
- Μείωση του κόστους παραγωγής του τσιμέντου και των εκπομπών CO_2 λόγω αντικατάστασης του τσιμέντου από την ποζολάνη.

Τα τσιμέντα με πρόσθετο φυσική ποζολάνη είναι ανθεκτικότερα σε σχέση με το αμιγές τσιμέντο Portland σε μαλακά νερά, θαλασσινό νερό και σε αραιά διαλύματα αλάτων Mg. Επίσης λόγω της ικανότητας δέσμευσης των χλωριόντων συντελούν στην προστασία του οπλισμού στο θαλασσινό νερό ^[1].

Τεχνητές ποζολάνες

❖ *Ιπτάμενη τέφρα (fly ash)*

Ονομάζεται το λεπτότατο κλάσμα που προκύπτει από την καύση γαιανθράκων σε βιομηχανίες παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας και συλλέγεται από διάφορα μηχανικά ή ηλεκτροστατικά φίλτρα. Η διαφορά της ΙΤ από τη φυσική ποζολάνη είναι η περιεκτικότητα σε ελευθέρα άσβεστο (CaO) και η μικρότερη περιεκτικότητα σε νερό.

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 197-1 οι ιπτάμενες τέφρες διακρίνονται σε ^[4]:

- Αργιλοπυριτικές που προέρχονται από την καύση γαιανθράκων και ανθρακιδίων και έχουν ποζολανικές ιδιότητες
- Ασβεστοπυριτικές που προέρχονται από την καύση λιγνιτών και έχουν τόσο ποζολανικές όσο και υδραυλικές ιδιότητες.

Σύμφωνα με το Αμερικανικό πρότυπο ASTM C-618-94 οι ιπτάμενες τέφρες κατατάσσονται ανάλογα με τον τύπο του γαιάνθρακα από τον οποίο έχουν προέλθει σε:

- Class F ιπτάμενη τέφρα η οποία προέρχεται από βιτουμενιούχους άνθρακες με υψηλό ποσοστό πυριτίου. Στο συγκεκριμένο τύπο τέφρας θα πρέπει να ικανοποιείται $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 \geq 70\%$ & $CaO < 10\%$.
- Class C ιπτάμενη τέφρα που προκύπτει από την καύση λιγνιτών και υποβιτουμενιούχων ανθράκων με υψηλό ποσοστό ασβεστίου, Στο συγκεκριμένο τύπο τέφρας θα πρέπει να ικανοποιείται $50\% \leq SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 < 70\%$ & $CaO > 20\%$.
- Class N ιπτάμενη τέφρα που παράγεται από την καύση σχιστόλιθων ή ηφαιστειακών πετρωμάτων. Στο συγκεκριμένο τύπο τέφρας θα πρέπει να ικανοποιείται $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 \geq 70\%$ & $CaO < 4\%$.

Στην Ελλάδα οι προδιαγραφές και οι χρήσεις των Ιπτάμενων Τεφρών ορίζονται από το ΦΕΚ 551/Β/18-4-2007. Οι ιπτάμενες τέφρες έχουν το πλεονέκτημα της μεγάλης λεπτότητας αφού τα πιο ευμεγέθη σφαιρίδια έχουν διάμετρο 1-100μm και η ειδική επιφάνεια τους κυμαίνεται από 250-600 m²/kg ^[11]. Σημαντικό ρόλο στην ποιότητα των τεφρών παίζουν η περιεκτικότητά τους σε SiO₂, Al₂O₃, C (<3%), SO₃, και CaO. Η χημική σύσταση των Ι.Τ που παράγονται στην Ελλάδα δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.10: Χημική σύσταση σε οξείδια (%) διαφόρων Ι.Τ που παράγονται στην Ελλάδα

	Ι.Τ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ	Ι.Τ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ	Ι.Τ ΑΛΙΒΕΡΙΟΥ
SiO₂	40-45	13-35	35
Al₂O₃	15-25	9-20	15
Fe₂O₃	6,5-10	3,5-7	8
CaO	12-18	30-50	25
MgO	1,8-2,8	1,5-4,5	2
SO₃	1,5-3,5	4-11	2,5
K₂O	1,5-2	0,5-1,1	2
Na₂O	-0,5	0,6-0,8	0,5
CAOF	-	9-15	3
Απώλεια πύρωσης	0,9-2,8	1-7,5	-
Αδιάλυτο υπόλειμμα	30-45	12-32	25-30

❖ *Φαρίνα Ηλεκτροφίλτρων (ΦΗΦ)*

Για την παραγωγή του τσιμέντου χρησιμοποιούνται ηλεκτροστατικά φίλτρα για τη κατακράτηση του λεπτομερέστατου κλάσματος που παράγεται κατά τη λειτουργία των περιστροφικών κλιβάνων. Η τέφρα αυτή, γνωστή και ως σαν φαρίνα Ηλεκτροφίλτρων (ΦΗΦ), συνήθως δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί στην τροφοδοσία των κλιβάνων όταν αυτοί παράγουν τύπο τσιμέντου που απαιτεί χαμηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια. Η ΦΗΦ αποτελείται από ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃), χαλαζία (SiO₂) και μικρό ποσοστό αργιλικών ορυκτών (καολίνη, ιλλίτη). Κατατάσσεται στα ασβεστολιθικά πρόσθετα και επειδή έχει αυξημένη αλκαλικότητα βελτιώνει την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος [4].

❖ *Σκωρία υψικαμίνων (slag)*

Η σκωρία υψικαμίνων αποτελείται κυρίως από πυριτικά και αργιλοπυριτικά άλατα του ασβεστίου και από πολύ μικρά ποσοστά μετάλλων. Έχει λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες οι οποίες αυξάνονται όταν αλέθονται σε πολύ μεγάλες λεπτότητες. Συγκεκριμένα, η σκωρία αλέθεται σε μέγεθος μικρότερο των 45μm αλλά παρουσιάζει την ιδιομορφία να αλέθεται εύκολα μέχρι τα 100 - 150μm και μετά να αλέθεται πολύ δύσκολα [11]. Οι κόκκοι της σκωρίας είναι γωνιώδεις και έχουν τραχιά επιφάνεια. Έχουν υψηλό ειδικό βάρος και μέτρια απορρόφηση νερού (λιγότερο από 3%). Για να αυξηθεί η δραστηριότητα και η υδραυλικότητα, η σκωρία ψύχεται απότομα με σκοπό την ανάπτυξη υαλώδους φάσεως σε ποσοστό τουλάχιστον 70% και τον περιορισμό της κρυσταλλικής [12]. Η προσθήκη της σκωρίας στο τσιμέντο μπορεί να γίνει με ξηρή συνάλεση στο κλίνκερ ή με ανάμιξη εφόσον η σκωρία είναι ήδη κονιοποιημένη. Τα ποσοστά ανάμιξης ποικίλουν από 5-85%. Σύμφωνα με το πρότυπο DIN 1164-1 στα τσιμέντα που περιέχουν σκωρία πρέπει να ικανοποιείται η σχέση $(CaO + MgO + Al_2O_3)/SiO_2 > 1$ και διακρίνονται σε:

→ Τσιμέντα με σκωρία 6-35% και τσιμέντο Portland 94-65% που χαρακτηρίζονται σαν σιδηρούχα τσιμέντα Portland με περιεκτικότητα SO₃<3.5% και συρρίκνωση μικρότερη των 8mm/m,

→ Τσιμέντα με σκωρία 36-80% και τσιμέντο Portland 64-20% που χαρακτηρίζονται σαν τσιμέντα υψικαμίνου με περιεκτικότητα $SO_3 < 4\%$ και συρρίκνωση μικρότερη των 8mm/m. Η χημική σύσταση μιας τυπικής σκωρίας φαίνεται στον παρακάτω πίνακα ^[6].

Πίνακας 1.11: Ποσοστά οξειδίων σε σκωρία υψικαμίνων (Emery, 1982)

Οξείδια	Ποσοστό (%)
CaO	40 - 52
SiO ₂	10 - 19
FeO	10 - 40
MnO	5 - 8
MgO	5 - 10
Al ₂ O ₃	1 - 3
P ₂ O ₅	0.5 - 1
S	< 0.1
Fe	0.5 - 10

Η χρήση της σκωρίας στο τσιμέντο Portland έχει τα παρακάτω ευνοϊκά αποτελέσματα:

- Μειώνει τη θερμότητα ενυδάτωσης του τσιμέντου εξαιτίας της δέσμευσης του $Ca(OH)_2$ ενώ παράλληλα εξαιτίας της αργής ποζολανικής αντίδρασης εκλύεται θερμότητα με πολύ αργό ρυθμό.
- Ελαττώνει τη συρρίκνωση του σκυροδέματος.
- Η χρήση της σκωρίας μειώνει την απαιτήσεως του σκυροδέματος σε νερό εξαιτίας της δέσμευσης του Ασβεστίου ενώ παράλληλα η έχει και από μόνη της υδραυλικές ιδιότητες.
- Τα σκωριοτσιμέντα, δεν προσβάλλονται από διαλύματα αραιής ή μέσης συγκέντρωσης $CaSO_4$, $MgSO_4$ και Na_2SO_4 .
- Μειώνει το βάθος ενανθράκωσης συγκριτικά με το αμιγές τσιμέντο Portland στις ίδιες συνθήκες έκθεσης.

Στις πρώιμες ηλικίες, τα σκωριοτσιμέντα εμφανίζουν μειωμένες αντοχές, οι οποίες πλησιάζουν τις αντοχές του αμιγούς τσιμέντου Portland στις 90 ημέρες. Ακόμα, τα σκωριοτσιμέντα παρουσιάζουν ανεπάρκεια στην προστασία του οπλισμού από τα χλωριόντα. Επομένως, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται η κατασκευή. Ακόμα σύμφωνα με άλλες έρευνες ^[4] το σκυρόδεμα για να μην προσβάλλεται από τα θεϊκά ιόντα θα πρέπει να ισχύει $C3A < 3\%$ και το ποσοστό προσθήκης σε σκωρία να είναι $< 70\%$. Γενικά, πάντως η σκωρία υψικαμίνων αποτελεί παραπροϊόν και η χρήση του μειώνει το κόστος παραγωγής του τσιμέντου συνυπολογίζοντας και την ενέργεια που δαπανάται, ενώ παράλληλα προστατεύει και το περιβάλλον.

❖ *Πυριτική παιπάλη (silica fume)*

Η πυριτική παιπάλη έχει αυξημένη ποζολανικότητα και είναι παραπροϊόν της βιομηχανικής

παραγωγής πυριτικών κραμάτων ή του σιδηροπυριτίου. Σχηματίζεται από την οξείδωση και συμπύκνωση ατμών SiO_2 . Η διάμετρος των σωματιδίων της πυριτικής παιπάλης κυμαίνεται από 0,02 έως 0,5μm. Κατά κύριο λόγο η χημική της σύσταση είναι SiO_2 σε ποσοστό 85% έως 90%.

Η προσθήκη της πυριτικής παιπάλης στο σκυρόδεμα μειώνει τη θερμότητα ενυδάτωσης, αυξάνει τη θλιπτική αντοχή σε μετέπειτα ηλικίες ^[13], βελτιώνει την αντίσταση στα θειικά ιόντα και μειώνει τη διαπερατότητα ^[14]. Επίσης, αυξάνει την αντοχή σε κύκλους ψύξης - θέρμανσης και την ανθεκτικότητα σε διάβρωση από το νερό. Εξαιτίας της λεπτής κοκκομετρίας, η προσθήκη πυριτικής παιπάλης αυξάνει την απαίτηση σε νερό ανάμιξης με αποτέλεσμα τη δημιουργία σκυροδεμάτων υψηλής πορώδους δομής ή ακόμα και τη δημιουργία μικρορηγματώσεων στη μάζα του σκυροδέματος.

1.1.5.2 Χημικά Πρόσθετα

Είναι χημικά υλικά που προστίθενται στο νωπό μίγμα, σε μικρές ποσότητες, για να προσδώσουν σε αυτό ορισμένες ιδιότητες, ή για να βελτιώσουν άλλες ^[15]. Τα χημικά πρόσθετα (admixtures), προστίθενται στο σκυρόδεμα σε ποσοστό μέχρι 5% κ.β τσιμέντου κατά τη διάρκεια της ανάμιξης του και πριν τη χύτευση. Έχουν ως σκοπό τη βελτίωση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Χημικά χαρακτηρίζονται σε οργανικά και ανόργανα πρόσθετα, αλλά κατηγοριοποιούνται με βάση τις ιδιότητες που προσδίδουν στο σκυρόδεμα. Γενικά αποτελούνται από μόρια που περιλαμβάνουν οργανικές αλυσίδες των οποίων το ένα άκρο είναι υδρόφιλο και περιέχει μία ή περισσότερες πολικές ($-\text{COO}^-$, $-\text{SO}_3^-$, $-\text{NH}_4^+$). Τα χημικά πρόσθετα διαχωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει αυτά που δρουν αμέσως στην επιφάνεια των κόκκων του τσιμέντου, ενώ η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει αυτά που επηρεάζουν τις αντιδράσεις μεταξύ τσιμέντου και νερού μερικές ώρες μετά την προσθήκη τους.

❖ *Αερακτικά (Air-Entraining Admixtures)*

Η δράση των αερακτικών συνίσταται στη μείωση της επιφανειακής τάσης και τη δημιουργία και κατόπιν εγκλωβισμό φυσαλίδων αέρα διαμέτρου 10 – 1000 μm στη μάζα του σκυροδέματος. Τα αερακτικά χρησιμοποιούνται κυρίως στη βελτίωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε εναλλαγές ψύξης-απόψυξης μέσω της χρήσης των φυσαλίδων ως χώρων διαστολής του νερού κατά την πήξη και τη βελτίωση της εργασιμότητας από τη μείωση της εσωτερικής τριβής μεταξύ των στερεών κόκκων, ιδιαίτερα σε μίγματα τα οποία περιέχουν αδρανή μεγάλης τραχύτητας. Επίσης αυξάνουν την ανθεκτικότητα στα θειικά και ελαττώνουν τον κίνδυνο αλκαλοπυριτικής αντίδρασης. Τα πρόσθετα τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως ως αερακτικά, προέρχονται συνήθως από άλατα ρητινών του ξύλου, από πετρελαϊκά οξέα και από ορισμένα συνθετικά απορρυπαντικά ^[16].

❖ *Ρευστοποιητές (Plasticizers)*

Χρησιμοποιούνται στο νωπό σκυρόδεμα ώστε να μειωθεί η ποσότητα του νερού μίξης και να βελτιωθεί η αντοχή και η ανθεκτικότητα. Οι ρευστοποιητές δρουν ως λιπαντικό στους κόκκους των

αδρανών, αυξάνοντας την εργασιμότητα. Οι πλαστικοποιητές που χρησιμοποιούνται ευρύτατα είναι αυτοί που κατατάσσονται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C-494 σε type-A τα οποία πρέπει να προκαλούν μείωση στο προστιθέμενο νερό στο σκυρόδεμα τουλάχιστον 5% χωρίς μείωση της πυκνότητας και την αντοχής συγκρινόμενο με σκυρόδεμα που περιέχει υψηλότερο λόγο W/C χωρίς ρευστοποιητή.

❖ *Επιβραδυντές (Retarders)*

Χρησιμοποιούνται με σκοπό τη αύξηση του χρόνου πήξης και τοποθετούνται στο σκυρόδεμα σε διάφορες αναλογίες συνήθως μαζί με άλλα πρόσθετα. Επίσης τα συγκεκριμένα πρόσθετα βοηθούν στην ομοιόμορφη πήξη του σκυροδέματος και στην αύξηση της εργασιμότητας με χρήση λιγότερου νερού. Οι επιβραδυντές επιδρούν στην ενυδάτωση του C3S & C3A τα οποία είναι υπεύθυνα για την πήξη του σκυροδέματος κατά τις πρώτες ώρες ^[17]. Στα αρνητικά της χρήση αυτού του είδους των προσθέτων είναι η μικρή αύξηση του περιεχόμενου αέρα στο σκυρόδεμα, ο αυξημένος χρόνος συντήρησης και οι χαμηλές πρώιμες αντοχές που επιδρούν στη συστολή και τον ερπυσμό ^[18].

❖ *Επιταχυντές (Accelerating)*

Η προσθήκη των επιταχυντών στο σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της ανάπτυξης των πρώιμων αντοχών του σκυροδέματος επιταχύνοντας την πήξη του τσιμέντου αλλά γενικά ελαττώνουν την αντοχή του σκυροδέματος κατά 15% ^[17]. Συνήθως οι επιταχυντές χρησιμοποιούνται όταν το σκυρόδεμα πρόκειται να χυτευτεί υπό συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας 2 °C έως 4 °C. Σε μεγάλες ποσότητες, οι επιταχυντές αυξάνουν τη συρρίκνωση του σκυροδέματος που προκαλείται από την εκλυόμενη θερμότητα κατά την ενυδάτωση των φάσεων του τσιμέντου. Ο συγκεκριμένος τύπος πρόσθετων επιδρά στο μηχανισμό ενυδάτωσης του C3S και ο πιο συνήθης επιταχυντής πήξης είναι το CaCl₂ λόγω της μεταβολής της αλκαλικότητας που προκαλεί στο διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος. Το χλωριούχο Ασβέστιο παρά τις αντιπαγωγικές του ιδιότητες, μειώνει την ανθεκτικότητα σε θειικά, διαβρώνει τον οπλισμό εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης σε ιόντα Cl⁻ για συγκέντρωση > 1% κ.β, και αυξάνει τον κίνδυνο δημιουργίας ρωγμών λόγω συρρίκνωσης ^[8] και ερπυσμού. Για την αποφυγή των παραπάνω προστίθενται διάφορα είδη ποζολανών.

❖ *Υπερρευστοποιητές (Superplasticizers)*

Τα υπερρευστοποιητικά αποτελούν ειδική κατηγορία χημικών πρόσθετων επιφανειακής δράσης και αυξάνουν τη ρευστότητα του σκυροδέματος 3 - 4 φορές περισσότερο από τα συνήθη ρευστοποιητικά, επιτρέποντας τη μείωση του νερού ανάμιξης στα 20 - 25% χωρίς απώλεια εργασιμότητας. Τα υπερρευστοποιητικά προστίθενται στο σκυρόδεμα σε ποσότητα συνήθως από 0.5 - 0.8% έως 1.2% κ.β. τσιμέντου. Επίσης δεν προκαλούν επιβράδυνση της πήξης του σκυροδέματος αλλά αντίθετα η δράση τους επιφέρει εξαιρετική διασπορά των κόκκων τσιμέντου με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της ενυδάτωσης του (ταχεία πήξη και σκλήρυνση του σκυροδέματος). Ενώσεις που συνήθως χρησιμοποιούνται ως υπερρευστοποιητικά σκυροδέματος είναι άλατα μελαμίνης, ενώσεις φορμαλδεΐδης και χρησιμοποιούνται κυρίως για την επίτευξη

υψηλών αντοχών ^[16] .Το Βρετανικό πρότυπο BS EN-5075 κατατάσσει τα χημικά πρόσθετα του σκυροδέματος σε επιταχυντές, επιβραδυντές, Ρευστοποιητές και Υπερευστοποιητές. Ο Ευρωκώδικας EN 934.02 περιγράφει τη χρήση και τις απαιτήσεις που πρέπει να καλύπτουν τα πρόσθετα τα οποία φέρουν τη σήμανση CE (Comformiting Marking and Labeling). Τα πρόσθετα πρέπει να ικανοποιούν τις γενικές απαιτήσεις του ΕΛΟΤ EN 934-1:2008 και τις ειδικές απαιτήσεις του ΕΛΟΤ EN 934-2+A1:20012.

Πίνακας 1.12: Κατηγοριοποίηση πρόσθετων σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 934-2+A1:20012

Ρευστοποιητές/μειωτές νερού	Απλοί
	Υψηλού βαθμού
Επιβραδυντές	Επιβραδυντές πήξης
	Επιβραδυντές πήξης/μειωτές νερού-απλοί/ρευστοποιητές
	Επιβραδυντές πήξης/μειωτές νερού-υψηλού βαθμού/υπερευστοποιητές
Αερακτικά	αερακτικά
Επιταχυντές	Επιταχυντές πήξης
	Επιταχυντές σκλήρυνσης
	Επιταχυντές πήξης/μειωτές νερού-απλοί/ρευστοποιητές
Πρόσθετα συγκράτησης νερού	Μειωτές εξίδρωσης
	Μειωτές τριχοειδούς απορρόφησης
Ρυθμιστές ιξώδους	Ρυθμιστές ιξώδους

1.2 ΧΑΛΥΒΕΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ο χάλυβας αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα κατασκευαστικά υλικά και αποτελείται από κράμα σιδήρου – άνθρακα, που περιέχει άνθρακα (C) σε ποσοστό έως 2% w/w, μαγγάνιο (Mn) έως 1% w/w και σε πολύ μικρότερες συγκεντρώσεις προσμίξεις πυριτίου (Si), φωσφόρου (P), θείου (S) και οξυγόνου (O). Ο χάλυβας δεν αποτελεί μοναδικό στη σύσταση προϊόν. Η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη και έρευνα για το υλικό αυτό μας επέτρεψε, τόσο με διαφοροποιήσεις στις διεργασίες παραγωγής του, όσο και με διάφορες προσμίξεις στο βασικό κράμα, να δημιουργήσουμε περισσότερα από 3.500 διαφορετικά είδη χαλύβων, με διαφορετικές ιδιότητες. Η ταξινόμηση του χάλυβα μπορεί να γίνει ανάλογα με τη χημική του σύσταση ή με την κατεργασία που υφίσταται για την παραγωγή του. Ως προς τη χημική τους σύσταση, οι χάλυβες ταξινομούνται ως εξής:

- Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες (carbon steels).
Περιέχουν άνθρακα (έως 2,06%) και μικρό ποσοστό μαγγανίου (έως 1,65%), πυριτίου (έως 0,6%) και χαλκού (έως 0,6%). Χρησιμοποιούνται ευρέως και παρουσιάζουν ευκολία συγκολλησεως. Με βάση τον περιεχόμενο άνθρακα, οι κοινοί χάλυβες διακρίνονται στις εξής υποκατηγορίες:
 - Χάλυβες χαμηλού άνθρακα ή μαλακοί χάλυβες (mild steel) $C < 0,3\%$
 - Χάλυβες μέτριου άνθρακα (medium carbon steels) $0,3\% < C < 0,6\%$
 - Χάλυβες υψηλού άνθρακα (high carbon steels) $0,6\% < C < 1\%$
 - Χάλυβες πολύ υψηλού άνθρακα (ultra-high carbon steels) $1\% < C < 2\%$

- Κραματωμένοι χάλυβες (alloy steels)
Είναι κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα σε σημαντική περιεκτικότητα. Τέτοιοι είναι οι:
 - Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες, που περιέχουν συνήθως χρώμιο, μολυβδαίνιο, βανάδιο, νικέλιο, κ.λ.π. σε συνολικό ποσοστό που δεν ξεπερνά το 10% κ.β.
 - Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες, όπως οι ανοξειδωτοι ($Cr > 10,5\%$), οι ταχυχάλυβες ($C=0.7\%$, $Cr=4.0\%$, $5.0\% < Mo < 10\%$, $Co < 8.0\%$).

Ακόμη, ανάλογα με την κύρια κρυσταλλική φάση τους διακρίνονται σε : ωστενιτικούς, μαρτενσινιτικούς, μπαινιτικούς και άλλου είδους χάλυβες. Η αντοχή του χάλυβα σε εφελκυσμό είναι σημαντικά μεγαλύτερη, σε αντίθεση με το σκυρόδεμα και μάλιστα παραπλήσια της αντοχής του σε θλίψη, γεγονός που, όπως προαναφέρθηκε, καθιστά το υλικό αυτό κατάλληλο για κατασκευή δομικών στοιχείων. Οι κατηγορίες χάλυβα που χρησιμοποιούνται συνήθως ως ράβδοι οπλισμού είναι S220, S400, S500, S400s, S500s, όπου οι αριθμοί αντιστοιχούν στη χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής μετρούμενη σε MPa. Οι τρεις πρώτες κατηγορίες αναφέρονται σε χάλυβες συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις (ΕΛΟΤ 959) ενώ οι υπόλοιπες δύο σε συγκολλησίμους χάλυβες. Η κατηγορία S220 αντιστοιχεί σε λείες ράβδους θερμής ελάσεως, ενώ οι υπόλοιπες σε ράβδους υψηλής συνάφειας. ^[19] Τα νέα πρότυπα ΕΛΟΤ προβλέπουν δύο επιπλέον κατηγορίες χαλύβων, ήτοι B500A και B500C. Τα μηχανικά και τεχνολογικά χαρακτηριστικά του χάλυβα για οπλισμένο

σκυρόδεμα καθορίζονται από συγκεκριμένα πρότυπα (π.χ. στην Ελλάδα τα νέα Πρότυπα ΕΛΟΤ EN10080, ΕΛΟΤ 1421-1, ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ1421-3 για συγκολλησίμους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος που αντικατέστησαν τα προηγούμενα πρότυπα ΕΛΟΤ 959 και 971) [20] και οφείλουν να διαθέτουν πιστοποιητικά συμμόρφωσης).

Πίνακας 1.13: Ιδιότητες σε εφελκυσμό για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος κατά ΕΛΟΤ 959,971 και κατά ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-3

Χαρακτηριστικό	ΕΛΟΤ959, ΕΛΟΤ971					ΕΛΟΤEN10080, ΕΛΟΤ1421-2, ΕΛΟΤ1421- 3	
	Τεχνική κατηγορία					Τεχνική κατηγορία	
	S220	S400	S500	S400s	S500s	B500A	B500C
Όριοδιαρροής fy(MPa)	220	400	500	400	500	≥500	≥500
Εφελκυστική αντοχή ft (MPa)	340	500	550	440	550		
Λόγος πραγματικής τιμής ορίου διαρροής προς ονομαστική τιμή ορίου διαρροής $f_{y,act}/f_{y,nom}$							≤1.25
Λόγος εφελκυστικής αντοχής προς όριο διαρροής f_t/ f_y		≥1.05	≥1.05	≥1.05	≥1.05	≥1.05 (≥1.03 για d<6mm)	≥1,15 ≤1,35
Επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο $\epsilon_{u,k}$ (%)						≥2,5 (≥ 2 για d<6mm)	≥7,5
Επιμήκυνση μετά τη θραύση ϵ_5 (%)	24	14	12	14	12		

1.2.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά και Λειτουργικές Ιδιότητες

Η μηχανική αντοχή των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος είναι το σημαντικότερο τεχνικό χαρακτηριστικό τους, που επιπλέον συμβάλλει και σε αντίστοιχη ταξινόμησή τους. Η ποιότητα τους, όμως, είναι συνδυασμός πολλών παραγόντων και οι παράμετροι που πρέπει να ικανοποιούνται ή τουλάχιστον να απαιτούνται είναι:

- Ικανοποίηση των απαιτήσεων των εκάστοτε ισχυόντων Προτύπων σε σχέση με τις μηχανικές αντοχές (όριο διαρροής και εφελκυστική αντοχή).
- Δυνατότητα ανάληψης σημαντικών πλαστικών παραμορφώσεων, που εκφράζεται μέσω συγκεκριμένων απαιτήσεων για την ολκιμότητα και τη δυσθραυστότητα.

Ικανότητα του συστήματος σκυρόδεμα/ οπλισμός μεταφοράς εφελκυστικών δυνάμεων από τον οπλισμό στο σκυρόδεμα. Η αντοχή συνάφειας είναι συνάρτηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος και είναι σημαντικός παράγοντας επηρεασμού της ικανότητας ανάληψης παραμορφώσεων από τα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος. Σημαντική προϋπόθεση γι' αυτό είναι η ύπαρξη κατάλληλης τραχύτητας του οπλισμού, που εξασφαλίζεται με την τήρηση ειδικών απαιτήσεων για τη γεωμετρία της επιφάνειας.

- Δυνατότητα διατήρησης των βασικών προδιαγραφόμενων ιδιοτήτων, εντός των απαιτήσεων των Προτύπων και των κατασκευαστικών κανονισμών, σε τυπικές συνθήκες διαμόρφωσης των χαλύβων οπλισμού πριν την ενσωμάτωσή τους στο έργο.
- Διατήρηση των βασικών ιδιοτήτων των χαλύβων οπλισμού, σε περιπτώσεις ιδιαίτερα επιβλαβούς περιβάλλοντος. Εδώ υπάγονται θέματα και απαιτήσεις προστασίας από τη διάβρωση.
- Συμπεριφορά των χαλύβων οπλισμού σε ειδικές συνθήκες, όπως σε πολύ υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες ή περιπτώσεις στις οποίες μπορούν να εμφανιστούν προβλήματα κόπωσης.

Κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά του οπλισμένου σκυροδέματος, που αφορούν κυρίως την **αλληλεπίδραση μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού**, του προσδίδουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του και είναι συνοπτικά τα ακόλουθα:

- Σντελεστής θερμικής διαστολής του σκυροδέματος είναι παρόμοιος με αυτόν του χάλυβα, αποτρέποντας έτσι τη δημιουργία σημαντικών εσωτερικών τάσεων λόγω διαφορών στις θερμικές συστολοδιαστολές.
- Η συνοχή του ρευστού μίγματος τσιμέντου/ αδρανών/ νερού στις ιδιαιτερότητες της επιφάνειας του οπλισμού, πριν τη σκλήρυνση του σκυροδέματος, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η εξάλειψη ενδεχόμενων τάσεων μεταξύ των δύο υλικών. Προκειμένου να βελτιωθεί περαιτέρω η συνοχή μεταξύ των δύο υλικών, η επιφάνεια των χαλύβδινων ράβδων τραχύνεται ή μορφοποιείται με αυλακώσεις.
- Το υδατικό διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος είναι έντονα αλκαλικό εξαιτίας της υδρασβέστου $[Ca(OH)_2]$, προϊόν της αντίδρασης της ενυδάτωσης (σκλήρυνσης) του τσιμέντου, με pH μεταξύ 12,5 και 13,9. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ο χάλυβας καλύπτεται επιφανειακά από ένα παθητικό στρώμα οξειδίων σιδήρου που παρεμποδίζει

τη διάβρωσή του. Η διάβρωση του χάλυβα περιορίζεται στην συντήρηση του παθητικού αυτού στρώματος, δράση εξαιρετικά αργή, που πρακτικά μπορεί να αγνοηθεί.

- Το σκυρόδεμα αποτελεί ένα φυσικό εμπόδιο στην επαφή του οπλισμού με τα διάφορα διαβρωτικά συστατικά του περιβάλλοντος (όπως οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα CO₂, διοξείδιο του θείου SO₂, κ.λ.π.) και άλλες ουσίες που βοηθούν τη διάβρωση (όπως χλωριόντα Cl⁻). [21]

1.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1.3.1 Εργασιμότητα

Ως εργασιμότητα (workability) ή εργάσιμο χαρακτηρίζεται γενικά η ευκολία με την οποία είναι δυνατόν να μεταφερθεί, διαστρωθεί και συμπυκνωθεί το σκυρόδεμα. Σύμφωνα με άλλον ορισμό, η εργασιμότητα ορίζεται ως το έργο που απαιτείται για να υπερνικηθούν οι εσωτερικές τριβές και να επιτευχθεί πλήρης συμπύκνωση. Η εργασιμότητα είναι μια σύνθετη ιδιότητα και συνδέεται με άλλες ρεολογικές ιδιότητες, όπως οι παρακάτω:

- Η **ρευστότητα**, που σημαίνει η ευκολία ροής ενός υλικού (η ρευστότητα εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του νερού ανάμιξης)
- Η **πλαστικότητα**, δηλαδή η ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς διακοπή της συνέχειάς του
- Η **συνοχή**, που εκφράζει το αποτέλεσμα των δυνάμεων που έλκουν τα μόρια μεταξύ τους και επομένως συντελεί στην πλαστικότητα
- Η **συμπυκνωσιμότητα**, που εκφράζει τη δυνατότητα του υλικού να συμπυκνωθεί και εξαρτάται από τον αρχικό βαθμό συμπύκνωσης.

Η εργασιμότητα δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Για το σκοπό αυτό έχουν προταθεί μέθοδοι με τις οποίες μετριέται μία ή περισσότερες από τις παραπάνω ιδιότητες. Η κυριότερη χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η **κάθιση/εξάπλωση** [1].

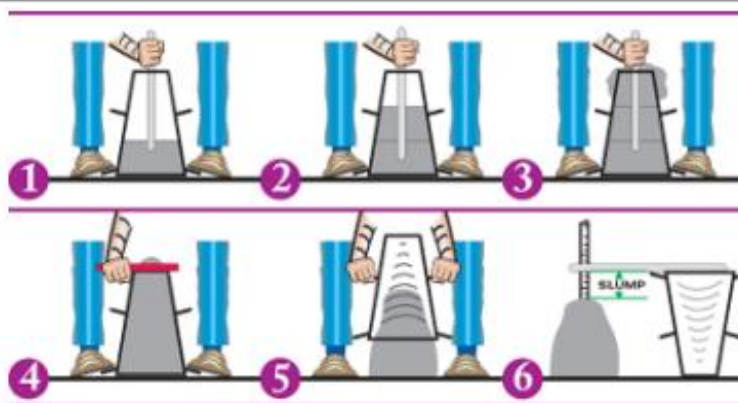
Δοκιμή κάθισης (slump test)

Ο κώνος κάθισης (κώνος Abrams) διαβρέχεται εσωτερικά και αφού τοποθετηθεί σε λεία και επίπεδη επιφάνεια, γεμίζεται έως το $\frac{1}{3}$ του ύψους του με σκυρόδεμα που λαμβάνεται με σέσουλα από διάφορες τυχαίες θέσεις εντός του αναμικτήρα. Ακολουθεί συμπύκνωση του σκυροδέματος με 25 χτυπήματα με πρότυπη ράβδο διαμέτρου Φ16. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τις άλλες 2 στρώσεις, ενώ προσοχή πρέπει να επιδεικνύεται κατά τη συμπύκνωση των 2 στρώσεων καθώς η πρότυπη ράβδος δεν πρέπει να εισέρχεται εντός της προηγούμενης στρώσης. Αφού ολοκληρωθεί η συμπύκνωση της 3ης στρώσης, μορφώνεται και επιπεδώνεται η επιφάνεια της

κορυφής του κώνου και ο κώνος αφαιρείται αργά και σταθερά εντός χρόνου 5 s μέγιστο. Ο κώνος αναστρέφεται και τοποθετείται δίπλα από το νωπό σωρό σκυροδέματος. Στην επιφάνεια της κορυφής του κώνου κάθισης τοποθετείται η πρότυπη ράβδος Φ16 και μετράται η ελεύθερη απόσταση ανάμεσα σε αυτή και το υψηλότερο σημείο του νωπού σκυροδέματος με ακρίβεια cm. Προσδιορίζεται από τον Κ.Τ.Σ. - 2016 η κατηγορία κάθισης του σκυροδέματος.

Πρότυπο: EN 12350-2

Κατηγορίες δοκιμής Κάθισης Τάξη	Διαφορά ύψους σε mm
S1	10 έως 40
S2	50 έως 90
S3	100 έως 150
S4	160 έως 210
S5 ¹	≥ 220



Σχήμα 1.14: α) κατηγορίες κάθισης
β) δοκιμή κάθισης σε βήματα

Μορφές κάθισης

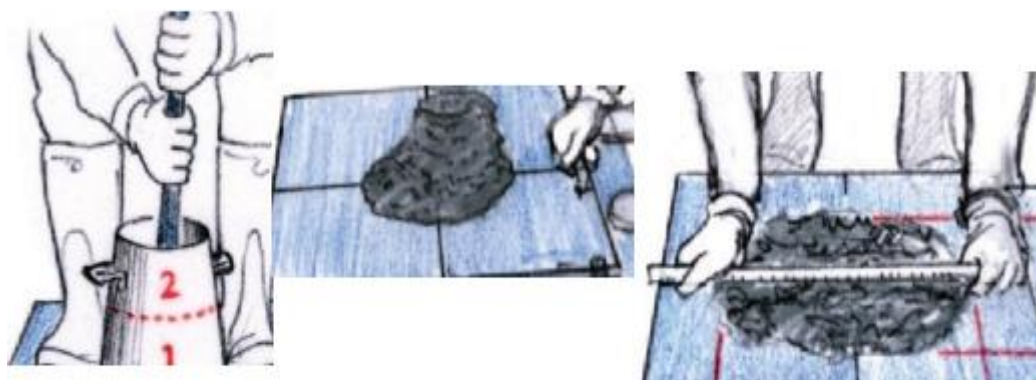


Σχήμα 1.15: Μορφές κάθισης

Δοκιμή εξάπλωσης

Στο αυτοσυμπυκνούμενο, συγκεκριμένα, σκυρόδεμα όμως χρησιμοποιείται η δοκιμή εξάπλωσης. Η δοκιμή καθορίζει τη συνεκτικότητα του νωπού σκυροδέματος μετρώντας την εξάπλωση του σκυροδέματος σε οριζόντια επίπεδη βάση. Μεταλλικός κώλυρος κώνος γεμίζεται με σκυρόδεμα (σε δύο στρώσεις) και συμπυκνώνεται με καθορισμένο τρόπο. Ο κώνος ακολούθως αφαιρείται κατακόρυφα προς τα επάνω. Μετά από την οποιαδήποτε κατάρρευση σκυροδέματος, η βάση ανυψώνεται χειροκίνητα ή μηχανικά 15 φορές έως το δείκτη ανύψωσης και αφήνεται να πέσει έως τους δείκτες πτώσης. Η εξάπλωση του σκυροδέματος μετριέται παράλληλα προς τις πλευρές της βάσης διαμέσου του κέντρου της.

Κατηγορίες Εξάπλωσης Τάξη	Πρότυπο EN 12350-5 Διάμετρος εξάπλωσης σε mm
F1 ¹	≤ 340
F2	350 έως 410
F3	420 έως 480
F4	490 έως 550
F5	560 έως 620
F6 ¹	≥ 630



Σχήμα 1.16: α) κατηγορίες εξάπλωσης
β) δοκιμή εξάπλωσης σε βήματα

1.3.2 Θερμοκρασία

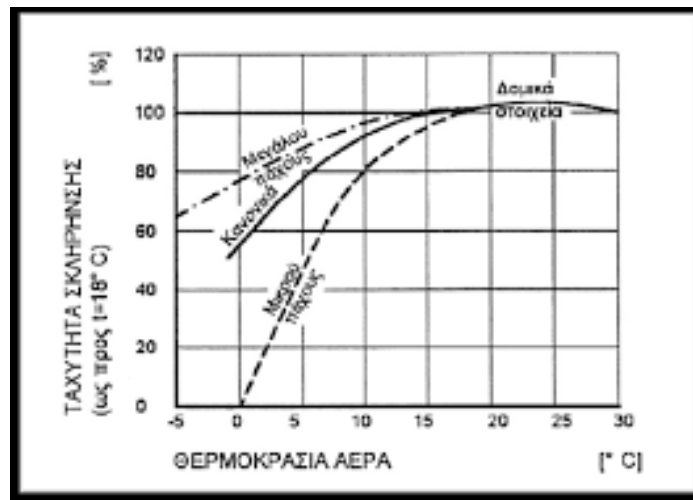
Το σκυρόδεμα πρέπει να προστατεύεται από την ξήρανση κατά την τοποθέτηση. Η σκυροδέτηση είναι εφικτή σε υψηλές θερμοκρασίες, μόνο εάν παρέχονται ειδικά προστατευτικά μέτρα. Τα μέτρα αυτά πρέπει να είναι σε εφαρμογή από την αρχή της διαδικασίας παραγωγής έως το τέλος της ωρίμανσης. Εξαρτώνται από την εξωτερική θερμοκρασία, την υγρασία αέρα, τις συνθήκες ανέμου,

τη θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος, την ανάπτυξη θερμότητας και απώλεια αυτής και από τον όγκο του χυτευόμενου σκυροδέματος. Η θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τους $+30^{\circ}\text{C}$ κατά την τοποθέτησή του εάν δεν εφαρμόζονται αυτά τα προστατευτικά μέτρα. Η εργασία με σκυρόδεμα χωρίς προσθήκη επιβραδυντή μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα σε περιπτώσεις θερμοκρασίας αέρα πάνω από τους $+25^{\circ}\text{C}$. Η ενυδάτωση είναι η χημική αντίδραση του τσιμέντου με το νερό. Ξεκινά μόλις έρθουν τα δύο συστατικά σε επαφή, συνεχίζεται ενώ το σκυρόδεμα χάνει την πλαστικότητά του και μπαίνει στη φάση πήξης (αρχική πήξη) και τελικώς ολοκληρώνεται μέσω της σκλήρυνσης του τσιμεντοπολτού. Κάθε χημική αντίδραση επιταχύνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι η σωστή και ολοκληρωμένη συμπίκνωση δεν είναι πλέον εφικτή. Τα συνήθη μέτρα αντιμετώπισης τέτοιων φαινομένων περιλαμβάνουν τη χρήση υπερρυστοποιητή με επιβραδυντικές ιδιότητες ή υπερρυστοποιητή σε συνδυασμό με επιβραδυντή πήξης.

Επίσης το σκυρόδεμα πρέπει να προστατεύεται από τη βροχή και τον παγετό κατά την εφαρμογή του. Η σκυροδέτηση είναι εφικτή σε θερμοκρασίες παγετού, μόνο εάν λαμβάνονται ειδικά προστατευτικά μέτρα. Αυτά πρέπει να εφαρμόζονται από την αρχή της διαδικασίας παραγωγής έως το τέλος της ωρίμανσης. Τα μέτρα αυτά εξαρτώνται από την εξωτερική θερμοκρασία, την υγρασία αέρα, τις συνθήκες ανέμου, τη θερμοκρασία νωπού σκυροδέματος, την ανάπτυξη θερμότητας και απώλεια αυτής και από τον όγκο της σκυροδέτησης. Το νωπό σκυρόδεμα δεν πρέπει να έχει θερμοκρασία χαμηλότερη από $+5^{\circ}\text{C}$ κατά την τοποθέτησή του εάν δε λαμβάνονται επιπλέον προστατευτικά μέτρα. Το νερό ανάμιξης και τα αδρανή θα πρέπει να προθερμαίνονται εάν αυτό είναι απαραίτητο. Οι χαμηλές θερμοκρασίες επιβραδύνουν την πήξη του τσιμέντου. Σε θερμοκρασίες κάτω από τους -10°C , οι χημικές διαδικασίες ενυδάτωσης του τσιμέντου διακόπτονται (αλλά συνεχίζουν μετά από θέρμανσή του). Κίνδυνος ενυπάρχει σε περίπτωση που το σκυρόδεμα παγώσει κατά την πήξη του, π.χ. χωρίς να έχει συγκεκριμένη ελάχιστη αντοχή. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται χαλάρωση της κατασκευής, με αντίστοιχη μείωση της αντοχής και της ποιότητας της. Η ελάχιστη αντοχή στην οποία το σκυρόδεμα μπορεί να αντέξει έναν κύκλο πήξης χωρίς βλάβη είναι η αποκαλούμενη αντοχή αντίστασης σε παγετό των 10N/mm^2 . Ο κύριος στόχος είναι να φτάσει το σκυρόδεμα αυτή την αντοχή αντίστασης σε παγετό όσο το δυνατόν γρηγορότερα. [22]

Αξίζει επίσης να αναφερθεί πως, η θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος, κατά τις δοκιμές που τυχόν υποβάλλεται, πρέπει να είναι μεταξύ 15°C και 22°C .

Πέρα από αυτά η θερμοκρασία περιβάλλοντος επηρεάζει την ταχύτητα σκλήρυνσης του σκυροδέματος για θερμοκρασίες αέρα μέχρι και τους 18°C περίπου. Για τις θερμοκρασίες αυτές η ταχύτητα σκλήρυνσης μειώνεται, καθώς μειώνεται η θερμοκρασία, και μάλιστα η μείωση είναι μεγαλύτερη για λεπτά δοκίμια. Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τους 18°C η ταχύτητα σκλήρυνσης παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα από το πάχος του δοκιμίου (Σχήμα 1.17).



Σχήμα 1.17. Επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα στην ταχύτητα σκλήρυνσης του σκυροδέματος^[16]

1.3.3 Αντοχές

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

Η αντοχή του σκυροδέματος σε συγκεκριμένη ηλικία, συντήρηση και θερμοκρασία θεωρείται ότι εξαρτάται κατά βάση από δύο παράγοντες: το λόγο νερού προς τσιμέντο (w/c) και το βαθμό συμπύκνωσης (degree of compaction).

Και οι δύο αυτοί παράγοντες επιδρούν στο πορώδες του σκυροδέματος και σε καλά συμπυκνωμένα σκυροδέματα το ποσοστό των κενών μειώνεται σημαντικά. Επομένως, η αντοχή του σκυροδέματος είναι συνάρτηση του όγκου των κενών χώρων του (voids) ^[1].

Η **μονοαξονική θλιπτική αντοχή** του σκυροδέματος, f_c , αποτελεί το πιο χαρακτηριστικό μέγεθος του υλικού και μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί πειραματικά. Η θλιπτική αντοχή αποτελεί γενικό δείκτη της ποιότητας του σκυροδέματος, γιατί όλες σχεδόν οι ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος (υδατοστεγανότητα, αντοχή σε επιφανειακή φθορά, ανθεκτικότητα, κλπ), βελτιώνονται με τη μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος η οποία σχετίζεται με το πορώδες του υλικού το οποίο είναι καθοριστικός παράγοντας της θλιπτικής αντοχής του. Η αντοχή του σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη προσδιορίζεται με επιτόνηση σε κεντρική θλίψη δοκιμίων από σκυρόδεμα, οριζόμενη ως η μέγιστη τάση θραύσεως των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα αυτού του προσδιορισμού για ηλικία σκυροδέματος 28 ημερών και για συμβατικές συνθήκες παρασκευής, συντήρησης και μέτρησης των δοκιμίων (που προδιαγράφονται στους κανονισμούς τεχνολογίας σκυροδέματος) χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν την ποιότητα του υλικού ^[5].

Σύμφωνα με τον ΚΤΣ-2016 ο προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος πραγματοποιείται ως εξής:

Μετά από την συντήρηση των δοκιμών στον υγρό θάλαμο, θερμοκρασίας $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ και σχετικής υγρασίας μεγαλύτερης του 95% τα δοκίμια είναι έτοιμα να υποστούν θραύση κατά τη δοκιμή θλίψης. Τα δοκίμια εξέρχονται του υγρού θαλάμου, σκουπίζονται επιφανειακά και ζυγίζονται με ακρίβεια 1 g. Έπειτα μετρώνται με παχύμετρο οι διαστάσεις τους, σε 3 σημεία για κάθε πλευρά, οι οποίες και δεν θα πρέπει να αποκλίνουν περισσότερο από ± 3 mm σε σχέση με την ονομαστική διάσταση των 150 mm. Κάθε δοκίμιο φέρεται εντός της διάταξης δοκιμής θλίψης και υπολογίζεται η θλιβόμενη επιφάνεια (από το γινόμενο πλάτος x ύψος ή μήκος x πλάτος), ανάλογα με το πως το δοκίμιο εισήλθε στη διάταξη δοκιμής θλίψης. Απαγορεύεται από τον Κ.Τ.Σ.-2016 η τοποθέτηση του δοκιμίου με την κατασκευαστική του επιφάνεια (αυτή που ίσιωσε το μυστρί) ανάμεσα στις πλάκες θλίψης. Ξεκινά η φόρτιση του δοκιμίου έως ότου η συσκευή καταγράψει το ανώτερο φορτίο πριν τη θραύση (συνήθως δίνεται σε kN). Από το προσδιορισθέν φορτίο θραύσης και το εμβαδόν της θλιβόμενης επιφάνειας, υπολογίζεται η τάση θραύσης σε MPa, ως το πηλίκο των παραπάνω μεγεθών. Προσοχή πρέπει να δοθεί στην ταχύτητα φόρτισης η οποία πρέπει να είναι μεταξύ $0,1 - 1$ N/mm²·s και στη συνολική διάρκεια της δοκιμής (από την έναρξη εφαρμογής του φορτίου έως τη θραύση) δεν πρέπει να διαρκέσει λιγότερο από 30 s.

1.3.4 Πορώδες

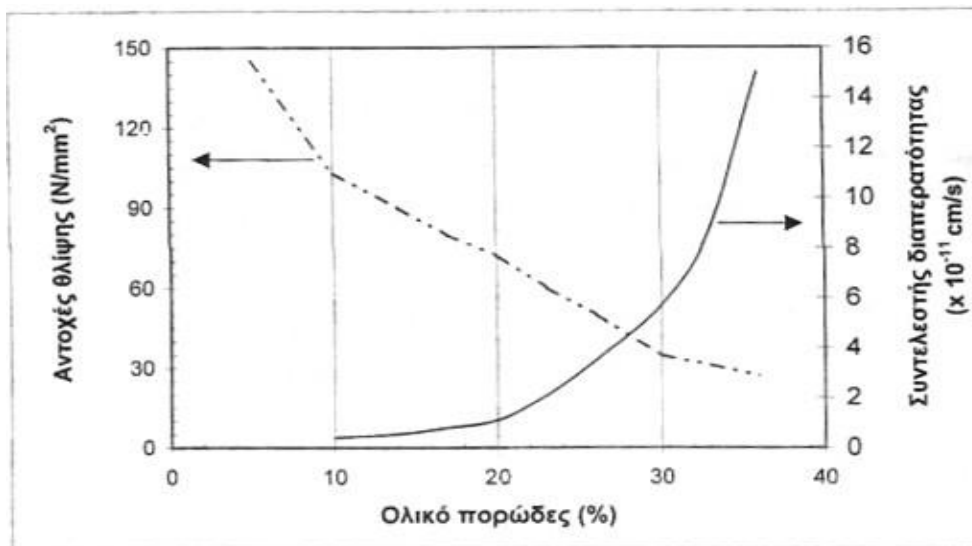
Το σκυρόδεμα, όπως και οι φυσικοί λίθοι, δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές και πλήρες, αλλά περιέχει πλήθος από εσωτερικές κοιλότητες. Οι κοιλότητες αυτές είναι κενές από στερεό υλικό και το σύνολό τους αποτελεί το πορώδες του σκυροδέματος. Οι κοιλότητες αυτές μπορεί να περιέχουν αέρα ή να είναι γεμάτες με νερό.

Ανάλογα με την προέλευσή τους διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

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

Το πορώδες του σκυροδέματος επηρεάζει κατά πολλούς τρόπους τις ιδιότητές του, κυρίως μέσα από την επίδραση που έχει στις αντοχές και στη διαπερατότητα του. Οι περισσότερες από τις ιδιότητες του σκυροδέματος βελτιώνονται όταν, για το ίδιο ολικό πορώδες, το μέγεθος των πόρων

είναι μικρότερο, είναι περισσότερο ομοιόμορφα κατανεμημένοι μέσα στο υλικό και το σχήμα τους πλησιάζει το σφαιρικό. Το πορώδες του σκυροδέματος επηρεάζει τις ιδιότητές του, κυρίως επιδρώντας στις αντοχές και στη διαπερατότητα αυτού. Η επίδραση αυτή φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 1.18: Συσχέτιση αντοχών θλίψης και διαπερατότητας με το πορώδες

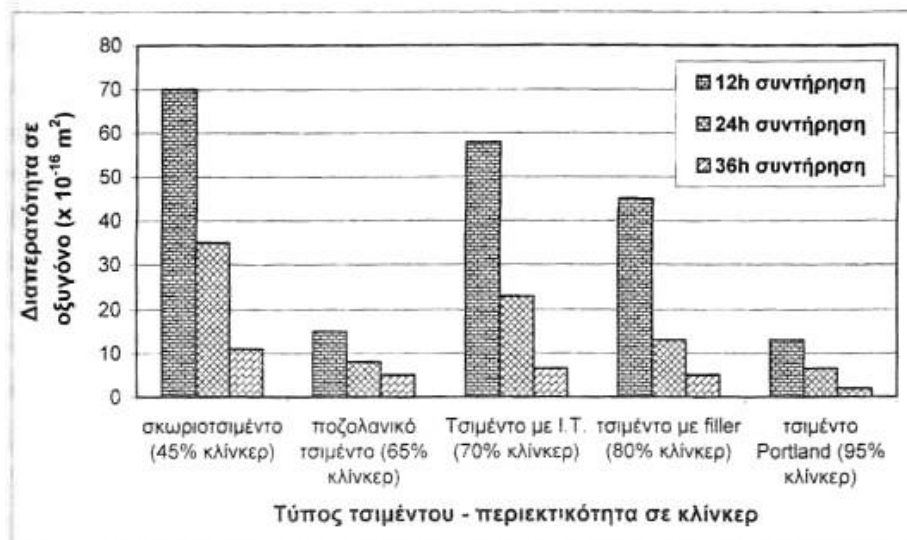
Επιπλέον, το πορώδες επηρεάζει τη χρόνια συστολή, τον ερπυσμό, την υδατοαπορροφητικότητα, την υδατοστεγανότητα, καθώς και την ανθεκτικότητα του υλικού στον παγετό.

Οι περισσότερες από τις ιδιότητες του σκυροδέματος βελτιώνονται όταν, για το ίδιο ολικό πορώδες, το μέγεθος των πόρων είναι μικρότερο (επομένως το πλήθος των πόρων, για τον ίδιο όγκο, είναι μεγαλύτερο), είναι περισσότερο ομοιόμορφα κατανεμημένοι μέσα στο υλικό και το σχήμα τους πλησιάζει το σφαιρικό ^[1].

1.3.5 Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα του σκυροδέματος επηρεάζεται από την σύσταση του τσιμέντου, από τον λόγο w/c, από το βαθμό συμπύκνωσης, από την συντήρηση και από την ύπαρξη ρωγμών. Αναλυτικότερα για τον κάθε έναν από αυτούς τους παράγοντες μπορούν να αναφερθούν τα εξής: Όταν η σύσταση του τσιμέντου στο σκυρόδεμα είναι μεγαλύτερη από 300 kg/m³, ο λόγος w/c είναι μικρός και έχει γίνει προσεκτική συντήρηση, τότε το σκυρόδεμα θα έχει μικρή διαπερατότητα. Στην επόμενη εικόνα

παρουσιάζεται η επίδραση διαφόρων τύπων τσιμέντου στη διαπερατότητα, για διάφορους χρόνους συντήρησης.



Εικόνα 1.19: Επίδραση της ποιότητας του τσιμέντου στη διαπερατότητα του σκυροδέματος.

Όταν ο λόγος w/c υπερβεί την τιμή 0,6, τότε υπάρχει δυσανάλογη αύξηση της διαπερατότητας, επειδή αυξάνεται το μέγεθος και ο αριθμός των τριχοειδών πόρων.

Το πορώδες (μέγεθος και κατανομή των πόρων) καθώς και η ποσότητα νερού που περιέχεται στους πόρους, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη διαπερατότητα του σκυροδέματος. Συνήθως, η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε φυσικές και χημικές επιδράσεις μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε τριχοειδείς πόρους.

Με τη συμπύκνωση γίνεται προσπάθεια μείωσης των κενών του αέρα στο σκυρόδεμα σε περιεκτικότητα μικρότερη από 1%. Για την επίτευξη της συμπύκνωσης εφαρμόζεται δόνηση κατά τη χύτευση. Η συντήρηση του σκυροδέματος συνίσταται στη διατήρηση ευνοϊκών συνθηκών υγρασίας και θερμοκρασίας, ώστε να προχωρήσουν οι αντιδράσεις ενυδάτωσης. Η συντήρηση γίνεται με σκοπό αφενός για να συγκρατήσει το σκυρόδεμα τη σωστή υγρασία, ώστε να γίνει η ενυδάτωση του τσιμέντου και αφετέρου για να προστατευθεί το σκυρόδεμα από τις απότομες αλλαγές θερμοκρασίας.

1.3.6 Ανθεκτικότητα του σκυροδέματος

Η ανθεκτικότητα (durability) εκφράζει τη δυνατότητα του σκυροδέματος να διατηρεί την αντοχή και τη λειτουργικότητά του στην κατασκευή στη μέγιστη δυνατή διάρκεια. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται στην ικανότητα του υλικού να μη φθείρεται από το περιβάλλον (φυσικό ή μη) στο οποίο εκτίθεται. Οι βασικότερες αιτίες φθοράς του σκυροδέματος είναι η διάβρωση του σιδηροπλισμού, η ψύξη/απόψυξη στα ψυχρά κλίματα, οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ του ενυδατωμένου τσιμέντου και των διαβρωτικών μέσων και οι φυσικοχημικές δράσεις, που συμβαίνουν στο εσωτερικό του σκυροδέματος μεταξύ των συστατικών του.

Οι βασικοί παράγοντες που ρυθμίζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος είναι:

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

Βάσει των προαναφερθέντων παραγόντων μπορεί να θεωρηθεί ότι η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σχετίζεται με τα τρία παρακάτω ρευστά, που εισέρχονται σε αυτό και προκαλούν τη φθορά του:

- Το νερό (με τα διαβρωτικά μέσα που περιέχει)
- Ο ατμοσφαιρικός αέρας (CO_2 , O_2)
- Το ειδικό περιβάλλον (SO_4^{2-} , Cl^- και αλκάλια)

Το σκυρόδεμα και κυρίως το οπλισμένο, έχει πεπερασμένο χρόνο ζωής, πέρα από τον οποίο κρίνεται λειτουργικά ανεπαρκές. Έτσι το πρόβλημα της ανθεκτικότητας σε διάρκεια θεωρείται σήμερα διεθνώς ίσως το σημαντικότερο πρόβλημα των κατασκευών σκυροδέματος. Επηρεάζεται από τρεις ομάδες παραγόντων, τη διαπερατότητα, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις φυσικές ή χημικές ή μηχανικές επιδράσεις. ^[4]

Το Πρότυπο EN 206 εισάγει και τις απαιτήσεις σχεδιασμού έργων από σκυρόδεμα για ανθεκτικότητα. Υιοθετούνται συγκεκριμένες Κατηγορίες Έκθεσης (με όρια συγκεκριμένης περιεκτικότητας σε ρύπους, εφόσον αυτό καθίσταται απαραίτητο) ενώ καθορίζονται (στο Εθνικό Προσάρτημα) και οι ελάχιστες επικαλύψεις για ανθεκτικότητα (συμβολίζονται και με cm^{in} , dur στον Ευρωκώδικα 2) για κατασκευές Κατηγορίας S4, δηλαδή αυτές με ωφέλιμη διάρκεια ζωής τα 50 χρόνια, κατά Ευρωκώδικα 0. Οι Κατηγορίες Έκθεσης που καλύπτει το Πρότυπο αφορούν την ενανθράκωση του σκυροδέματος (XC), την έκθεση σε χλωριόντα από το θαλασσινό νερό (XS), την έκθεση σε χλωριόντα από άλλους παράγοντες, π.χ. αντιπαγωτικά άλατα (XD), την έκθεση σε χημικά από το έδαφος και τον υδροφόρο ορίζοντα (XA), την έκθεση σε ψύξη/απόψυξη (XF) και τη μηχανική απότριψη (XM). Αναλυτική προσέγγιση του θέματος θα γίνει σε παρακάτω ενότητα.

1.4 ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Με τον όρο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα εννοούμε ένα τύπο σκυροδέματος που δύναται να ρέει υπό την επίδραση του ιδίου βάρους του, να πληρώνει τους ξυλοτύπους διερχόμενο μέσα από πυκνό οπλισμό και τελικά να σχηματίζει κατά τη σκλήρυνσή του ένα πυκνό και ικανοποιητικά ομοιογενές υλικό χωρίς την ανάγκη συμπύκνωσης με μηχανικά μέσα. Είναι σημαντικό να εντοπίσουμε τη διαφορά ανάμεσα σε ένα σωστά σχεδιασμένο μείγμα ΑΣΣ και ένα παραδοσιακό σκυρόδεμα με υψηλή ρευστότητα, γνωστό ως υπέρρευστο σκυρόδεμα. Το ΑΣΣ χαρακτηρίζεται από υψηλή εργασιμότητα, δεν απαιτεί καθόλου συμπύκνωση, παρουσιάζει ικανοποιητικότερη αντίσταση στην απόμειξη και διατηρεί τη σταθερή του σύνθεση τόσο κατά τη μεταφορά του όσο και κατά τη χύτευσή του, χαρακτηριστικά τα οποία το υπέρρευστο δεν παρουσιάζει στον ίδιο βαθμό. Ένα σωστά σχεδιασμένο μείγμα ΑΣΣ πρέπει να είναι ταυτόχρονα ρευστό αλλά και συνεκτικό κατά τη νωπή του κατάσταση, στο βαθμό μάλιστα που αυτό απαιτείται από τις ιδιαιτερότητες της εκάστοτε

εφαρμογής. Μία άλλη σημαντική ιδιότητα του ΑΣΣ είναι η σθεναρότητά του (robustness), η ικανότητά του δηλαδή στη νωπή κατάσταση να διατηρεί τις αρχικά σχεδιασμένες ρεολογικές του ιδιότητες με ελάχιστες αποκλίσεις, όταν οι αναλογίες των συστατικών του – και κυρίως η κοκκομετρία της άμμου και η υγρασία των αδρανών - παρουσιάζουν υπολογίσιμες διακυμάνσεις. Η συγκεκριμένη ιδιότητα δεν έχει ιδιαίτερα βαρύνοντα ρόλο στην περίπτωση των συμβατικά δονούμενων σκυροδεμάτων, στην περίπτωση όμως του ΑΣΣ αποτελεί καθοριστικό παράγοντα μιας επιτυχημένης σχεδίασης. Το ΑΣΣ αρχικά αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 στην Ιαπωνία. Η κατασκευαστική έκρηξη που ακολούθησε τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο οδήγησε σε επιτάχυνση της κατασκευαστικής διαδικασίας κατά τις δεκαετίες του 1950 και 1960 χωρίς την απαραίτητη προσοχή στο θέμα της ποιότητας. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η ταχεία διάβρωση των κατασκευών πολλές από τις οποίες παρουσίασαν σοβαρά προβλήματα τις πρώτες δύο δεκαετίες της ζωής τους. Η σοβαρότητα του προβλήματος ανάγκασε την Ιαπωνική κυβέρνηση να ξεκινήσει έρευνα σχετικά με τις αιτίες της απaráδεκτα γρήγορης και έντονης υποβάθμισης της ποιότητας των κατασκευών. Έτσι, ένα μεγάλο ερευνητικό πρόγραμμα θεσπίστηκε με σκοπό τη διαλεύκανση των βασικών αιτιών αλλά και την εύρεση λύσης για την αύξηση της ανθεκτικότητας των νέων κατασκευών.

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

Δοκιμές πεδίου και περιορισμένες εφαρμογές στα τέλη της δεκαετίας του 1980, οδήγησαν σε αυτό που αργότερα ονομάστηκε αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Το διεθνές ενδιαφέρον για τον νέο τύπο αυτού του σκυροδέματος και για τα πολλαπλά οφέλη που επιφέρει στον κατασκευαστικό κλάδο άρχισε να αυξάνεται, με αποτέλεσμα τη χρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση ενός ερευνητικού προγράμματος με οκτώ εταιρείες ^[2]. Σε ελληνικό επίπεδο η πρώτη εργαστηριακή παρασκευή μειγμάτων ΑΣΣ με ελληνικά υλικά παρουσιάστηκε στο 14ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος στην Κω το 2003 ^[9]. Στο ίδιο συνέδριο παρουσιάστηκαν επίσης άλλες δύο εισηγήσεις σχετικά με την τεχνολογία του ΑΣΣ. Τρία χρόνια αργότερα στο 15ο ΕΣΣ στην Αλεξανδρούπολη παρουσιάστηκαν ακόμη τρεις εισηγήσεις σχετικά με το ΑΣΣ, ενώ τον Μάιο του 2008 το Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος του ΤΕΕ οργάνωσε στην Αθήνα την πρώτη ημερίδα σχετικά με το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα. Στο χρονικό αυτό διάστημα η έρευνα σχετικά με το ΑΣΣ έχει παρουσιάσει τάση ανάπτυξης σε διάφορα ερευνητικά ιδρύματα της Ελλάδας και της Κύπρου. Η αυξανόμενη όμως ζήτηση και το ενδιαφέρον για χρήση του νέου τύπου σκυροδέματος κατέστησε επιτακτική τη σύσταση οδηγιών σε πανευρωπαϊκό επίπεδο. Έτσι η EFNARC κυκλοφόρησε το 2002 τις πρώτες συστάσεις για το ΑΣΣ (EFNARC, 2002), οι οποίες λίγα χρόνια αργότερα εξελίχθηκαν στις πρώτες Ευρωπαϊκές Οδηγίες για ΑΣΣ ^[23]. Σε ελληνικό επίπεδο υπάρχουν διαθέσιμες οι Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ) για το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα που κυκλοφόρησαν από το ΥΠΕΧΩΔΕ (ΥΠΕΧΩΔΕ 2004). ^[21]

1.4.1 Βασικές Αρχές Σχεδιασμού Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος

Οι βασικές λειτουργικές ιδιότητες του νωπού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι η ικανότητα πλήρωσης (filling ability), η αντίσταση στο διαχωρισμό των υλικών - απόμειξη (segregation resistance) καθώς και η ικανότητα εισχώρησης μεταξύ των σπλισμών (passing ability). Προκειμένου να ικανοποιηθούν και οι τρεις ανωτέρω απαιτήσεις, δίνεται ιδιαίτερη σημασία στη ρεολογία της τσιμεντόπαστας κατά το σχεδιασμό του μείγματος. Διεθνώς έχουν αναπτυχθεί αρκετές μεθοδολογίες για τον κατ' αρχήν σχεδιασμό ενός μείγματος αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος [24], τα όποια αποτελέσματα όμως πρέπει πάντα να επαληθεύονται με δοκιμαστικά μείγματα πριν τεθούν σε παραγωγή. Εν συνεχεία, παρουσιάστηκε (2006) μία βελτιωμένη μέθοδος σχεδιασμού μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (μέθοδος Σχ.Ε.Δι.Π.Υ.) που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Δ.Π.Θ. και αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο που επιτρέπει το σχεδιασμό μειγμάτων διαφορετικών κατηγοριών αντοχής. Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για το σχεδιασμό μειγμάτων ΑΣΣ διαφορετικών κατηγοριών αντοχής (C20/25 έως C50/60) στην παρασκευή των οποίων χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά τσιμέντα και αδρανή υλικά του Ελλαδικού χώρου [25].

Η μέθοδος είναι απλή στη χρήση της, επιτρέπει τον συνυπολογισμό στο σχεδιασμό του μείγματος διαφορετικών λεπτών υλικών πέραν του τσιμέντου, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν μέθοδος ποιοτικού ελέγχου προκειμένου να ελεγχθεί η διακύμανση της ποιότητας των πρώτων υλών (αδρανών υλικών, τσιμέντου και λεπτών προσθέτων). Βασικό στοιχείο για τη βελτιστοποίηση των ρεολογικών ιδιοτήτων του νωπού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι η περιεκτικότητά του σε πολύ λεπτά υλικά τα οποία ορίζονται ως το άθροισμα της μάζας του τσιμέντου, της μάζας των ποζολανικών προσθέτων (πυριτική παιπάλη, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνων) και της παιπάλης που προέρχεται από την άμμο (ασβεστολιθικό ή πυριτικό φίλλερ). Με τον όρο φίλλερ χαρακτηρίζονται τα διερχόμενα από το κόσκινο των 0,075 mm (ή των 0,125 mm) στην Ευρώπη, ενώ στην Ιαπωνία για τον αντίστοιχο προσδιορισμό χρησιμοποιείται το κόσκινο των 0,090 mm.

Οι βασικές αρχές που διέπουν το σχεδιασμό ενός αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος σύμφωνα με τις συστάσεις της EFNARC παρουσιάζονται παρακάτω:

Ενδεικτικές αναλογίες υλικών αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος:

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

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, η ποσότητα του λεπτού υλικού πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 400-600 κιλών στο κυβικό μέτρο, προκειμένου το νωπό σκυρόδεμα να έχει τις απαιτούμενες ιδιότητες που θα του προσδώσουν χαρακτηριστικά αυτοσυμπύκνωσης. Το μείγμα που παρασκευάζεται κατ' αυτό

τον τρόπο ονομάζεται ΑΣΣ τύπου κονιάς (powder type SCC). Όταν παρά την προσθήκη των πολύ λεπτών υλικών εξακολουθεί να υπάρχει κίνδυνος απόμειξης, προστίθεται και μία μικρή ποσότητα προσθέτου ρυθμιστικού του ιξώδους (viscosity modifying agent, VMA) προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη αντίσταση του μείγματος σε απόμειξη. Τα μείγματα αυτά ονομάζονται μεικτά μείγματα ΑΣΣ (mixed type SCC). Η ποσότητα του απαιτούμενου προσθέτου για τη ρύθμιση του ιξώδους αυξάνεται, όσο μειώνεται η ποσότητα των λεπτών υλικών. Μάλιστα είναι δυνατή η παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος αποκλειστικά με προσθήκη VMA, χωρίς ανάλογη αύξηση των λεπτών υλικών (VMA type SCC), τα μείγματα αυτά όμως χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη ανθεκτικότητα στο χρόνο συγκρινόμενα με τα υπόλοιπα αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα [25].

Η σύνθεση του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος πρέπει να ελέγχεται όχι μόνο κάθε φορά που αλλάζει ο τύπος του τσιμέντου ή η πηγή των αδρανών υλικών όπως συμβαίνει με τα συμβατικά μείγματα, αλλά και κάθε φορά που αλλάζει η παρτίδα της χρησιμοποιούμενης άμμου, ακόμη και αν αυτή προέρχεται από το ίδιο λατομείο. Αυτό συμβαίνει διότι το ΑΣΣ είναι πολύ ευαίσθητο στην περιεκτικότητα του μείγματος σε λεπτά υλικά (φίλλερ) και οποιαδήποτε αλλαγή στο λεπτόκοκκο κλάσμα της άμμου (διερχόμενα από το κόσκινο των 0.125 mm) θα επιφέρει αξιοσημείωτες αλλαγές στη συμπεριφορά του ΑΣΣ [25]. Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα διαφοροποιείται από τα αντίστοιχα συμβατικά σκυροδέματα λόγω των ιδιοτήτων του σε νωπή κατάσταση. Τα βασικά χαρακτηριστικά του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ικανότητα πλήρωσης (filling ability), η αντίσταση στο διαχωρισμό των υλικών-απόμειξη (segregation resistance) καθώς και η ικανότητα εισχώρησης μεταξύ των οπλισμών (passing ability). Λόγω της απουσίας διεθνώς αναγνωρισμένων κανονισμών για το ΑΣΣ δεν υπάρχουν θεσμοθετημένες μέθοδοι ελέγχου των παραπάνω ιδιοτήτων. Είναι μάλιστα πολλές φορές συνηθισμένο μία από τις ανωτέρω ιδιότητες να μπορεί να μετρηθεί με περισσότερες από μία διαφορετικές συσκευές και μεθοδολογίες, γεγονός που επιφέρει σύγχυση. Στον πίνακα 1.20 παρουσιάζονται οι εναλλακτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των βασικών ιδιοτήτων του ΑΣΣ καθώς και οι οριακές τιμές αποδοχής.

Πίνακας 1.20 Κριτήρια αποδοχής των ιδιοτήτων νωπού αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος (CEB, 2005)

Ιδιότητα	Δοκιμή	Μονάδες μέτρησης	Εύρος μονάδων	
			ελάχιστο	μέγιστο
Ικανότητα πλήρωσης (filling ability)	Μέτρο εξάπλωσης	mm	550	850
	Χρόνος T_{50} στο μέτρο εξάπλωσης	sec	2	5
	Συσκευή V-funnel	sec	6	27
	Orimet	sec	0	5
Ικανότητα	Συσκευή L-box	(h2/h1)	0.75	1.0

Πρέπει πάντως να τονιστεί ότι το ΑΣΣ είναι ένα ειδικό σκυρόδεμα, και ως εκ τούτου οι νωπές ιδιότητές του θα πρέπει να σχεδιάζονται με βάση τις απαιτήσεις του εκάστοτε έργου [26].

1.5 ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (EN-206,ΚΤΣ-2016)

1.5.1 Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο για το Σκυρόδεμα EN 206

Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο για το Σκυρόδεμα EN 206 εισήχθη στην Ευρώπη σε μεταβατικές περιόδους που διέφεραν από χώρα σε χώρα. Στη χώρα μας εκδόθηκε το EN 206 – 1:2000 με το αντίστοιχο εθνικό προσάρτημα το οποίο περιλαμβάνει τον πίνακα ΣΤ1, ο οποίος καθορίζει τα ελάχιστα κιλά τσιμέντου ανά m^3 σκυροδέματος που απαιτούνται για τη σκυροδέτηση, τον μέγιστο λόγο Ν/Τ και την ελάχιστη κατηγορία αντοχής ανάλογα με την κατηγορία έκθεσης. Στην Ευρώπη έχει εκδοθεί και ισχύει το EN 206:2013, το οποίο αντικαθιστά το EN 206-1:2000. Εντός του 2016 εκδόθηκε σχέδιο του νέου ΚΤΣ που υιοθετεί γενικά το EN 206 και τον πίνακα ΣΤ1 του εθνικού προσαρτήματος.

Το πρότυπο αυτό βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις κατασκευών επί τόπου στο έργο, σε προκατασκευασμένα στοιχεία και προκατασκευασμένα δομικά προϊόντα κτιρίων και έργων.

Το πρότυπο εφαρμόζεται στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Σκυροδέματος κανονικού βάρους
- Βαρέων σκυροδεμάτων
- Ελαφροσκυροδεμάτων
- Προεντεταμένου σκυροδέματος

Το EN 206 δεν εφαρμόζεται σε περιπτώσεις:

- Αεριοσκυροδέματος
- Αφροσκυροδέματος
- Σκυροδέματος ανοιχτής δομής (σκυρόδεμα χωρίς λεπτά αδρανή)
- Κονιαμάτων με μέγιστη διάμετρο κόκκου $\varnothing \leq 4 \text{ mm}$
- Σκυροδέματος με πυκνότητα μικρότερη από $800 \text{ kg} / \text{m}^3$
- Πυρίμαχου σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα προδιαγράφεται είτε ως κατά παραγγελία σκυρόδεμα (λαμβάνοντας υπόψη την τάξη έκθεσης και τις απαιτήσεις) ή ως σκυρόδεμα προκαθορισμένης σύνθεσης (προδιαγράφοντας τη σύνθεσή του).

1.5.2 Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-2016)

Η μορφή και το περιεχόμενο του ΚΤΣ 2016 εναρμονίζονται με αυτή των Ευρωπαϊκών προτύπων, τηρώντας μεν τη συνήθη πλέον μορφή των Ελληνικών εν ισχύει κανονισμών που παραδοσιακά έχουν υιοθετηθεί στη δόμηση (π.χ., ΕΚΟΣ 2000, ΕΑΚ 2000, ΚΑΝΕΠΕ 2010, ΚΤΧ 2008) αλλά συγχρόνως, αποφορτίζει το κυρίως κείμενο από πολλές εξειδικευμένες απαιτήσεις είτε την ανάγκη ενσωμάτωσης ερμηνευτικών συνοδευτικών κειμένων, μέσω της χρήσης Παραρτημάτων. Ο ΚΤΣ 2016 καλύπτει το σκυρόδεμα κανονικού βάρους πυκνότητας από 2.000 kg/m³ ως και 2.600 kg/m³, το οποίο παράγεται με ανάμιξη των παρακάτω υλικών: τσιμέντο, φυσικά (λίθινα) αδρανή υλικά πυκνότητας από 2.000 kg/m³ έως 3.000 kg/m³, νερό, πρόσθετα (χημικά). Τα υλικά αυτά θα είναι αποκλειστικά αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη σύνθεσης. Για μεν το νερό, ισχύει το ΕΛΟΤ EN 1008. Τα λοιπά υλικά πρέπει να είναι σύμφωνα με τα εναρμονισμένα πρότυπα ΕΛΟΤ EN 197-1 (τσιμέντο), ΕΛΟΤ EN 12620 (αδρανή) και ΕΛΟΤ EN 934-2 (χημικά πρόσθετα), τα οποία έχουν προέλθει από τη μεταφορά και ενσωμάτωση των ισχυόντων ευρωπαϊκών στο ελληνικό σύστημα τυποποίησης. Ο ΚΤΣ 2016, περιλαμβάνει ένα μεγάλο μέρος από τα σκυροδέματα και συστατικά που περιγράφονται στο ΕΛΟΤ EN 206, με βασικό γνώμονα τα σκυροδέματα που απαντώνται σε μεγαλύτερο ποσοστό στη συνήθη πράξη, ενώ αναδεικνύει (λόγω και της μεγάλης χρονικής διάρκειας που έχει περάσει από την προηγούμενη έκδοσή του) τα θέματα εκείνα που θεωρούνται ότι είναι ώριμα πλέον για τα Ελληνικά δεδομένα δόμησης. Ως εκ τούτου, ο ΚΤΣ 2016 δεν περιλαμβάνει π.χ. τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής και επιτελεστικότητας, το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ), το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, το δομικό (φέρρον) ελαφροσκυρόδεμα, το σκυρόδεμα από ανακυκλωμένα αδρανή, το σκυρόδεμα με αρχιτεκτονικές απαιτήσεις, το υδατοπερατό σκυρόδεμα (perVIOUS, no fines concrete) και τη χρήση των προσμίκτων στο σκυρόδεμα. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι, ειδικά για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, το συγκεκριμένο προϊόν δεν θεωρήθηκε ως μη ώριμο να ενσωματωθεί στον ΚΤΣ 2016. Όμως, λόγω της γενικότερης μείωσης του πλήθους των έργων η ζήτησή του σε ευρεία κλίμακα έργων είναι ακόμη περιορισμένη. [27]

1.5.2.1 Οι κατηγορίες έκθεσης στο περιβάλλον σύμφωνα με τον ΚΤΣ-2016

Ο ΚΤΣ-2016, είναι ένας Κανονισμός που στηρίχτηκε κυρίως (πχ κατά 70%) στον ΚΤΣ-97 και ενσωμάτωσε μέσα του διατάξεις από Ευρωπαϊκά Πρότυπα(EN) κυρίως:

- ΕΛΟΤ EN 206 +Εθνικό Προσάρτημα (24.2.2011)
- ΕΛΟΤ EN 13670 (execution)
- ΕΛΟΤ EN 13791 (έμμεσες μέθοδοι-NDT) και πολλά ακόμη ΕΛΟΤ EN για δοκιμές.

Μία από τις κυριότερες καινοτομίες που εισήγαγε ο ΚΤΣ-2016 είναι η καθιέρωση των κατηγοριών έκθεσης στο περιβάλλον (exposure class) και των αντίστοιχων απαιτήσεων για το σκυρόδεμα (βλέπε : Πίνακα Β2-7, σελίς 18091 του ΦΕΚ) και: ΠΒ-2 (σελίς:18147). Ο Κανονισμός στοχεύει στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος έναντι διαφόρων δράσεων προσβολής όπως:

- Ενανθράκωση (carbonation): ΧC1,...,ΧC4
- Χλωριόντων θαλασσινού νερού ή όχι: ΧS1,...,ΧD1
- Ψύξη/απόψυξη : ΧF1,...,ΧF4

- Χημική προσβολή: ΧΑ1,...,ΧΑ3
- Τριβή/Αποτριβή: ΧΜ1,...,ΧΜ3

συνολικά: 24 κατηγορίες έκθεσης, για τις οποίες απαιτούνται όρια, για την προστασία από διάβρωση των χαλύβων, με :

- Μέγιστο λόγο : N/T , π.χ 0,50-0,55
- Ελάχιστη κατηγορία αντοχής, π.χ C30/37 ή C25/30
- Ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, π.χ 300-320 kg/m^3
- Ελάχιστη επικάλυψη σπλισμού, π.χ 35-45 mm

Στον ΚΤΣ-2016 οι περιβαλλοντικές επιδράσεις κατηγοριοποιούνται ως κατηγορίες έκθεσης. Οι τάξεις εκθέσεις που επιλέγονται εξαρτώνται από τις προβλέψεις που ισχύουν για την περιοχή χρήσης του σκυροδέματος. Αυτή η κατηγοριοποίηση λαμβάνει υπόψη της τις ειδικές συνθήκες που ισχύουν στην περιοχή χρήσης του σκυροδέματος ή την εφαρμογή προστατευτικών μέτρων, τη χρήση ανοξείδωτου χάλυβα ή άλλου μετάλλου με αντοχή σε διάβρωση και τη χρήση προστατευτικών βαφών για το σκυρόδεμα ή τον σπλισμό. Το σκυρόδεμα μπορεί να υπόκειται σε περισσότερες από μία από τις επιδράσεις που περιγράφονται. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες υπόκειται το σκυρόδεμα μπορεί να είναι απαραίτητο να περιγραφούν ως συνδυασμός κατηγοριών έκθεσης.

Οι κατηγορίες έκθεσης που απασχολούν την παρούσα διπλωματική είναι η ενανθράκωση (XC) και η προσβολή από χλωριόντα (XS, XD).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κατηγορίες εκθέσεις του σκυροδέματος σε διάφορα περιβάλλοντα βάση του ΚΤΣ-2016.

Πίνακας 1.21: Κατηγορίες έκθεσης βάσει ΚΤΣ-2016

Χαρακτηρισμός κατηγορίας	Περιγραφή περιβάλλοντος	Παραδείγματα επεξήγησης για το πού δύνανται να υπάρχουν τέτοιες κατηγορίες έκθεσης
XO	Για σκυρόδεμα χωρίς οπλισμό ή εμβαπτισμένα μέταλλα: Όλες οι εκθέσεις εκτός περιπτώσεων κύκλων ψύξης/απόψυξης, φθοράς ή χημικής προσβολής. Για οπλισμένο σκυρόδεμα ή με ενσωματωμένα μέταλλα: Πολύ ξηρό	Σκυρόδεμα εντός κτιριακών κατασκευών με πολύ χαμηλή ατμοσφαιρική υγρασία
Διάβρωση λόγω ενανθράκωσης		
XC1	Ξηρό ή μόνιμα υγρό	Σκυρόδεμα εντός κτιριακών κατασκευών με χαμηλή ατμοσφαιρική υγρασία. Σκυρόδεμα μόνιμα εμβαπτισμένο σε νερό.
XC2	Υγρό, σπάνια ξηρό	Επιφάνειες σκυροδέματος που βρίσκονται σε μακροπρόθεσμη επαφή με το νερό. Πολλές περιπτώσεις θεμελιώσεων.
XC3	Μεσαία υγρασία	Σκυρόδεμα εντός κτιριακών κατασκευών με μεσαία ή υψηλή ατμοσφαιρική υγρασία. Σκυρόδεμα σε εξωτερικούς χώρους προστατευμένο από τη βροχή.
XC4	Κυκλική ύγραση και ξήρανση	Επιφάνειες σκυροδέματος που υπόκεινται σε επαφή με νερό (εξαιρούμενης της κατηγορίας XC2)
Διάβρωση που προκαλείται από χλωριόντα εκτός εκείνων του θαλασσινού νερού		
XD1	Μεσαία υγρασία	Επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε αερομεταφερόμενα χλωριόντα
XD2	Υγρό, σπάνια ξηρό	Πισίνες, σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε βιομηχανικά ύδατα που περιέχουν χλωριόντα
XD3	Κυκλική ύγραση και ξήρανση	Τμήματα γεφυρών που εκτίθενται σε παγολυτικά άλατα, πεζοδρόμια, χώροι στάθμευσης αυτοκινήτων
Διάβρωση που προκαλείται από χλωριόντα του θαλασσινού νερού		
XS1	Έκθεση σε αερομεταφερόμενα άλατα αλλά όχι σε απευθείας επαφή με το θαλασινό νερό	Κατασκευές σε παράκτιες περιοχές
XS2	Μόνιμη Εμβάπτιση	Τμήματα λιμενικών κατασκευών
XS3	Παλίρροια, ζώνες κυμάτων και ψεκασμού	Τμήματα λιμενικών κατασκευών
Προσβολή λόγω κύκλων ψύξης/απόψυξης με ή χωρίς παγολυτικά άλατα		
XF1	Μεσαίος κορεσμός σε νερό, χωρίς παγολυτικά άλατα	Κατακόρυφες επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε βροχή και παγετό
XF2	Μεσαίος κορεσμός σε νερό με παγολυτικά άλατα	Κατακόρυφες επιφάνειες σκυροδέματος οδικών κατασκευών εκτεθειμένων σε παγετό και αερομεταφερόμενα παγολυτικά άλατα
XF3	Υψηλός κορεσμός σε νερό, χωρίς παγολυτικά άλατα	Οριζόντιες επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες στη βροχή και τον παγετό
XF4	Υψηλός κορεσμός σε νερό, με παγολυτικά άλατα	Κατασκευές οδοποιίας και καταστρώματα γεφυρών εκτεθειμένα σε παγολυτικά άλατα. Επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε παγετό και απευθείας ψεκασμό παγολυτικών αλάτων.
Χημική προσβολή		
XA1	Ελαφριά προσβολή λόγω χημικού περιβάλλοντος σύμφωνα με τον Πίνακα 8	Σκυρόδεμα σε έργα βιολογικού καθαρισμού, κάδοι απορριμμάτων
XA2	Μέτρια προσβολή λόγω χημικού περιβάλλοντος σύμφωνα με τον Πίνακα 8	Στοιχεία σκυροδέματος σε επαφή με το θαλασινό νερό, στοιχεία σε έδαφος διαβρωτικό για το σκυρόδεμα.
XA3	Έντονη προσβολή λόγω χημικού περιβάλλοντος σύμφωνα με τον Πίνακα 8	Βιομηχανικές εγκαταστάσεις με ουσίες διαβρωτικές για το σκυρόδεμα, καπνοδόχοι από σκυρόδεμα για έκλυση προϊόντων καύσης

Σύμφωνα με τον ΚΤΣ-2016 για ορισμένα σκυροδέματα, λόγω της ειδικής τους χρήσης(έκθεση σε συγκεκριμένο περιβάλλον), υπάρχουν πρόσθετες απαιτήσεις. Τα σκυροδέματα αυτά (που μπορεί να ανήκουν φυσικά είτε στην κατηγορία του εργοστασιακού είτε στην κατηγορία του εργοταξιακού), ταξινομούνται σε 7 κατηγορίες και είναι τα εξής:

- σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε αέρα που περιέχει θαλάσσια άλατα (παραθαλάσσιο περιβάλλον) – Διάβρωση λόγω χλωριόντων από θαλασσινό νερό
- σκυρόδεμα ανθεκτικό σε επιφανειακή φθορά – Τριβή / απότριψη
- σκυρόδεμα για θαλάσσιες κατασκευές
- σκυρόδεμα μέσα σε νερό (πλην θαλασσινού νερού)
- σκυρόδεμα μειωμένης υδατοπερατότητας
- σκυρόδεμα ανθεκτικό σε παγετό – Προσβολή από ψύξη / απόψυξη
- σκυρόδεμα που εκτίθεται σε χημικές προσβολές

Στα σκυροδέματα αυτά εφαρμόζονται οι επί μέρους απαιτήσεις που ακολουθούν.

Σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε αέρα που περιέχει θαλάσσια άλατα (παραθαλάσσιο περιβάλλον) – Διάβρωση λόγω χλωριόντων από θαλασσινό νερό.

Πρόκειται περί σκυροδέματος που χρησιμοποιείται σε κατασκευές σε παραθαλάσσιο περιβάλλον και σε απόσταση από την ακτή μέχρι 1,5 km. Οι επιφάνειες του σκυροδέματος αυτού εκτίθενται στον αέρα που περιέχει θαλάσσια άλατα (αλλά δεν διαβρέχονται από θάλασσα, ούτε καταιονίζονται με θαλασσινό νερό, ούτε βέβια βρίσκονται μέσα στη θάλασσα). Σκυρόδεμα με εκτεθειμένες επιφάνειες σε αέρα που περιέχει θαλάσσια άλατα εντάσσεται (από το μελετητή του έργου) στη κατηγορία XS1 (Πίνακας 1.23), με τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Μέγ. N/T : 0,50 και
- Ελάχ. Περιεκτικότητα Τσιμέντου: 330 kg

Σκυρόδεμα του οποίου οι επιφάνειες είναι πλήρως προστατευμένες από θαλασσινό αέρα (π.χ. εσωτερικές, υπόγειες, κ.λπ.), δεν θεωρείται σκυρόδεμα σε παραθαλάσσιο περιβάλλον.

Σκυρόδεμα ανθεκτικό σε επιφανειακή φθορά – Τριβή / απότριψη.

Πρόκειται περί σκυροδέματος χωρίς ειδικές επενδύσεις ή ειδική επιφανειακή επεξεργασία, που υφίσταται μηχανική καταπόνηση από τριβή και κρούση, όπως είναι το σκυρόδεμα χώρων κυκλοφορίας και στάθμευσης οχημάτων, προσπέλασης κτιρίων, πρανών ποταμών με φερτές ύλες κ.λπ. Το σκυρόδεμα αυτό θα εντάσσεται (από τον μελετητή του έργου) σε μια από τις κατηγορίες έκθεσης σε τριβή/απότριψη: XM1, XM2, XM3 που αναφέρονται στον Πίνακα 1.23 με τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Μέγ. N/T : 0,40 έως 0,50
- Ελάχ Περιεκτικότητα Τσιμέντου: 320 kg έως 360 kg

Η σύνθεση του μίγματος πρέπει να έχει μελετηθεί, έτσι ώστε αυτό να έχει τη μικρότερη εξίδρωση. Η συντήρηση πρέπει να αρχίζει αμέσως μετά την διάστρωση και να διαρκεί 14 ημέρες τουλάχιστον (συνιστάται η συντήρηση να γίνεται με υγρές λινάτσες). Στη χώρα μας υπάρχουν λίγες πηγές πετρωμάτων μεγάλης σκληρότητας (γρανίτες υπάρχουν στη Δήλο, Νάξο, τη Χαλκιδική κ.α.). Η θραύση τους δε, λόγω της φθοράς που προκαλούν στους θραυστήρες, ανεβάζει το κόστος τους. Για τους λόγους αυτούς, είναι οικονομικότερη η επικάλυψη συνήθους σκυροδέματος με επιστρώσεις ή πλάκες που περιέχουν σκληρά αδρανή (γρανιτικό πορφύρη, σμύριδα, κ.ά). Οι προαναφερθείσες απαιτήσεις δεν εξασφαλίζουν αντλιοσθηρές επιφάνειες σκυροδέματος. Οι απαιτήσεις αντλιοσθηρών επιφανειών σκυροδέματος δεν είναι αντικείμενο του ΚΤΣ-16.

Σκυρόδεμα για θαλάσσιες κατασκευές

Πρόκειται περί κατασκευών που βρίσκονται μέσα στη θάλασσα ή διαβρέχονται από θάλασσα ή καταιονίζονται με θαλασσινό νερό. Το σκυρόδεμα θα εντάσσεται (από τον μελετητή του έργου) σε μια από τις κατηγορίες: XS2, XS3, που αναφέρονται στον Πίνακα 1.23 με τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Μέγ. N/T : 0,45 έως 0,50
- Ελάχ. Περιεκτικότητα Τσιμέντου: 330 kg έως 350 kg

Ακόμη και αν πρόκειται για άοπλο σκυρόδεμα αλλά ειδικών απαιτήσεων όπως: προστασίας ακτών, ανάσχεσης ρευμάτων κ.λπ., θα ισχύουν οι προαναφερθείσες απαιτήσεις.

Σκυρόδεμα μέσα σε νερό (πλην θαλασσινού νερού)

Πρόκειται για σκυρόδεμα που διαστρώνεται κάτω από την επιφάνεια του νερού. Το νερό δεν είναι θαλασσινό, ούτε είναι διαβρωτικό με την έννοια των χημικών προσβολών έτσι όπως περιγράφεται παρακάτω. Το σκυρόδεμα θα ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Μέγ. N/T : 0,55
- Ελάχ. Περιεκτικότητα Τσιμέντου: 350 kg
- κατηγορία κάθισης: S3 ή S4

Το σκυρόδεμα δεν θα δονείται και δεν θα μετακινείται από τη θέση που πήρε μετά την έξοδο του από τον κάδο ή το σωλήνα. Όταν το βάθος του νερού είναι μεγαλύτερο του 1 μέτρου το σκυρόδεμα δεν θα αφήνεται ελεύθερο μέσα στο νερό αλλά θα διαστρώνεται.

Σκυρόδεμα μειωμένης υδατοπερατότητας

Η υδατοπερατότητα του σκυροδέματος αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση του λόγου N/T, γι' αυτό συνιστάται η χρήση μικρών λόγων N/T. Σκυροδέματα μειωμένης υδατοπερατότητας ικανοποιούν τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Μέγ. N/T : 0,50
- Ελάχ. Περιεκτικότητα Τσιμέντου: 350 kg

Για γαρμπιλοσκυρόδεμα η ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου πρέπει να είναι 370 kg Η συμπύκνωση πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή για αποφυγή κενών και φυσαλίδων μέσα στη μάζα του σκυροδέματος. Η συντήρηση πρέπει να αρχίζει αμέσως μετά τη διάστρωση και να διαρκεί το κατάλληλο χρονικό διάστημα, ώστε να αποφευχθούν ρηγματώσεις, π.χ. από συστολή πριν από την πήξη, από συστολή ξήρανσης, καθώς και από θερμοκρασιακές μεταβολές.

Σκυρόδεμα ανθεκτικό σε παγετό – Προσβολή από ψύξη/απόψυξη

Πρόκειται κυρίως για σκυροδέματα που εντάσσονται από τον μελετητή του έργου σε μία από τις κατηγορίες έκθεσης XF1, XF2, XF3, XF4, έτσι όπως περιγράφονται στον Πίνακα 1.23, με τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Μέγ. N/T : 0,50 έως 0,55
- Ελάχ. Περιεκτικότητα Τσιμέντου: 300 kg έως 320 kg

Όταν το σκυρόδεμα εντάσσεται στην κατηγορία XF2, XF3 ή XF4 τότε γίνεται υποχρεωτικά προσθήκη αερακτικού, ώστε η ελάχιστη % περιεκτικότητα αέρα στο σκυρόδεμα να είναι 4%.

Σκυρόδεμα που εκτίθεται σε χημικές προσβολές

Πρόκειται για σκυρόδεμα που εκτίθεται σε χημικές ουσίες που περιέχονται στο νερό ή στο έδαφος. Σκυρόδεμα που εκτίθεται σε χημικές προσβολές εντάσσεται (από το μελετητή του έργου) σε μια από τις κατηγορίες: XA1, XA2, XA3, έτσι όπως περιγράφονται στον Πίνακα 1.23, με τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Μέγ. N/T : 0,45 έως 0,55
- Ελάχ. Περιεκτικότητα Τσιμέντου: 320 kg έως 360 kg

Οι απαιτήσεις του πίνακα 1.22 ισχύουν για ήπιες κλιματολογικές συνθήκες, για φυσικό νερό που έχει μολυνθεί από χημικές ουσίες και είναι στάσιμο ή ρέει με βραδύτητα, όπως και για εδάφη που είναι υγρά ή υγραίνονται συχνά. Δεν ισχύουν για υγρά βιομηχανικά απόβλητα, για αποθέσεις στερεών βιομηχανικών αποβλήτων και γενικά για εδάφη με περιεκτικότητα θειούχων μεγαλύτερη από 100mg θειοϊόντων (S^{2-}) ανά kg εδαφικού υλικού ξηραμένου στον αέρα. Στις περιπτώσεις αυτές, όπως επίσης και σε περιπτώσεις που το σκυρόδεμα έρχεται σε επαφή με θερμό θαλασσινό νερό (π.χ. σταθμοί αφαλατώσεως), καθώς και σε έργα βιολογικών καθαρισμών, θα γίνεται ειδική μελέτη, όπου θα καθορίζονται η σύνθεση του σκυροδέματος, ο τύπος του τσιμέντου και άλλα προστατευτικά μέτρα. (Η συμπύκνωση πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή. Η συντήρηση συνιστάται να γίνεται με υγρές λινάτσες.) Η συντήρηση πρέπει να αρχίζει αμέσως μετά τη διάστρωση και να διαρκεί τουλάχιστον 14 ημέρες. Όταν το σκυρόδεμα εντάσσεται στην κατηγορία XA1, τότε δεν επιτρέπεται η χρήση τσιμέντου τύπων CEM II/B-L και CEM II/B-LL. Όταν η ύπαρξη θειικών (SO_4^{2-}) οδηγεί σε κατηγορία XA2 και XA3, τότε είναι απαραίτητη η χρήση τσιμέντου ανθεκτικού σε θειικά, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1. Εάν η ένταξη στις κατηγορίες XA2 και XA3 γίνεται λόγω των υπόλοιπων παραγόντων που αναφέρονται στον πίνακα 1.22, τότε επιτρέπεται η χρήση και των άλλων τύπων τσιμέντου του προτύπου ΕΛΟΤ EN 197-1, πλην των τύπων CEM II/B-L και CEM II/B-LL.

Πίνακας 1.22: Περιοριστικές τιμές για κατηγορίες έκθεσης σε χημικές επιθέσεις από φυσικά εδάφη και υπόγεια ύδατα.

<p>Τα διαβρωτικά χημικά χαρακτηριστικά αναφέρονται σε έδαφος και υπόγειο νερό, σε θερμοκρασίες 5-25°C, με το νερό σε πολύ μικρή ταχύτητα, σχεδόν να ηρεμεί. Ως κατηγορία έκθεσης λαμβάνεται η δυσμενέστερη κατηγορία από αυτές που θα προκύψουν για κάθε χημικό παράγοντα ξεχωριστά. Αν συγχρόνως δύο ή περισσότερες τιμές χημικών παραγόντων βρίσκονται στην ίδια στήλη τότε ως κατηγορία έκθεσης θεωρείται η επόμενη (δυσμενέστερη) του Πίνακα, εκτός αν ειδική μελέτη για τις συγκεκριμένες συνθήκες αποδείξει ότι δεν είναι απαραίτητο.</p>				
Χημικά χαρακτηριστικά	Μέθοδος ελέγχου	XA1	XA2	XA3
Υπόγειο νερό				
SO ₄ ²⁻ mg/l	ΕΛΟΤ EN 196-2	≥ 200 και ≤ 600	> 600 και ≤ 3000	> 3000 και ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 και ≥ 5,5	<5,5 και ≥ 4,5	<4,5 και ≥4,0
Διαβρωτικό CO ₂ mg/l	EN 13577	≥15 και ≤40	>40 και ≤100	>100 έως κορεσμό
NH ₄ ⁺ mg/l	ISO 7150-1	≥15 και ≤ 30	>30 και ≤ 60	>60 και ≤100
Mg ²⁺ mg/l	ISO 7980	≥ 300 και ≤ 1000	> 1000 και ≤ 3000	> 3000 έως κορεσμό
Χημικά Χαρακτηριστικά	Μέθοδος ελέγχου	XA1	XA2	XA3
Έδαφος				
SO ₄ ²⁻ mg/kg ^a συνολικό	ΕΛΟΤ EN 196-2 ^β	>2000 και <3000 ^γ	>3000 ^γ και <12000	>12000 και <24000
Βαθμός οξύτητας κατά τη μέθοδο Baumann Gully ml/kg	prEN16502	>200	Δεν συναντάται στην πράξη	
<p>^a Αργιλικά εδάφη με διαπερατότητα (permeability) μικρότερη από 10⁻⁵ m/s μπορεί να μετακινήθούν σε αμέσως χαμηλότερη κατηγορία ^β Η μέθοδος ελέγχου καθορίζει την αποβολή του SO₄²⁻ με χρήση υδροχλωρικού οξέος. Εναλλακτικά, επιτρέπεται η αποβολή με χρήση νερού αρκεί να υπάρχει η απαραίτητη εμπειρία. ^γ Το όριο των 3000 mg/kg πρέπει να γίνεται 2000 mg/kg όταν υπάρχει κίνδυνος συσσώρευσης θειικών (sulfate) ιόντων λόγω της ύγρανσης και ξήρανσης ή λόγω αναρρόφησης των τριχοειδών (capillary suction)</p>				

Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 1.23) αναγράφει τις απαιτήσεις για το σκυρόδεμα, ανάλογα με την κατηγορία έκθεσης.

Πίνακας B2-7 - Απαιτήσεις για το σκυρόδεμα ανάλογα με την κατηγορία έκθεσης
Κατηγορίες έκθεσης

Κατηγορία έκθεσης	Χωρίς κίνδυνο διάβρωσης ή προσβολής	Διάβρωση λόγω χλωριόντων												Χημική προσβολή ^β	Τριβή / Απόσφιξη									
		Διάβρωση λόγω χλωριόντων						Χλωριόντα που δεν προέρχονται από θαλασσινό νερό																
		Διάβρωση λόγω αναθράκωσης			Τσιμεντά II, III, IV (Εκτός CEM III/B-L + CEM III/B-L)			Τσιμεντά I (+ CEM III/B-L + CEM III/B-L)			Χλωριόντα που δεν προέρχονται από θαλασσινό νερό													
XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3		
1 max N/T	---	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,45	0,50	0,45	0,55	0,55	0,55	0,50	0,55	0,50	0,50	0,45	0,40	0,40	
2 min κατηγορία αντοχής	C 12/15	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 25/30	C 25/30	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 35/45	C 35/45	C 30/37	C 25/30	C 25/30	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 35/45	C 35/45	C 40/50	C 50/60	
3 min περιεκτικότητα σε τσιμέντο kg/m ³	---	280	300	300	330	330	350	330	330	330	350	330	350	320	300	300	320	320	340	360	320	340	360	
4 min επικάλυψη για ανθεκτικότητα ^γ mm	---	25	25	35	35	45	45	50	45	40	40	50	50	35	40	40	35	35	35	35	35	35	35	
5 min περιεκτικότητα σε αέρα (%)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	4,0 ^δ	4,0 ^δ	4,0 ^δ	---	---	---	---	---	---	
6 Άλλες απαιτήσεις	Σημ.: Άσπλο σκυρόδεμα				Σημ.: Παραθαλάσσιο 1,5 km	Σημ.: Μόνη μέσα στη θαλάσσια	Σημ.: Διαβροχόμενες νέες ζυγαριές													Αδρανή σύμφωνα με ΕΛΟΤ EN12620 με ικανοποιητική αντοχή σε παγετό ^δ			Τοιμένο ανθεκτικό σε θραύση ^ε	LA ≤ 27 LA ≤ 25 LA ≤ 22

^α Όταν δεν προστίθεται αερακτικό πρόσθετο, η επτελεστικότητα του σκυροδέματος ελέγχεται με κατάλληλη μέθοδο, σε σύγκριση με σκυρόδεμα του οποίου η αντοχή σε ψύξη/αποψύξη για την αντίστοιχη κατηγορία έκθεσης είναι αποδεκτή.

^β Για αυτή την κατηγορία έκθεσης (XA) ισχύουν και οι παράγραφοι B7.7.5 και B7.7.6 του παρόντος ΚΤΣ. Όταν η ύπαρξη SO₂ οδηγεί σε κατηγορία XA2 και XA3, τότε είναι απαραίτητη η χρήση τσιμεντού ανθεκτικού σε θραύση σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1

^γ Οι τιμές της επικάλυψης αφορούν σπλιμένο σκυρόδεμα.

^δ Για τα αδρανή υλικά ισχύει και η παράγραφος B1.3.3.3 του παρόντος ΚΤΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

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

Με τον όρο διάβρωση εννοούμε την καταστροφή, φθορά ή και λειτουργική αχρήστευση ενός υλικού εξαιτίας χημικής ή ηλεκτροχημικής ή μηχανικής δράσης του υλικού με το περιβάλλον του [16].

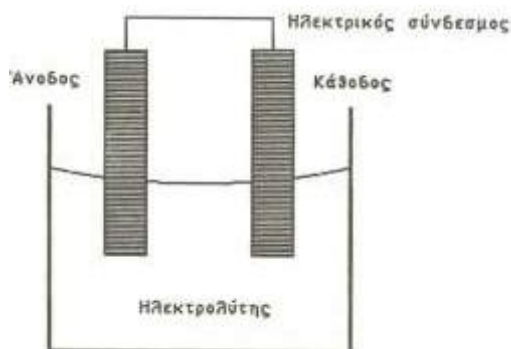
Ένας άλλος ορισμός της διάβρωσης, όπως δίνεται από το ISO 8044 – 86 είναι: «Διάβρωση είναι η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του μετάλλου, του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος, που αυτά αποτελούν τμήμα του» (ISO 8044 – 86, 1999).

Ένας άλλος πληρέστερος ορισμός της διάβρωσης όπως δίνεται από την «Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Διάβρωσης» της «Διεθνούς Επιτροπής Θαλάσσιας Διάβρωσης και Ρύπανσης των Υφάλων» είναι ο παρακάτω: «Διάβρωση λέγεται η αυθόρμητη, κατά επέκταση εκβιασμένη, ηλεκτροχημικής κατά επέκταση χημικής, κατά επέκταση μηχανικής κατά επέκταση βιολογικής φύσης, αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων και των κραμάτων, που οδηγεί σε απώλεια υλικού» [23].

Με την γνώση των τύπων και την κατανόηση των μηχανισμών και των αιτιών της διάβρωσης, είναι δυνατόν να ληφθούν μέτρα πρόληψης. Για παράδειγμα μπορούμε να αλλάξουμε τη φύση του περιβάλλοντος, να επιλέξουμε ένα σχετικά μη δραστικό υλικό ή να προστατέψουμε το υλικό με εφαρμογή προστατευτικού αντιδιαβρωτικού φιλμ. Θα πρέπει επίσης να διευκρινιστεί ότι ως απώλεια υλικού συνέπεια της διάβρωσης δεν σημαίνει πάντα ότι το βάρος του σώματος μικραίνει. Αντίθετα υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο σχηματισμός στην επιφάνεια ενώσεων με έντονη πρόσφυση σε αυτή, έχει ως συνέπεια την αύξηση του βάρους του υλικού. Ως απώλεια υλικού εννοείται η απώλεια ως προς την αρχική του μορφή. Στην περίπτωση του σιδήρου, όταν ποσό αυτού μετατρέπεται εξαιτίας της διάβρωσης, σε οξείδιο, η μορφή, που σε αυτή βρίσκεται ο σίδηρος στο οξείδιο, δεν είναι η αρχική μεταλλική μορφή του και θεωρείται το ποσό αυτό του σιδήρου ως απώλεια υλικού [26].

2.1.1 Διάταξη ενός διαβρωτικού συστήματος

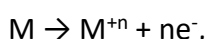
Οι αντιδράσεις που εμφανίζονται κατά τη διάβρωση είναι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις γιατί εμπεριέχουν μεταφορά φορτίου στη διεπιφάνεια μεταξύ ηλεκτρονικού αγωγού (μέταλλο) και ενός ιοντικού αγωγού (ηλεκτρολύτης), που συνεπάγεται την οξείδωση του μετάλλου (M) και την αναγωγή του οξειδωτικού O_x . Το φαινόμενο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



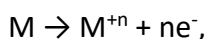
Σχήμα 2.1 Ηλεκτρολυτικό στοιχείο

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

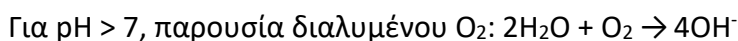
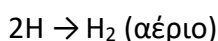
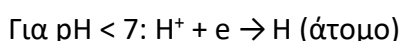
Η αντίδραση οξείδωσης του μετάλλου έχει την μορφή:



όπου n ο αριθμός των ηλεκτρονίων που χάνει κάθε άτομο και εξαρτάται από την κατάσταση της οξείδωσης του μετάλλου. Στην κάθοδο πραγματοποιείται είτε η αναγωγή των ιόντων του μετάλλου, σύμφωνα με την αντίδραση:

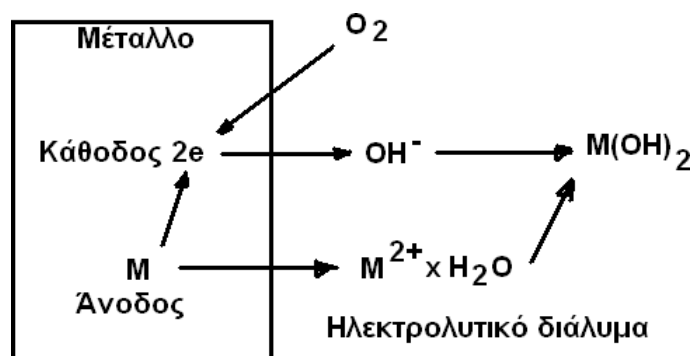


είτε η αναγωγή του περιβάλλοντος. Στο σύνηθες διαβρωτικό περιβάλλον των υδατικών ηλεκτρολυτικών διαλυμάτων, 2 διαφορετικές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μπορούν να συμβούν στην κάθοδο, ανάλογα με το pH του διαλύματος.



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

παράγει ηλεκτρόνια μέσα στο μέταλλο και της αναγωγής που καταναλώνει αυτά τα ηλεκτρόνια έχουν σαν αποτέλεσμα την διάβρωση. Στο σχήμα 2.2 φαίνονται οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην άνοδο και στην κάθοδο κατά την διαδικασία της υγρής διάβρωσης ενός δισθενούς μετάλλου.



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

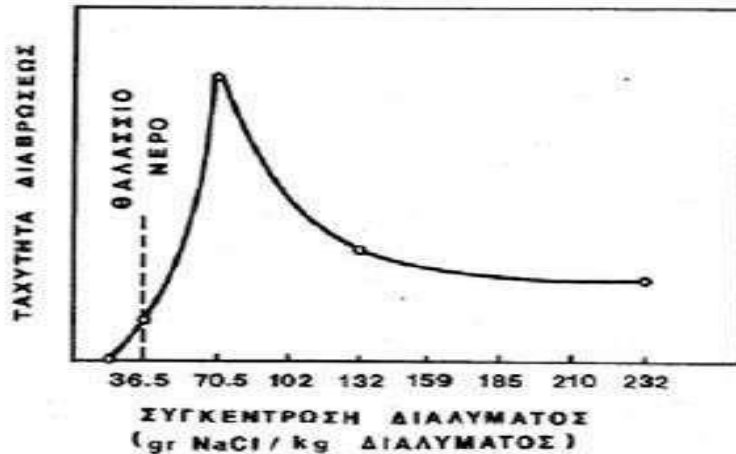
2.1.2 Ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα

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

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

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

- Η ύπαρξη ενεργών "κέντρων" στην επιφάνεια του χάλυβα (όπως για παράδειγμα οξείες αιχμές ή πληγές, κάμψεις με μικρή ακτίνα καμπυλότητας).
- Η επαφή χαλύβων διαφορετικού είδους και διαφορετικού ηλεκτροχημικού δυναμικού.
- Η επαφή χαλύβων διαφορετικού βαθμού διάβρωσης.
- Η ψυχρή κατεργασία (ολκή, έλαση).
- Το αυξημένο πορώδες του σκυροδέματος ^[33]



Σχήμα 2.3: Μεταβολή της ταχύτητας διάβρωσης σε σχέση με τη συγκέντρωση του Χλωριούχου Νατρίου

2.1.3 Ατμοσφαιρική διάβρωση μετάλλων

Η ατμόσφαιρα περιέχει πάντοτε ένα ποσοστό υγρασίας που συμπυκνώνεται, ιδιαίτερα όταν ο καιρός είναι υγρός, πάνω στην επιφάνεια των αντικειμένων. Κατ' αρχάς, λόγω προέλευσης το στρώμα αυτό περιέχει διαλυμένα διάφορα ατμοσφαιρικά αέρια, ανάμεσα στα οποία και οξυγόνο. Το ποσοστό του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα είναι περίπου 20% άρα η παρουσία της υγρασίας είναι αυτή που καθορίζει την έναρξη της διάβρωσης. Επιπρόσθετα η σχετική υγρασία στον ατμοσφαιρικό αέρα, χωρίς να είναι ορατή στην επιφάνεια του χάλυβα μπορεί επίσης να προκαλέσει σχηματισμό οξειδίων στον χάλυβα. Σύμφωνα με εργασίες που έχουν δημοσιευτεί, σε καθαρό αέρα με σχετική υγρασία <100% ο ρυθμός διάβρωσης του χάλυβα είναι μικρότερος από αυτόν σε ατμόσφαιρα στην οποία περιέχονται ρύποι όπως διοξείδιο του θείου. Επίσης μεγάλοι ρυθμοί διάβρωσης παρατηρούνται για σχετική υγρασία 70% η οποία ορίζεται ως κρίσιμη σχετική υγρασία ^[35].

Η επίδραση της υγρασίας στο ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα εξαρτάται από το χρόνο επαφής της με τη μεταλλική επιφάνεια. Γενικά η επίδραση της σχετικής υγρασίας στο ρυθμό διάβρωσης είναι πολύ πιο σημαντική από την επίδραση της βροχής, λόγω του ότι το ποσοστό της σχετικής υγρασίας 70% το οποίο χαρακτηρίζεται ως κρίσιμο για την ταχεία εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης μπορεί να διατηρείται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ^[36]. Παρόλο που το SO₂ διαλύεται στην υγρασία προς σχηματισμό οξέων, η δράση του δεν είναι άμεση προσβολή της επιφάνειας του χάλυβα, αλλά στον σχηματισμό αλάτων όπως άλατα θειικού σίδηρου (FeSO₄). Τα θειικά άλατα χαρακτηρίζονται ως διαβρωτικά άλατα τα οποία δια μέσω μιας σειράς αντιδράσεων δημιουργούν σκουριά. Επιπρόσθετα τα θειικά άλατα έχουν υδρόφιλο χαρακτήρα (hygroscopic) έτσι μπορούν και παγιδεύουν την υγρασία στην επιφάνεια του χάλυβα. Τα θειικά άλατα παρουσιάζουν μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον στην περίπτωση των οργανικών επιστρωμάτων προστασίας σε επιφάνειες είδη οξειδωμένες ^[34]. Στην περίπτωση αυτή τα θειικά άλατα είναι ο κυριότερος παράγοντας διάρρηξης και αστοχίας των οργανικών επιστρωμάτων.

Η παρουσία των ιόντων χλωρίου στην επιφάνεια του χάλυβα τυπικά συναντάται σε παραθαλάσσιες περιοχές, παρόλα αυτά έχει διαπιστωθεί ότι η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου παρουσιάζεται σχετικά υψηλή ακόμα και στην ενδοχώρα λόγω του ότι τα χλωριόντα μεταφέρονται δια μέσω του άνεμου. Η έναρξη της διάβρωσης του χάλυβα παρουσία ιόντων χλωρίου στην επιφάνεια του συμβαίνει για τιμές σχετικής υγρασίας και κάτω της κρίσιμης < 70%. Έχει βρεθεί ότι παρουσία χλωριόντων στην ατμόσφαιρα η διάβρωση του χάλυβα μπορεί να ξεκινήσει για σχετική υγρασία μικρότερη από 40% [34]. Γενικά όταν η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου στην ατμόσφαιρα μειώνεται συναρτήσει της απόστασης από την ακτογραμμή παρατηρείται και μείωση του ρυθμού διάβρωσης του χάλυβα. Συνθήκες έκθεσης όπου το σπρέι της θάλασσας διαβρέχει συνεχώς χαλύβδινη επιφάνεια, οδηγεί σε έντονη διάβρωση [34].

2.1.4 Διάβρωση μετάλλων στο νερό

Στο νερό η διαθεσιμότητα του οξυγόνου είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, σε αντίθεση με την ατμόσφαιρα όπου η επάρκεια του είναι δεδομένη άρα σημαντικός παράγων έναρξης της διάβρωσης θεωρείται η ύπαρξη της υγρασίας. Συνεπώς η διάβρωση του χάλυβα στο νερό προϋποθέτει για την έναρξή της την επάρκεια σε διαθέσιμο οξυγόνο. Σε συνθήκες πλήρους εμβάπτισης υπάρχουν πολύ παράγοντες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, και αυτό λόγω της πολυπλοκότητας του περιβάλλοντος αλλά και των προϊόντων διάβρωσης ιόντων σιδήρου Fe και υδροξυλίου OH που δεν παραμένουν απαραίτητα στην επιφάνεια του μετάλλου αλλά μπορούν να διαχυθούν και να αντιδράσουν με το διάλυμα. Ο χημικός τύπος του νερού είναι H₂O, ωστόσο όμως στο νερό βρίσκονται και άλλα συστατικά όπως άλατα, στερεά και αέρια η σύσταση αυτών διαφέρει και εξαρτάται από την πηγή προέλευσης του νερού (ποταμίσιο, θαλασσινό, λιμνίσιο νερό, κλ.π.). Ακόμα και ένα καθαρά πόσιμο νερό έχει ουσιαστικά πολύπλοκη σύνθεση. Το pH του νερού συνήθως είναι ουδέτερο και κυμαίνεται στην περιοχή των 4,5 – 8,5. Ωστόσο όμως, μερικές φορές μπορεί να είναι και ελαφρώς όξινο και συνεπώς να προκαλέσει διάβρωση του χάλυβα. Γενικά, οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα και τον βαθμό διαβρωτικότητάς του είναι τα περιεχόμενα διαλυμένα στερεά (επηρεάζουν την αγωγιμότητα, σκληρότητα και το pH του νερού), τα διαλυμένα αέρια (κυρίως οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα) και τα οργανικά. Η αγωγιμότητα είναι πολύ σημαντική φυσικοχημική ιδιότητα και η παρουσία των αλάτων στο νερό όπως χλωριούχο νάτριο (NaCl) έχει την τάση να κάνει το θαλασσινό νερό πολύ πιο διαβρωτικό από ότι το γλυκό νερό [11]. Η σκληρότητα είναι επίσης μια σημαντική ιδιότητα του νερού και καθορίζει την ικανότητα απόθεσης ιζημάτων στη χαλύβδινη/ μεταλλική επιφάνεια. Η σκληρότητα επηρεάζεται από το ποσοστό του διαλυμένου διοξειδίου του άνθρακα αλλά και από την παρουσία των αλάτων κυρίως του ανθρακικού ασβεστίου και όξινων ανθρακικών. Τα «σκληρά νερά» έχουν τάση για μείωση του ρυθμού διάβρωσης, ενώ τα «μαλακά νερά» μπορούν να επεξεργαστούν με ασβέστη (*lime*) έτσι ώστε να γίνουν λιγότερο διαβρωτικά. Παρόλο όμως που η δημιουργία επικαθίσεων στην επιφάνεια του μετάλλου μειώνει τον ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα, αυτό μπορεί να έχει και μειονεκτήματα ως προς τη χρήση του στην όλη κατασκευή. Για παράδειγμα οι επικαθίσεις στους μεταλλικούς αυλούς ενός εναλλάκτη θερμότητας έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της αποδοτικότητας του στην εναλλαγή της θερμότητας ενώ τελική συνέπεια των επικαθίσεων είναι η μείωση της διατομής και τελικά φραγή των αυλών. Σε θαλασσινό

ή υφάλμυρο νερό η δημιουργία προστατευτικού ασβεστολιθικού φιλμ επιφανειακά του μετάλλου έχει σημαντική επίδραση στη διάβρωση. Ο σχηματισμός των ασβεστολιθικών στρωμάτων στα υποθαλάσσια τμήματα μιας μεταλλικής κατασκευής είναι ένας από τους λόγους όπου τέτοιου είδους κατασκευές προστατεύονται καθοδικά χωρίς να προαπαιτείται η εφαρμογή προστατευτικού χρώματος. Η παρουσία οργανικών ουσιών κυρίως στο θαλασσινό και υφάλμυρο νερό έχει άμεση αλλά και έμμεση επίδραση στη διάβρωση. Η επικάθιση και προσκόλληση οργανικών ουσιών στη μεταλλική επιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή των προστατευτικών χρωμάτων στον χάλυβα. Αυτή η περίπτωση συναντάται κυρίως στα ύφαλα πλοίων και στις πλωτές κατασκευές. Η διάβρωση του χάλυβα σε λιμνάζον νερό είναι πολύ διαφορετική από αυτήν που συναντάμε στην πράξη. Πολύ παράγοντες επιδρούν στον τύπο αλλά και στον ρυθμό της διάβρωσης, όπως η ταχύτητα ροής και η θερμοκρασία του νερού. Η ταχύτητα ροής του νερού σε συνδυασμό με τη γεωμετρία της μεταλλικής κατασκευής μπορεί να προκαλέσει πλήθος προβλημάτων διάβρωσης. Όλα τα παραπάνω είδη διάβρωσης επιδρούν στη λειτουργία της διεργασίας.

Εκτός των παραπάνω μηχανικών καταπονήσεων, η ταχύτητα ροής μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα σε μια βαμμένη μεταλλική επιφάνεια ή ακόμα και σε μια γυμνή μεταλλική επιφάνεια (τοπικά γδαρσίματα, τοπικές ανομοιογένειες) ιδίως εάν στο νερό περιέχονται στερεά σωματίδια. Επίσης επιδρά στη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου. Παρόλο που στο γλυκό νερό, μεγάλη ταχύτητα ροής παρέχει επαρκή ποσότητα οξυγόνου για τη δημιουργία ενός παθητικού στρώματος προστασίας της μεταλλικής επιφάνειας, γενικά όμως ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας ροής του νερού. Κατά κανόνα η μορφή διάβρωσης του χάλυβα σε νερό συνήθως είναι ομοιόμορφη, παρόλα αυτά έχει παρατηρηθεί και διάβρωση με βελονισμούς η οποία είναι αποτέλεσμα της γεωμετρίας του μετάλλου, ταχύτητα ροής νερού και των επικαθίσεων στη μεταλλική επιφάνεια. Συγκεκριμένα, χάλυβες με επιφανειακή επεξεργασία όπως επιψευδαργυρωμένοι ή γαλβανιζέ χάλυβες έχουν εμφανίσει σοβαρά προβλήματα βελονισμών κυρίως σε θαλασσινό αλλά και σε υφάλμυρο νερό. Η εμφάνιση των βελονισμών στην επιφάνεια τους οφείλεται στην ανομοιογένεια της δηλαδή υπάρχουν σημεία στην επιφάνεια όπου ο χάλυβας δεν είναι επιψευδαργυρωμένος αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων που οδηγούν σε σοβαρά προβλήματα διάβρωσης.

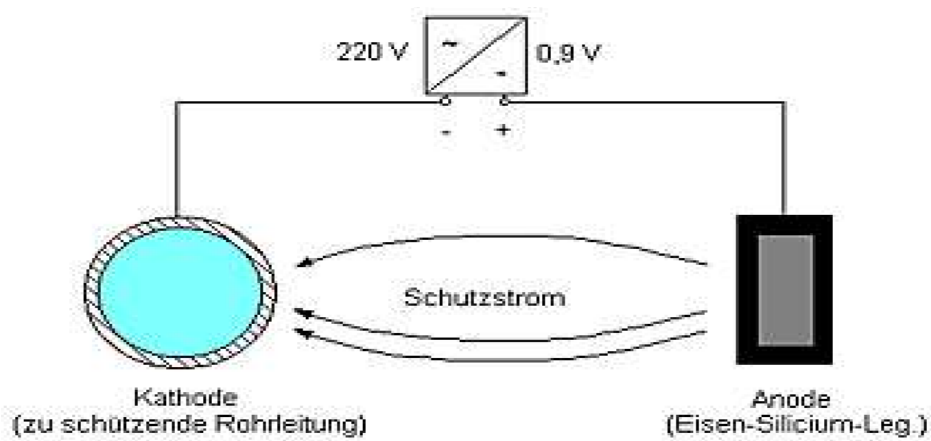
2.1.5 Προστασία των μεταλλικών κατασκευών

2.1.5.1 Καθοδική προστασία με εφαρμοζόμενο ρεύμα

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

Επίσης προς την επιφάνεια κινούνται υπό την επίδραση της τάσης συνεχούς ρεύματος και τα τυχόν υπάρχοντα χλωριόντα της μάζας του σκυροδέματος και του νερού των πόρων. Έτσι η εξουδετέρωση

των ανιόντων, δηλαδή η οξειδωση, γίνεται στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος και όχι στον χάλυβα με συνέπεια τη διάβρωσή του. Απαιτείται εξαιρετικά μεγάλη προσοχή κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής γιατί αν εφαρμοστεί με λαθεμένες συνθήκες, η αύξηση της καθοδικότητας της εγκατάστασης πάνω από ορισμένο όριο (υπερπροστασία), μεγαλώνει εξαιρετικά την ταχύτητα διάβρωσης. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με την επάλειψη μεγάλου τμήματος της επιφάνειας του σκυροδέματος με ένα συνεχές στρώμα ηλεκτρικά αγωγίμης μπογιάς (συνήθως με βάση τον άνθρακα) με το οποίο συνδέονται σε αρκετά πυκνές αποστάσεις ηλεκτρικά καλώδια από το θετικό πόλο της ηλεκτρικής πηγής. Η σύνδεση των ράβδων οπλισμού ή η επαφή των ράβδων μέσω των συρμάτων επαρκεί. Αντίθετα εντελώς απαραίτητο είναι να μην υπάρχουν μεταξύ επιφανειακού αγωγίμου στρώματος και ράβδων οπλισμού σύρματα, καβίλιες και άλλα που μπορούν να βραχυκυκλώσουν το ηλεκτρικό κύκλωμα. Οι άνοδοι είναι είτε καταναλισκόμενες (π.χ. σίδερα ανακύκλωσης) που όμως για να εξασφαλίζουν το πέρασμα επαρκών ρευμάτων, είναι ογκώδης, μολύνουν το περιβάλλον και απαιτούν συχνή αντικατάσταση είτε μη καταναλισκόμενες (π.χ. Si-Fe γραφίτης, Pb-Sb-Ag, Pt-Ti, Pt-Ta). Η τιμή του δυναμικού της πηγής του συνεχούς ρεύματος επηρεάζεται κυρίως από την αγωγιμότητα του περιβάλλοντος, ενώ το μήκος της προστατευόμενης ανά άνοδο κατασκευής (π.χ. σωλήνα) από την αντίσταση της μεταλλικής κατασκευής.



Σχήμα 2.5 Απεικόνιση συστήματος καθοδικής προστασίας με χρήση ηλεκτρικής πηγής

Πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής:

- Μεγάλη διάρκεια ζωής των ανόδων άρα όχι συχνή αντικατάσταση
- Πλήρης αναστολή της διάβρωσης του χάλυβα εφαρμόζοντας ποικίλες τιμές ρεύματος
- Ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της επιφάνειας
- Δεν προσθέτει νεκρά φορτία ούτε αυξάνει τις φυσικές διαστάσεις της κατασκευής
- Μία άνοδος παρέχει υψηλά ποσά ρεύματος και έτσι προστατεύεται μεγάλο μέρος της κατασκευής
- Μπορεί να τοποθετηθεί μακριά από την κατασκευή επειδή παρέχει υψηλές

τάσεις (έως 100V)

- Εγκατάσταση σε μεγάλο βάθος που φτάνει και τις πιο δυσπρόσιτες περιοχές
- Εφαρμογή και σε καινούριες κατασκευές ως μέτρο προστασίας

Μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής:

- Απαιτεί συχνή ρύθμιση και προσαρμογή (πιθανή διακοπή ρεύματος, διακύμανση ιδιοτήτων διαβρωτικού περιβάλλοντος)
- Μειώνει την ολκιμότητα σε χάλυβες υψηλής αντοχής λόγω εκλύσεως υδρογόνου {για να γίνει πρέπει να έχεις αστοχία}
- Υψηλό κόστος (χρησιμοποίηση δαπανηρότερων δυναμοστατών σε διαβρωτικό περιβάλλον με μεγάλες διακυμάνσεις των ιδιοτήτων του)
- Πρέπει να γίνεται σωστή εκλογή των ορίων τιμών της καθοδικής τάσης με προηγούμενη εργαστηριακή έρευνα
- Για την πραγματοποίηση αυτής της μεθόδου πρέπει να βρεθεί ένα σταθερό υλικό ανόδου, που θα μπορεί να καταναίμει το ρεύμα καθοδικής προστασίας σε μεγάλες επιφάνειες.

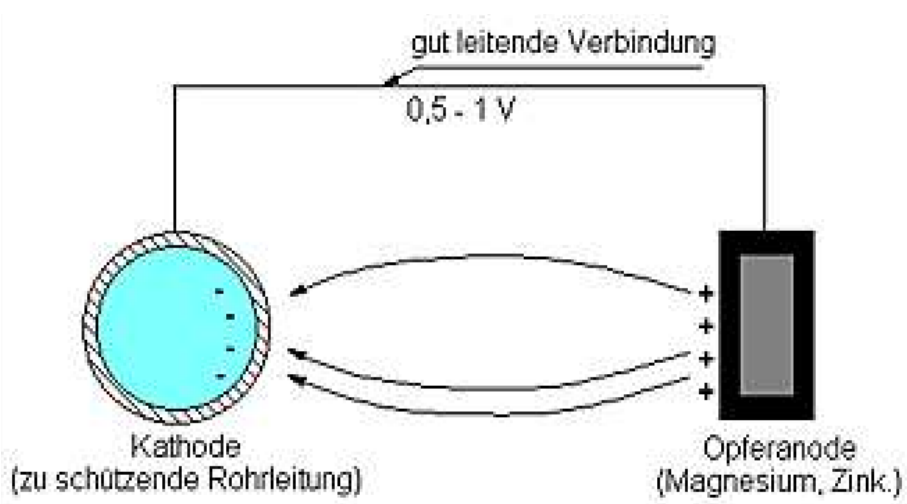
Η καθοδική προστασία με εφαρμοζόμενο ρεύμα χρησιμοποιείται πολύ περισσότερο σε σχέση με την μέθοδο θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων, ιδιαίτερα στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Προστασία σωλήνων μέσα στο έδαφος σε γλυκό ή θαλασσινό νερό
- Κατασκευές πλωτές και μη, μέσα στη θάλασσα
- Στα πλοία

2.1.5.2 Καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους

Κατά αυτόν τον τρόπο καθοδικής προστασίας χρησιμοποιούνται θυσιαζόμενες άνοδοι, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από μέταλλο ηλεκτραρνητικότερο από το δεύτερο, συνδέονται με το προς προστασία μέταλλο με αποτέλεσμα την ροή ηλεκτρονίων από το θυσιαζόμενο μέταλλο προς στο προστατευόμενο. Τα ανοδικότερα αυτά μέταλλα (συνήθως χρησιμοποιούνται κράματα Mg, Zn, Al) αποκτούν αυθόρμητα αρνητικό δυναμικό σε σχέση με το διαβρωτικό περιβάλλον. Το ίδιο αρνητικά φορτισμένη (σε σχέση με το διαβρωτικό περιβάλλον) είναι και η χαλύβδινη κατασκευή που πρόκειται να προστατευθεί. Τα μέταλλα αυτά έχουν μεγαλύτερη προδιάθεση να διαβρωθούν (είναι ανοδικότερα) και για το λόγο αυτό φορτίζονται περισσότερο αρνητικά ως προς το περιβάλλον απ' ό,τι ο χάλυβας. Έτσι ο χάλυβας φορτίζεται θετικά ως προς τα μέταλλα αυτά. Επιβάλλεται δηλαδή στο χάλυβα από τα ανοδικότερα αυτά μέταλλα ένα αντίστροφο δυναμικό, από το δυναμικό διάβρωσής του (ηλεκτρόνια ρέουν από την πλάκα του μετάλλου προς το χάλυβα). Ταυτόχρονα, εξ αιτίας του

γαλβανικού στοιχείου που δημιουργήθηκε, το ανοδικότερο μέταλλο οξειδώνεται (απώλεια ηλεκτρονίων, σχηματισμός ιόντων) και καταναλίσκεται περισσότερο παρά αν ήταν μόνο του. [9]



Σχήμα 2.6 Απεικόνιση συστήματος καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενη άνοδο

Πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής:

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

Μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής:

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

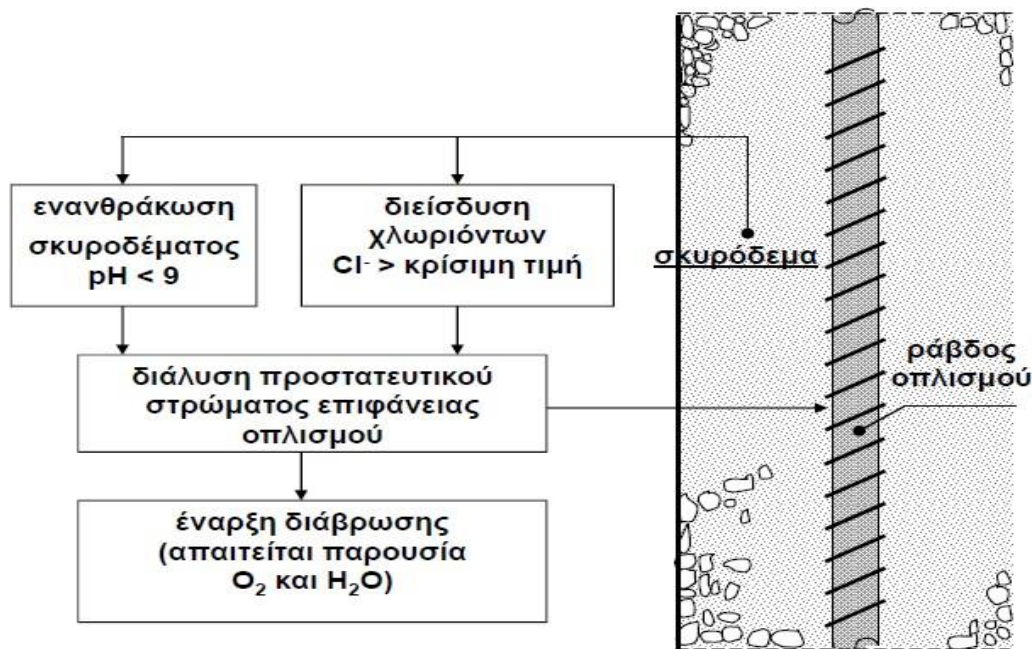
2.2 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται το φαινόμενο, έργα από οπλισμένο σκυρόδεμα κατασκευασμένα πριν από αρκετές δεκαετίες να φθάνουν στο τέλος της χρήσιμης ζωής τους, όχι επειδή κρίνονται ως λειτουργικά ανεπαρκή, ούτε γιατί κάποια εξωτερική μηχανική δράση όπως ο σεισμός ή τα φορτία χρήσης, προκάλεσε την αστοχία, αλλά εξαιτίας της φυσικής γήρανσής τους. Το πρόβλημα επομένως που καλείται ένας σύγχρονος μηχανικός να λύσει, είναι αυτό της ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος σε διάρκεια, το οποίο οφείλεται κυρίως στους μηχανισμούς διάβρωσης. Η ανθεκτικότητα κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο.Σ) επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες επιδρούν στην κατασκευή εσωτερικά και εξωτερικά. Σε χώρες που περιβάλλονται από θάλασσα και με ζεστό κλίμα όπως η Ελλάδα η επίδραση της θερμοκρασίας, η σχετική υγρασία τα χλωριόντα και άλλοι αέριοι ρύποι όπως το διοξείδιο του άνθρακα 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 και την ενανθράκωση του σκυροδέματος. Η διάβρωση του χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα, αποτελεί ένα παγκόσμιο πρόβλημα των κατασκευών στις οποίες τα κύριο δομικό υλικό είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. Το πρόβλημα αυτό είναι δυνατόν να προκαλέσει καταστροφές οι οποίες κυμαίνονται από απλές παραμορφώσεις μέχρι ολοκληρωτικές δομικές καταστροφές. Η διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα είναι μια ηλεκτροχημική δράση που λαμβάνει χώρα όταν το σκυρόδεμα έχει μια ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω της παρουσίας υγρασίας και ηλεκτρολυτών στους πόρους του. Ιδιαίτερα στις παραθαλάσσιες περιοχές, τα υψηλά ποσοστά υγρασίας που επικρατούν, σε συνδυασμό με τις υψηλές μέσες ετήσιες θερμοκρασίες και το χλωριούχο νάτριο της θάλασσας, δημιουργούν τις δυσμενείς προϋποθέσεις για επιτάχυνση της διάβρωσης του σιδηρού οπλισμού των κατασκευών από σκυρόδεμα ^[14].

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

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

Εάν και οι τρεις προϋποθέσεις εκπληρώνονται, τότε η διάβρωση του σιδηροπλισμού εξαρτάται και από άλλους παράγοντες. Η ταχύτητα, η μορφή και η έκταση της διάβρωσης εξαρτάται και από άλλους παράγοντες. Η ανοδική και η καθοδική δράση συμβαίνουν ταυτόχρονα στην επιφάνεια του χάλυβα.



Σχήμα 2.7 Μηχανισμοί έναρξης διάβρωσης οπλισμού σκυροδέματος

Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το θαλασσινό νερό επηρεάζει τη διάβρωση του σκυροδέματος. Κατασκευές από σκυρόδεμα οι οποίες έρχονται σε άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό είναι γέφυρες, αποβάθρες, λιμενοβραχίονες, κριπιδότοιχοι κ.λ.π., ο μηχανισμός φθοράς λόγω θαλασσινού νερού είναι σύνθετος, συνδυάζοντας τόσο φυσικές όσο και χημικές δράσεις. Οι φθορές του σκυροδέματος που εκτίθεται σε θαλασσινό νερό μπορεί να οφείλονται σε ^[9] :

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

2.2.1 Διαβρωτικό περιβάλλον

Στην πράξη υπάρχει τεράστια ποικιλία διαβρωτικού περιβάλλοντος και στις τρεις καταστάσεις της ύλης, όπως: σε αέρια μορφή με ή χωρίς παρουσία υγρασίας (ατμοσφαιρική διάβρωση, διάβρωση σε ξηρή ατμόσφαιρα – απουσία υγρασίας – διάβρωση από καυσαέρια), σε υγρή μορφή (θαλασσινό, φυσικό, ύδρευσης, αποχέτευσης, βιομηχανικό νερό, χημικά υγρά, βιολογικά υγρά) και σε στερεή μορφή (έδαφος, σκυρόδεμα). Σε κάθε περίπτωση το διαβρωτικό σύστημα είναι ετερογενές και η διάβρωση εμφανίζεται στη διεπιφάνεια. Παράμετροι που επηρεάζουν κατά περίπτωση τη διάβρωση είναι:

με κριτήριο το υλικό:

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

με κριτήριο το διαβρωτικό περιβάλλον:

- χημικές, φυσικές ή ηλεκτροχημικές όπως το pH (όξινο, ουδέτερο, αλκαλικό),
- το είδος των εν διαλύσει ιόντων (π.χ. Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NH_4^+),
- η αγωγιμότητα του διαβρωτικού μέσου,
- η παρουσία ή όχι διαλυμένου οξυγόνου,
- η θερμοκρασία,
- η ακινησία ή ροή του διαβρωτικού μέσου,
- η μηχανική καταπόνηση μόνιμη ή περιοδική που επιβάλλεται στο υλικό από το περιβάλλον,
- η παρουσία ζώντων οργανισμών (π.χ. μακρο-οργανισμοί στο θαλάσσιο περιβάλλον, βακτηρίδια στο έδαφος) κ.α.

Στην πράξη μπορούν να συνυπάρχουν δύο ή και τρεις μηχανισμοί διάβρωσης που δρουν άμεσα ή έμμεσα με αποτέλεσμα η διάγνωση των αιτιών της διάβρωσης να είναι εξαιρετικά δύσκολη σε ορισμένες περιπτώσεις. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των μορφών διάβρωσης είναι η επιφανειακή αλλοίωση των υλικών με επιπτώσεις που η βαρύτητά τους εξαρτάται από τις απαιτήσεις λειτουργίας του υλικού. [2]

Οι κύριοι διαβρωτικοί παράγοντες για κάθε περιβάλλον είναι:

- Η Ατμόσφαιρα. Οι κύριοι παράγοντες της ατμοσφαιρικής διάβρωσης είναι το οξυγόνο, η υγρασία που περιέχεται στην ατμόσφαιρα και το CO_2 . Η ατμοσφαιρική διάβρωση εξαρτάται από

τις κλιματολογικές συνθήκες, δηλαδή αν το κλίμα είναι ξηρό, τροπικό ή πολικό.

- Το Έδαφος. Η διαβρωτική ικανότητα του εδάφους επηρεάζεται κυρίως από τα συστατικά που περιέχονται σε αυτό. Παράγοντες διάβρωσης είναι η οξύτητα του εδάφους, η ύπαρξη αλάτων, η υγρασία του εδάφους, η περιεκτικότητά του σε O_2 , η δομή και η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα βακτήρια που επίσης περιέχονται στο έδαφος βοηθούν στην αναγωγή των θειικών ενώσεων σε θειώδεις και αυξάνουν έτσι το βαθμό διάβρωσης.
- Το Νερό. Το νερό αποτελεί κύριο παράγοντα διάβρωσης χάρη στην ικανότητά του να υδρολύει και να διαλύει υλικά που έρχονται σε επαφή με αυτό, καθώς και στην ικανότητά του να διεισδύει και να αναρριχάται (με βάση το μηχανισμό των τριχοειδών φαινομένων). Στη διαβρωτική δράση του νερού πρέπει να προστεθεί και εκείνη των διαφόρων διαβρωτικών ουσιών των οποίων αποτελεί φυσικό φορέα. Ο περισσότερο διαβρωτικός τύπος νερού είναι το νερό της θάλασσας. Οι βιολογικοί οργανισμοί, η περιεκτικότητα σε οξυγόνο, η άνοδος της θερμοκρασίας και η αύξηση της ταχύτητας κίνησης του νερού (τρικυμία) αυξάνουν τη διαβρωτική δράση του θαλασσινού νερού.

2.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση του σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα είναι ένα πορώδες υλικό με αρκετά υψηλή αλκαλικότητα. Η αλκαλικότητα του οφείλεται στο διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος το οποίο αποτελείται κυρίως από οξείδια του ασβεστίου, νατρίου και καλίου. Τα οξείδια αυτά διαλυόμενα σε νερό σχηματίζουν ενώσεις υδροξειδίων, οι οποίες είναι αλκαλικές. Είναι γνωστό ότι γενικά τα μέταλλα (εκτός του αλουμινίου) παθητικοποιούνται σε αλκαλικά διαλύματα ενώ αντίθετα διαβρώνονται/οξειδώνονται/ διαλύονται σε όξινα διαλύματα. Κατά συνέπεια η αλκαλικότητα του σκυροδέματος οδηγεί στη δημιουργία ενός παθητικού στρώματος στην επιφάνεια του οπλισμού/ χάλυβα. Η παθητικοποίηση του χάλυβα μέσα στο σκυρόδεμα οφείλεται στη δημιουργία επιφανειακού επιστρώματος μαγνητίτη (Fe_3O_4) ή $\gamma-Fe_2O_3$, το οποίο είναι αρκετά συνεκτικό, λεπτό με το υπόστρωμα και προστατεύει από τη διάβρωση τον χάλυβα. Η έναρξη της αποπαθητικοποίησης του χάλυβα προκαλείται από τη διάχυση ή την τριχοειδής όδευση αερίων διαβρωτικών όπως CO_2 , (ενανθράκωση) από ατμοσφαιρικά οξέα, ή υγρών που περιέχουν HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} . Ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης εξαρτάται από εξωτερικούς παράγοντες όπως η συγκέντρωση των χλωριόντων του περιβάλλοντος, ρωγμές που παρουσιάζει η κατασκευή, πάχος επικάλυψης οπλισμών, αλλά και από άλλους παράγοντες όπως η ταχύτητα μεταφοράς των ιόντων, η δέσμευση τους ή όχι στα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου κ.α. Την αποπαθητικοποίηση του χάλυβα στο σκυρόδεμα και κατά συνέπεια την αρχή της διάβρωσης του, προκαλούν η μείωση του pH, η οποία προέρχεται από την αντίδραση του CO_2 με το $Ca(OH)_2$ στους πόρους του σκυροδέματος και προκαλεί γενικά ομοιόμορφη διάβρωση, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου προκαλεί διάβρωση με βελονισμούς. ^[12]

2.2.2.1 Το είδος και η δομή του σκυροδέματος

Το είδος του τσιμέντου είναι σημαντικός παράγοντας στη διάβρωση του σιδηροπλισμού. Το σκυρόδεμα αποτελείται κυρίως από τσιμέντο, αδρανή και νερό. Ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται, προστίθενται κάποια βελτιωτικά των ιδιοτήτων του. Η ποιότητα του σκυροδέματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των υλικών από τα οποία συντίθενται, αλλά και από άλλους παράγοντες όπως η αναλογία και ο τρόπος ανάμιξής τους, η συντήρηση, η κατασκευή των καλουπιών και η συμπύκνωση του σκυροδέματος μέσα στα καλούπια. Οι προσμίξεις που περιέχονται στο τσιμέντο επιδρούν στις τελικές ιδιότητες του τσιμέντου. Για παράδειγμα το τσιμέντο που είναι ανθεκτικό σε θειικά, σε περιβάλλον που περιέχει χλωριόντα επιταχύνει τη διάβρωση του σιδηροπλισμού. Επίσης τσιμέντα που περιέχουν φυσικές ή τεχνητές ποζολάνες, εξαιτίας της ποζολανικής δράσης, μειώνουν το πορώδες. Πολλές ποζολάνες πέραν από τη μείωση του πορώδους παρεμποδίζουν τη διάβρωση με δέσμευση χλωριόντων εξαιτίας της περιεκτικότητάς τους σε Al_2O_3 . Ακόμα η χρήση της σκωρίας υψικάμινων και της ιπτάμενης τέφρας ως πρόσθετα στο τσιμέντο μειώνει τον κίνδυνο πραγματοποίησης αλκαλοπυριτικής δράσης. Η ποιότητα του σκυροδέματος και η διάβρωση του σιδηροπλισμού επηρεάζονται από τις ιδιότητες των αδρανών, όπως είναι η κοκκομετρική τους διαβάθμιση, οι περιεχόμενες επιβλαβείς ουσίες, η αντοχή τους σε θλίψη και τριβή, το σχήμα και η υφή της επιφάνειάς τους, η απορρόφηση νερού και τέλος η αντοχή τους σε φυσικές μεταβολές και σε χημικές επιδράσεις. Επίσης τα αδρανή επιδρούν τόσο στη μηχανική αντοχή όσο και σε μία από τις πιο σημαντικές ιδιότητες του σκυροδέματος που έχει άμεση επίδραση στη διάβρωσή του, το πορώδες. Εάν τα αδρανή είναι συμπαγή (χωρίς πόρους) τότε η διέλευση των διαβρωτικών συστατικών πραγματοποιείται μέσα από τους πόρους του τσιμέντου. Εάν όμως είναι πορώδη, η διέλευση των διαβρωτικών συστατικών γίνεται και μέσα από τους πόρους των αδρανών και φυσικά η διάβρωση είναι μεγαλύτερη. Επίσης η ποιότητα του σιδηροπλισμού επηρεάζεται τόσο από την ποσότητα όσο και από την ποιότητα του νερού στο σκυρόδεμα. Επειδή η ποσοστιαία αναλογία του νερού ανάμιξης και επομένως και κάθε ξένης ουσίας μέσα σε αυτό, είναι μικρή, το νερό επηρεάζει σε μικρό βαθμό την ποιότητα του σκυροδέματος. ^[1] Όταν πρόκειται για πόσιμο νερό δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην ποιότητα του σκυροδέματος. Η σύσταση του νερού επηρεάζει περισσότερο την ποιότητα του σκυροδέματος όταν έχει χρησιμοποιηθεί νερό ποταμών ή θάλασσας, λόγω της περιεκτικότητάς του σε χλωριόντα. Το νερό που χρησιμοποιείται πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγραφή EN 1008.

2.2.2.2 Το πάχος επικάλυψης

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

2.2.2.3 Η παρουσία νερού στο σκυρόδεμα

Το νερό τις πόρους του σκυροδέματος ρυθμίζει την μεταφορά των διάφορων ιόντων ή αερίων στο εσωτερικό του σκυροδέματος αλλά και την (ηλεκτρική) αντίσταση του σκυροδέματος. Το κορεσμένο με νερό σκυρόδεμα έχει την μικρότερη ηλεκτρική αντίσταση και μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο διάχυση του διαλυμένου στο νερό οξυγόνου, η οποία είναι μικρή. Αντίθετα η ηλεκτρική αντίσταση του ξηρού σκυροδέματος είναι μεγάλη. Επομένως, ο κίνδυνος διάβρωσης σε ξηρό και κορεσμένο σε νερό σκυρόδεμα είναι μικρός ενώ τις ενδιάμεσες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερος.

Η ποσότητα του νερού στο σκυρόδεμα εξαρτάται από:

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

2.2.2.4 Η παρουσία ρωγμών

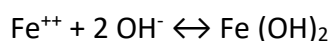
Η παρουσία ρωγμών στο σκυρόδεμα έχει σαν αποτέλεσμα την διευκόλυνση τις μεταφοράς του οξυγόνου, του διοξειδίου του άνθρακα και των χλωριόντων στην επιφάνεια του οπλισμού. Γενικά στο σκυρόδεμα υπάρχουν ρωγμές με πλάτος μικρότερο από 2-3 mm. Η ύπαρξη ρωγμών με πλάτος μεγαλύτερο από 0,3 mm οδηγεί σε διάβρωση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

2.2.3 Αίτια και μηχανισμοί διάβρωσης

Στη χώρα μας είναι εξαιρετικά σπάνιο το ενδεχόμενο σταδιακής αποσύνθεσης του σκυροδέματος λόγω εναλλαγών πήξεως-τήξεως του νερού των πόρων, ή λόγω προσβολής αδρανών από την αλκαλικότητα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Συνεπώς το κύριο πρόβλημα από άποψη ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος είναι η διάβρωση των οπλισμών. Οι ράβδοι οπλισμού προστατεύονται από τη διάβρωση μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου, που δημιουργείται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Το σκληρυμένο σκυρόδεμα περιέχει μεγάλο ποσοστό οξειδίου του ασβεστίου, Ca(OH)_2 , στο νερό των πόρων έτσι ώστε να δημιουργείται αλκαλικό περιβάλλον με τιμή pH γύρω στο 12.5. Με αυτόν τον τρόπο προστατεύεται ο χάλυβας από τη διάβρωση εφόσον το οξύδιο παραμένει ανέπαφο. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως παθητικοποίηση του χάλυβα ^[14]. Διάβρωση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις, οι οποίες αλλάζουν τη χημική σύσταση του οπλισμού του σκυροδέματος. Παρατηρείται σημαντική μείωση της αντοχής καθώς και της λειτουργικότητάς της κατασκευής. Επιπλέον και από αισθητικής απόψεως έχουμε αρνητικές επιπτώσεις. Όλα αυτά καθιστούν απαραίτητη την προσοχή του πολιτικού μηχανικού. Οι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι πολλοί, είτε φυσικοί (κλιματολογικές συνθήκες περιβάλλοντος,

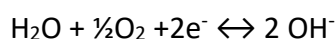
τοπογραφία), είτε εξωγενείς (κακός σχεδιασμός). Η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού του σκυροδέματος είναι ένα σύνθετο ηλεκτροχημικό φαινόμενο που συνδέεται με την ύπαρξη ανοδικών και καθοδικών περιοχών. Το φαινόμενο οφείλεται στη μικροσκοπική και μακροσκοπική ανομοιογένεια της επιφάνειας του χάλυβα σε συνδυασμό με το υγρό των πόρων του σκυροδέματος. Η διάβρωση του χάλυβα όταν αυτός βρίσκεται σε επαφή με το νερό προκαλείται από τις ακόλουθες αντιδράσεις:

Ανοδική περιοχή



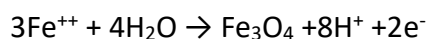
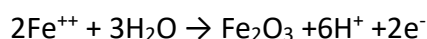
Ως άνοδος συμπεριφέρεται το τμήμα του χάλυβα όπου έχει καταστραφεί το προστατευτικό στρώμα οξειδίων. Σ' αυτή την περιοχή, τα άτομα σιδήρου μετατρέπονται σε ιόντα, ενώ ελευθερώνονται ηλεκτρόνια. Το σχηματιζόμενο $\text{Fe}(\text{OH})_2$ είναι αδιάλυτο και σχηματίζει ένα μικρής συνάφειας πορώδες και ογκώδες στρώμα (σκουριά) πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα.

Καθοδική περιοχή



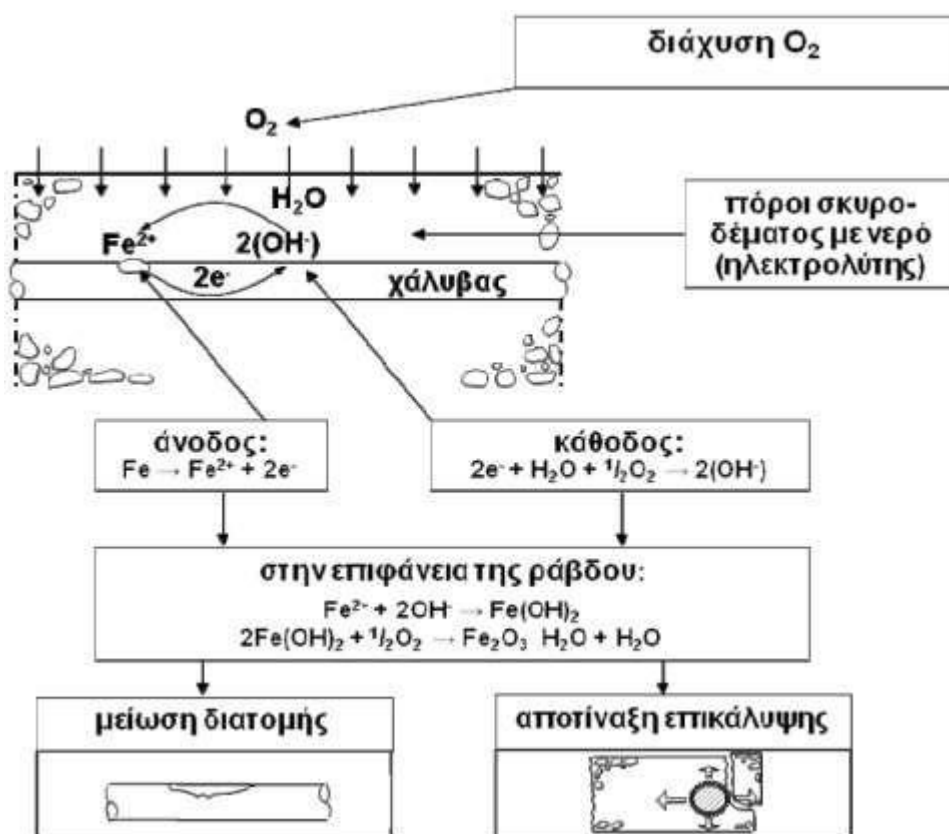
Ως κάθοδος συμπεριφέρεται εκείνη η περιοχή του χάλυβα όπου υπάρχει νερό και οξυγόνο, χωρίς να είναι απαραίτητο να έχει καταστραφεί το λεπτό στρώμα των οξειδίων. Ο ρυθμός της παραπάνω δράσης καθορίζεται από το ρυθμό διάχυσης του οξυγόνου. Το διαλυμένο στο νερό οξυγόνο φθάνει στην καθοδική περιοχή μέσω των τριχοειδών πόρων και των ρωγμών του σκυροδέματος και οδηγεί στην διάβρωση του σιδηροπλισμού όταν η τιμή του pH βρίσκεται μεταξύ 4 και 10. Το σχηματιζόμενο στρώμα του $\text{Fe}(\text{OH})_2$ δεν προσφέρει καμία προστασία στον οπλισμό καθώς είναι πορώδες και ελάχιστα συμπαγές, με αποτέλεσμα η διάβρωση να προχωρά μέχρι την ολοσχερή μετατροπή του σιδήρου σε υδροξείδιο. Απαραίτητη προϋπόθεση για την συνέχιση της δράσης αυτής είναι η παρουσία οξυγόνου.

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



Σύμφωνα με τις παραπάνω αντιδράσεις είναι δυνατόν να συμβεί οξείδωση, δηλαδή διάβρωση ακόμη και όταν η τιμή του pH είναι μεγαλύτερη από 10. Η διαφορά όμως είναι, ότι τα προϊόντα των αντιδράσεων αυτών (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) σχηματίζουν ένα συμπαγές και αδιαπέραστο στρώμα που παθητικοποιεί τον οπλισμό και τον απομονώνει από το διαβρωτικό περιβάλλον. Έχει ήδη αναφερθεί ότι η τιμή του pH του υγρού των πόρων του σκυροδέματος βρίσκεται συνήθως μεταξύ 12,5 και 13,5 με αποτέλεσμα ο εγκιβωτισμένος οπλισμός να παραμένει σε παθητικοποιημένη κατάσταση. Αν το σκυρόδεμα περιέχει ρωγμές, το νερό μπορεί να εισχωρήσει, να φθάσει στην περιοχή του οπλισμού και να απομακρύνει τα OH^{-} που συντελούν στην

παθητικοποίηση του σιδήρου. Όταν υπάρχει ρωγμή που εκτείνεται μέχρι τον οπλισμό, ο χάλυβας θα συμπεριφερθεί σαν να ήταν άμεσα βυθισμένος στο θαλασσινό νερό, με αποτέλεσμα την γρήγορη διάβρωσή του. Η απομάκρυνση των OH^- όμως εμποδίζεται από τις αντιδράσεις μεταξύ των ιόντων του θαλασσινού νερού και του ενυδατωμένου τσιμέντου, τα προϊόντα των οποίων φράσσουν προοδευτικά τις ρωγμές του σκυροδέματος. Η διάβρωση του σιδηροπλισμού επηρεάζεται επίσης από τις μεταβολές της υγρασίας του σκυροδέματος στην περιοχή του. Τέτοιες μεταβολές δεν παρατηρούνται σε σκυρόδεμα μόνιμα βυθισμένο στο θαλασσινό νερό είναι όμως έντονες σε περιοχές με παλιρροιακά φαινόμενα. Τέλος, ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. ^[32]



Σχήμα 2.8 Μηχανισμοί και αποτελέσματα διάβρωσης οπλισμού σκυροδέματος

Οι δύο βασικοί λόγοι διάβρωσης του χάλυβα είναι:

- Ενανθράκωση του σκυροδέματος
- Επίδραση χλωριόντων

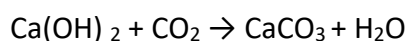
Διαδικασίες που δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, καθώς η πρώτη προκαλεί ραγδαία επιτάχυνση στη δεύτερη. Μεγάλες επιπτώσεις συναντώνται στα λιμενικά έργα, αλλά και σε κατοικίες σε παραθαλάσσιες περιοχές, αφού η παρουσία του άλατος οξύνει το πρόβλημα. Πρακτικά είναι αδύνατο να παράγουμε σκυρόδεμα που να αποτρέπει πλήρως τη διάβρωση του

οπλισμού, συνεπώς είναι μία πραγματικότητα με την οποία μαθαίνουμε να ζούμε και να αντιμετωπίζουμε ^[14].

2.2.3.1 Ενανθράκωση

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

Το αποτέλεσμα της απορρόφησης του CO είναι η βαθμιαία εξουδετέρωση της αλκαλικότητας:

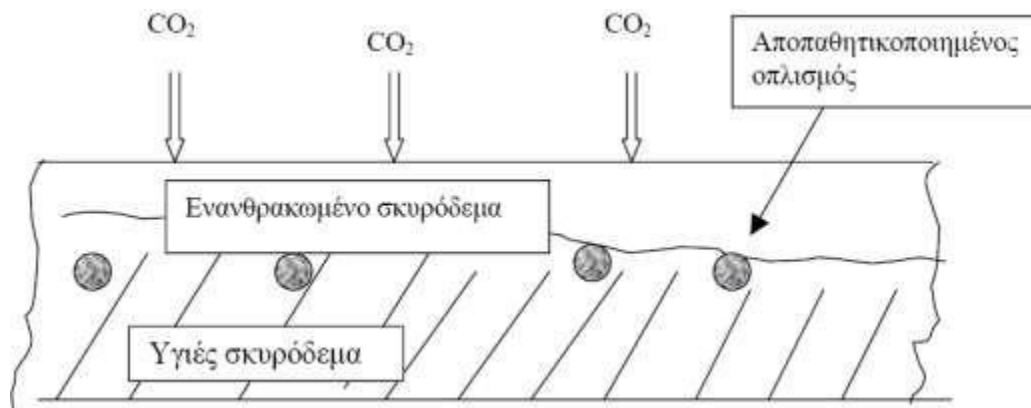


Το δημιουργημένο ανθρακικό ασβέστιο δίνει και το όνομα της ενανθράκωσης στο φαινόμενο αυτό. Η ενανθράκωση επιταχύνεται δραστικά από πόρους, φωλιές, κακοτεχνίες, ανομοιογενή κακή δόνηση κ.λ.π.. Αξιοσημείωτο είναι ότι η ενανθράκωση μένει απαρατήρητη για πολλά χρόνια. Μόνον όταν οξειδωθεί ο οπλισμός παρατηρούνται,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

Παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα ενανθράκωσης:

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

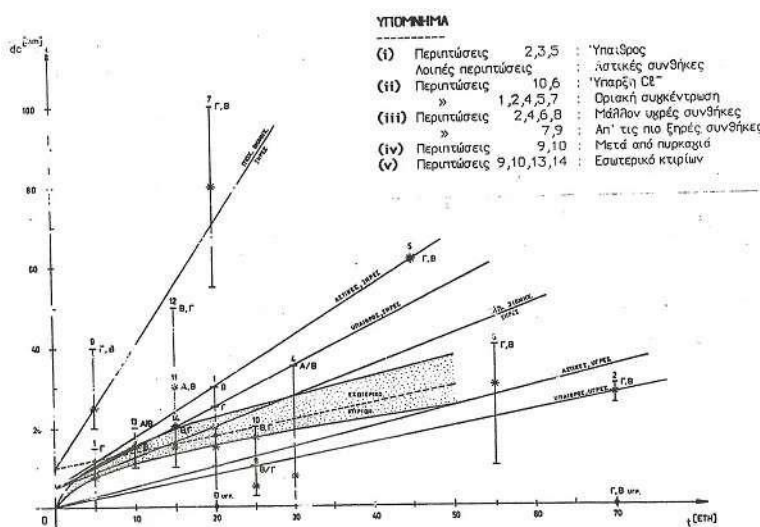
Η αντίδραση που πραγματοποιείται εξαρτάται από την σχετική υγρασία που επικρατεί στους πόρους του σκυροδέματος. Το νερό που δημιουργείται μετά την αντίδραση διαχέεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος όπως επίσης και το CO₂ μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Αποτέλεσμα είναι το pH του σκυροδέματος να μειώνεται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



Σχήμα 2.9 Διάβρωση οπλισμού σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα

Η μείωση του pH του σκυροδέματος σε τιμές κάτω του 9.5 οφείλεται στην αντίδραση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ του νερού των πόρων (και γενικότερα του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού) με το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) της ατμόσφαιρας, που σταδιακά διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Η ύπαρξη του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ μαζί με αυτή άλλων υδροξειδίων που υπάρχουν σε μικρότερες ποσότητες εξασφαλίζουν στους οπλισμούς ένα προστατευτικό, έντονα αλκαλικό περιβάλλον ($\text{pH} \approx 12,5$). Όπως αναφέραμε παραπάνω, σ' αυτό το περιβάλλον ένα λεπτό στρώμα οξειδίων και υπεροξειδίων προστατεύει το χάλυβα από τη διάβρωση. Το στρώμα αυτό δε σταματά τη διάβρωση, αλλά περιορίζει σημαντικά τους ρυθμούς εξέλιξής της. Η μετατροπή όμως του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ σε ασβεστόλιθο με τη βοήθεια του ανθρακικού οξέος, που προκύπτει από την ένωση του CaO με H_2O , μειώνει σταδιακά την αλκαλικότητα στο περιβάλλον του οπλισμού, μέχρι να τη ρίξει σε επίπεδα που η παθητική προστασία που παρέχει το επικαλυπτικό στρώμα αναιρείται. Το pH που σηματοδοτεί αυτή τη μετάβαση είναι γύρω στο 9.5 ενώ ένα πλήρως ενανθρακωμένο σκυρόδεμα έχει $\text{pH} \approx 8$. Η ενανθράκωση δεν αποτελεί πρόβλημα για το σκυρόδεμα καθαυτό. Απεναντίας, η μετατροπή του υδροξειδίου του ασβεστίου σε ασβεστόλιθο δίνει ένα πιο πυκνό υλικό (χαμηλό πορώδες) με μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή. Τη διάβρωση του οπλισμού μπορούμε να την κατατάξουμε στις χημικές διεργασίες φθοράς και απαξίωσης του οπλισμού σκυροδέματος σε αντιδιαστολή με άλλες π.χ. μηχανικές, φυσικές, βιολογικές. Σε περιοχές μάλιστα όπου υπάρχουν και χλωριούχες ενώσεις όπως σε παραθαλάσσιες περιοχές, η συνεργιστική δράση ενανθράκωσης και χλωριόντων μπορεί να είναι καταγιστική. Η ενανθράκωση είναι το φαινόμενο εκείνο που περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο μας έκανε να συνειδητοποιήσουμε ότι το οπλισμένο σκυρόδεμα γερνάει και απαξιώνεται. Τα ποσά που ήδη δαπανώνται για τη δομική αποκατάσταση μεγάλων τεχνικών έργων – όπως γέφυρες – προκαλούν δέος. Στο άμεσο μέλλον θα εκτοξευτούν σε δυσθεώρητα ύψη για πολλά χρόνια. Η τάση αυτή θα κοπάσει όταν αρχίζουν να αποδίδουν τα μέτρα που μόλις τώρα αρχίζουν να λαμβάνονται για την καλύτερη προστασία των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα [37]. Η ενανθράκωση εξαρτάται από την ηλικία των κατασκευών και από το περιβάλλον, ή σε κακής ποιότητας κατασκευές, αναπαλαιωμένα πέτρινα κτίρια με επεμβάσεις από οπλισμένο σκυρόδεμα χαμηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο. Σπάνια συναντώνται φαινόμενα ενανθράκωσης σε καινούργιες κατασκευές σκυροδέματος όπου η αναλογία λόγου τσιμέντο προς νερό είναι μικρή,

περιεκτικότητα σκυροδέματος σε τσιμέντο όχι μικρότερη από 300 Kg τσιμέντο/m³ σκυροδέματος, καλής αναμιξιμότητας και με μεγάλο χρόνο συντήρησης του. Σε τέτοιου είδους κτίρια όπου πληρούνται οι προδιαγραφές κατασκευή σύμφωνα με τα διεθνή και ελληνικά πρότυπα τεχνολογίας σκυροδέματος η διάβρωση από ενανθράκωση ξεκινά πολύ αργότερα από τη διάβρωση από χλωριόντα για κατασκευές παραθαλάσσιες. Οι συνεχείς κύκλοι ύγρυνσης/ ξήρανσης του σκυροδέματος επιταχύνουν το φαινόμενο της ενανθράκωσης, επιτρέποντας τη δίοδο του διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διάρκεια του κύκλου ξήρανσης. Αυτό είναι ένα πρόβλημα όπου συχνά συναντάται σε τροπικές και ημί – τροπικές χώρες π.χ Hong Kong, Pacific Rim. [30]



Σχήμα 2.10 Βάθος ενανθράκωσης και ηλικία των κατασκευών.

Τα τελευταία χρόνια αυξάνεται σταθερά ο αριθμός των κατασκευών από Ο.Σ. στην Ελλάδα που παρουσιάζουν φθορές και βλάβες όχι λόγω μηχανικών αλλά λόγω περιβαλλοντικών δράσεων. Έτσι, είναι μας οι περιπτώσεις 'αναμενόμενης' γήρανσης των παλαιών κατασκευών αλλά και πρόωρης αστοχίας νέων κατασκευών. Σε μας από αυτές μας περιπτώσεις απαιτούνται δομητικές (πλέον) επεμβάσεις (επισκευές και ενισχύσεις), ενώ για αρκετές μας κατασκευές (γέφυρες αλλά και κτήρια) επιβάλλεται η λήψη άμεσων και ριζικών μέτρων. Για την χώρα μας το κύριο, αν όχι το μόνο, πρόβλημα του Ο.Σ. από άποψη ανθεκτικότητας είναι η προσβολή του σκυροδέματος (διείσδυση CO₂ και Cl⁻) και η αποπαθητικοποίηση και διάβρωση των ράβδων οπλισμού (εντοπισμένη ή και γενικευμένη) [23].

2.2.3.2 Επίδραση χλωριόντων

Τα χλωριόντα δεν έχουν αξιόλογη δυνατότητα διάβρωσης του σκυροδέματος, αλλά έχουν μεγάλη διαβρωτική ικανότητα στον οπλισμό. Η διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος από τα χλωριόντα αποτελεί ένα φαινόμενο, που παρατηρείται πολύ συχνά στις κατασκευές. Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι, κατά την παρουσία χλωριόντων, η αποπαθητικοποίηση του χάλυβα μπορεί να αρχίσει σε υψηλότερες από τις κανονικές τιμές του pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος με τη μορφή βελονισμών (pitting corrosion). Η φθορά στο σκυρόδεμα από τη

διάβρωση του σιδηροπλισμού εκδηλώνεται με τη μορφή διόγκωσης, ρηγμάτωσης και θρυμματισμού της επικάλυψης του οπλισμού. Επιπροσθέτως, λόγω της απώλειας της επικάλυψης, το στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να υποστεί δομικές φθορές, λόγω απώλειας της συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος και μείωσης της διατομής του οπλισμού. Τα χλωριόντα, που βρίσκονται στη μάζα του σκυροδέματος, μπορεί να προέρχονται είτε από τα υλικά κατασκευής του (π.χ. ανεπαρκώς κατεργασμένα αδρανή, άμμος θαλάσσης, γλυφό νερό), στα οποία βρίσκονται με τη μορφή αλάτων τους, είτε μπορεί να μεταφέρονται από το περιβάλλον στο εσωτερικό του (διείσδυση θαλασσινού νερού και διαλυμάτων αλάτων από διάλυση του πάγου). Τα χλωριόντα μπορούν, επίσης, να βρεθούν σε παραθαλάσσιες κατασκευές και στη μάζα του οδοστρώματος, όταν κατά τους χειμερινούς μήνες χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες αλατιού, για να απομακρυνθεί ο πάγος. Στην πρώτη περίπτωση τα χλωριόντα είναι σχεδόν ομοιόμορφα κατανεμημένα στη μάζα του σκυροδέματος, ενώ στη δεύτερη η συγκέντρωση παρουσιάζει μια μέγιστη τιμή κοντά στην επιφάνεια και ελαττώνεται όσο το βάθος από την επιφάνεια του σκυροδέματος αυξάνει. Η μεταφορά των χλωριόντων από το περιβάλλον στο εσωτερικό του σκυροδέματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, είτε με διάχυση είτε με μεταφορά τους μέσω του νερού [30]. Όταν η μεταφορά τους γίνεται με το δεύτερο τρόπο, τότε τα ποσά των μεταφερόμενων χλωριόντων είναι μεγαλύτερα συγκριτικά με εκείνα του πρώτου τρόπου. Η μεταφορά των αλάτων μέσω του νερού των πόρων ακολουθεί το δεύτερο νόμο του Fick. Σε αντίθεση με την ενανθράκωση, όπου παρατηρείται μέτωπο μεταφοράς, τα χλωριόντα παρουσιάζουν συνεχή κατανομή στη μάζα του σκυροδέματος. Η διείσδυση των χλωριόντων στη μάζα του σκυροδέματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, οι σπουδαιότεροι από τους οποίους είναι:

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

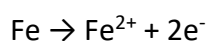
Από το σύνολο των χλωριόντων, που υπάρχουν μέσα στο σκυρόδεμα, εκείνα που συμμετέχουν ενεργά στη διάβρωση του οπλισμού του είναι αυτά που είναι δυνατόν να διαλυθούν στο νερό των πόρων του σκυροδέματος (διαλυτά ή ελεύθερα χλωριόντα) και τα οποία μπορούν να φτάσουν στην επιφάνεια του οπλισμού, όπου προκαλούν την αποπαθητικοποίησή του. Στα συνολικά χλωριόντα περιλαμβάνονται, εκτός από τα ελεύθερα (διαλυτά), κι εκείνα που συμμετέχουν στο σχηματισμό κρυσταλλικών ενώσεων στο σκυρόδεμα. Τα συνολικά χλωριόντα προσδιορίζονται με διάλυση του κονιοποιημένου σκυροδέματος σε διάλυμα HNO_3 1M. Τα ελεύθερα (διαλυτά) χλωριόντα μπορούν να προσδιοριστούν με εκχύλιση του κονιοποιημένου σκυροδέματος με διάλυμα καυστικού καλίου, αιθυλικής αλκοόλης ή με συμπίεση του σκυροδέματος, σε κατάλληλη συσκευή, για την απομάκρυνση του υγρού των πόρων. Οι διάφοροι τρόποι και μέθοδοι μέτρησης των διαλυτών χλωριόντων, για το ίδιο δείγμα σκυροδέματος, δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα. Φαίνεται να επικρατεί η αντίληψη ότι η συμπίεση του σκυροδέματος για την απομάκρυνση του υγρού των πόρων δίνει τα πιο ρεαλιστικά

αποτελέσματα. Τα χλωριόντα, που είναι διαλυμένα στο υγρό των πόρων του σκυροδέματος, είναι δυνατόν να δεσμευθούν με φυσικό ή χημικό τρόπο. Ο φυσικός τρόπος συνίσταται στη ρόφηση τους στην επιφάνεια των πόρων του σκυροδέματος, ενώ ο χημικός στο σχηματισμό διαφόρων ενώσεων η συνηθέστερη από τις οποίες είναι το άλας του Friedel (Friedel's salt): $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό του άλατος του Friedel διαδραματίζει η περιεκτικότητα του τσιμέντου σε C3A. Βέβαια, η δέσμευση των χλωριόντων δεν εξαντλείται μόνο με το εν λόγω άλας, ούτε ο σχηματισμός του άλατος αυτού είναι δυνατόν να γίνει μόνο με το C3A. Το τσιμέντο Portland έχει τη δυνατότητα να συγκρατήσει δεσμευμένα 0.4 g Cl⁻/100 g τσιμέντου. Γενικά, στην πράξη έχει επικρατήσει το κριτήριο Ritzard, σύμφωνα με το οποίο ποσότητες χλωριόντων μεγαλύτερες από 0.4 g Cl⁻/100 g τσιμέντου μπορούν να μετατρέψουν την παθητική κατάσταση του χάλυβα στο σκυρόδεμα σε ενεργή (έστω και με υψηλή τιμή pH). Ποσότητες χλωριόντων μεγαλύτερες από 1 g Cl⁻/100 g τσιμέντου απαιτούν άμεση λήψη μέτρων προστασίας της κατασκευής. Άλλοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι είναι ορθότερο να εξετάζεται η τιμή του λόγου των χλωριόντων προς το pH. Βάσει αυτής της θεώρησης, κατά την παρουσία χλωριόντων και ανάλογα της αριθμητικής τιμής του λόγου $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$, το προστατευτικό στρώμα του χάλυβα μπορεί να καταστραφεί (έναρξη αποπαθητικοποίησης) ακόμη και αν οι τιμές του pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος είναι σημαντικά υψηλότερες από τις κανονικές (>12.5). Έτσι, όταν ο λόγος $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 0.6, ο χάλυβας δεν προστατεύεται επί μακρόν έναντι της διάβρωσης, πιθανώς επειδή το στρώμα οξειδίου του σιδήρου είτε γίνεται διαπερατό, είτε γίνεται ασταθές υπό αυτές τις συνθήκες ^[38]. Για τα τυπικά μίγματα σκυροδέματος, που χρησιμοποιούνται στην πράξη, αναφέρεται ότι η περιεκτικότητα σε χλωριόντα για έναρξη της διάβρωσης πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0.6-0.9 kg Cl⁻/m³ σκυροδέματος. Τα τσιμέντα, που περιέχουν ποζολανικά πρόσθετα, έχουν τη δυνατότητα δέσμευσης μεγαλύτερης ποσότητας χλωριόντων σε σχέση με τα απλά τσιμέντα, ενώ, επειδή η χρησιμοποίησή τους επιφέρει μείωση του πορώδους, παρεμποδίζουν τη διείσδυση των χλωριόντων στη μάζα του σκυροδέματος. Επιπλέον, τα συγκεκριμένα τσιμέντα μπορούν να περιέχουν σημαντικά μεγαλύτερα ποσοστά χλωριόντων σε σχέση με το αμιγές τσιμέντο Portland, χωρίς τον κίνδυνο διάβρωσης του οπλισμού.

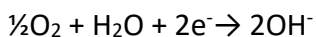
Όταν τα χλωριόντα εισέρχονται στο εσωτερικό του σκυροδέματος, τότε αυτά μπορούν να οδηγήσουν σε δυο περιπτώσεις διάβρωσης:

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

Όταν η συγκέντρωση των χλωριόντων αποκτήσει μια ορισμένη τιμή, τότε υπάρχουν αρκετά ελεύθερα χλωριόντα, τα οποία φθάνουν, λόγω διάχυσης, στην επιφάνεια του οπλισμού και προκαλούν την αποπαθητικοποίησή του. Η διάβρωση του οπλισμού παρουσία χλωριόντων απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11 και λαμβάνει χώρα με τη λειτουργία ενός τοπικού γαλβανικού στοιχείου. Στην άνοδο πραγματοποιείται διάλυση του σιδήρου κατά την αντίδραση:

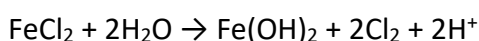
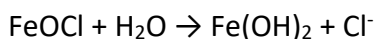


και στην κάθοδο η αντίδραση:

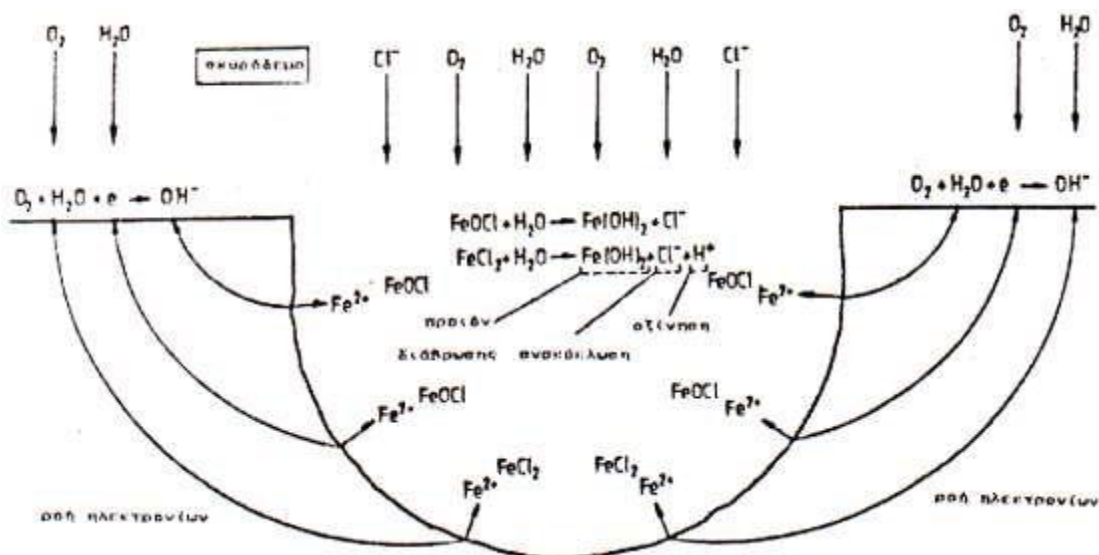


Τα ιόντα σιδήρου, που παράγονται κατά την ανοδική δράση, αντιδρούν αρχικά με τα χλωριόντα, που έχουν φθάσει στην επιφάνεια του οπλισμού, σχηματίζοντας (δι)χλωριούχο σίδηρο (FeCl₂). Στη συνέχεια ο χλωριούχος σίδηρος, παρουσία του οξυγόνου, μετατρέπεται σε χλωρίδιο του τρισθενούς σιδήρου (FeOCl – οξείδωση του σιδήρου σε τρισθενή σίδηρο).

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

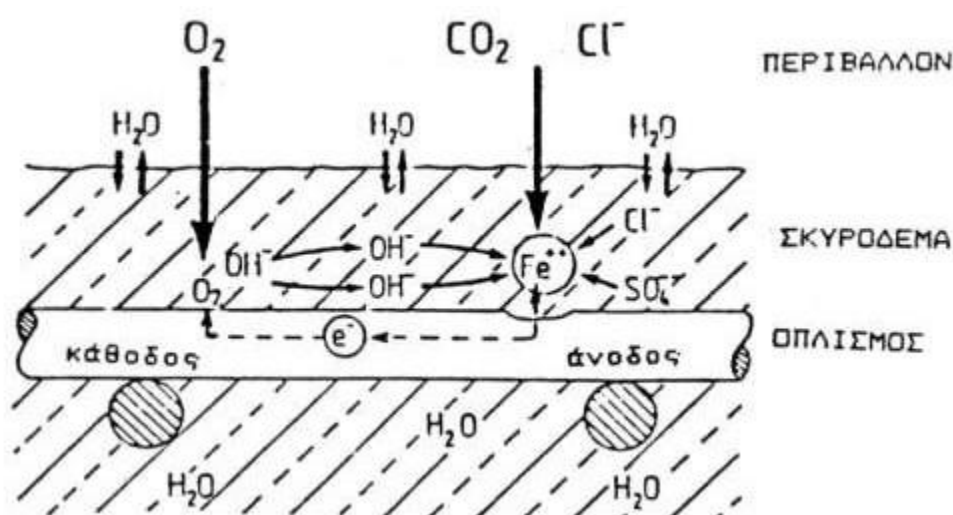


Από τις παραπάνω αντιδράσεις προκύπτει ότι τα χλωριόντα, που είχαν δεσμευθεί στα προϊόντα της διάβρωσης, επιστρέφουν στο διάλυμα των πόρων, λόγω της υδρόλυσης, ενώ ταυτόχρονα γίνεται και τοπική οξίνιση του διαλύματος αυτού. Συνεπώς, είναι προφανές, ότι η δράση των χλωριόντων αποτελεί ένα αυτοκαταλυόμενο σύστημα αντιδράσεων, όταν η συγκέντρωσή τους φθάσει σε ένα ορισμένο επίπεδο. Έτσι, ακόμη και αν σταματήσει η περαιτέρω είσοδος χλωριόντων, η διάβρωση του οπλισμού δεν παρεμποδίζεται και συνεχίζεται, επειδή η συγκέντρωση των χλωριόντων στην επιφάνεια του οπλισμού παραμένει σταθερή. Η αναγκαία ροή ηλεκτρονίων πραγματοποιείται μέσω του χάλυβα, ενώ η μετακίνηση των ιόντων γίνεται μέσα στους πόρους του σκυροδέματος. Μια τέτοια περίπτωση διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως ιδιοδιάβρωση, σε αντίθεση με τη δημιουργία ενός μακροσκοπικού γαλβανικού στοιχείου, που μπορεί να δημιουργηθεί στο οπλισμένο σκυρόδεμα κατά τη διεύδυση των χλωριόντων. [38]



Σχήμα 2.11 Διάβρωση του οπλισμού σε σκυρόδεμα με χλωριόντα.

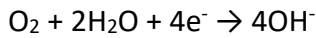
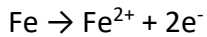
Στην περίπτωση του οπλισμένου σκυροδέματος, η δημιουργία μακροστοιχείων οφείλεται σε επιδράσεις του περιβάλλοντος [30]. Η γραμμική πόλωση χρησιμοποιείται κύριος ως μέθοδος αποτίμησης της διάβρωσης από χλωριόντα. Ωστόσο η μόνη μέθοδος (καταστρεπτική) αποτίμησης του βάθους ενανθράκωσης του σκυροδέματος γίνεται δια μέσο της διάτρησης του και της συλλογής πηλύνων /καρότων από το κτίριο ή δια μέσω των δυναμικών διάβρωσης. Οι ρυθμοί διάβρωσης ενός ενανθρακωμένου σκυροδέματος σπάνια υπερβαίνουν την τιμή των $0,5\mu\text{A cm}^{-2}$, ενώ σε σκυρόδεμα διαβρωμένο από χλωριόντα οι ρυθμοί διάβρωσης υπερβαίνουν το $1\mu\text{A cm}^{-2}$ ισοδύναμο με $12,5\mu\text{m}/\text{έτος}$ απώλεια διατομής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα ενανθρακωμένο σκυρόδεμα στεγνώνει και ξηραίνεται πολύ πιο εύκολα από ότι ένα μολυσμένο με χλωριόντα σκυρόδεμα. Επιπρόσθετα θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ενανθράκωση μειώνει τη μέση διάμετρο των πόρων του σκυροδέματος [38]. Η διάβρωση του οπλισμού του σκυροδέματος είναι μία ηλεκτροχημική δράση, που λαμβάνει χώρα κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Η ηλεκτροχημική δράση απαιτεί την ύπαρξη ανόδου, καθόδου και ηλεκτρολύτου μέσω του οποίου διακινούνται τα ιόντα. Η διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών δράσεων πραγματοποιείται στην διεπιφάνεια μετάλλου-ηλεκτρολύτη και ακολουθεί η μετακίνηση των ιόντων μέσω του ηλεκτρολύτη. Η ανοδική και η καθοδική δράση όπως και οι συνθήκες για την πραγματοποίησή τους εμφανίζονται στο Σχήμα 2.12.



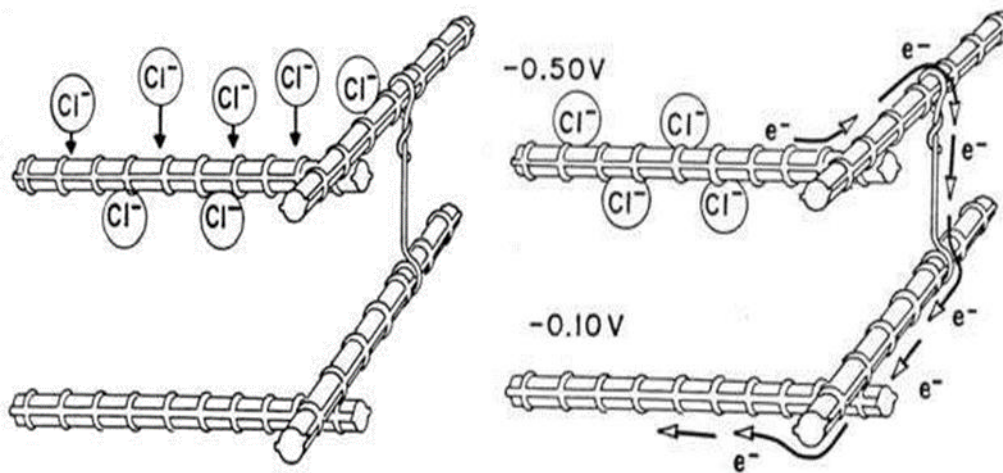
Σχήμα 2.12 Σχηματισμός γαλβανικού στοιχείου στον σιδηροπλισμό σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την διάβρωση του οπλισμού (κατά Evans).

Στην πράξη (π.χ. σε θαλάσσιο περιβάλλον) συχνά παρουσιάζεται η περίπτωση της διείσδυσης των χλωριόντων από τη μία μόνο πλευρά της κατασκευής. Τότε είναι δυνατή η περίπτωση, που περιγράφεται στο Σχήμα 2.13. Τα χλωριόντα φτάνουν, μετά από ένα χρονικό διάστημα, στις πρώτες ράβδους του οπλισμού, ενώ αυτές που βρίσκονται προς το εσωτερικό τμήμα της κατασκευής δεν έχουν γύρω τους χλωριόντα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13 (α). Μεταξύ των εσωτερικών και των εξωτερικών ράβδων αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού (δημιουργία μακροστοιχείου μέσω των συνδετήρων), όπως εικονίζεται στο Σχήμα 2.13 (β). Οι ράβδοι, με τη μεγάλη συγκέντρωση χλωριόντων αποτελούν την άνοδο, ενώ οι ράβδοι χωρίς χλωριόντα (ή με μικρή συγκέντρωση

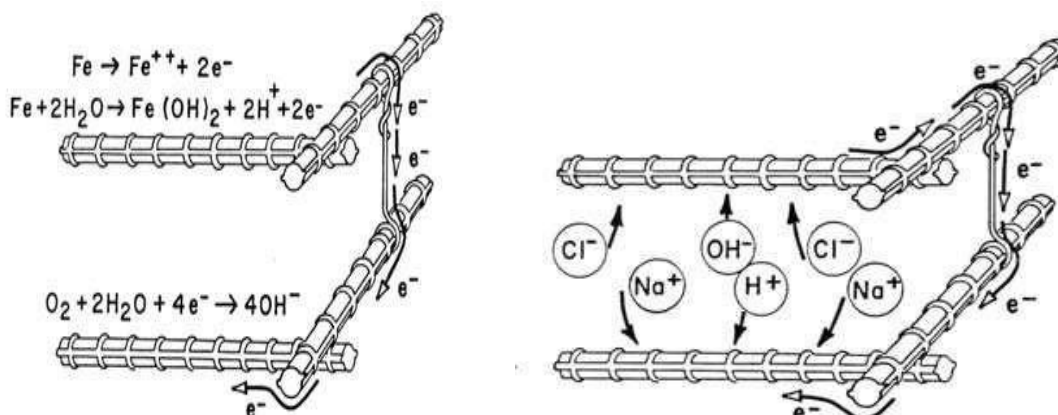
χλωριόντων) αποτελούν την κάθοδο του γαλβανικού στοιχείου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13 (γ). Στο ίδιο σχήμα περιγράφονται και οι ηλεκτροχημικές δράσεις του γαλβανικού μακροστοιχείου:



Στη συνέχεια, σχηματίζεται υδροξείδιο του σιδήρου. Μέσω των πόρων του σκυροδέματος αρχίζει η μεταφορά των ιόντων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13 (δ). Η ταχύτητα της διάβρωσης εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος του γαλβανικού μακροστοιχείου. Η ένταση του ρεύματος, με τη σειρά της, εξαρτάται από το δυναμικό του μακροστοιχείου (δυναμικό μεταξύ ανόδου - καθόδου), από το λόγο της ανοδικής προς την καθοδική επιφάνεια και από την ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος. Η ταχύτητα διάβρωσης στην περίπτωση σχηματισμού γαλβανικού μακροστοιχείου είναι, κατά κανόνα, πολύ μεγαλύτερη από αυτήν της ιδιοδιάβρωσης^[1].



(α) Διείσδυση των χλωριόντων μέχρι τον σπλισμό (β) Δημιουργία γαλβανικού μακροστοιχείου



(γ) Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις (δ) Μεταφορά ιόντων γαλβανικού μακροστοιχείου.

Σχήμα 2.13 Σχηματισμός μακροστοιχείου σε σκυρόδεμα με χλωριόντα (α-δ)

Γαλβανικά μακροστοιχεία επίσης εμφανίζονται όταν υπάρχουν:

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

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

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

Όταν τα γαλβανικά μακροστοιχεία έχουν σχηματιστεί θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για την εξαφάνισή τους. Τα χλωριόντα που μπορεί να διατρήσουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίου όταν φτάσουν μέσω του νερού των πόρων μέχρι τον οπλισμό, μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος, αν έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτά αδρανή από παραλίες ή θαλασσινό νερό μείξης (νησιωτική Ελλάδα), ή πρόσμικτα βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα, είτε από το φυσικό περιβάλλον. Η δεύτερη περίπτωση είναι πολύ συνηθισμένη σε παραθαλάσσιες περιοχές της Ελλάδας, όπου μέχρι σε μεγάλη απόσταση από την ακτή ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει χλωριούχα άλατα, ιδίως αν οι επικρατούντες άνεμοι κατευθύνονται από τη θάλασσα προς την ξηρά ^[14]. Έχει παρατηρηθεί όμως ότι η ενανθράκωση και η διείσδυση χλωριόντων δεν είναι ανεξάρτητες διαδικασίες, και μάλιστα η πρώτη επιταχύνει σημαντικά τη δεύτερη. Όταν το υδροξείδιο του ασβεστίου του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού αντιδρά με τα χλωριόντα και τα δεσμεύει, περιορίζοντας την ποσότητα αυτών που διαχέονται προς τον οπλισμό, κάτω από την οριακή συγκέντρωση του 0.4-0.6%, που απαιτείται για την διάτρηση του προστατευτικού οξειδίου. Όταν όμως το υδροξείδιο του ασβεστίου μετατραπεί με την ενανθράκωση σε ανθρακικό ασβέστιο τα χλωριόντα που είχε δεσμεύσει ελευθερώνονται και διατίθενται πλέον για την προσβολή του χάλυβα.

Η ύπαρξη και λειτουργία γαλβανικών μακροστοιχείων οδηγεί σε υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης που οδηγούν σε:

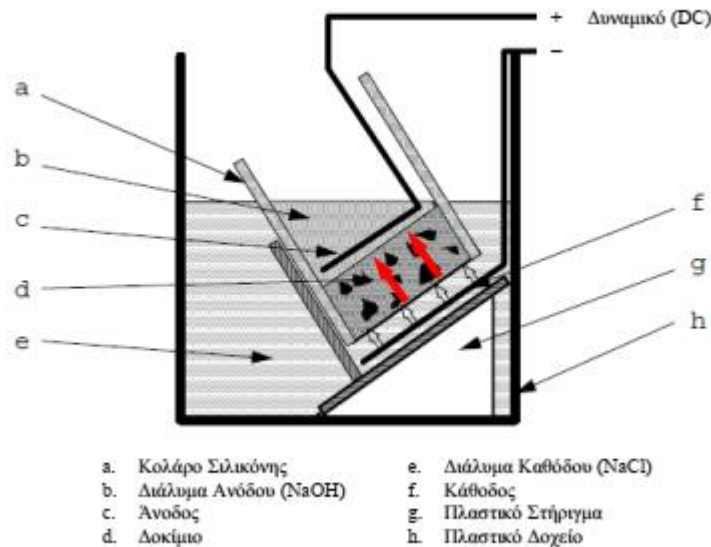
- Μείωση της διατομής του οπλισμού, με συνέπειες στη στατική ικανότητα της κατασκευής.
- Δημιουργία ρωγμών λόγω του σχηματισμού οξειδίων στην επιφάνεια του οπλισμού, τα οποία με τον μεγαλύτερο του χάλυβα όγκο τους ασκούν εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα.

Η ταχύτητα διάβρωσης εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος του γαλβανικών μακροστοιχείου. Η ένταση του ρεύματος εξαρτάται από το δυναμικό του μακροστοιχείου, την ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος και τον λόγο μεταξύ της ανοδικής προς την καθοδική επιφάνεια. ^[30]

2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

2.3.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΚΑΤΑ NT BUILD 492

Η μέθοδος NT BUILD 492 είναι μία μέθοδος επιταχυνόμενης μέτρησης της διαπερατότητας χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Σκοπός της μεθόδου είναι ο υπολογισμός του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων σε σκυρόδεμα, κονιάματα και υλικά αποκατάστασης μέσω μετρήσεων μη σταθερής ροής χλωριόντων (non-steady-state experiments). Η πειραματική διαδικασία της μεθόδου έχει ως εξής: ^[39] Αρχικά γίνεται η προετοιμασία δοκιμίων διαστάσεων $\Phi 95 \times 50 \pm 2 \text{ mm}$ και η τοποθέτησή τους σε δοχείο κενού. Τα δοκίμια εντός του δοχείου υποβάλλονται σε κενό για τρεις ώρες και στη συνέχεια ενώ βρίσκονται υπό κενό πληρώνονται με διάλυμα $\text{Ca}(\text{OH})_2$ για 18 περίπου ώρες υπό συνθήκες εργαστηριακού περιβάλλοντος. Στη συνέχεια τα δοκίμια απομακρύνονται από το δοχείο κενού και τοποθετούνται στη συσκευή μέτρησης. Η αρχή λειτουργίας της συσκευής μέτρησης διαπερατότητας χλωριόντων και η κίνηση των χλωριόντων παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.14: αρχή λειτουργίας της συσκευής μέτρησης διαπερατότητας χλωριόντων κατά NT BUILD 492. (Τα κόκκινα βέλη υποδεικνύουν την κίνηση των χλωριόντων.)

Τα διαλύματα που τοποθετούνται στην άνοδο και την κάθοδο του κελιού είναι 0.3N καυστικό νάτριο και 10% κατά μάζα χλωριούχο νάτριο αντίστοιχα. Η διάρκεια της μέτρησης και η τάση που θα εφαρμοστεί κατά τη μέτρηση καθορίζονται από το πρότυπο. Η θερμοκρασία των διαλυμάτων και του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της μέτρησης πρέπει να διατηρείται μεταξύ 20 και 25 βαθμών κελσίου. Αφού η μέτρηση ολοκληρωθεί το δοκίμιο απομακρύνεται από την συσκευή, απομακρύνονται τα υπολείμματα διαλυμάτων από τις επιφάνειες του και τοποθετείται επί μηχανήματος θλίψης όπου και διαρρηγνύεται. Τέλος το διαρρηγμένο δοκίμιο διαβρέχετε με

διάλυμα νιτρικού αργύρου 0,1 M και παρατηρείται ο σχηματισμός μιας περιοχής λευκού χρώματος επί της επιφάνειας που προέκυψε από την διάρρηξη. Η περιοχή αυτή υποδεικνύει την αντίδραση του νιτρικού αργύρου μετά ελεύθερα χλωριόντα που διείσδυσαν στο δοκίμιο γεγονός το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό χλωριούχου αργύρου οποίος έχει χρώμα λευκό. Μετρώντας το μέσο μήκος της λευκής περιοχής μπορούμε να υπολογίσουμε το συντελεστή διάχυσης χλωριόντων του δοκιμίου από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$D_{\text{nssm}} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - a\sqrt{x_d}}{t} \quad E = \frac{U - 2}{L} \quad a = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)$$

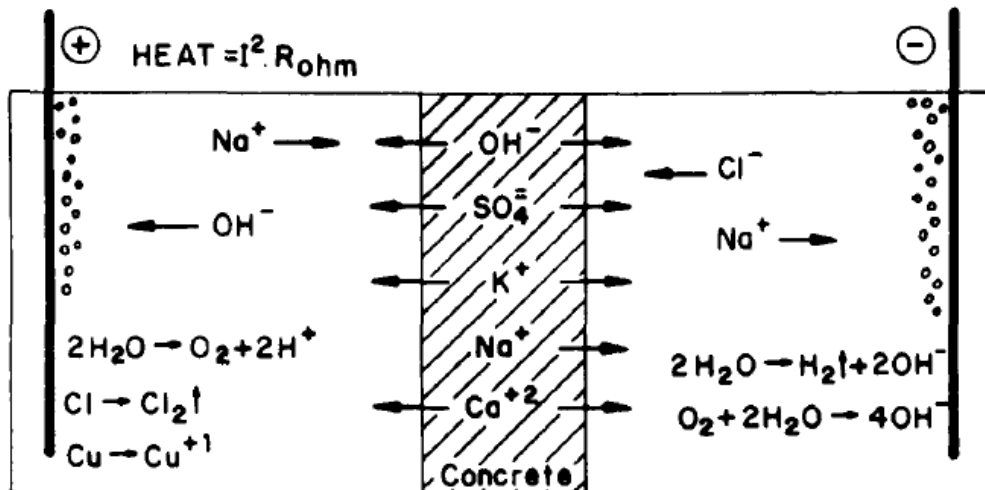
Όπου

- D_{nssm} : συντελεστής διάχυσης χλωριόντων ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)
- F : σταθερά του Faraday, $F = 9.648 \cdot 10^4 \text{ J}/(\text{V mol})$
- U : απόλυτη τιμή της εφαρμοσμένης τάσης (V)
- T : μέση τιμή αρχικής και τελικής θερμοκρασίας του διαλύματος ανόδου ($^{\circ}\text{C}$)
- L : πάχος δοκιμίου (mm)
- x_d : μέση τιμή των βαθών διείσδυσης των χλωριόντων (mm)
- t : διάρκεια του πειράματος (h)
- c_d : συγκέντρωση χλωριόντων στην οποία το χρώμα αλλάζει, $c_d = 0.07 \text{ N}$
- c_0 : συγκέντρωση χλωριόντων στο διάλυμα καθόδου, $c_0 = 2 \text{ N}$

2.3.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΚΑΤΑ ASTM C 1202

Η μέθοδος ASTM C 1202 είναι άλλη μία μέθοδος επιταχυνόμενης μέτρησης διαπερατότητας χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Σκοπός της μεθόδου είναι η εκτίμηση της διαπερατότητας ηλεκτρικού φορτίου από τη μάζα του σκυροδέματος (ηλεκτρική αγωγιμότητα σκυροδέματος). Η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που διαπερνά το σκυρόδεμα αποτελεί μία ένδειξη της ανθεκτικότητάς του σκυροδέματος στη διείσδυση χλωριόντων. Η πειραματική διαδικασία της μεθόδου έχει ως εξής: [40]. Προετοιμασία-κόψιμο σε τροχό κυλινδρικών δοκιμίων σε διαστάσεις 100 mm διάμετρο και 50 mm πάχος και τοποθέτηση τους σε θάλαμο κενού. Τα δοκίμια εντός του θαλάμου και ενώ βρίσκονται υπό κενό, πληρώνονται με απαερισμένο νερό για 18 περίπου ώρες υπό συνθήκες εργαστηριακού περιβάλλοντος.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της μεθόδου.



Εικόνα 2.15: αρχή λειτουργίας της μεθόδου ASTM C 1202

Τα δοκίμια αφού προετοιμαστούν, τοποθετούνται στη συσκευή μέτρησης. Τα διαλύματα που τοποθετούνται στην άνοδο και την κάθοδο του κελιού είναι 0,3N καυστικό νάτριο και 3% βάρος κατά όγκο χλωριούχο νάτριο αντίστοιχα. Ο αρνητικός ακροδέκτης συνδέεται με το ηλεκτρόδιο στο διάλυμα NaCl και ο θετικός ακροδέκτης συνδέεται με το ηλεκτρόδιο στο διάλυμα NaOH. Οι συνθήκες υπό τις οποίες διεξάγεται η μέτρηση είναι η εξής:

- Διάρκεια πειράματος 6 ώρες
- Εφαρμοσμένη τάση 60 Volt
- Ανώτατη επιτρεπόμενη θερμοκρασία διαλύματος NaCl 90 °C

κατά τη διάρκεια της μέτρησης καταγράφονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα το ρεύμα που διαπερνά το δοκίμιο και η θερμοκρασία των διαλειμμάτων. Αφού η μέτρηση ολοκληρωθεί σημειώνουμε την τελική τιμή του ρεύματος και της θερμοκρασίας. Έπειτα εφαρμόζοντας τις τιμές του ρεύματος που έχουμε καταγράψει στην παρακάτω εξίσωση μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό φορτίο που πέρασε μέσα από το δοκίμιο.

$$Q = 900 \cdot (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360})$$

Όπου:

- Q (σε coulomb) το συνολικό φορτίο που πέρασε μέσα από το δοκίμιο κατά τη διάρκεια της μέτρησης
- I_0 (σε ampere) η αρχική ένταση του ρεύματος που καταγράφηκε τη στιγμή που εφαρμόστηκε τάση 60 Volt στο δοκίμιο
- I_t (σε ampere) Η ένταση του ρεύματος που καταγράφηκε σε χρονικό διάστημα t από τη στιγμή που εφαρμόστηκε στο δοκίμιο τάση 60 Volt.

2.3.3 ΣΤΑΘΜΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΜΑΖΑΣ

Η μέτρηση της απώλειας μάζας των οπλισμών, ανήκει στις καταστροφικές μεθόδους διότι απαιτείται καταστροφή του δοκιμίου. Για τη μέτρηση της απώλειας μάζας απαιτείται σπάσιμο των δοκιμίων, μετά από ένα σημαντικό χρονικό διάστημα έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον. Για την εκτίμηση της διάβρωσης του χάλυβα γίνονται μετρήσεις μάζας των οπλισμών του χάλυβα πριν και μετά την έκθεση τους στο διαβρωτικό περιβάλλον και κατόπιν υπολογισμός της διαφοράς μάζας. Η τελική μάζα των οπλισμών υπολογίζεται αφού πρώτα οι οπλισμοί καθαριστούν για την απομάκρυνση των οξειδίων και της ρητίνης που καλύπτει την άνω επιφάνεια των οπλισμών. Η διαφορά μάζας προκύπτει από την αρχική μείον την τελική μάζα του κάθε οπλισμού. Η εκτίμηση της διάβρωσης δίνεται με τον υπολογισμό του ποσοστού επί της εκατό κατά βάρος μεταβολής της μάζας των οπλισμών, καθώς επίσης και από τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης. Το ποσοστό επί της εκατό της μεταβολής του βάρους των οπλισμών δίνεται από την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$\Delta B\% = [(m_{\alpha\rho\chi} - m_{\tau\epsilon\lambda}) / m_{\alpha\rho\chi}] * 100\%$$

$m_{\alpha\rho\chi}$: Η μάζα των οπλισμών πριν την έκθεση στο διαβρωτικό περιβάλλον

$m_{\tau\epsilon\lambda}$: Η μάζα των οπλισμών μετά από έκθεση στο διαβρωτικό περιβάλλον

Ο ρυθμός διάβρωσης του οπλισμού δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$CR = (8,76 * 10^7 * W) / (A * T * D)$$

CR: Ρυθμός διάβρωσης (Corrosion Rate)

W: Απώλεια μάζας του οπλισμού σε g ($W=m_{\alpha\rho\chi}-m_{\tau\epsilon\lambda}$)

A: Η επιφάνεια του οπλισμού σε cm^2 ($A=33cm^2$)

T: Χρόνος έκθεσης των δοκιμίων σε h

D: Πυκνότητα χάλυβα ($\rho=7,8gr/cm^3$)

2.3.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΑΘΟΥΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Μετρήση βάθους ενανθράκωσης σύμφωνα με τη μέθοδο RILEM CPC-18.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, το δοκίμιο σπάει αξονικά και ψεκάζεται με διάλυμα δείκτη φαινολοφθαλείνης, ο οποίος παίρνει ιώδες χρώμα στις περιοχές του δοκιμίου που δεν έχουν ενανθρακωθεί ($pH\approx 12-13$) και άχρωμο όταν η αλκαλικότητα του σκυροδέματος είναι κάτω από 9 ($pH\leq 9$). Για την παρασκευή του διαλύματος φαινολοφθαλείνης συνήθως γίνεται μίξη 1 g δείκτη σε 100 ml απιονισμένου νερού. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου πρέπει να απομακρύνεται η παιπάλη που δημιουργείται από την κοπή του δοκιμίου και μπορεί να μας δώσει λανθασμένα αποτελέσματα ενώ σε περίπτωση που το σκυρόδεμα είναι ξηρό γίνεται διαβροχή του ώστε να είναι πιο έντονη η χρωματική αλλαγή ^[38]. Όταν είναι γνωστός ο χρόνος έκθεσης σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον και το βάθος ενανθράκωσης του σκυροδέματος μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής K σύμφωνα με τη σχέση: $D=k*t^{1/2}$ όπου D το βάθος ενανθράκωσης σε mm, t ο χρόνος έκθεσης σε χρόνια και K ο συντελεστής διάχυσης CO_2 σε $mm/yr^{1/2}$ ^[11].

Μέτρηση βάθους ενανθράκωσης σε θάλαμο ενανθράκωσης.

Επειδή η ενανθράκωση του σκυροδέματος υπό συνθήκες περιβάλλοντος πραγματοποιείται με πολύ αργούς ρυθμούς, εξαιτίας της χαμηλής συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, μετρήσεις επιταχυνόμενης ενανθράκωσης πραγματοποιούνται στο εργαστήριο σε ειδικούς θαλάμους. Η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα μέσα σε ένα τέτοιο θάλαμο είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή της ατμόσφαιρας και έτσι μπορούμε σε μικρότερο χρονικό διάστημα να έχουμε αποτελέσματα σχετικά με την ανθεκτικότητα ενός σκυροδέματος απέναντι στο φαινόμενο της ενανθράκωσης. Η συγκεκριμένη διαδικασία έχει ως εξής:

Δύο πρίσματα ή οκτώ κύβοι σκυροδέματος χυτεύονται και σκληραίνουν για 28 ημέρες σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-2. Τα δοκίμια αφήνονται στη συνέχεια σε εργαστηριακό περιβάλλον αέρα για 14 ημέρες και στη συνέχεια τοποθετούνται στον θάλαμο ενανθράκωσης. Η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα εντός του θαλάμου αποθήκευσης βρίσκεται σε ποσοστό επί τοις εκατό κατ'όγκο $3,00 \pm 0,10\%$, η θερμοκρασία $(20 \pm 2)^\circ \text{C}$ και η σχετική υγρασία $(57 \pm 3)\%$ για περιόδους έως και 70 ημερών. Μετά την αποθήκευση 0, 7, 28 και 70 ημερών στον θάλαμο, στο τέλος κάθε περιόδου έκθεσης, δύο από τους κύβους χωρίζονται στη μέση (ή μία φέτα διαστάσεων 50mm χωρίζεται από κάθε πρίσμα) και μετρούνται τα βάθη της ενανθράκωσης. Σε κάθε φέτα πρίσματος ή στο μισό του κάθε κύβου, μετρούνται οκτώ βάθη ενανθράκωσης στο ίδιο σημείο και εξαγονται οι μέσοι όροι. Χρησιμοποιώντας μετρήσεις που έγιναν σε σταθερές ώρες, ο ρυθμός ενανθράκωσης εκφράζεται σε $\text{mm} / \sqrt{\text{ημέρες}}$.

2.3.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΧΛΩΡΙΟΥ

Μια αξιολογη μέθοδος για τον προσδιορισμό των ολικών ιόντων χλωρίου, σε δοκίμια τα οποία εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα NaCl είτε εκτέθηκαν σε παραθαλάσσιο περιβάλλον, αποτελεί η μέθοδος Mohr. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο ζυγίζονται 5g τσιμεντοκονίας στο ζυγό ακριβείας και τοποθετούνται μέσα σε ογκομετρική φιάλη των 250 ml προσθέτοντας 50ml HNO₃ 1N. Στη συνέχεια γίνεται συμπλήρωση με απιονισμένο νερό με ταυτόχρονη ανάδευση. Έπειτα 10 ml από αυτό το διάλυμα μπαίνουν σε κωνική φιάλη μαζί με 90 ml απιονισμένο νερό. Το επόμενο βήμα είναι η εξουδετέρωση με NaOH 0,1 N και η ρίψη 1 ml χρωμικού καλίου. Το τελευταίο βήμα είναι η τιτλοδότηση με AgNO₃ 0,01N μέχρι αλλαγή χρώματος ^[30]. Η μέθοδος βασίζεται στο ότι τα γραμμομόρια του Νιτρικού Αργύρου που χρειάζονται για την τιτλοδότηση είναι ίσα με αυτά των ιόντων χλωρίου. Η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου προκύπτει από τον τύπο:

$$C_{Cl} (\text{mgr/lit}) = (V_{AgNO_3} \times C_{AgNO_3} \times A_{BCl} \times 1000) / V_{\delta/\tau\omicron\varsigma}$$

Όπου: V_{AgNO_3} ο όγκος για την τιτλοδότηση, $V_{\delta/\tau\omicron\varsigma} = 100\text{ml}$, $C_{AgNO_3} = 0.01\text{mole/l}$, $A_{BCl} = 35,45$.

2.3.6 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)

Η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης είναι μια από τις πιο νέες τεχνικές ανάλυσης της μικροδομής μεγάλου φάσματος υλικών. Λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο όπως ένα οπτικό μικροσκόπιο με τη διαφορά ότι αντί για φως, προσπίπτει στην επιφάνεια του δείγματος μια δέσμη ηλεκτρονίων. Από την αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων με την επιφάνεια προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα για τη μορφολογία και τη σύσταση των υλικών. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης έχει σημαντικά πλεονεκτήματα της σε σχέση με την οπτική όπως είναι η τρισδιάστατη και η εις βάθος απεικόνιση των στερεών δειγμάτων και η μεγάλη ανάλυση που φθάνει μέχρι το 1nm-5nm. Η δέσμη των ηλεκτρονίων συγκρούεται με την επιφάνεια του δείγματος (ελαστικά ή μη ελαστικά) και εκπέμπονται κυρίως δευτερογενή (*secondary*) ηλεκτρόνια, οπισθοσκεδαζόμενα (*backscattered*) ηλεκτρόνια καθώς και ακτίνες Χ. Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Έτσι το SEM δίνει πληροφορίες που αφορούν κυρίως στη μορφολογία και στη σύσταση της επιφάνειας. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης αποτελείται από σύστημα παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων, σύστημα κατεύθυνσης της δέσμης ηλεκτρονίων, σύστημα πληροφοριών το οποίο περιλαμβάνει τους αισθητήρες που δέχονται τα διάφορα σήματα που εκπέμπονται ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της δέσμης ηλεκτρονίων με το δείγμα, σύστημα κενού, καθώς και το σύστημα μεγέθυνσης, παρουσίασης και καταγραφής αποτελεσμάτων. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διαθέτει επίσης σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτίνων Χ που δημιουργούνται στην επιφάνεια από την προσπίπτουσα δέσμη με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση του υλικού [19].

2.3.7 ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ (X-Ray Diffraction)

Η μέθοδος της περίθλασης των ακτίνων Χ (XRD) χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση των κρυσταλλικών ενώσεων που εμπεριέχονται στα υπό εξέταση δείγματα. Οι αποστάσεις μεταξύ των κρυσταλλικών επιπέδων, το είδος των ατόμων και η κατανομή τους στα κρυσταλλικά επίπεδα είναι χαρακτηριστικά για κάθε ορυκτό. Επειδή το μήκος κύματος των ακτίνων Χ είναι ίδιο με αυτό των κρυσταλλικών επιπέδων, οι κρύσταλλοι των ορυκτών μπορούν να προκαλέσουν περίθλαση των ακτίνων Χ. Για να λάβει χώρα η περίθλαση ακτίνων Χ πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη του Bragg:

$$n \times \lambda = 2 \times d \times \sin\theta$$

όπου:

$$n=1,2,3\dots$$

λ το μήκος κύματος των ακτίνων Χ,

d η απόσταση των κρυσταλλικών επιπέδων,

θ η γωνία της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με το κρυσταλλικό επίπεδο

Στην περίθλαση ακτίνων Χ το δείγμα κατάλληλα κονιοποιημένο περιστρέφεται μαζί με τον ανιχνευτή σε γωνία 2θ ώστε να ανιχνεύονται οι ανακλώμενες ακτίνες. Το μηχάνημα καταγράφει την ένταση της περιθλώμενης ακτινοβολίας I συναρτήσει της

γωνίας 2θ . Σε κάθε κορυφή του διαγράμματος XRD υπάρχει μέγιστη ανάκλαση και στην οποία ικανοποιείται η συνθήκη του Bragg για ένα είδος πλεγματικών επιπέδων ενώ ανάμεσα στις κορυφές υπάρχει θόρυβος. Οι γωνίες 2θ εξαρτώνται από το σχήμα και το μέγεθος της μοναδιαίας κυψελίδας ενώ η ένταση των κορυφών από τη θέση των ατόμων και από την ικανότητα σκέδασης της ακτινοβολίας [38].

2.3.8 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΜΕ ΠΟΡΟΣΙΜΕΤΡΙΑ Hg

Η ποροσιμετρία υδραργύρου είναι μια από τις πιο δημοφιλείς και γρήγορες μεθόδους για τον καθορισμό του συνολικού πορώδους και της κατανομής του μεγέθους των πόρων στο σκυρόδεμα και όχι μόνο. Βασίζεται στις ιδιότητες του υδράργυρου ο οποίος είναι ένα ισχυρά μη Νευτωνικό, μη διαβρέχον υγρό για τα περισσότερα υλικά [12]. Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στην εξίσωση του Washburn (1921) σύμφωνα με την οποία η απαιτούμενη πίεση για να εισέλθει ένα μη Νευτωνικό υγρό μέσα σε ένα σύστημα τριχοειδών αγγείων, είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου των αγγείων αυτών και ανάλογη της επιφανειακής τάσης και της γωνίας επαφής του εισερχόμενου υγρού με τα αγγεία. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε μικρά, καθαρά και στεγνά δείγματα μάζας συνήθως 5g και ακαθορίστου σχήματος. Το υπό εξέταση δείγμα τοποθετείται σε ειδικό κλωβό στον οποίο εισάγεται υδράργυρος σε ελεγχόμενη ποσότητα και πίεση.

Η εισαγωγή του υγρού υδραργύρου υπό πίεση προκαλεί αύξηση του πραγματικού όγκου του δείγματος επειδή πληρώνονται σταδιακά τα κενά των πόρων του. Από την καμπύλη του όγκου του εισαχθέντος υδραργύρου, συναρτήσει της πίεσης, προκύπτει η καμπύλη κατανομής του μεγέθους των πόρων του δείγματος. Συνήθως, η πίεση που απαιτείται ώστε να γεμίσουν όλοι οι πόροι του δείγματος με Hg 60000 psi. Το πορώδες του δείγματος, τότε, προκύπτει ως λόγος του όγκου των κενών πόρων προς τον φαινόμενο όγκο του δείγματος:

$$E_p = (V_p / V_d) * 100$$

Όπου:

E_p : πορώδες δείγματος (%),

V_p : όγκος υδραργύρου που απαιτήθηκε για την πλήρωσή των πόρων,

V_b : φαινόμενος όγκος δείγματος

2.3.9 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η θερμική αγωγιμότητα στο σκυρόδεμα είναι μια βασική ιδιότητα που σχετίζεται με την πρόβλεψη της μεταφοράς θερμότητας διαμέσου της μάζας του και εξαρτάται από το πορώδες της τσιμεντοκονίας, το είδος των αδρανών και την περιεχόμενη υγρασία. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία μειώνεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος κυρίως λόγω των εσωτερικών ρωγμών που προκαλούνται από του εξάτμιση του νερού [38]. Η μέτρηση των θερμικών παραμέτρων πραγματοποιείται σε κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm με το μηχάνημα ISOMET 2104 το οποίο μετράει το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, τη θερμοχωρητικότητα, τη θερμική διάχυση και τη

θερμοκρασία των δοκιμών καθώς επίσης και των ορυκτών προσθέτων που χρησιμοποιούνται ως μέρος αντικατάστασης τσιμέντου. Η θερμοχωρητικότητα δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = Cp * a$$

Όπου:

λ : θερμική αγωγιμότητα σε W/m^*K

Cp : η θερμοχωρητικότητα σε J/m^3*K και

a : η θερμική διάχυση σε m^2/s

2.3.10 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η μέτρηση της απορροφητικότητας του σκυροδέματος γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C-1585. Για την εκτέλεση της δοκιμής, τα δοκίμια (κυλινδρικά ή κυβικά) σκυροδέματος αρχικά ξηραίνονται στους $105^{\circ}C$ για την απομάκρυνση της περιεχόμενης υγρασίας μέχρι σταθερής μάζας. Αφού επιτευχθεί πλήρης ξήρανση, τα δοκίμια ζυγίζονται σε ζυγό ακριβείας και στη συνέχεια αφήνονται στην ατμόσφαιρα για να κρυώσουν. Επίσης οι πλευρές του δοκιμίου μονώνονται με κατάλληλη ρητίνη με σκοπό την μονοδιάστατη ροή του υγρού μόνο από την κάτω εμβαπτισμένη επιφάνεια και για να μην υπάρχουν πλευρικές απώλειες υγρού. Στη συνέχεια τα δοκίμια μπαίνουν σε δοχείο το οποίο περιέχει νερό ή άλλο διαλύτη με την κάτω επιφάνεια να μην ακουμπά στον πυθμένα του δοχείου και το υγρό να απέχει από την κάτω επιφάνεια του δοκιμίου 3 - 5 mm. Το δοκίμιο σε συγκεκριμένους χρόνους βγαίνει από το δοχείο και αφού απομακρυνθεί η υγρασία επιφανειακά ζυγίζεται με ακρίβεια 0.01 g. Κατά τη διάρκεια του πειράματος καταγράφεται η θερμοκρασία του διαλύτη ώστε να γίνει η διόρθωση της πυκνότητας και συμπληρώνεται υγρό ώστε να διατηρείται σταθερή η στάθμη.

Η απορρόφηση i σε mm δίνεται από τον τύπο:

$$i = \Delta m / (a/d)$$

Όπου Δm η μεταβολή της μάζας σε συγκεκριμένο χρόνο t σε g, a η εμβαπτισμένη επιφάνεια του δοκιμίου σε mm^2 και d η πυκνότητα του υγρού g/mm^3 .

Στη συνέχεια κατασκευάζεται διάγραμμα $I = fvt$. Από το γράφημα εφαρμόζοντας γραμμική γραμμή τάσης προκύπτει η αρχική απορρόφηση που δίνεται από τη μαθηματική σχέση $I = Si \times vt + a$ για χρονικό διάστημα μέχρι 6 ώρες και ακολουθεί η δευτερογενής απορρόφηση από την 1η ημέρα εμβάπτισης μέχρι τις 8 ημέρες.

2.3.11 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΝΕΡΟΥ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ

Η δοκιμή της διείσδυσης νερού υπό πίεση γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 12390-8. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο το δοκίμιο το οποίο πρέπει να είναι κυβικό ή κυλινδρικό με ακμή ή διάμετρο αντίστοιχα, τουλάχιστον 150 mm, στερεώνεται σε κατάλληλο τρίποδο όπου εισέρχεται νερό από την κάτω επιφάνεια του δοκιμίου. Εφαρμόζεται σταθερή πίεση 5 bars για 72 ώρες και στη συνέχεια το δοκίμιο σπάει σε 2 κομμάτια και μετράται το βάθος στο οποίο έχει διεισδύσει το νερό. Όσο διαρκεί η δοκιμή πρέπει να ελέγχεται εκτός από την πίεση η οποία πρέπει να διατηρείται σταθερή και το αν υπάρχει πλευρική απώλεια νερού.

2.3.12 ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Μέτρηση δυναμικού διάβρωσης *Ecorr*

Το δυναμικό διάβρωσης *Ecorr* 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 ^[38]. 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.

Ηλεκτροχημικός προσδιορισμός του ρυθμού διάβρωσης με τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης (*Ipr*)

Η τεχνική γραμμικής πόλωσης είναι μια καταστροφική μέθοδος και συνίσταται στη σάρωση ± 25 mV γύρω από το δυναμικό ισορροπίας και καταγραφή του αντίστοιχου ρεύματος. Είναι μία πολύ γρήγορη τεχνική προσδιορισμού της ταχύτητας διάβρωσης και επειδή το ρεύμα που εφαρμόζεται είναι μικρό έχει το πλεονέκτημα ότι η επιφάνεια του δοκιμίου δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα και έτσι το ίδιο δοκίμιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλες μετρήσεις. Η μέτρηση του *R_p* γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM G59. 'Standard Test method for conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements' vol.03.02.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

3.1 ΤΡΟΠΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος πρέπει να προστατεύεται από τη διάβρωση, τόσο πριν από την ενσωμάτωσή του στο σκυρόδεμα όσο και μετά από αυτήν. Κατά την τοποθέτηση στην τελική του θέση, ο χάλυβας πρέπει να είναι απαλλαγμένος από εμφανείς απολεπίσεις, αλλοιώσεις ή αθέλητες παραμορφώσεις και πληγές, οι οποίες εκτός των άλλων επιταχύνουν το φαινόμενο της διάβρωσης. Στην αρχή ο ενσωματωμένος στο σκυρόδεμα χάλυβας προστατεύεται από τη διάβρωση επειδή βρίσκεται σε παθητική κατάσταση χάρη στο αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος (όσο το pH είναι μεγαλύτερο από 9,5) και την επικάλυψη στεγανότητας του σκυροδέματος. Με την πάροδο του χρόνου μπορεί να ξεκινήσει η διάβρωση του οπλισμού στο σκυρόδεμα, που οφείλεται είτε στην ενανθράκωση είτε στην είσοδο χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Αλλά και σε ειδικές περιπτώσεις, για τις οποίες απαιτείται μεγαλύτερη προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση μέσα στο σκυρόδεμα, είτε επειδή υπάρχει έντονα διαβρωτικό περιβάλλον, είτε διότι απαιτείται μεγαλύτερη από τη συνήθη διάρκεια ζωής του έργου, μπορεί να λαμβάνονται κατά περίπτωση πρόσθετα μέτρα όπως:

- Αύξηση της περιεκτικότητας του σκυροδέματος σε τσιμέντο ή χρήση ειδικών τσιμέντων.
- Χρήση σκυροδέματος μειωμένου πορώδους ή υδατοπερατότητας.
- Αύξηση του πάχους της επικάλυψης των οπλισμών με σκυρόδεμα.
- Χρήση χαλύβων ανθεκτικότερων στη διάβρωση όπως οι επιψευδαργυρωμένοι (γαλβανισμένοι), οι καλυμμένοι με εποξικό επίστρωμα, οι καλυμμένοι με επίστρωμα ανοξειδωτού χαρακτήρα και οι ανοξειδωτοι χάλυβες.
- Χρήση επιχρισμάτων καταλλήλου πάχους.
- Επίστρωση / επίχρωση της επιφάνειας του σκυροδέματος με λεπτό προστατευτικό στρώμα από κατάλληλες οργανικές ή ανόργανες ουσίες.
- Χρήση αναστολέων διάβρωσης.
- Καθοδική προστασία.

Τα μέτρα αυτά έχουν διαφορετικό κόστος και εξασφαλίζουν διαφορετική διάρκεια προστασίας από τη διάβρωση και το καθένα τους μπορεί να εφαρμοσθεί κατά περίπτωση. Πριν την εφαρμογή τους θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τυχόν δυσμενείς συνέπειες και να σταθμίζεται η συνολική επίδρασή τους στον χάλυβα αλλά και στο σκυρόδεμα.

Η ποιότητα του σκυροδέματος, η οποία ασκεί σημαντικό ρόλο στην αντίσταση κατά της διάβρωσης εξαρτάται, εκτός από τη διαδικασία παρασκευής του, από την ποιότητα και τη σωστή κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών, την ποιότητα και το είδος του τσιμέντου και την ποσότητα του νερού στην παρασκευή του σκυροδέματος.

Ο περιορισμός των κενών του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά σημαντικός, διότι τα χλωριόντα εισέρχονται στη μάζα του σκυροδέματος διαμέσου των κενών. Τα αδρανή θα πρέπει να μην έχουν κενά στη μάζα τους, δηλαδή να μην είναι πορώδη, και να είναι κατάλληλης κοκκομετρικής διαβάθμισης. Για αντίσταση στη διάβρωση δεν συνιστάται ο τύπος τσιμέντου ανθεκτικού σε θειικά,

αλλά τσιμέντο τύπου CEM II ή IV κατά ΕΛΟΤ EN 197. Η αναλογία νερού προς τσιμέντο δεν πρέπει να ξεπερνά το 0,50 και στις κατασκευές η επαρκής επικάλυψη του οπλισμού με σκυρόδεμα να είναι τουλάχιστον 6 εκατοστά.

Η σημασία της έγκαιρης και σωστά εφαρμοσμένης μεθόδου προστασίας από τη διάβρωση συνοψίζεται στον Νόμο των Πέντε του de Sitter (De Sitter's Law of Fives), όπου αναφέρει ότι κάθε 1 € που δαπανάται κατά την αρχική φάση σχεδιασμού, κατασκευής και 84 ωρίμανσης, ισοδυναμεί με 5 € που δαπανώνται για παρεμπόδιση των μηχανισμών έναρξης της διάβρωσης, με 25 € που δαπανώνται για παρεμπόδιση των μηχανισμών διάδοσης της διάβρωσης και με 125 € που δαπανώνται προς αποκατάσταση των εκτεταμένων φθορών της κατασκευής. Τα συνηθέστερα μέτρα προστασίας που χρησιμοποιούνται για την αποτελεσματική προστασία του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος είναι η καθοδική προστασία, η προσθήκη στο σκυρόδεμα αναστολέων διάβρωσης, η χρήση ανοξειδωτων χαλύβων και η χρήση επικαλύψεων - στεγανωτικών [2] .

3.1.1 Χρήση Ορυκτών Πρόσθετων

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

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

Τα ποζολανικά υλικά είναι γνωστά από αρχαιοτάτων χρόνων και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την προέλευση τους: [16]

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

3.1.1.1 Ιπτάμενη Τέφρα

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

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

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

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

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

3.1.1.2 Σκωρία υψικαμίνων

Η σκωρία υψικαμίνων (slag, Schlacke) είναι υλικό μη μεταλλικό, το οποίο αποτελείται από πυριτικά και αργυλοπυριτικά άλατα του ασβεστίου. Οι σκωρίες έχουν από μόνες της υδραυλικές ιδιότητες. Όταν της ενυδατώνονται μόνες της, χωρίς την παρουσία του τσιμέντου πόρτλαντ, το ποσό του υδραυλικού υλικού που σχηματίζεται είναι μικρό και ο ρυθμός σχηματισμού του ανεπαρκής. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται πάντα σε μίγματα με τσιμέντο πόρτλαντ. Η σκωρία είναι ένα παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας του χάλυβα. Η σκωρία δεν είναι μεταλλικό προϊόν και αποτελείται κατά βάση από πυριτικά και αργυλοπυριτικά άλατα του ασβεστίου. Λόγω των υδραυλικών ιδιοτήτων της σκωρίας, σωματίδια κοκκομετρίας μικρότερης από τα $10\mu\text{m}$ συνεισφέρουν της πρώιμες αντοχές, ενώ σωματίδια μεγαλύτερα από $10\mu\text{m}$ και μικρότερα από $45\mu\text{m}$ συνεισφέρουν της τελικές αντοχές. Σωματίδια κοκκομετρίας μεγαλύτερης των $45\mu\text{m}$ είναι δύσκολο να ενυδατωθούν. Η σκωρία είναι υλικό κοκκομετρίας μικρότερης των $45\mu\text{m}$. Παρασύρεται από το ρεύμα των καυσαερίων και συλλέγεται σε ειδικές εγκαταστάσεις αποκονίωσης (με μηχανικά ή ηλεκτροστατικά φίλτρα). Η σκωρία όταν χρησιμοποιείται ως πρόσθετο στο τσιμέντο πόρτλαντ προσδίδει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

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

Τα τσιμέντα σκωρίας έχουν της καλή εργασιμότητα και χαμηλή απαίτηση σε νερό. Στην ενυδάτωση της σκωρίας σημαντικό ρόλο παίζει η επίδραση της θερμοκρασίας. Η ενυδάτωση επιτυγχάνεται της υψηλές θερμοκρασίες και επιβραδύνεται της χαμηλότερες, σε σχέση με την ενυδάτωση του τσιμέντου πόρτλαντ.

3.1.1.3 Διογκωτικά ή μειωτικά της συρρίκνωσης του σκυροδέματος

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

3.1.1.4 Ρυθμιστές ιξώδους

Οι ρυθμιστές ιξώδους (viscosity modifying admixtures) είναι ουσίες που μπορούν να μεταβάλλουν το ιξώδες του υγρού σκυροδέματος. Οι ουσίες αυτές είναι υδατικά διαλύματα συμπολυμερών με υψηλό μοριακό βάρος. Ρυθμίζουν το ιξώδες του σκυροδέματος ώστε να επιτυγχάνονται καταρχήν αντικρουόμενες ιδιότητες όπως υψηλή ρευστότητα, μεγάλη ταχύτητα ροής και αντίσταση στον διαχωρισμό. Οι ιδιότητες αυτές είναι απαραίτητες για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα έχει την ιδιότητα να καταλαμβάνει τον χώρο που του διατίθεται στα καλούπια χωρίς να απαιτηθεί δόνηση. Αυτό επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο σχεδιασμό του μίγματος τσιμέντου- αδρανών με χρήση κατάλληλων λεπτοκόκκων υλικών, υπερπλαστικοποιητών και ρυθμιστών ιξώδους. Η χρήση των προσθέτων σκυροδέματος απαιτεί προσοχή τόσο όσον αφορά την χρησιμοποιούμενη ποσότητα και όσον αφορά την ανάμιξή τους. Επομένως όταν τα πρόσθετα σκυροδέματος παρέχονται σε δοχεία πρέπει να σημαίνονται με ευκρίνεια με τις σχετικές πληροφορίες. Όταν το υλικό παρέχεται χύμα, οι ίδιες πληροφορίες πρέπει να δίδονται γραπτά κατά το χρόνο της παράδοσης.

3.1.2 Καθοδική Προστασία

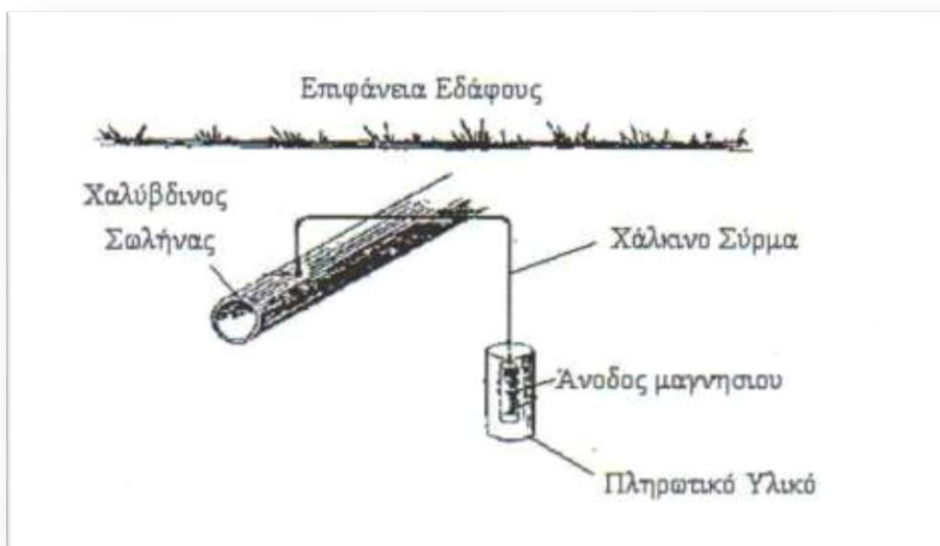
Η καθοδική προστασία χρησιμοποιείται, ευρέως, ως μέθοδος προστασίας των οπλισμών από τη διάβρωση σε σημαντικές κατασκευές, όπως γέφυρες, θαλάσσιες εξέδρες, υπόγειες σωληνώσεις από σκυρόδεμα, οι οποίες υφίστανται διάβρωση από την εγκατάσταση γεωηλεκτρικών στοιχείων κ.α. Σε περίπτωση που το περιβάλλον είναι έντονα διαβρωτικό ή υπάρχουν αμφιβολίες για την τελική ποιότητα του σκυροδέματος, συχνά, εγκαθίστανται οι αναγκαίες διευκολύνσεις, κατά τη φάση της κατασκευής, για ενδεχόμενη, εκ των υστέρων, εφαρμογή της καθοδικής προστασίας .

Η εφαρμογή της καθοδικής προστασίας επιτυγχάνεται με τη διαβίβαση μιας καθορισμένης ποσότητας ρεύματος. Οι καθοδικές περιοχές πολώνονται στο δυναμικό ισορροπίας των ανοδικών περιοχών. Επομένως, δεν υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ των ανοδικών και καθοδικών περιοχών και παύει, πλέον, το μέταλλο να υφίσταται διάβρωση. Η μέθοδος εφαρμόζεται με δύο τρόπους: [12]

- χρήση θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων
- με επιβαλλόμενα εξωτερικά ρεύματα

3.1.2.1 Καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους

Στην περίπτωση αυτή, οι θυσιαζόμενες άνοδοι, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από μέταλλο ηλεκτραρνητικότερο από το δεύτερο, συνδέονται με το προς προστασία μέταλλο, με αποτέλεσμα τη ροή ηλεκτρονίων από το θυσιαζόμενο μέταλλο, προς το προστατευόμενο. Τα ηλεκτρόνια ρέουν από το θυσιαζόμενο μέταλλο προς το προστατευόμενο μετατρέποντας το τελευταίο σε αρνητικό πόλο ενός ηλεκτραρνητικού κελιού, οπότε πραγματοποιείται αναγωγή και όχι οξείδωση. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται η περίπτωση εφαρμογής καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενη άνοδο, σε σωλήνα που βρίσκεται στο υπέδαφος.



Σχήμα 3.1 : Προστασία από τη διάβρωση ενός υπόγειου σωλήνα από χάλυβα με θυσιαζόμενη άνοδο

Οι θυσιαζόμενες άνοδοι που χρησιμοποιούνται, στην πράξη, για την προστασία του χάλυβα είναι ο ψευδάργυρος και τα κράματα του μαγνησίου, τα οποία προτιμούνται περισσότερο, κάτι, άλλωστε, που προκύπτει και από τη σύγκριση των πρότυπων δυναμικών. ^[34]

Παρακάτω παρουσιάζονται, συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενες ανόδους.

Πίνακας 3.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενες ανόδους

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Δεν απαιτείται πρόσθετη πηγή ρεύματος από κάποια εξωτερική πηγή	Εφαρμογή σε περιπτώσεις που απαιτούνται μικρά ρεύματα
Χαμηλό κόστος εγκατάστασης, εάν τοποθετηθούν ταυτόχρονα με τη δημιουργία της κατασκευής	Ενδεχόμενη απαίτηση αρκετών ανόδων σε περιπτώσεις κατασκευών που έχουν υποστεί διάβρωση
Μικρή πιθανότητα εμφάνισης προβλημάτων υπερπροστασίας	Αναποτελεσματικές σε περιβάλλον μεγάλης ειδικής αντίστασης
Προσθήκη επιπλέον ανόδων, σχετικά εύκολα	
Ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού, κατά μήκος της επιφάνειας	

3.1.2.2 Καθοδική προστασία με επιβαλλόμενα εξωτερικά ρεύματα

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου με εξωτερική τάση, ο αρνητικός πόλος πηγής συνεχούς ρεύματος συνδέεται, με τη βοήθεια μονωμένων, εξωτερικά, παράλληλων αγωγών, με το προς προστασία μέταλλο. Έτσι, και σε αυτήν την περίπτωση, τα ηλεκτρόνια που έρχονται στον οπλισμό από τον αρνητικό πόλο της πηγής, τον μετατρέπουν σε αρνητικό πόλο ηλεκτρολυτικού κελιού, ενώ ήταν αρνητικός πόλος γαλβανικού στοιχείου. Τα ηλεκτρόνια επιστρέφουν στο θετικό πόλο της πηγής από τις βοηθητικές ανόδους. [36]

Οι άνοδοι είναι, είτε καταναλισκόμενες (π.χ. σίδηρα ανακύκλωσης) που, όμως, για να εξασφαλίζουν το πέρασμα επαρκών ρευμάτων, είναι ογκώδεις, μολύνουν το περιβάλλον και απαιτούν συχνή αντικατάσταση, είτε μη καταναλισκόμενες (π.χ. Si-Fe γραφίτης, Pb-Sb-Ag, Pt-Ti, Pt-Ta), αλλά μεγαλύτερου κόστους. Οι άνοδοι, συνήθως, περιβάλλονται από πληρωτικά υλικά, όπως καρβουνόσκονη, γύψος ή μπεντονίτης ή μίγμα αργίλου, γύψου και θειικού νατρίου, για βελτίωση της ηλεκτρικής επαφής μεταξύ ανόδου και περιβάλλοντος εδάφους. Η τιμή του δυναμικού της πηγής του συνεχούς ρεύματος επηρεάζεται, κυρίως, από την αγωγιμότητα του περιβάλλοντος, ενώ το μήκος της προστατευόμενης ανά άνοδο κατασκευής (π.χ. σωλήνα), από την αντίσταση της μεταλλικής κατασκευής.

Στην παρακάτω εικόνα δίνεται παράδειγμα εφαρμογής καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενα εξωτερικά ρεύματα σε γέφυρα.



Εικόνα 3.3 : Εφαρμογή της καθοδικής προστασίας με εξωτερικά εφαρμοζόμενο ρεύμα σε γέφυρα.

Η μέθοδος της καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενα εξωτερικά ρεύματα εφαρμόζεται πολύ περισσότερο, σε σχέση με τη μέθοδο θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις: ^[10]

- προστασίας σωλήνων μέσα στο έδαφος σε γλυκό ή θαλασσινό νερό
- πλωτών και μη κατασκευών μέσα στη θάλασσα
- πλοίων

Παρακάτω παρουσιάζονται, συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενα εξωτερικά ρεύματα.

Πίνακας 3.4: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθοδικής προστασίας με επιβαλλόμενα εξωτερικά ρεύματα.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<i>Δυνατότητα παροχής από την πηγή υψηλών τιμών δυναμικού</i>	<i>Υψηλό κόστος</i>
<i>Προστασία μεγάλων και ακάλυπτων κατασκευών</i>	<i>Δυσκολία ομοιόμορφης κατανομής του δυναμικού σε πολύπλοκες κατασκευές</i>
<i>Καλύτερη ρύθμιση των συνθηκών</i>	<i>Κίνδυνος υπερπροστασίας</i>
<i>Απαιτεί λιγότερες ανόδους</i>	
<i>Ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού κατά μήκος της επιφάνειας</i>	

3.1.2.3 Προστασία σκυροδέματος από την διάβρωση σε θαλάσσιο περιβάλλον με την μέθοδο της καθοδικής προστασίας

Η αποφυγή φαινομένων διάβρωσης του σκυροδέματος που βρίσκεται εκτεθειμένο σε θαλάσσιο περιβάλλον είναι ιδιαίτερα σημαντική και, ταυτόχρονα, πολύπλοκη. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις του άλατος και της υγρασίας μπορούν να οδηγήσουν στην επιταχυνόμενη διάβρωση του και τη σημαντική επιδείνωση στη συγκεκριμένη κατασκευή. Πιο συγκεκριμένα, οι κατασκευές, που τμήματά τους έρχονται σε επαφή με το θαλασσινό νερό, είναι περισσότερο ευάλωτες σε ό,τι αφορά στη διάβρωση του οπλισμού και χαρακτηρίζονται από υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων, συχνή εμφάνιση κύκλων ξήρανσης και ύγρυνσης, μεγάλη διαθεσιμότητα οξυγόνου και υψηλά επίπεδα υγρασίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, διακρίνονται τρεις περιοχές:

- η καταδυόμενη ζώνη (πάντα κάτω από το νερό της θάλασσας)
- ο παφλασμός και η παλιρροιακή ζώνη (περιοδική ύγρυνση και ξήρανση)
- η ατμοσφαιρική ζώνη (σπάνια βρέχεται)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα τμήματα των διάφορων περιοχών διάβρωσης του σκυροδέματος σε θαλάσσιο περιβάλλον.



Σχήμα 3.5: Τμήματα διαφόρων περιοχών διάβρωσης σκυροδέματος σε θαλάσσιο περιβάλλον.

Για την προστασία του εκτεθειμένου σκυροδέματος στο θαλάσσιο περιβάλλον, χρησιμοποιείται η καθοδική προστασία με τη χρήση θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων ή με επιβαλλόμενα εξωτερικά ρεύματα. Σε θαλάσσιο περιβάλλον, ο ρυθμός διάβρωσης διαφοροποιείται, σημαντικά, μεταξύ των περιοχών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5. Οι μεταβολές στην πυκνότητα χάλυβα μπορούν, επίσης,

να επιφέρουν ανομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού, κατά μήκος της επιφάνειας προστασίας. Έρευνες αποδεικνύουν ότι επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα η καθοδική προστασία με επιβαλλόμενα εξωτερικά ρεύματα. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι η χρήση ανόδου από πλέγμα Τιτανίου προσφέρει καθοδική προστασία παραπάνω από 75 έτη.

Σε θαλάσσιες κατασκευές εφαρμόζονται ρεύματα πυκνότητας 18-42 mA/m². Γρήγορα, όμως, οι τιμές των ρευμάτων μειώνονται, πιθανόν εξαιτίας των διαφόρων μικροοργανισμών, οι οποίοι καταναλώνουν το οξυγόνο. Η τιμή της πυκνότητας ρεύματος και το δυναμικό του οπλισμού σε συστήματα καθοδικής προστασίας επηρεάζονται, έντονα, από τη μεταβολή περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία. [41]

3.1.3 Αναστολείς διάβρωσης

Ο αναστολέας διάβρωσης καθορίζεται ως μια ουσία που όταν προστίθεται σε μικρή συγκέντρωση σε ένα περιβάλλον μειώνει αποτελεσματικά το ρυθμό διάβρωσης ενός μετάλλου που εκτίθεται σε αυτό. Η χρήση των χημικών αναστολέων για τη μείωση του ρυθμού διάβρωσης ποικίλει. Στις βιομηχανίες εξαγωγής και επεξεργασίας πετρελαίου π.χ. οι αναστολείς θεωρούνται βασικό στοιχείο υπεράσπισης ενάντια στη διάβρωση. Ένας μεγάλος αριθμός επιστημονικών μελετών έχει αφιερωθεί στο θέμα των ανασταλτικών παραγόντων διάβρωσης αλλά το μεγαλύτερο μέρος των πληροφοριών προέρχεται από πειράματα 'δοκιμής και σφάλματος' σε εργαστήρια και σε πραγματικές συνθήκες. [29]

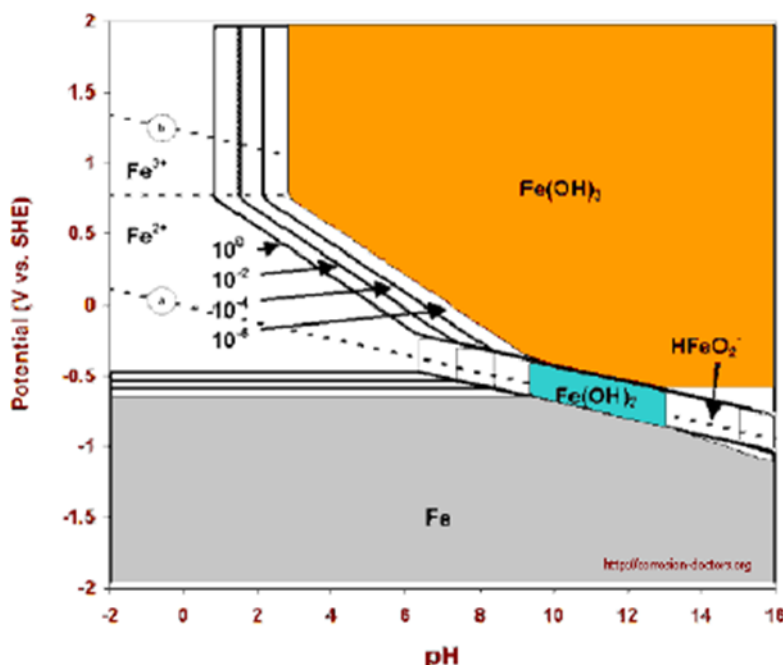
Οι αναστολείς καθυστερούν τη διαδικασία της διάβρωσης με τους παρακάτω τρόπους:

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

Τα μόρια των αναστολέων είναι συνήθως σε συνεχή κίνηση, καθώς προσροφώνται και εκροφώνται μεταξύ του ρευστού και του προστατευτικού στρώματος. Η ρόφηση και η εκρόφηση εξαρτώνται από τη φύση των μορίων καθώς και από τη συγκέντρωσή τους στο διάλυμα. Είναι σημαντικό κατά την προστασία με χρήση αναστολέων, η συγκέντρωσή τους να διατηρείται σε επαρκή επίπεδα στο ρευστό. [30]

Στα διαλύματα οξέος, η ανοδική διάβρωση είναι η μετάβαση των ιόντων μετάλλων από την επιφάνεια των μετάλλων που δεν έχει οξειδία προς κύρια καθοδική διάβρωση είναι η απόθεση ιόντων υδρογόνου ώστε να παραχθεί αέριο υδρογόνο. Ο αναστολέας μπορεί να μειώσει το ποσοστό της ανοδικής διάβρωσης, της καθοδικής ή και των δύο. Η αλλαγή του δυναμικού διάβρωσης κατά την προσθήκη του αναστολέα είναι συχνά μια χρήσιμη ένδειξη για το ποιου είδους διάβρωσης καθυστερείτε. Η μετατόπιση του δυναμικού διάβρωσης προς την θετική κατεύθυνση δείχνει κυρίως την καθυστέρηση της ανοδικής διάβρωσης (ανοδικός έλεγχος), ενώ η μετατόπιση προς την αρνητική κατεύθυνση δείχνει κυρίως την καθυστέρηση της καθοδικής (καθοδικός έλεγχος). Μικρή αλλαγή στο δυναμικό διάβρωσης αποδεικνύει ότι και οι ανοδικές και καθοδικές διαδικασίες καθυστερούνται. Η συνδυασμένη δράση της αύξησης και της απόθεσης φιλμ από το διάλυμα οδηγεί στην ακαθαρσία που πρέπει να αφαιρεθεί για να αποκατασταθεί η αποδοτικότητα π.χ. των εναλλακτών θερμότητας, των αναβραστήρων ή των γεννητριών ατμού. Το διάγραμμα Pourbaix

δείχνει ότι το φιλμ από Fe_3O_4 και Fe_2O_3 των σιδερένιων βραστήρων μπορεί να διαλυθεί είτε στις όξινες είτε στις αλκαλικές περιοχές διάβρωσης. Το διάγραμμα E-pH δείχνει ακόμη ότι η διάλυση της ακαθαρσίας από οξείδια είναι επίσης δυνατή στα αλκαλικά διαλύματα, αλλά οι ανοδικές και καθοδικές αντιδράσεις σε υψηλά pH είναι πολύ πιο αργές από κινητικής απόψεως και επομένως αυτές οι αντιδράσεις είναι λιγότερο χρήσιμες.



Σχήμα 3.6. Διάγραμμα Pourbaix

Στην πράξη, το υδροχλωρικό οξύ με χρήση αναστολέα έχει αποδειχθεί επανειλημμένα η αποδοτικότερη μέθοδος για να αφαιρεθεί η ακαθαρσία.

Τέσσερις εξισώσεις απαιτούνται για την εξήγηση της αφαίρεσης της ακαθαρσίας.

Τρεις από αυτές αντιπροσωπεύουν τις καθοδικές διαβρώσεις:

- $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4 \text{Cl}^- + 6 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{FeCl}_2(\text{aq}) + 3 \text{H}_2\text{O} \dots (\text{A})$
- $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 6 \text{Cl}^- + 8 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow 3 \text{FeCl}_2(\text{aq}) + 4 \text{H}_2\text{O} \dots (\text{A}')$
- $2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \dots (\text{A}'')$

και μια την ανοδική, δηλ. η διάλυση του υλικού

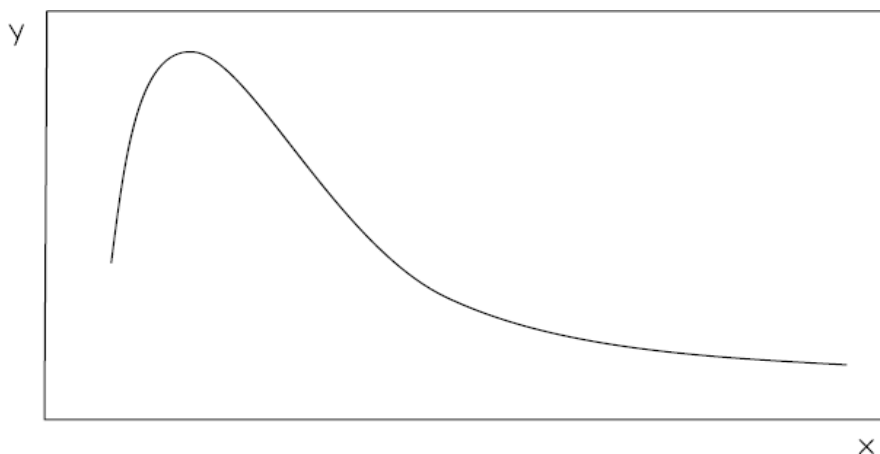
- $\text{Fe} + 2 \text{Cl}^- \rightarrow \text{FeCl}_2(\text{aq}) + 2 \text{e}^- \dots (\text{C})$

Αυτές οι εξισώσεις δείχνουν ότι ο σίδηρος (βάση) λειτουργεί ως μειωτής για να επιταχύνει τη διάλυση των οξειδίων του σιδήρου. Δεδομένου ότι είναι δύσκολο να καθοριστεί το τελικό σημείο της διάλυσης της ακαθαρσίας, ο αναστολέας προστίθεται για μεγαλύτερη ασφάλεια. Μετά τη διάλυση της ακαθαρσίας μπορεί να προστεθεί και ανοδικός και καθοδικός αναστολέας για την επιβράδυνση της διάβρωσης του γυμνού μετάλλου.

3.1.3.1 Ανοδικοί αναστολείς (anodic inhibitors)

Οι ανοδικοί αναστολείς δημιουργούν ένα λεπτό προστατευτικό στρώμα στα ανοδικά σημεία (anodic sites) του μετάλλου, αυξάνοντας το ανοδικό δυναμικό και επιβραδύνοντας την αντίδραση διάβρωσης. Σταδιακά το στρώμα αυτό μπορεί να καλύψει ολόκληρη την επιφάνεια του μετάλλου. Το στρώμα αυτό δεν είναι ορατό με γυμνό οφθαλμό, και γι' αυτό το λόγο δε θα φαίνεται διαφορά στο μέταλλο. Ειδικότερα, αν η συγκέντρωση του αναστολέα είναι σχετικά χαμηλή, στην αρχή της τροφοδοσίας του αναστολέα η διάβρωση αυξάνεται εκθετικά, και αφού φτάσει σ' ένα μέγιστο σημείο, αρχίζει να ελαττώνεται προσεγγίζοντας την ελάχιστη τιμή ισορροπίας η οποία σχετίζεται με τον τύπο του αναστολέα και με τις ιδιότητες του συστήματος. Το μέγιστο της διάβρωσης που αναφέρθηκε μερικές φορές υπερβαίνει κατά πολύ το αντίστοιχο ενός μετάλλου το οποίο δεν προστατεύεται από αναστολέα. Το φαινόμενο οφείλεται στο ότι αν η συγκέντρωση του αναστολέα είναι μικρή, ο αναστολέας καλύπτει τα 'αδύναμα' (weak) ανοδικά σημεία του μετάλλου στα οποία πραγματοποιείται η διάβρωση, χωρίς να έχει τη δυνατότητα να καλύψει τα πιο 'ισχυρά' (strong) ανοδικά σημεία του μετάλλου.

Καθώς το καθοδικό δυναμικό παραμένει σταθερό και η πλειοψηφία των ισχυρά ανοδικών σημείων παραμένουν ενεργά, η κάλυψη των αδύναμων ανοδικών σημείων επιταχύνει τη διάβρωση των ισχυρά καθοδικών σημείων. Αν όμως επέλθει αύξηση της συγκέντρωσης του αναστολέα, τότε αυτός μπορεί να αντιδράσει με τα ισχυρά ανοδικά σημεία του μετάλλου, παρεμποδίζοντας και σε αυτά τη διάβρωση. Η τελική τιμή της διάβρωσης αγγίζει πολλές φορές το ένα δέκατο της διάβρωσης ενός μετάλλου που προστατεύεται από καθοδικό αναστολέα. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο σχήμα 3.7. [31]



Σχήμα 3.7. Διάβρωση από Ανοδικό Αναστολέα
Όπου X : η συγκέντρωση του αναστολέα και Y : ρυθμός διάβρωσης

Αν το μέταλλο δεν έχει προηγουμένως καθαριστεί καλά, οι κυψελίδες αέρα που περιέχει είναι δυνατόν να δημιουργήσουν μεγάλα προβλήματα. Ο αναστολέας δεν έχει τη δυνατότητα να προστατέψει τα πορώδη σημεία του μετάλλου στα οποία εμφανίζονται οι κυψελίδες. Έτσι αυτές συνδυάζονται με τα καθοδικά σημεία του μετάλλου συγκεντρώνοντας το δυναμικό διάβρωσης.

Η ενεργότητά τους επιταχύνεται και ελέγχεται μόνο από τη διάχυση των προϊόντων διάβρωσης μέσα από την πορώδη επιφάνεια. Με αυτή τη διαδικασία αυξάνεται η τοπική διάβρωση σε σημεία του

μετάλλου που συγκεντρώνουν υψηλές τιμές δυναμικού διάβρωσης.

Για να περιορίσουμε λοιπόν όσο το δυνατόν αυτά τα φαινόμενα είναι σημαντικό να ακολουθήσουμε μια διαδικασία:

- Η αρχική συγκέντρωση του αναστολέα πρέπει να είναι πολύ υψηλή ώστε να δημιουργηθεί γρήγορα το προστατευτικό στρώμα σε όλη την επιφάνεια του μετάλλου
- Η συνεχής μέτρηση της συγκέντρωσης του αναστολέα είναι απαραίτητη και επιτρέπει την αντιμετώπιση τυχόν ελάττωσής της που μπορεί να οφείλεται π.χ. σε κάποια διαρροή.
- Για να αποτραπεί η διάβρωση στους πόρους του μετάλλου που δημιουργείται από τη συγκέντρωση του δυναμικού των καθοδικών σημείων του μετάλλου είναι σημαντικό να έχει καθαριστεί καλά το μέταλλο και σε περίπτωση που δεν έχει πραγματοποιηθεί ικανοποιητικά το στάδιο του καθαρισμού, η χρήση των ανοδικών αναστολέων πρέπει να συνοδεύεται από καθοδικούς αναστολείς. Μερικές Ενώσεις που χρησιμοποιούνται ως ανοδικοί αναστολείς
- Ενώσεις του χρωμίου, του μολυβδενίου και του αζώτου:
Καταλύουν την αντίδραση μεταξύ του μετάλλου και του οξυγόνου και δημιουργούν ένα στρώμα παθητικοποίησης. Είναι οι μόνοι ανοδικοί αναστολείς που δρουν χωρίς την παρουσία οξυγόνου.
- Ορθοφωσφορικές ενώσεις: Καταλύουν επίσης την αντίδραση μεταξύ του μετάλλου και του οξυγόνου και δημιουργούν ένα στρώμα παθητικοποίησης. Απαιτούν την παρουσία οξυγόνου για να δράσουν.
- Πολυφωσφορικές ενώσεις: Ενώ λειτουργούν κυρίως ως καθοδικοί αναστολείς, μπορούν να λειτουργήσουν και ως ανοδικοί.^[30]

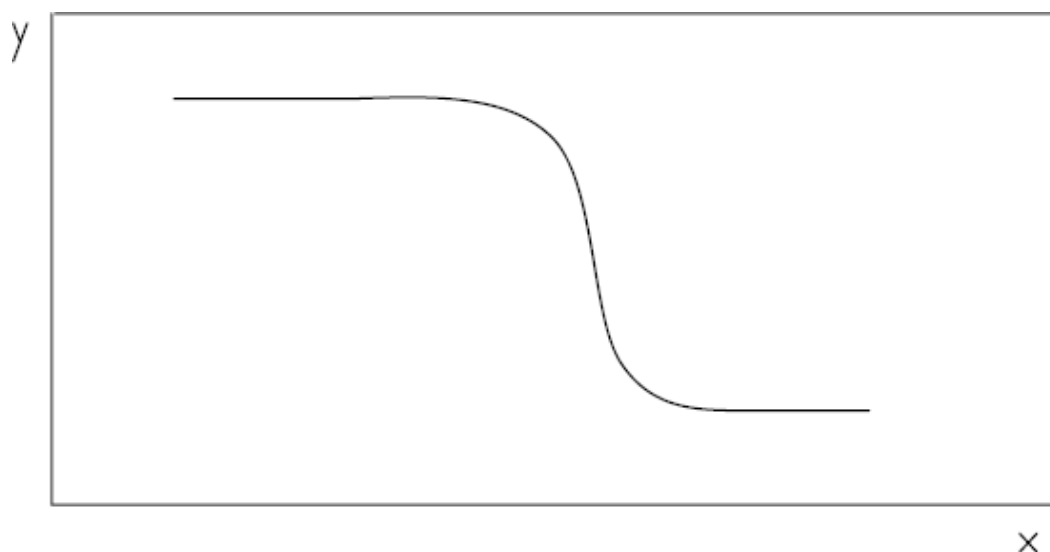
3.1.3.2 Καθοδικοί αναστολείς (cathodic inhibitors)

Οι καθοδικοί αναστολείς είναι γενικά λιγότερο αποτελεσματικοί από τους ανοδικούς. Σε αντίθεση με τους τελευταίους, οι καθοδικοί αναστολείς δημιουργούν ένα ορατό στρώμα στα καθοδικά σημεία του μετάλλου το οποίο πολώνει το μέταλλο, περιορίζοντας την πρόσβαση του διαλυμένου οξυγόνου στην επιφάνεια του μετάλλου.



Σχήμα 3.8. Καθοδικός αναστολέας

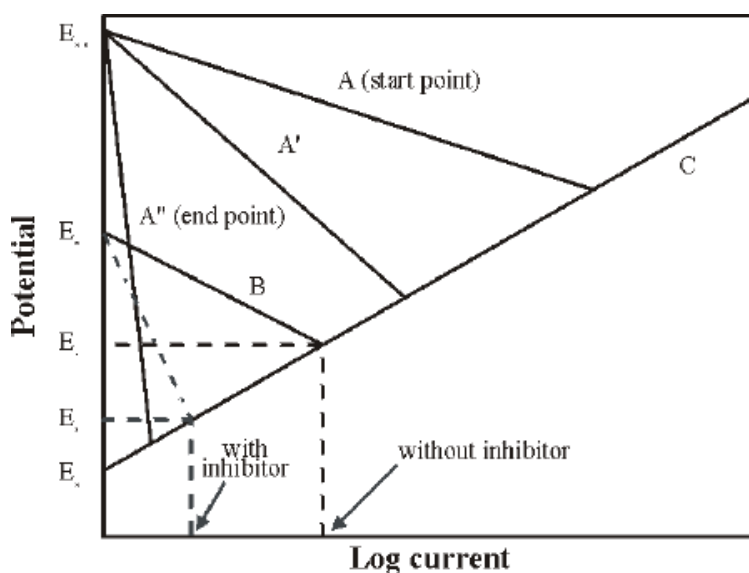
Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.9, με μηδενική συγκέντρωση του αναστολέα, η διάβρωση ταυτίζεται με αυτήν ενός απροστάτευτου μετάλλου. Με την τροφοδοσία του αναστολέα, όταν η συγκέντρωσή του είναι ακόμα χαμηλή, δεν φαίνεται να υπάρχει μεταβολή στο ρυθμό διάβρωσης. Καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση του αναστολέα, τα καθοδικά σημεία απενεργοποιούνται και μετά από μια συγκεκριμένη τιμή της συγκέντρωσης, το διαθέσιμο καθοδικό δυναμικό δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες των ανοδικών σημείων. Έτσι, η συνολική διάβρωση ελαττώνεται στο ελάχιστο, το οποίο εξαρτάται κάθε φορά από τον αναστολέα που χρησιμοποιούμε και από τις ιδιότητες του συστήματος. Αν ελαττώσουμε τη συγκέντρωση του αναστολέα, ο συνολικός ρυθμός διάβρωσης μετά από έναν μικρό χρόνο προσαρμογής στον οποίο ενεργοποιούνται και πάλι τα καθοδικά σημεία, ακολουθεί αντίστροφη πορεία και αρχίζει και πάλι να ελαττώνεται. Η ενεργότητα των κυψελίδων αέρα ακολουθεί την ίδια πορεία με τα καθοδικά σημεία του μετάλλου. ^[21]



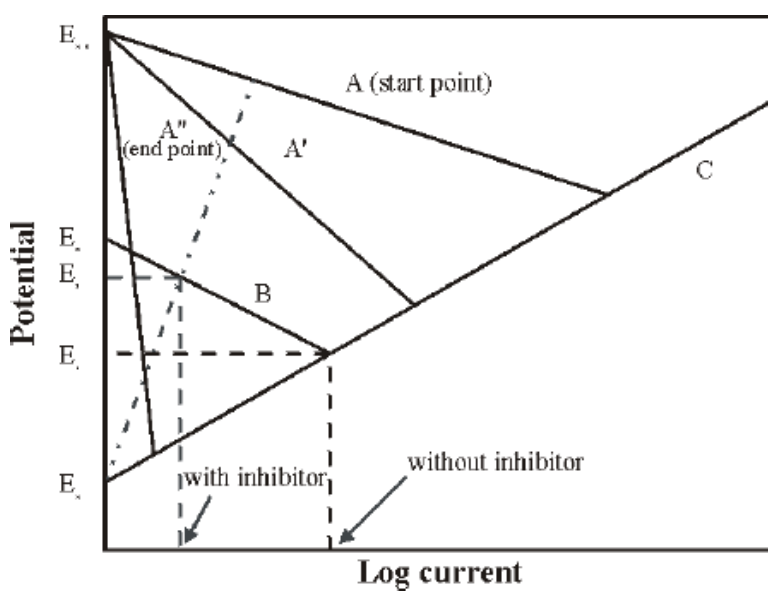
*Σχήμα 3.9. Διάβρωση από Καθοδικό Αναστολέα
Όπου X: η συγκέντρωση του αναστολέα και Y: Ο ρυθμός διάβρωσης*

Μερικές Ενώσεις που χρησιμοποιούνται ως καθοδικοί αναστολείς:

- Υδροξείδιο του ψευδαργύρου
- Φωσφορικός ψευδάργυρος
- Ανθρακικό ασβέστιο
- Φωσφορικό ασβέστιο.
- Ο ρυθμός διάλυσης του σιδήρου



Σχήμα 3.10. Παρουσιάζει την επίδραση ενός ανοδικού αναστολέα στο ρυθμό διάλυσης του σιδήρου και των οξειδίων του σιδήρου.



Σχήμα 3.11. Παρουσιάζει την επίδραση ενός καθοδικού αναστολέα στο ρυθμό διάλυσης του σιδήρου και των οξειδίων του σιδήρου.

Παρατηρείται ότι ενώ ο ανοδικός αναστολέας καθυστερεί την ανοδική διάλυση του σιδήρου στο τελικό σημείο, μειώνει ταυτόχρονα το ρυθμό διάλυσης οξειδίων που επιτρέπεται από το χημικό σύστημα. Από την άλλη, ο καθοδικός αναστολέας καθυστερεί και τη μείωση των πρωτονίων στο υδρογόνο και τη διάλυση του μετάλλου ενώ η μείωση της ακαθαρσίας των οξειδίων παραμένει απρόσβλητη.

3.1.3.3 Μικτοί αναστολείς

Οι μικτοί αναστολείς διάβρωσης θεωρείται ότι παρέχουν την καλύτερη προστασία από τη διάβρωση. Είναι συνήθως οργανικές ενώσεις με πολικές ομάδες (αμίνες, οργανικά οξέα). Δρουν και στα δυο τμήματα της ηλεκτροχημικής αντίδρασης μειώνοντας τόσο την ανοδική όσο και την καθοδική διεργασία, είτε προσροφημένοι στην μεταλλική επιφάνεια καλύπτοντάς τη με ένα προστατευτικό στρώμα είτε, στην περίπτωση της προστασίας του οπλισμού στο σκυρόδεμα, μεταβάλλοντας την επιφάνεια του σκυροδέματος σε υδρόφοβη εξασφαλίζοντας έτσι μείωση του εισερχόμενου οξυγόνου. Με βάση τον τρόπο που προσροφώνται στην προστατευόμενη επιφάνεια, ταξινομούνται σε:

Αναστολείς φυσικής ρόφησης: δρουν καλύπτοντας τα ενεργά κέντρα στην επιφάνεια του μετάλλου στα οποία οφείλεται η ύπαρξη γαλβανικών στοιχείων που είναι υπεύθυνα για τη διάβρωση. Ονομάζονται επίσης και πρωτογενείς, γιατί το στρώμα ρόφησης περιέχει μόνο τα μόρια του αναστολέα. Η επιφάνεια δεν μεταβάλλεται χημικά και υπάρχει μόνο ασθενής αλληλεπίδραση μεταξύ μετάλλου και αναστολέα με μεταξύ τους δυνάμεις τύπου Van der Waals.

Αναστολείς χημικής ρόφησης: δρουν με επιφανειακή χημική αντίδραση στην επιφάνεια του μετάλλου την οποία καλύπτουν με το προϊόν της αντίδρασης. Ονομάζονται επίσης και δευτερογενείς, γιατί το στρώμα ρόφησης περιέχει το προϊόν της αντίδρασης μεταξύ του μετάλλου και του αναστολέα.

3.1.3.4 Οργανικοί και ανόργανοι αναστολείς

Οργανικοί

Αυτές οι ουσίες χαρακτηρίζονται από υψηλά μοριακά βάρη και είναι συνήθως πολικές. Προστατεύουν το μέταλλο με τη δημιουργία ενός υδρόφοβου στρώματος στην επιφάνειά του. Είναι συνήθως πιο διαλυτοί σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες παρά σε αλιφατικούς και πιο διαλυτοί σε αλιφατικούς με μεγάλη αλυσίδα παρά μικρή.

- Φωσφορούχοι εστέρες
- Phosphonates

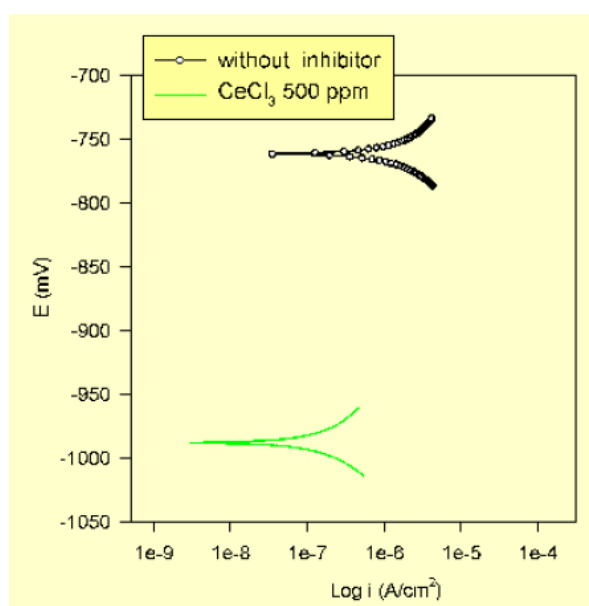
Ανόργανοι

Τα άλατα μερικών μετάλλων μπορούν να δράσουν ως αναστολείς. Συνήθως δημιουργούν στρώματα στην επιφάνεια του μετάλλου, αλλά μπορεί και να αντιδράσουν με το μέταλλο:

- Χρωμικά άλατα

- Άλατα ψευδαργύρου
- Σύμπλοκα μολυβδενίου
- Φωσφορικά άλατα
- Νιτρικά άλατα
- Σύμπλοκα θειικών αλάτων

Ένα παράδειγμα είναι τα άλατα λανθανίδων ως αναστολείς σε κράματα αλουμινίου. Πολλά κράματα λανθανίδων, κυρίως LnCl_3 , έχουν δοκιμαστεί επιτυχώς ως αναστολείς διάβρωσης για κράματα Al-Mg, και ανοξειδωτου ατσάλιου. Τα βέλτιστα αποτελέσματα προσφέρει η ένωση CeCl_3 , όταν το διαβρωτικό υλικό είναι διαλύματα NaCl. Να σημειωθεί ότι η χρήση τους δεν έχει σημαντική αρνητική επίδραση για το περιβάλλον.



Σχήμα 3.12. Καμπύλες Πόλωσης.

Οι καμπύλες πόλωσης του σχήματος 3.12 μας δείχνουν ότι οι χλωριούχες ενώσεις των λανθανίδων λειτουργούν ως καθοδικοί αναστολείς.

Λειτουργούν παρεμποδίζοντας τα καθοδικά σημεία των μεταλλικών κραμάτων. Η απενεργοποίηση των καθοδικών σημείων ελαττώνει το διαθέσιμο καθοδικό ρεύμα και κατά συνέπεια ελαττώνει το συνολικό ρυθμό διάβρωσης.^[16]

3.1.3.5 Ιζηματοποιού αναστολείς (Precipitation inducing inhibitors)

Οι ιζηματοποιού αναστολείς αποτελούν σύμπλοκες ενώσεις οι οποίες, γενικότερα, σχηματίζουν ένα στρώμα πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου, απενεργοποιώντας εμμέσως και τα ανοδικά και τα καθοδικά σημεία. Το προστατευτικό αυτό στρώμα σχηματίζεται από το ίζημα που παράγουν τα σύμπλοκα αυτά. Το σκληρό νερό, το οποίο είναι πλούσιο σε ασβέστιο και μαγνήσιο είναι λιγότερο διαβρωτικό από το γλυκό νερό εξαιτίας της τάσης των αλάτων να ιζηματοποιούνται στην επιφάνεια του μετάλλου και να σχηματίζουν το προστατευτικό στρώμα.

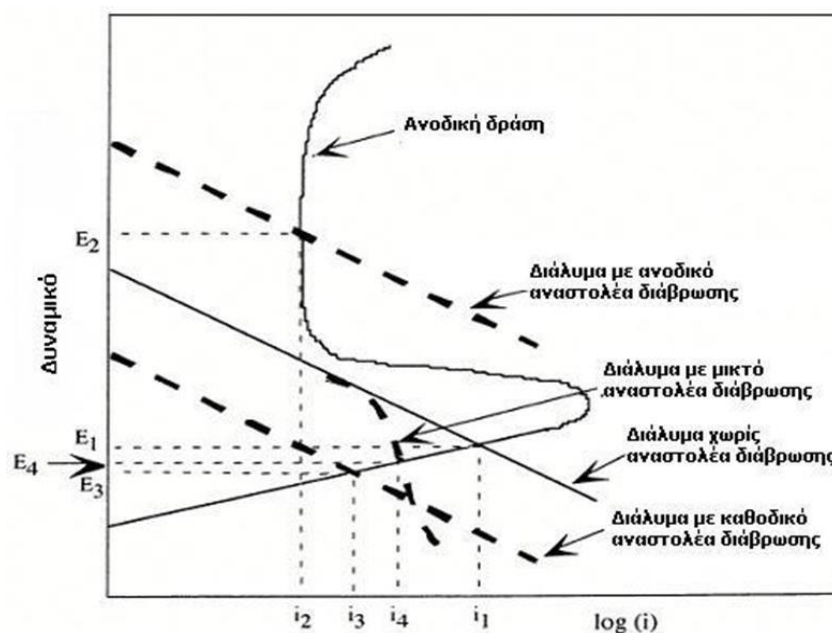
Τα κυριότερα είδη αναστολέων αυτής της κατηγορίας είναι τα θειικά και τα φωσφορικά άλατα. Το θειικό άλας νατρίου π.χ. χρησιμοποιείται στα φίλτρα πόσιμου νερού. Ωστόσο, ο βαθμός προστασίας του εξαρτάται από το pH και το ποσοστό κορεσμού του νερού που μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία. Τα φωσφορικά άλατα χρειάζονται επίσης οξυγόνο για αποδοτικότερη προστασία. Συμπεραίνοντας, τα θειικά και τα φωσφορικά άλατα δεν μπορούν να συγκριθούν με την αποδοτικότητα των χρωματικών και νιτρωδών αλάτων, παρ' όλα αυτά, χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου η πρόσθεση μη τοξικών ουσιών είναι απαραίτητη.

3.1.3.6 Πτητικοί αναστολείς (Volatile corrosion inhibitors)

Οι πτητικοί αναστολείς είναι σύμπλοκες ενώσεις, οι οποίες μετακινούνται προς το σημείο προς προστασία με εξαέρωση ή εξάτμιση. Στους βραστήρες, τα βασικά πτητικά σύμπλοκα όπως η μορφολίνη ή η υδραζίνη μεταφέρονται σε μορφή ατμών για την αποφυγή της διάβρωσης στους συμπυκνωτήρες κι έτσι εξουδετερώνουν το όξινο διοξείδιο του άνθρακα. Σε κλειστούς χώρους ατμών χρησιμοποιούνται πτητικά άλατα όπως η δικυκλοεξαμίνη, η κυκλοεξαμίνη και η εξαμεθυλεναμίνη. Σε επαφή με την επιφάνεια του μετάλλου, οι ατμοί των αλάτων συμπυκνώνονται και υδρολύονται από την υγρασία με ταυτόχρονη απελευθέρωση προστατευτικών ιόντων. Δυστυχώς η προϋπόθεση για γρήγορη λειτουργία των συμπλόκων είναι η ψηλή πτητικότητα, ενώ για μακροχρόνια λειτουργία, η χαμηλή πτητικότητα.

3.1.3.7 Μηχανισμός προστασίας μέσω αναστολέων διάβρωσης

Από την πλευρά της ηλεκτροχημικής προσέγγισης του φαινομένου της διάβρωσης η επίδραση των αναστολέων διάβρωσης συνοψίζεται και δίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι καμπύλες πόλωσης οι οποίες δείχνουν την ανοδική και καθοδική δράση ως συνάρτηση της διαφοράς δυναμικού στη διεπιφάνεια χάλυβα (οπλισμού) / σκυροδέματος.



Σχήμα 3.13: Επίδραση του αναστολέα διάβρωσης στο δυναμικό και την πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης.

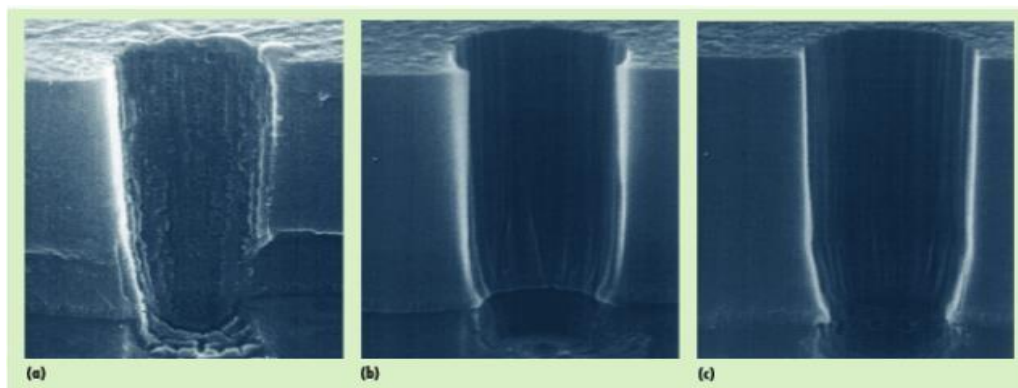
Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν την ανοδική δράση (διάλυση/οξειδωση του σιδήρου $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$) και την καθοδική δράση ($\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$) απουσία αναστολέα διάβρωσης, καθώς επίσης και το αντίστοιχο δυναμικό, E_1 , και πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης, i_1 . Η χρήση ενός ανοδικού αναστολέα διάβρωσης προκαλεί αύξηση του δυναμικού σε σημείο τέτοιο, E_2 , όπου η ανοδική και καθοδική καμπύλη πόλωσης διασταυρώνονται στην παθητική περιοχή (βλέπε καμπύλη με κωδική ονομασία «ανοδικός αναστολέας διάβρωσης»), ενώ η πυκνότητα ρεύματος μειώνεται σε i_2 . Η χρήση καθοδικού αναστολέα διάβρωσης δρα στην καθοδική αντίδραση μειώνοντας τον ρυθμό της καθώς και το δυναμικό, E_3 , και την πυκνότητα ρεύματος, i_3 , όπως παρουσιάζεται στη γραμμή με την ονομασία «καθοδικός αναστολέας διάβρωσης». Η δράση των αναστολέων διάβρωσης οι οποίοι μπλοκάρουν ή φράζουν τους πόρους του σκυροδέματος παρεμποδίζοντας έτσι την είσοδο του οξυγόνου και κατά συνέπεια τη μείωση του ρεύματος.

3.1.3.8 Αξιολόγηση των αναστολέων διάβρωσης

Η επιλογή αναστολέα αρχίζει με την διερεύνηση των φυσικών ιδιοτήτων.

- Πρέπει ο αναστολέας να είναι στερεό ή υγρό;
- Είναι σημαντικά τα σημεία τήξης και πήξης;
- Πρέπει να είναι συμβατό με άλλες πρόσθετες ουσίες του ίδιου συστήματος;
- Απαιτούνται οι τιμές ειδικής διαλυτότητας;

Η δυσκολία στην αξιολόγηση ανασταλτικών παραγόντων είναι ο σχεδιασμός των πειραμάτων που προσομοιώνουν τις συνθήκες του πραγματικού συστήματος. Οι μεταβλητές που πρέπει να εξεταστούν είναι η θερμοκρασία, η πίεση και η ταχύτητα καθώς επίσης και οι ιδιότητες των μετάλλων. Οι σωστότεροι έλεγχοι πρέπει να γίνονται στις χειρότερες πιθανές συνθήκες που μπορούν να εμφανιστούν στο σύστημα. Τα δείγματα που χρησιμοποιούνται για τα tests πρέπει να είναι ακριβώς ίδια με αυτά που θα προστατευθούν αργότερα. Ακόμη και οι μικρότερες διαφορές στις ιδιότητες του μετάλλου, όπως το μέγεθος των κόκκων, ο προσανατολισμός, οι δυνάμεις εναπόθεσης και η κατάσταση της επιφάνειας μπορούν να επιφέρουν σημαντικές διαφορές στην απόδοση των αναστολέων. Η επιφάνεια του δείγματος πρέπει, στο μέτρο του δυνατού, να είναι συγκρίσιμη με αυτήν του πραγματικού συστήματος. Συνήθως απαιτείται ελάχιστος καθαρισμός της επιφάνειας για την αφαίρεση του λίπους.



Εικόνα 3.14. Εικόνα ενός μετάλλου σε τρία διαφορετικά στάδια καθαρισμού.

3.1.3.9 Αναστολείς διάβρωσης στο σκυρόδεμα

Όσον αφορά το σκυρόδεμα οι αναστολείς διάβρωσης μπορούν να ταξινομηθούν σε κατηγορίες σύμφωνα με τις μεθόδους εφαρμογής τους, ανάλογα του μηχανισμού προστασίας τους, ή του περιεχομένου τους.

Οι κύριες μέθοδοι εφαρμογής για αντιδιαβρωτικά είναι οι εξής:

- Προστίθενται σε νωπό σκυρόδεμα σαν πρόσμικτο
- Εφαρμόζονται στην επιφάνεια του σκληρυμένου σκυροδέματος, ως διεισδυτικοί αναστολείς διάβρωσης
- Οι αναστολείς μπορούν επίσης να προστεθούν για την επισκευή οπλισμού σαν επιφανειακή επικάλυψη πριν από τη σκυροδέτηση.

Σύμφωνα με τους διαφορετικούς μηχανισμούς προστασίας και με τα όσα αναφέραμε προηγουμένως, οι αναστολείς διάβρωσης στο σκυρόδεμα μπορεί να είναι:

- **Ανοδικοί.** Οι ανοδικοί αναστολείς ενεργούν για τη διάλυση των προϊόντων διάβρωσης του χάλυβα και μειώνουν το ρυθμό διάβρωσης του. Χρησιμοποιούνται συχνά ανοδικοί αναστολείς απο νιτρώδες ασβέστιο ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$). Νιτρώδες νάτριο, βενζοϊκό νάτριο και χρωμικό νάτριο.
- **Καθοδικοί.** Οι καθοδική αναστολείς ενεργούν για την αντίδραση του οξυγόνου στην επιφάνεια του χάλυβα και μειώνουν την διάβρωση ποσοστό από μείωση δυναμικό διάβρωσης. Συνήθως ως καθοδικός αναστολέας χρησιμοποιείται το υδροξείδιο του νάτριο και ανθρακικό νάτριο. Τα οποία βοηθούν στην αύξηση του pH κοντά στο χάλυβα, και μειώνουν την μεταφορά οξυγόνου καλύπτοντας την επιφάνεια του χάλυβα. Τα φωσφορικά, πυριτικά και πολυφωσφορικά χρησιμοποιούνται επίσης ως καθοδικοί αναστολείς.
- **Μικτοί.** Μικτοί αναστολείς δρουν και σε ανοδικά και καθοδικά σημεία και μειώνουν το ρυθμό διάβρωσης χωρίς σημαντική αλλαγή στο δυναμικό διάβρωσης, γενικά με επιφανειακή προσρόφηση πάνω από την επιφάνεια του χάλυβα σε επαφή με τον αναστολέα, σχηματίζοντας ένα λεπτό προστατευτικό στρώμα. Σε μικτού τύπου αναστολείς, υλικό με το ότι η υδρόφοβη ομάδα έχουν πολικές ομάδες όπως N, S, OH είναι αποτελεσματική. Οργανικές ενώσεις πολυμερούς όπως αμίνη και αμινοαλκοόλης (AMA) χρησιμοποιούνται επίσης. ^[21]

3.1.4 Προστασία μέσω επικαλύψεων – στεγανωτικών

Η χρήση επικαλύψεων αποτελεί την πιο κοινή μέθοδο αντιδιαβρωτικής προστασίας. Η προστατευτική δράση των διαφόρων κατηγοριών επικαλύψεων οφείλεται στον προκαλούμενο διαχωρισμό του μετάλλου από το διαβρωτικό περιβάλλον του, στην αύξηση της ηλεκτρικής του

αντίστασης ή στην μεταβολή της ανοδικής ή/και της καθοδικής πόλωσης και εξαρτάται από το πάχος τους, και τις ιδιότητές τους, όπως η αντοχή, η πρόσφυση, η διαπερατότητα κλπ.
[32]

Οι επικαλύψεις μπορεί να είναι:

- Ανόργανες, μεταλλικές: διακρίνονται, ως προς τη διάβρωση, 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 οξείδια, φωσφορικά, χρωμικά, εμαγιέ) και η τσιμεντοκονία.
- Οργανικές: Διαφόρων τύπων, οργανικά χρώματα, πολυμερή, ρητίνες κλπ.

Η κάλυψη του σκυροδέματος (οπλισμένου ή μη) με διάφορα υλικά είναι συνηθισμένη τακτική, ιδιαίτερα όταν το σκυρόδεμα είναι εκτεθειμένο σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον. Η επιφανειακή προστασία του σκυροδέματος μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους. Οι μέθοδοι αυτοί, που μπορούν να προστατεύσουν τόσο τον οπλισμό, όσο και το σκυρόδεμα, οι εξής:

a) Διαποτισμός. Είναι η δημιουργία ενός λεπτού στρώματος στην επιφάνεια του σκυροδέματος χωρίς την κάλυψη των πόρων του σκυροδέματος. Στην παρούσα διπλωματική, όπως θα διαπιστωθεί στις πειραματικές δοκιμές, έγινε χρήση της μεθόδου του διαποτισμού.

b) Σφράγιση. Είναι η δημιουργία ενός λεπτού στρώματος στην επιφάνεια του σκυροδέματος, πάχους 300μm, με μερική ή ολική κάλυψη των πόρων του σκυροδέματος.

c) Επικάλυψη. Είναι ο σχηματισμός ενός ομοιόμορφου στρώματος στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Η επικάλυψη μπορεί επιμέρους να διακριθεί σε:

- Λεπτή επικάλυψη με πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 0,3~1,0 mm
- Χονδρή επικάλυψη με πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 1,0~5,0 mm
- Επικάλυψη με κονιάματα με πάχος που είναι μεγαλύτερο από 5,0 mm

Στην παρούσα ενότητα δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην επιφανειακή προστασία του σκυροδέματος με ανόργανες και οργανικές επικαλύψεις, δηλαδή με χρώματα. Με δεδομένο επίσης ότι το πάχος του χρώματος (συνολικά) δεν υπερβαίνει τα 300μm, η επικάλυψη του σκυροδέματος με αυτή τη μέθοδο ανήκει στην κατηγορία του σφραγίσματος. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι τα χρώματα εκτός από την προστασία από τη φθορά προσφέρουν και αξιόλογα αισθητικά αποτελέσματα στην κατασκευή, χωρίς να αυξάνουν το βάρος της ^[16].

3.1.4.1 Επικάλυψη με ανόργανα χρώματα

Τα ανόργανα χρώματα έχουν σαν συνδετικό μέσο την υδρύαλο (πυριτικό κάλιο) και ως χρωστικές, συνήθως, ανόργανα πιγμέντα. Υδρύαλος είναι η συνήθης ονομασία των πυριτικών αλάτων των αλκαλίων με γενικό τύπο $Me_2O \cdot nSiO_2$ όπου το Me είναι K ή Na και σπανίως Li, που άλλωστε είναι τα μόνα υδατοδιαλυτά (σχηματίζουν συστήματα κολλοειδούς διασποράς) 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 [2].

Η συγκράτηση της υδρύαλου με το υπόστρωμα (σκυροδέμα, 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.

3.1.4.2 Επικάλυψη με 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. 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 διείδυση του χρώματος στους πόρους του σκυροδέματος. Η σωστή εφαρμογή του υποστρώματος είναι μεγάλης σημασίας για τη διάρκεια ζωής του χρώματος.

Τα χρώματα σιλικόνης έχουν σαν συνδετικό μέσο μία υδατική διασπορά ρητίνης σιλικόνης. Τα χρώματα αυτά έχουν μεγάλη διαπερατότητα σε ατμό και μικρή διαπερατότητα σε νερό. Βασική προϋπόθεση της εφαρμογής τους είναι η εφαρμογή ενός υδρόφοβου ασταριού σιλικόνης. Συνήθως χρησιμοποιούνται στην προστασία του σκυροδέματος αλλά και στην προστασία μνημείων. Τα χρώματα των υδατικών διασπορών είναι τα πλέον συνηθισμένα στην προστασία του σκυροδέματος. Στην αγορά διατίθεται μεγάλη γκάμα χρωμάτων της κατηγορίας αυτής σε διάφορους

χρωματισμούς. Οι ακρυλικές διασπορές είναι οι πλέον γνωστές. Η προσεκτική εφαρμογή του κατάλληλου ασταριού δίνει μεγάλες τιμές συνάφειας.

Τα χρώματα της κατηγορίας αυτής εμφανίζουν μεγάλη διαπερατότητα σε υδρατμούς, πολύ μικρή διαπερατότητα σε CO₂ και SO₂, αλλά συνήθως εμφανίζουν μεγαλύτερη διαπερατότητα σε νερό από τις επόμενες κατηγορίες χρωμάτων. Νεότερες εξελίξεις στα χρώματα της κατηγορίας αυτής έχουν δώσει προϊόντα που μπορούν να εφαρμοστούν στην επιφάνεια του σκυροδέματος αμέσως μετά το ξεκαλούπωμα. Επίσης διατίθενται προϊόντα που σχηματίζουν ελαστικό στρώμα επικάλυψης ικανό για την κάλυψη των ρωγμών.

Ρητίνες από ακρυλικά και μεθακρυλικά συμπολυμερή, διαλυτές σε οργανικούς διαλύτες, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παραγωγή προστατευτικών χρωμάτων στο σκυρόδεμα. Τα χρώματα της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν πολύ καλή διαπερατότητα σε νερό και διοξείδιο του άνθρακα, καθώς και καλή αντοχή στην ακτινοβολία UV. Επίσης παρουσιάζουν πολύ καλή δεισδυτικότητα 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 σκλήρυνσή τους γίνεται με την αρχή της πολυπροσθήκης.

Τα δύο συστατικά, ρητίνη και σκληρυντής, αναμιγνύονται λίγο πριν την εφαρμογή και αντιδρούν σχηματίζοντας ένα υψηλού μοριακού βάρους πολυμερές. Ακόμη, ακόρεστοι πολυεστέρες και μεθακρυλικές ρητίνες που σκληρύνονται με 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.

Η χρήση τους σε γκαράζ, βιομηχανικές κατασκευές, στα τούνελ κλπ είναι ιδιαίτερα συνηθισμένη. Η χρήση πολυουρεθανικών ρητινών σε συνδυασμό με πίσσα για την προστασία του σκυροδέματος σε ισχυρά διαβρωτικά περιβάλλοντα αποτελεί μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εφαρμογή. Μία νεώτερη εξέλιξη στα χρώματα της κατηγορίας αυτής είναι η χρήση ακόρεστων πολυεστερικών ρητινών σε συνδυασμό με ίνες για την κάλυψη δεξαμενών από οπλισμένο σκυρόδεμα [5].

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ ανόργανων και οργανικών χρωμάτων.

Πίνακας 3.15: Διαφορές ανόργανων και οργανικών χρωμάτων

ΑΝΟΡΓΑΝΑ ΧΡΩΜΑΤΑ	ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΧΡΩΜΑΤΑ
1. Έχουν σαν βάση την υδράλο	1. Είναι διαφόρων ειδών
2. Έχουν χαμηλή διαπερατότητα σε διοξείδιο του θείου (SO ₂), σε διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂) και νερό.	2. Έχουν υψηλή διαπερατότητα σε διοξείδιο του θείου (SO ₂), σε διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂) και νερό.
3. Διαλύονται από το νερό και άρα δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον	3. Διαλύονται από οργανικούς διαλύτες

4. Δεν αλλοιώνονται εύκολα υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και του νερού	4. Αλλοιώνονται πιο εύκολα υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και του νερού
5. Δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη μικροοργανισμών	5. Είναι πιο ευάλωτα στους μικροοργανισμούς
6. Είναι διαπερατές από αέρια και υγρασία	6. Έχουν χαμηλή διαπερατότητα από αέρια και υγρασία
7. Προσφέρουν χαμηλό βαθμό προστασίας	7. Προσφέρουν υψηλό βαθμό προστασίας
8. Η πρόσφυση επιτυγχάνεται με χημική αντίδραση μεταξύ του χρώματος και της προς βαφή επιφάνειας	8. Η πρόσφυση επιτυγχάνεται με σχηματισμό υμένα πάνω από τη προς βαφή επιφάνεια
9. Διεισδύουν ικανοποιητικά στο υπόστρωμα ισχυροποιώντας έτσι πιο καλά την πρόσφυση	9. Δεν διεισδύουν ικανοποιητικά στο υπόστρωμα
10. Δεν φορτίζονται ηλεκτροστατικά, δεν έχουν κολλώδη επιφάνεια, δεν επικολλάται η σκόνη πάνω στη βαμμένη επιφάνεια	10. Φορτίζονται ηλεκτροστατικά, έχουν κολλώδη επιφάνεια, επικολλάται η σκόνη πάνω στη βαμμένη επιφάνεια
11. Η επιφάνεια που σχηματίζουν δεν χαράσσεται εύκολα	11. Η επιφάνεια που σχηματίζουν χαράσσεται εύκολα
12. Έχουν ίδιο συντελεστή επιφανειακής διαστολής με τα δομικά υλικά	12. Έχουν διαφορετικό συντελεστή επιφανειακής διαστολής με τα δομικά υλικά
13. Απαιτούν μικρότερο χρόνο επαναβαφής και καθαρίζονται πιο εύκολα	13. Απαιτούν μεγαλύτερο χρόνο επαναβαφής και καθαρίζονται πιο δύσκολα
14. Προσφέρονται σε μικρή ποικιλία αποχρώσεων	14. Προσφέρονται σε μεγάλη ποικιλία αποχρώσεων
15. Παρέχουν μικρότερη προστασία στη διάβρωση σε σχέση με τα οργανικά.	15. Παρέχουν ικανοποιητική προστασία στη διάβρωση.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω για να χρησιμοποιηθεί ένα χρώμα σαν επικάλυψη (οργανική ή ανόργανη) θα πρέπει να πληροί τις ακόλουθες προϋποθέσεις ^[16] :

- Να αποτρέπει τη διείσδυση του νερού στο σκυρόδεμα.
- Να αποτρέπει τη διείσδυση του διοξειδίου του θείου (SO₂), και του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) 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.

Ο συνδυασμός της χρήσης μονωτικών επικαλύψεων (π.χ. χρωμάτων) και μεθόδων όπως η καθοδική προστασία είναι αρκετά αποτελεσματικός γιατί το προστατευτικό ρεύμα αφορά μόνο τις ατέλειες της επικάλυψης και επομένως είναι μικρότερο από ό,τι στο γυμνό μέταλλο. Ο συνδυασμός αυτός είναι επίσης και οικονομικός, γιατί μικρές ατέλειες της επικάλυψης μπορεί να είναι ανεκτές, ενώ χωρίς την καθοδική προστασία θα έπρεπε το στρώμα του χρώματος να είναι απόλυτα συμπαγές για να είναι προστατευτικό ^[23] .

3.1.5 Χρήση ειδικών χαλύβων

Μία μέθοδος προστασίας για την αντιμετώπιση των προβλημάτων διάβρωσης στο οπλισμένο σκυρόδεμα σε έντονο διαβρωτικό περιβάλλον, είναι η χρήση ειδικών χαλύβων. Με τον όρο «ειδικοί χάλυβες» αναφέρονται οι χάλυβες με επικαλύψεις και οι ανοξείδωτοι χάλυβες. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αναφορές με διάφορα επιστρώματα (ανόργανα, όπως κεραμικά ή οργανικά, όπως PVC) καθώς και άλλα μέταλλα όπως π.χ. τιτάνιο. Στην πράξη όμως έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο τα αναφερόμενα στον παρακάτω πίνακα 3.16 είδη χαλύβων όπου παρουσιάζονται και οι σχετικοί δείκτες κόστους σε αναφορά με τον κοινό δομικό χάλυβα ^[16] .

Πίνακας 3.16: Είδη ειδικών δομικών χαλύβων

ΕΙΔΗ ΧΑΛΥΒΑ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ
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

Εκτός βέβαια από το κόστος, κάθε είδος από τους παραπάνω δομικούς χάλυβες προσφέρει διαφορετικό βαθμό προστασίας και παρουσιάζει διαφορετικό πεδίο και τρόπο εφαρμογής. Η χρήση δε αυτών γίνεται σε περιπτώσεις όπου, είτε προαπαιτείται από τον σχεδιασμό της κατασκευής λόγω της ύπαρξης διαβρωτικού περιβάλλοντος, ή σε αποκαταστάσεις κτιρίων μεγάλης σπουδαιότητας (ιστορικά κτίρια, μνημεία, κ.α.).

Ειδικότερα, οι ανοξειδωτοι χάλυβες χρησιμοποιούνται εναλλακτικά και σε αντικατάσταση των κοινών ανθρακούχων χαλύβων σε κατασκευές. Συνήθως όμως στην πράξη γίνεται μερική αντικατάσταση των ανθρακούχων χαλύβων, σε τμήματα της κατασκευής που υποφέρουν περισσότερο από διάβρωση. Η βασική ιδιότητα των ανοξειδωτων χαλύβων είναι η υψηλή αντίσταση στη διάβρωση. Οι ανοξειδωτοι χάλυβες σχηματίζουν στην επιφάνεια τους ένα πολύ λεπτό στρώμα οξειδίου του χρωμίου, με εξαιρετική πρόσφυση, το οποίο απομονώνει ουσιαστικά τον χάλυβα από τους διαβρωτικούς ρύπους. Υπάρχουν πάνω από 60 κατηγορίες ποιότητας ανοξειδωτων χαλύβων. Κατατάσσονται σε τέσσερις βασικούς τύπους ανάλογα με την μικρογραφική δομή τους (α) Μαρτενιτικοί, (β) Φερριτικοί, (γ) Ωστενιτικοί και (δ) Φερριτο – ωστενιτικοί (duplex) ανοξειδωτοι χάλυβες. Σε κάθε περίπτωση περιέχουν ελάχιστο άνθρακα. Στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος συνήθως χρησιμοποιούνται οι ωστενιτικοί και οι φερριτο-ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες. Η επιλογή είναι θέμα σχεδιασμού και εξαρτάται πάντα από τη ζητούμενη κατά περίπτωση αντίσταση στη διάβρωση, τις αναγκαίες μηχανικές αντοχές και το κόστος. Συγκεκριμένα, ο ανοξειδωτος χάλυβας τύπου *AISI 304* ή *304L* ανήκει στην κατηγορία των ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων και χρησιμοποιείται για κατασκευές που εκτίθενται σε ιδιαίτερα διαβρωτικό περιβάλλον, σε περιπτώσεις όπου προβλέπονται συγκολλήσεις (για παράδειγμα, για την αποκατάσταση ιστορικού κτιρίου στο Λονδίνο, Guildhall, London, χρησιμοποιήθηκαν 140 τόνοι ανοξειδωτου χάλυβα αυτού του τύπου). Ο ανοξειδωτος χάλυβας τύπου *AISI 316* ανήκει και αυτός στην κατηγορία των ωστενιτικών ανοξειδωτων χαλύβων και χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν υψηλά επίπεδα τάσεων και περιβάλλον εξαιρετικά διαβρωτικό σε συνδυασμό με υψηλές θερμοκρασίες (στην αποκατάσταση της Sydney Opera House στην Αυστραλία, έγινε χρήση οπλισμού και πλέγματος από ανοξειδωτο χάλυβα αυτού του τύπου, προς αντικατάσταση κοινού δομικού χάλυβα που αστόχησε έπειτα από 25 χρόνια έκθεσης σε θαλάσσιο περιβάλλον). Οι Φερριτο – ωστενιτικοί (duplex) ανοξειδωτοι χάλυβες (η πιο γνωστή κατηγορία τους είναι οι *SAF 2205*) παρουσιάζουν αυξημένη

αντίσταση στη διάβρωση σε περιβάλλοντα με υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων, σε σχέση με τους ωστενιτικούς. Έχουν επίσης μεγαλύτερες αντοχές και καλύτερες τιμές δυσθραυστότητας. Γενικότερα, για τη σωστή χρησιμοποίηση του υλικού θα πρέπει η μελέτη της κατασκευής να προσαρμόζει τις επιλογές στις συνθήκες μέσα στις οποίες θα ζήσει το έργο. Στον παρακάτω πίνακα συσχετίζονται διάφορες κατηγορίες ανοξείδωτων χαλύβων σκυροδέματος με συγκεκριμένες απαιτήσεις διαβρωτικού περιβάλλοντος. [35]

Πίνακας 3.17: Συνιστώμενοι ανοξείδωτοι χάλυβες ανά κατηγορία διαβρωτικού περιβάλλοντος

Κατηγορία ποιότητας	Περιβάλλοντα χρήσης
W.1.4301/AISI 304L	Ηπειρωτικές περιοχές, χαμηλή συγκέντρωση χλωριόντων
W.1.4401/AISI 316LN	Θαλάσσιες περιοχές, υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων
W.1.4462/SAF 2205 Duplex	Πολύ υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων, απαίτηση για υψηλή αντοχή

Τυπικές εφαρμογές μερικής ή ολικής χρήσης ανοξείδωτων χαλύβων οπλισμού είναι οι παρακάτω: [16]

- Οπλισμός θεμελίων σε περιοχές με υπόγεια νερά.
- Κατασκευές σε υγρό περιβάλλον (π.χ. σήραγγες μετρό και τρένων, στοές, υπόγειες διαβάσεις, υπόγειοι δρόμοι), κατασκευές σε θαλάσσιο περιβάλλον, θεμελίωση εντός νερού, σε υγρό υπέδαφος, αποβάθρες, βάσεις σε γέφυρες.
- Γέφυρες αερογέφυρες, αεροδιάδρομοι πεζών, μπαλκόνια και οπλισμοί εμφανών σκυροδεμάτων.
- Σκελετός σκυροδέματος σε έργα αναπαλαιώσεων και μνημείων, αποκατάσταση αγαλμάτων, μνημείων είτε από μάρμαρο είτε από πέτρα.
- Πλατφόρμες σε ανοικτή θάλασσα, κυματοθραύστες.
- Κατασκευές από σκυρόδεμα με αντιμαγνητικές απαιτήσεις.

3.1.6 Επεμβάσεις σε οπλισμό και σκυρόδεμα

Ο πιο συνήθης τρόπος επισκευής μιας διαβρωμένης κατασκευής είναι η αποκατάσταση των δομικών στοιχείων που έχουν υποστεί φθορά. Τα κυριότερα στάδια της μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

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

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

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι τα διαβρωτικά συστατικά από το περιβάλλον, πρέπει να διαπεράσουν την επικάλυψη του σκυροδέματος και να φτάσουν στην επιφάνεια του οπλισμού. Όσο λοιπόν το πάχος της επικάλυψης είναι μεγαλύτερο τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για να φθάσουν τα διαβρωτικά συστατικά στον οπλισμό (εφόσον τα άλλα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος παραμείνουν τα ίδια). Η ωθούσα δύναμη για τη μετακίνηση των συστατικών εντός του σκυροδέματος είναι η διάχυση. Συνεπώς όσο το πορώδες του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερο, τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι και το πάχος επικάλυψης του οπλισμού ώστε να έχουμε τον ίδιο βαθμό προστασίας του οπλισμού.

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

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

Συνήθως, η αποκατάσταση/προστασία κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, των οποίων η διάβρωση οφείλεται στην προσβολή από χλωριόντα, γίνεται με εφαρμογή άλλων μεθόδων

προστασίας (π.χ. σφράγισμα με ρητίνες, αφαλάτωση), ή με κάποιο συνδυασμό συμβατικής αποκατάστασης και προστασίας της κατασκευής μέσω εφαρμογής ηλεκτροχημικών μεθόδων.

Πιο συγκεκριμένα:

❖ Επανακαλοποίηση

Ο σκοπός της μεθόδου αυτής είναι η αύξηση του pH του σκυροδέματος, όταν αυτό έχει μειωθεί λόγω ενανθράκωσης ή άλλων αιτιών. Η επιφάνεια του σκυροδέματος επαλείφεται με διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου. Η διαδικασία της επανακαλοποίησης στηρίζεται στην ανοδική και καθοδική δράση όπου ως άνοδος λειτουργεί ένα ηλεκτρόδιο μολύβδου ή ανοξειδωτού χάλυβα και ως κάθοδος ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος. Η εφαρμογή ενός εξωτερικού ηλεκτρικού δυναμικού, οδηγεί στη διάχυση του αλκαλικού υγρού στους πόρους του σκυροδέματος με αποτέλεσμα την αύξηση του pH του.

❖ Αφαίρεση υγρασίας

Η μέθοδος αυτή, η οποία αναφέρεται και ως «ηλεκτρική» χρησιμοποιείται για την αφαίρεση υγρασίας από κονιάματα. Απαιτεί η περιεκτικότητα των αλάτων στο κονίαμα να είναι 2% - 5% και το pH του υλικό υψηλότερο του 8. Η διαδικασία προσομοιάζει με αυτήν της αφαίρεσης χλωριόντων. Με την εφαρμογή του δυναμικού, τα ιόντα των αλάτων κινούνται προς τα ηλεκτρόνια μεταφέροντας μαζί τους και νερό. Η μεταφορά των μορίων (νερού) από τα ιόντα ερμηνεύεται με (και επηρεάζεται από) διάφορες δράσεις (π.χ. διαφορετικός βαθμός ενυδάτωσης των ανιόντων και κατιόντων των αλάτων, τα ανιόντα συμπαρασύρουν κατά την κίνησή τους το υδατικό περίβλημα των πόρων, ανάπτυξη δράσεων απώθησης οι οποίες τρέπουν το νερό προς τους λεπτούς πόρους κλπ.). Η συγκεκριμένη διαδικασία, ωστόσο, αν και απλή και με χαμηλό κόστος, είναι πολύ βραδεία. ^[9]

❖ Ηλεκτροχημική εξαγωγή χλωριόντων (ECE)

Η ηλεκτροχημική εξαγωγή χλωριόντων (Electrochemical Chloride Extraction– ECE) είναι μια μέθοδος περιορισμού των βλαβών που δημιουργούνται λόγω διάβρωσης, μέσω της μείωσης της συγκέντρωσης χλωριόντων σε επίπεδα που επιτρέπουν την επαναπαθητικοποίηση του χαλύβδινου οπλισμού στο ισχυρά αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος. Η μέθοδος περιλαμβάνει την εφαρμογή μιας βοηθητικής ανόδου στην επιφάνεια της κατασκευής και επιβολή συνεχούς ρεύματος μεταξύ αυτής της ανόδου και του οπλισμού που λειτουργεί ως κάθοδος. Με αυτό τον τρόπο τα χλωριόντα μετακινούνται από τον οπλισμό και το εσωτερικό του σκυροδέματος προς την επιφάνειά του. Η ταχύτητα της μετακίνησης εξαρτάται από το επιβαλλόμενο ρεύμα. Επιπλέον, η ηλεκτροχημική αντίδραση που συμβαίνει στην επιφάνεια του χάλυβα αυξάνει την αλκαλικότητα του περιβάλλοντος σκυροδέματος μέσω της παραγωγής ιόντων υδροξυλίου. Αυτά βοηθούν την επαναπαθητικοποίηση του χάλυβα μειώνοντας την αναλογία χλωριόντων / υδροξυλίων κάτω από το όριο έναρξης της διάβρωσης. Η μέθοδος ωστόσο μπορεί να επιφέρει και επιζήμιες επιπτώσεις στην κατασκευή. Αυτό διότι το υδρογόνο που παράγεται στην κάθοδο μπορεί να μεταναστεύσει μέσω του χαλύβδινου πλέγματος, μειώνοντας την αντοχή του και οδηγώντας σε αστοχία. Αυτό το φαινόμενο αναφέρθηκε ανωτέρω ως ευθραυστότητα λόγω υδρογόνου (hydrogen embrittlement)

και δεν επηρεάζει τόσο τους συμβατικούς χάλυβες που χρησιμοποιούνται ως οπλισμοί, όσο τους χάλυβες υψηλών αντοχών. Η ηλεκτροχημική εξαγωγή χλωριόντων μοιάζει με την καθοδική προστασία (που αναλύεται ακολούθως) όσον αφορά στο ότι μεταξύ του χάλυβα του οπλισμού και της ανόδου στην επιφάνεια διέρχεται συνεχές ρεύμα αλλά μεταξύ των δύο μεθόδων υπάρχουν δύο σημαντικές διαφορές. Αφ' ενός η πυκνότητα του εφαρμοζόμενου ρεύματος στην ECE είναι πολύ υψηλότερη απ' ότι στην καθοδική προστασία και αφ' εταίρου στην ECE παραμένει στην επιφάνεια της κατασκευής μόνο προσωρινά, όσο διαρκεί η διαδικασία εξαγωγής των χλωριόντων (συνήθως επί μερικές εβδομάδες).

❖ Σφράγισμα με ρητίνες

Αν και το σφράγισμα των ρωγμών στο σκυρόδεμα μπορεί να επιτευχθεί και με άλλα υλικά (π.χ. τσιμέντο), οι ρητίνες αποτελούν ένα υλικό που γεμίζει τα κενά των ρωγμών και επιτυγχάνει πλήρη συνέχεια του υλικού. Επιπλέον, εμποδίζουν την οξειδωτική διαδικασία καθώς λόγω της σύστασής τους δεν επιτρέπεται η διείσδυση του οξυγόνου και της υγρασίας, ενώ λόγω της αντοχής σε εφελκυσμό και της μεγάλης τους συνάφειας αποτρέπεται σε σημαντικό βαθμό η διεύρυνση των ρωγμών. ^[8]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η επίδραση της σύστασης του σκυροδέματος στη διάβρωση, εμπεριέχει μέσα της την ερμηνεία του πορώδους τόσο σε σχέση με την περιεκτικότητα των συνθέσεων όσο και με την αναλογία τους σε νερό/τσιμέντο. Αυτός ο συλλογισμός αποτέλεσε τον άξονα της παρούσας διπλωματικής.

Το σύνολο των κενών που απομένει μεταξύ των προϊόντων της ενυδάτωσης, αποτελεί το πορώδες του σκυροδέματος, το οποίο, ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες και της απόστασης του κάθε τμήματος του σκυροδέματος από ελεύθερη επιφάνεια, μπορεί να είναι πλήρες νερού ή αέρα.

Το νερό που απαιτείται για την πλήρη αντίδραση του τσιμέντου με το νερό είναι περίπου το 22-23% του βάρους του τσιμέντου, δηλαδή $N/T=0,23$. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει περίσσεια νερού για τις υπόλοιπες ιδιότητες που πρέπει να έχει το σκυρόδεμα, όπως η εργασιμότητα, αντλησιμότητα κλπ. Για να αποκτήσει το σκυρόδεμα αυτές τις ιδιότητες, εκτός των άλλων, απαιτείται περίσσεια νερού. Όσο περισσότερο είναι το νερό σε σχέση με το τσιμέντο (μεγάλος N/T), οι βελόνες των προϊόντων ενυδάτωσης «μπλέκονται» λίγο μεταξύ τους, τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ των προϊόντων ενυδάτωσης (πορώδες) των διπλανών κόκκων είναι σχετικά μεγάλα, με αποτέλεσμα η τάση που απαιτείται για να σπάσει αυτός ο «δεσμός», να είναι σχετικά μικρή, οπότε και η αντοχή είναι μικρή. Όταν το νερό σε σχέση με το τσιμέντο είναι λιγότερο (μικρός N/T), οι βελόνες των προϊόντων ενυδάτωσης είναι «σφιχτά μπλεγμένες» μεταξύ τους, τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ τους είναι σχετικά μικρά, με αποτέλεσμα η τάση που απαιτείται για να «σπάσει» αυτός ο δεσμός να είναι μεγαλύτερη από το πρώτο παράδειγμα. Οι λόγοι N/T για τα συνηθισμένα έργα κυμαίνονται από 0,45 – 0,70. Για ειδικά σκυροδέματα, όπως το αυτοσυμπυκνούμενο μπορούμε να φτάσουμε και την τιμή $N/T=0,35-0,40$.

Η επίπτωση στο πορώδες (τη «δίοδο» μέσω της οποίας εισέρχονται οι παράγοντες που προσβάλλουν τον οπλισμό) των διαφόρων παραμέτρων, για σταθερά όλα τα υπόλοιπα, είναι:

- Μεγάλη ποσότητα τσιμέντου → μικρό πορώδες
- Μικρός λόγος N/T → μικρό πορώδες
- Μεγάλη αντοχή → μικρό πορώδες.

Με βάση, λοιπόν, όλα τα παραπάνω πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός των πειραματικών διαδικασιών της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ο σχεδιασμός των συνθέσεων έγινε σε συμμόρφωση με τον ΚΤΣ-2016 και από τα αποτελέσματα επιδιώκεται να γίνει τεχνολογική βελτιστοποίηση των συνθέσεων σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται σε διαβρωτικό περιβάλλον.

Πιο συγκεκριμένα οι πέντε συνθέσεις που δημιουργήθηκαν έχουν ως εξής:

- **Σύνθεση 1.1** – Σκυρόδεμα αναφοράς (C30/37) – περιέχει 330 kg/m^3 τσιμέντο CEM II 42.5 και μεγαλύτερα κλάσματα αδρανών.
- **Σύνθεση 1.2** – Σκυρόδεμα (C30/37) με προσθήκη αναστολέα διάβρωσης (4% κ.β. τσιμέντου) – περιέχει 330 kg/m^3 τσιμέντο CEM II 42.5 και μεγαλύτερα κλάσματα αδρανών.
- **Σύνθεση 1.3** – Σκυρόδεμα (C30/37) ψεκαζόμενο με αναστολέα διάβρωσης (4% κ.β. τσιμέντου) – περιέχει 330 kg/m^3 τσιμέντο CEM II 42.5 και μεγαλύτερα κλάσματα αδρανών.
- **Σύνθεση 2.1** – Γαρμπυλόδεμα – περιέχει 400 kg/m^3 τσιμέντο CEM II 42.5 και περιέχει μικρότερα κλάσματα αδρανών.
- **Σύνθεση 2.2** – Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ) – περιέχει 400 kg/m^3 τσιμέντο CEM II 42.5 και επιπλέον 100 kg/m^3 τσιμέντο CEM IV 32.5 ενώ είναι λεπτόκοκκο.

4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Σ' αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η περιγραφή των σταδίων της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται λεπτομερώς η διαδικασία και ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκαν και συντηρήθηκαν τα δοκίμια, παρασκευάστηκαν οι διάφοροι τύποι σκυροδέματος, οι πειραματικές διαδικασίες και οι παραδοχές οι οποίες έγιναν για τη λήψη δεδομένων. Όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, η πειραματική διαδικασία περιλάμβανε την κατασκευή 75 δοκιμίων συνολικά, για τις 5 διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα στη κάθε σύνθεση αναλογούν 12 κυβικά και 3 κυλινδρικά δοκίμια.

4.2.1 Παρασκευή και Συντήρηση δοκιμίων

Η πορεία που ακολουθήθηκε τόσο για την παρασκευή όσο και για τη συντήρηση των δοκιμίων συμβαδίζει απόλυτα με τον ΚΤΣ-2016. Σύμφωνα λοιπόν με τον κανονισμό η διαδικασία έχει ως εξής:

Αρχικά επαλείφθηκαν οι μήτρες σκυροδέματος με λεπτή στρώση αντικολλητικού υλικού για να αποτραπεί η προσκόλληση του σκυροδέματος στο καλούπι. Οι μήτρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι μεταλλικές, κυβικές (150 x 150mm) και κυλινδρικές με διάμετρο 100 mm και ύψος 200 mm. Η μέθοδος συμπύκνωσης που ακολουθήθηκε στη συνέχεια είναι η «συμπύκνωση με τράπεζα δονήσεως» (εικόνα 4.3). Οι μήτρες τοποθετήθηκαν στη δονούμενη τράπεζα, γεμίστηκαν με δύο στρώματα (κανένα στρώμα δεν είχε πάχος περισσότερο από 100 mm) σκυροδέματος ανά μήτρα. Ύστερα ακολούθησε προσεκτική δόνησή τους μόνο για 15 sec με ταυτόχρονη επιβολή φορτίου καθώς η υπερδόνηση μπορεί να προκαλέσει απώλεια εγκλωβισμένου αέρα.

Μετά τη μορφοποίηση της άνω πλευράς τους, τα καλουπωμένα δοκίμια νωπού σκυροδέματος τοποθετήθηκαν για σκλήρυνση στον χώρο του εργαστηρίου (εικόνα 4.1). Προηγουμένως τα δοκίμια σημειώθηκαν ευκρινώς και με προσοχή χωρίς να προκληθούν καταστροφές σε αυτά. Τα αρχεία

διατηρήθηκαν για την εξασφάλιση της ανιχνευσιμότητας του δοκιμίου έτσι ώστε να μπορούν χρησιμοποιηθούν για δοκιμές. Η διαδικασία της σκλήρυνσης πρέπει να γίνεται στη σκιά, μέσα στις μήτρες, χωρίς κτυπήματα, δονήσεις, και προστατευμένα από ξήρανση(σκεπάστηκαν με βρεγμένη λινάτσα-εικόνα 4.2) ενώ πρέπει να διαρκεί τουλάχιστον 20 ώρες και όχι περισσότερες από 32 ώρες σε θερμοκρασία $20 \pm 5^\circ \text{C}$.

Μετά το πέρας της σκλήρυνσης έγινε καθαρισμός των μητρών και προετοιμασία τους για την παρασκευή των δοκιμών της επόμενης σύνθεσης. Η ωρίμανση των δοκιμών πραγματοποιήθηκε σε θάλαμο συντήρησης (εικόνα 4.4) για 28 μέρες. Η εισαγωγή στον θάλαμο συντήρησης (θερμοκρασία $20 \pm 1^\circ \text{C}$) αποσκοπεί στη δημιουργία συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας που θα επιτρέψουν να ενυδατωθεί το μεγαλύτερο ποσοστό τσιμέντου του μείγματος. Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί πως τόσο η ανάμιξη των πρώτων υλών για την παρασκευή σκυροδέματος όσο και η χύτευση του στις μήτρες αλλά και η συντήρηση των δοκιμών πραγματοποιήθηκαν σε βιομηχανικό περιβάλλον και όχι σε εργαστηριακό. Ακολουθεί φωτογραφικό υλικό από τις διαδικασίες παραγωγής και συντήρησης των υπό μελέτη δοκιμών.



Εικόνα 4.1: Πληρωμένες μήτρες σκυροδέματος



Εικόνα 4.2: Συντήρηση δοκιμών



Εικόνα 4.3: Τράπεζα δονήσεως



Εικόνα 4.4: Θάλαμος συντήρησης

4.3 ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ

4.3.1 Παραγόμενες συνθέσεις

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει την κατασκευή 75 δοκιμών συνολικά, για 5 διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος. Στην κάθε σύνθεση αντιστοιχούν 12 κυβικά δοκίμια, που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής και του ανοικτού πορώδους (υδατοπερατότητα), και 3 κυλινδρικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων (ASTM.1202-Proovelt). Και οι πέντε συνθέσεις πληρούν τις προδιαγραφές του ΚΤΣ-2016 και βρίσκονται εντός ορίων όσων αφορά τις εξής τιμές:

- Μέγιστο λόγο: $N/T = 0,50$
- Ελάχιστη κατηγορία αντοχής: C30/37
- Ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο: 330 kg/m^3

Οι πέντε συνθέσεις μπορούν εύκολα να διακριθούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη κοκκομετρική τους διαβάθμιση. Οι τρεις πρώτες μπορούν να χαρακτηριστούν ως περισσότερο χονδρόκοκκες από τις δύο τελευταίες (Γαρμπιλόδεμα και Αυτοσυμπυκνούμενο) οι οποίες αποτελούν κλασικό δείγμα λεπτόκοκκων συνθέσεων, μιας και από αυτές απουσιάζει το μεγαλύτερο κλάσμα αδρανών (χαλίκι $>16\text{mm}$).

Επιπλέον αξίζει να αναφερθεί πως και στις 5 συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε ίδιος τύπος τσιμέντου CEM II 42.5 (στο ΑΣΣ χρησιμοποιήθηκε επίσης και τσιμέντο CEM IV 32.5 σε αναλογία 1/5) δηλαδή τσιμέντο Portland τύπου II με κύριο συστατικό, πλην του κλίνκερ, φυσική ποζολάνη (P), λεπτοαλεσμένο ασβεστόλιθο (LL) και ιπτάμενη τέφρα (W). Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν ήταν άμμος 0-4 mm, γαρμπίλι 8-16 mm, χαλίκι ($>16\text{mm}$) ενώ στο Γαρμπιλομπετό χρησιμοποιήθηκε και ρύζι (4-8mm). Επίσης, χρησιμοποιήθηκε σε όλες ανεξαιρέτως τις συνθέσεις Ρευστοποιητής BV-90 ενώ στις δύο λεπτόκοκκες προστέθηκε επιπλέον Ρυθμιστής Ιξώδους VMA.

Τέλος να αναφερθεί πως οι 3 πρώτες συνθέσεις (1.1, 1.2 και 1.3) έχουν όμοια σύσταση (σκυρόδεμα ποιότητας C30/37), με μοναδική διαφορά πως στη δεύτερη χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο αναστολέας διάβρωσης (4% κ.β. τσιμέντου) ενώ στην τρίτη μετά την ωρίμανση των δοκιμών στις 28 ημέρες υποβλήθηκαν σε ψεκάσμο με αναστολέα διάβρωσης.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι διαδικασίες παραγωγής και συντήρησης των δοκιμών πραγματοποιήθηκαν σε εργοστάσιο παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος. Έτσι ο σχεδιασμός των συνθέσεων έγινε στη γραμμή παραγωγής για ποσότητα 1 τόνου υλικού από το οποίο έγινε η παραλαβή των υπό μελέτη δοκιμών. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται αναλυτικά η σύσταση των 5 συνθέσεων που θα μελετηθούν.

Πίνακας 4.5: Ανάλυση σύστασης εξεταζόμενων συνθέσεων σκυροδέματος

Σύνθεση	Αναφοράς (C30/37)	Προσθήκη Αναστολέα Διάβρωσης		Λεπτόκοκκες Συνθέσεις	
		1.2 (Πρόσθετος Α.Δ.)	1.3 (Ψεκαζόμενος Α.Δ.)	2.1 (Γαρμπυλόδεμα)	2.2 (ΑΣΣ)
α/α	1.1	1.2 (Πρόσθετος Α.Δ.)	1.3 (Ψεκαζόμενος Α.Δ.)	2.1 (Γαρμπυλόδεμα)	2.2 (ΑΣΣ)
CEM II 42.5	330	330	330	400	400
CEM IV 32.5	-	-	-	-	100
Νερό	165	165	165	190	200
Θραυστά Ασβεστολιθικά:					
Άμμος (0-4mm)	975	975	975	1000	1050
Ρύζι (4-8mm)	-	-	-	260	-
Γαρμπύλι (8-16mm)	280	280	280	495	570
Χαλίκι (>16mm)	650	650	650	-	-
Ρευστοποιητής BV-90	2	2	2	3,5	5,5
Αναστολέας Διάβρωσης (Chem Protect - 4% κ.β.Σ)	-	13,2	-	-	-
Ρυθμιστής Ιξώδους VMA	-	-	-	0,5	0,5
Σύνολο συστατικών (kg/m³)	2402	2415,2	2402	2349	2326
Λόγος W/C	0,50	0,50	0,50	0,48	0,40

Σκοπός του σχεδιασμού των συγκεκριμένων συνθέσεων είναι η δημιουργία τριών συγκριτικών καταστάσεων, όπως περιγράφονται παρακάτω.

Η πρώτη βασίζεται στην περιεκτικότητα του τσιμέντου της κάθε σύνθεσης. Με αυτό τον τρόπο, οι συνθέσεις ομαδοποιούνται ως εξής:

- 1.1, 1.2, 1.3 με 330 kg/m³ τσιμέντο
- 2.1 (γαρμπυλομετό) με 400 kg/m³ τσιμέντο
- 2.2 (Αυτοσυμπυκνούμενο) με 500 kg/m³ τσιμέντο

Η δεύτερη συγκριτική κατάσταση βασίζεται στο λόγο νερού/τσιμέντο της κάθε σύνθεσης. Με αυτό τον τρόπο, οι συνθέσεις ομαδοποιούνται ως εξής:

- 1.1, 1.2, 1.3, 2.1 με λόγο N/T = 0,5.
- 2.2 με λόγο N/T = 0,40.

Η τρίτη σύγκριση βασίζεται στις διαφορές που εμφανίζουν οι συνθέσεις 1.1, 1.2, 1.3 και άρα στο κατά πόσο επηρεάζει η προσθήκη αναστολέα διάβρωσης (ως πρόσμικτο είτε ως ψεκαζόμενο) την αντιδιαβρωτική τους συμπεριφορά

4.3.2 Ιδιότητες νωπής φάσης

Νωπό σκυρόδεμα είναι αυτό το οποίο προκύπτει από την ανάμειξη των πρώτων υλών του και χαρακτηρίζεται έτσι για όσο χρονικό διάστημα διατηρεί το εργάσιμο, δηλαδή για όσο είναι δυνατόν να μεταφέρεται και να διαστρώνεται. Οι ιδιότητες της νωπής φάσης του σκυροδέματος σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της εργασιμότητας και της ρευστότητας τα οποία είναι πολύ χρήσιμα κατά τη σκυροδέτηση ενός έργου αλλά και κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης. Παρακάτω παρουσιάζονται οι μετρήσεις των βασικότερων ιδιοτήτων της νωπής φάσης, της θερμοκρασίας και της κάθισης/εξάπλωσης, για κάθε μια από της 5 συνθέσεις.

4.3.2.1 Θερμοκρασία σκυροδέματος

Η θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος δεν πρέπει να είναι πολύ χαμηλή, έτσι ώστε το σκυρόδεμα να μπορέσει να αποκτήσει επαρκή αντοχή αρκετά γρήγορα και να μην υποστεί βλάβη από παγετό σε πρώιμο στάδιο. Σύμφωνα με το ΚΤΣ-2016, η θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος δεν πρέπει να πέσει κάτω από τους 5 °C κατά την τοποθέτησή-παράδοση του, ενώ όσον αφορά στις δοκιμές που υποβάλλεται, η θερμοκρασία του δεν πρέπει να πέσει κάτω από τους 15 °C.

Από την άλλη μεριά, πολύ υψηλές θερμοκρασίες σκυροδέματος μπορεί επίσης να προκαλέσουν προβλήματα κατά την τοποθέτησή του όπως επιφανειακές ρηγματώσεις και μείωση ορισμένων ιδιοτήτων του σκληρυμένου σκυροδέματος. Για να αποφευχθεί αυτό, η θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος δεν θα πρέπει να ξεπερνά τους 30 °C κατά την εφαρμογή του και τους 22 °C κατά την δοκιμή. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε τις επιμέρους θερμοκρασίες για κάθε σύνθεση.

Πίνακας 4.6: Θερμοκρασίες νωπού σκυροδέματος

Σύνθεση	Αναφοράς (C30/37)	Προσθήκη Αναστολέα Διάβρωσης		Λεπτόκοκκες Συνθέσεις	
α/α	1.1	1.2 (Πρόσθετος Α.Δ.)	1.3 (Ψεκαζόμενος Α.Δ.)	2.1 (Γαρμπυλόδεμα)	2.2 (ΑΣΣ)
Θερμοκρασία (°C)	19,3	19,2	19	19	19,3

Παρατηρεί κανείς πως οι θερμοκρασίες σκυροδέματος της κάθε σύνθεσης βρίσκονται μεταξύ των επιτρεπτών ορίων, κάτι που καθιστά το σκυρόδεμα έτοιμο προς χρήση-χύτευση και ικανό στο να υποβληθεί σε δοκιμές χωρίς την απειλή παρουσίας κάποιου προβλήματος.



Εικόνα 4.7: Μέτρηση θερμοκρασίας σκυροδέματος

Η μέτρηση της θερμοκρασίας σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε με θερμομότρο Laser-Υπερήχων όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα.

4.3.2.2 Κάθιση-Εξάπλωση σκυροδέματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η κάθιση αποτελεί ένα μέτρο εργασιμότητας. Εκφράζεται με την απώλεια ύψους, σε cm ή mm, που παρουσιάζει μια κωνική στήλη νωπού σκυροδέματος, όταν ανασυρθεί η κωνική μήτρα (κώνος κάθισης) με την οποία μορφώθηκε. Πιο συγκεκριμένα η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

Αρχικά ο κώνος κάθισης (κώνος Abrams) διαβράχθηκε εσωτερικά και αφού τοποθετήθηκε σε λεία και επίπεδη επιφάνεια, γεμίστηκε έως το $\frac{1}{3}$ του ύψους του με σκυρόδεμα που λήφθηκε με σέσουλα από διάφορες τυχαίες θέσεις από το καρότσι μπετού. Στη συνέχεια ακολούθησε η συμπύκνωση του σκυροδέματος με 25 χτυπήματα με πρότυπη ράβδο διαμέτρου $\Phi 16$. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για τις άλλες 2 στρώσεις, ενώ ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε κατά τη συμπύκνωση των 2 στρώσεων καθώς η πρότυπη ράβδος δεν πρέπει να εισέρχεται εντός της προηγούμενης στρώσης. Αφού ολοκληρώθηκε η συμπύκνωση της 3ης στρώσης, ακολούθησε η μόρφωση και επιπέδωση της επιφάνειας της κορυφής του κώνου. Έπειτα ο κώνος αφαιρέθηκε αργά και σταθερά εντός χρόνου 5 s (εικόνα 4.8). Ο κώνος αναστράφηκε άμεσα και τοποθετήθηκε δίπλα από το νωπό σωρό σκυροδέματος. Τέλος, στην επιφάνεια της κορυφής του κώνου κάθισης, οριζοντιώθηκε η πρότυπη ράβδος $\Phi 16$ και στη συνέχεια μετρήθηκε η ελεύθερη απόσταση ανάμεσα σε αυτή και το υψηλότερο σημείο του νωπού σκυροδέματος με ακρίβεια cm (εικόνα 4.9).

Αντίστοιχο μέτρο εργασιμότητας που αναφέρεται όμως στο Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα αποτελεί η εξάπλωση. Εξάπλωση είναι το μέτρο εργασιμότητας που εκφράζεται με τη μέση διάμετρο σε cm που αποκτά μια κωνική στήλη νωπού σκυροδέματος, η οποία μορφώθηκε επάνω στην τράπεζα εξάπλωσης, έπειτα από ορισμένο αριθμό αναπηδήσεων της τράπεζας. Συγκεκριμένα η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

Ο μεταλλικός κώλυρος κώνος πληρώθηκε με σκυρόδεμα (σε δύο στρώσεις) και συμπυκνώθηκε με καθορισμένο τρόπο (εικόνα 4.10). Ο κώνος ακολούθως αφαιρέθηκε κατακόρυφα προς τα επάνω. Μετά από την κατάρρευση σκυροδέματος που παρατηρήθηκε, η βάση ανυψώθηκε χειροκίνητα 15 φορές έως το δείκτη ανύψωσης και αφέθηκε να πέσει έως τους δείκτες πτώσης (εικόνα 4.11). Η εξάπλωση του σκυροδέματος μετρήθηκε παράλληλα προς τις πλευρές της βάσης διαμέσου του κέντρου της.



Εικόνα 4.8: Αφαίρεση κώνου κάθισης



Εικόνα 4.9: Διαδικασία και μέτρηση κάθισης



Εικόνα 4.10: Πλήρωση κώλυρου εξάπλωσης



Εικόνα 4.11: Χειροκίνητη ανύψωση βάσης

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της δοκιμής κάθισης – εξάπλωσης στις συνθέσεις που εξετάζουμε.

Πίνακας 4.12: Αποτελέσματα κάθισης-εξάπλωσης

Σύνθεση	Αναφοράς (C30/37)		Προσθήκη Αναστολέα Διάβρωσης		Λεπτόκοκκες Συνθέσεις	
	1.1	1.2 (Πρόσθετος Α.Δ.)	1.3 (Ψεκαζόμενος Α.Δ.)	2.1 (Γαρμπυλόδεμα)	2.2 (ΑΣΣ)	
Κάθιση - Εξάπλωση (cm)	2-3cm	4cm	2-3cm	4-5cm	60cm	

Πίνακας 4.13: Κατηγορίες δοκιμής κάθισης

Πρότυπο: EN 12350-2

Κατηγορίες δοκιμής Κάθισης Τάξη	Διαφορά ύψους σε mm
S1	10 έως 40
S2	50 έως 90
S3	100 έως 150
S4	160 έως 210
S5 ¹	≥ 220

Στις συνθέσεις 1.1, 1.2, 1.3, 2.1 πραγματοποιήθηκε δοκιμασία κάθισης, ενώ στην 2.2 (ΑΣΣ) δοκιμασία εξάπλωσης. Από τις τιμές που προέκυψαν και σύμφωνα με το πρότυπο EN:12350-2 γίνεται δυνατή η κατηγοριοποίηση των συνθέσεων στις ονομαζόμενες τάξεις κάθισης (πίνακας 4.13). Συγκεκριμένα οι συνθέσεις 1.1, 1.2, 1.3 συγκαταλέγονται στη S1 τάξη (1 έως 4 cm) ενώ η 2.1 , βρίσκεται στα όρια των κατηγοριών S1 και S2 (4-5cm). Η διαφοροποίηση αυτή έγκειται στο γεγονός ότι στα αδρανή των τριών πρώτων συνθέσεων συμμετέχει, εκτός των άλλων, και χαλίκι, κάτι που τις καθιστά περισσότερο χονδρόκοκκες και άρα πιο συμπαγείς, σε αντίθεση με το γαρμπυλόδεμα (2.1) που είναι πιο λεπτόκοκκο οπότε και περισσότερο ρευστό. Παρόλα αυτά, η ύπαρξη ποσότητας ρυζιού στα αδρανή του γαρμπυλομπετού είναι υπαίτια για τη διαμόρφωση της συγκρατημένη τιμής κάθισης του (4-5cm). Από την άλλη, τα 60 cm εξάπλωσης του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, αποτελούν μια πλήρως αναμενόμενη τιμή αν αναλογιστεί κανείς τη λεπτόκοκκη ταυτότητα και ρευστή του φύση.

Μερικό Συμπέρασμα (i)

Όπως αναμενόταν, παρατηρήθηκε πως οι πιο “λεπτές” δομές σκυροδέματος έδωσαν μεγαλύτερες τιμές κάθισης. Αυτό τα καθιστά περισσότερο εργάσιμα, πράγμα λογικό καθότι συνθέσεις όπως το ΑΣΣ έχουν αυξημένη ρευστότητα-εργασιμότητα με αποτέλεσμα να εκτελούν μόνα τους τη διαδικασία συμπύκνωσης χωρίς την ανάγκη εξωτερικής δόνησης. Επιπλέον τα χημικά πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν στο σχεδιασμό των συνθέσεων επηρέασαν τα αποτελέσματα τις κάθισης. Συγκεκριμένα, όπως παρατηρούμε από τις τιμές του πίνακα 4.12 η χρήση ρυθμιστή ιξώδους (VMA) οδήγησε σε αύξηση της εργασιμότητας και κατ’ επέκταση σε μεγαλύτερες τιμές κάθισης.

4.3.3 Ιδιότητες σκληρυμένης φάσης

Σκληρυμένο σκυροδέμα είναι αυτό το οποίο έχει σκληρυνθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε δεν είναι πια κατεργάσιμο. Βασικές ιδιότητες οπότε του σκληρυμένου σκυροδέματος δεν θα μπορούσαν να είναι άλλες από την μηχανική αντοχή την ανθεκτικότητα και το πορώδες. Με κεντρικό άξονα τις ιδιότητες αυτές και τον ΚΤΣ-2016, στόχος των πειραματικών μετρήσεων αποτέλεσε ο χαρακτηρισμός των 5 συνθέσεων και οι μεταξύ τους σύγκριση όσων αφορά την αντοχή σε θλίψη, την υδατοπερατότητα αλλά και την επιτελεστικότητα στη διείδυση χλωριόντων.

4.3.3.1 Θλιπτική αντοχή

Η αντοχή του σκυροδέματος σε μηχανική καταπόνηση θεωρείται ως η πιο σημαντική ιδιότητα του και εκφράζει την ικανότητα του υλικού να ανταπεξέλθει στη μηχανική καταπόνηση που υπόκειται. Η ποσοτική της εκτίμηση δίνεται σε μονάδες φορτίου ανά επιφάνεια (N/mm^2 ή MPa). Η αντοχή συνδέεται άμεσα με τη δομή της τσιμεντόπαστας και είναι μία αναντικατάστατη μεταβλητή στο σχεδιασμό των κατασκευών. Όπως έχει είδη αναφερθεί η αντοχή του σκυροδέματος, σε συγκεκριμένη ηλικία, συντήρηση και θερμοκρασία, θεωρείται ότι εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες: το λόγο νερού προς τσιμέντο και το βαθμό συμπύκνωσης (περιεκτικότητα σε τσιμέντο). Σύμφωνα με τον ΚΤΣ-2016 ο προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε με κυβικά δοκίμια και για κάθε σύνθεση από τρεις φορές. Μία στις 7 ημέρες ωρίμασης, μία στις 14 ημέρες και μία στις 28. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

Μετά από την συντήρηση των δοκιμίων στον υγρό θάλαμο (για 7-14-28 μέρες), θερμοκρασίας $20^{\circ}\pm 2^{\circ}C$ και σχετικής υγρασίας μεγαλύτερης του 95% τα δοκίμια τέθηκαν σε ετοιμότητα να υποστούν θραύση κατά τη δοκιμή θλίψης. Τα δοκίμια εξήλθαν του υγρού θαλάμου, σκουπίστηκαν επιφανειακά και ζυγίστηκαν με ακρίβεια 1 g. Έπειτα μετρήθηκαν με παχύμετρο οι διαστάσεις τους, σε 3 σημεία για κάθε πλευρά, και οι οποίες μάλιστα δεν απέκλιναν περισσότερο από ± 2 mm σε σχέση με την ονομαστική διάσταση των 150 mm.

Στη συνέχεια κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε εντός της διάταξης δοκιμής θλίψης και υπολογίστηκε η θλιβόμενη επιφάνεια (από το γινόμενο πλάτος x ύψος). Αξίζει σε αυτό το σημείο να υπενθυμίσουμε πως απαγορεύεται από τον Κ.Τ.Σ.-2016 η τοποθέτηση του δοκιμίου με την κατασκευαστική του επιφάνεια (αυτήν που ίσως το μυστρί) ανάμεσα στις πλάκες θλίψης, κάτι που αποφεύχθηκε. Μετά από αυτά ξεκίνησε η φόρτιση του δοκιμίου έως ότου η συσκευή καταγράψει το ανώτερο φορτίο πριν τη θραύση (δώθηκε σε τόνους). Από το προσδιορισθέν φορτίο θραύσης και το εμβαδόν της θλιβόμενης επιφάνειας, υπολογίστηκε η τάση θραύσης σε MPa, ως το πηλίκο των παραπάνω μεγεθών.

Σημαντικές παράμετροι για πετυχημένες μετρήσεις, οι οποίες και τηρήθηκαν, αποτελούν η ταχύτητα φόρτισης η οποία πρέπει να είναι μεταξύ $0,1 - 1 N/mm^2 \cdot s$ καθώς και η συνολική διάρκεια της δοκιμής (από την έναρξη εφαρμογής του φορτίου έως τη θραύση) η οποία δεν πρέπει να διαρκέσει λιγότερο από 30 s.

Στη συνέχεια ακολουθεί φωτογραφικό υλικό από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε βιομηχανικό εργαστήριο.



Εικόνα 4.14: Συσκευή μονοαξονικής θλίψης



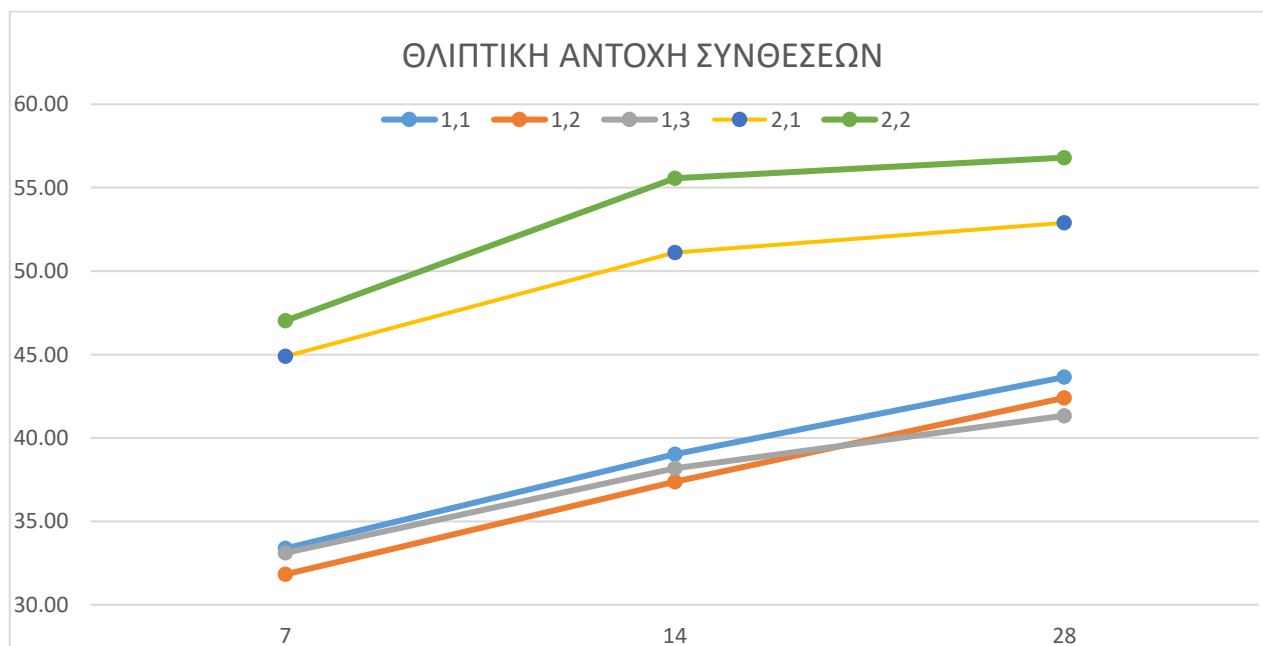
Εικόνα 4.15: Θλίψη κυβικού δοκιμίου

Στους παρακάτω πίνακες γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων..

Πίνακας 4.16: Αναλυτικά αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής

ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ				
ΗΜΕΡΕΣ ΩΡΙΜΑΝΣΗΣ:	7	14	28	
2.1. (ΓΑΡΜΠΥΛΟΔΕΜΑ)	101	115	119	(tn)
	44,89	51,11	52,89	(Mpa)
ΒΑΡΟΣ (gr)	7910	7985	8010	(gr)
1.3. (1+ΨΕΚΑΖ.)	74,5	85,9	93	(tn)
	33,11	38,18	41,33	(Mpa)
ΒΑΡΟΣ (gr)	7925	7925	8065	(gr)
1.2. (1+ΑΝΑΣΤ. ΔΙΑΒΡ.)	71,6	84,1	95,4	(tn)
	31,82	37,38	42,40	(Mpa)
ΒΑΡΟΣ (gr)	8095	7990	7980	(gr)
1.1 (C30/37)	75,1	87,8	98,2	(tn)
	33,38	39,02	43,64	(Mpa)
ΒΑΡΟΣ (gr)	7920	7960	8030	(gr)
2.2. (ΑΣΣ)	105,8	125	127,8	(tn)
	47,02	55,56	56,80	(Mpa)
ΒΑΡΟΣ (gr)	7860	7900	7958	(gr)

Πίνακας 4.17: Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής σε μορφή διαγράμματος



Από τους τρεις αυτούς πίνακες διακρίνει κανείς την ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων, σύμφωνα με το σκεπτικό που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Συγκεκριμένα όσον αφορά την περιεκτικότητα σε τσιμέντο: οι πιο χονδρόκοκκες συνθέσεις με λιγότερο τσιμέντο 1.1, 1.2, 1.3 παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές κάτι που είναι απολύτως λογικό αν αναλογιστεί κανείς την ομοιότητα των συνθέσεων. Επίσης παρουσιάζουν χαμηλότερη αντοχή σε σχέση με τις δύο άλλες συνθέσεις 2.1 και 2.2 οι οποίες υπερτερούν σημαντικά σε ποσότητα τσιμέντου. Την ορθότητα των προσδοκώμενων μετρήσεων έρχεται επίσης να επαληθεύσει, το δεδομένο των λόγων νερού προς τσιμέντου, οι οποίοι όσο μικρότεροι είναι τόσο ανθεκτικότερο καθιστούν το σκυρόδεμα.

Η σύνθεση του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος υπερτερώντας σε ποσότητα τσιμέντου και ταυτόχρονα παρουσιάζοντας μικρότερο λόγο νερού προς τσιμέντο επιδεικνύει επάξια τις μεγαλύτερες αντοχές. Αυτό φυσικά δεν υποτιμά τις υπόλοιπες συνθέσεις οι οποίες, ανεξαιρέτως, επέδειξαν σημαντικά υψηλές αντοχές.

Μερικό συμπέρασμα (ii)

Όπως διαφαίνεται από του Πίνακες αποτελεσμάτων (4.16, 4.17, 4.18) και κυρίως από τη γραφική απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης των θλιπτικών αντοχών (πίνακας 4.18) παρατηρούμε μια σαφή ομαδοποίηση των εξεταζόμενων συνθέσεων. Πιο αναλυτικά στη πρώτη ομάδα με τιμές από 41,33 έως 43,64 Μρα συγκαταλέγονται οι συνθέσεις με βάση το σκυρόδεμα C30/37 (1.1, 1.2 και 1.3) το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός πως και οι 3 συνθέσεις έχουν κοινά χαρακτηριστικά (λόγος Ν/Τ, περιεκτικότητα τσιμέντου, κλάσμα αδρανών). Σε μια δεύτερη ομάδα και μια τάξη μεγέθους παραπάνω από τις προηγούμενες (52,9-56,8 Μρα) συναντάμε τις πιο "λεπτές" δομές (2.1 και 2.2). Ο συγκριτικά μειωμένος λόγος Ν/Τ, η περιεκτικότητα του τσιμέντου αλλά και η απουσία αδρανών με διάμετρο >16mm προσδίδει στις συνθέσεις 2.1 και 2.2 τις ψηλές αυτές τιμές θλιπτικής αντοχής που παρατηρούμε.

4.3.3.2 Υδατοπερατότητα

Το σκυρόδεμα, όπως και οι φυσικοί λίθοι, δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές και πλήρες, αλλά περιέχει πλήθος από εσωτερικές κοιλότητες. Οι κοιλότητες αυτές είναι κενές από στερεό υλικό και το σύνολό τους αποτελεί το πορώδες του σκυροδέματος. Οι κοιλότητες αυτές μπορεί να περιέχουν αέρα ή να είναι γεμάτες με νερό. Η υδατοπερατότητα αποτελεί μια αξιόπιστη μέθοδο σύγκρισης του πορώδους διαφορετικών συνθέσεων σκυροδέματος. Η δοκιμή της διείσδυσης νερού υπό πίεση γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 12390-8 και πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο σκυροδέματος της βιομηχανίας DOMYLCO.

Κατά τη μέθοδο αυτή, το κυβικό δοκίμιο στερεώθηκε σε κατάλληλο τρίποδο όπου εισέρχονταν νερό από την κάτω επιφάνεια του δοκιμίου. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε σταθερή πίεση 5 bars για 72 ώρες. Μετά το πέρας των 72 ωρών το δοκίμιο αφαιρέθηκε από τη συσκευή και θραύστηκε στη μέση προκειμένου να καταγραφεί το βάθος που έχει διεισδύσει το νερό στο εσωτερικό του.

Βασική προϋπόθεση για τις επιτυχημένες μετρήσεις, αποτέλεσε το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της δοκιμής διατηρούνταν σταθερή η πίεση αλλά και ελέγχονταν συστηματικά τυχόν ύπαρξη πλευρικής απώλειας νερού. Στη συνέχεια ακολουθεί φωτογραφικό υλικό από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου της εταιρείας DOMYLCO.



Εικόνα 4.18: Διάταξη δοκιμής υδατοπερατότητας (κατά EN 12390-8)

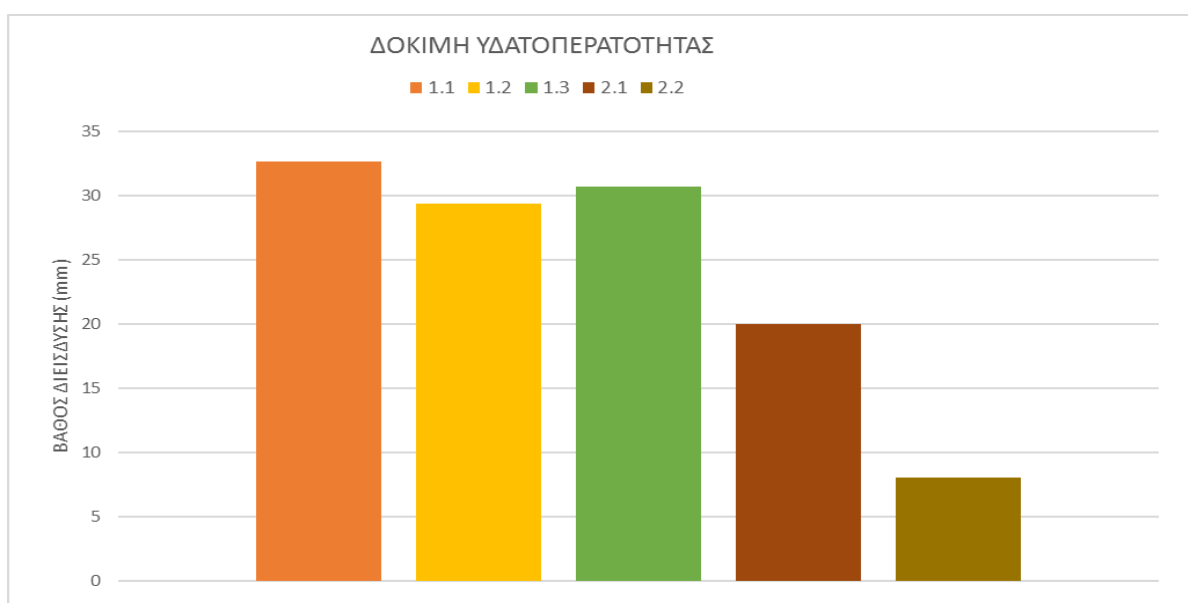


Εικόνα 4.19: Μέτρηση βάθους διείσδυσης

Στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων τα οποία, δεν πρέπει να παραληφθεί, πως προέρχονται από οπτικές παρατηρήσεις, οι οποίες με τη σειρά τους ερμηνεύονται αριθμητικά, με τη χρήση του μέτρου, ως βάθος διείσδυσης.

Πίνακας 4.20: Αποτελέσματα υδατοπερατότητας (κατά EN 12390-8)

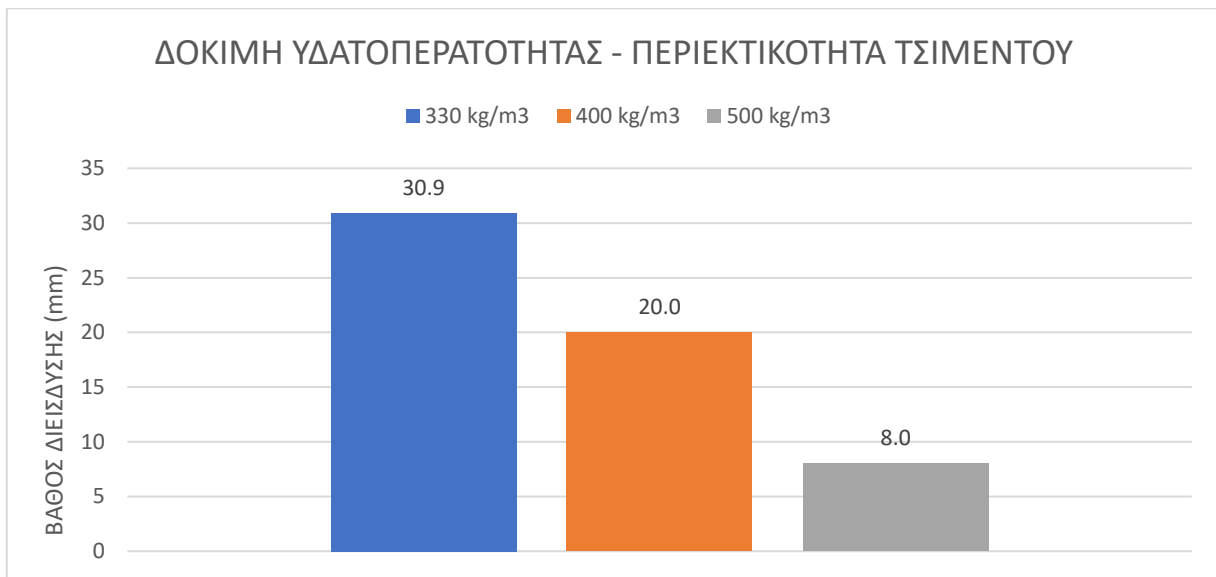
ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ - DOMYLCO					
ΣΥΝΘΕΣΗ	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2
	Αναφοράς (C30/37)	Πρόσθετος Α.Δ.	Ψεκαζόμενος Α.Δ.	Γαρμπυλόδεμα	ΑΣΣ
Υδατοπερατότητα (mm) - 1	32	36	33	17	9
Υδατοπερατότητα (mm) - 2	31	28	28	18	8
Υδατοπερατότητα (mm) - 3	35	24	31	25	7
Υδατοπερατότητα - Μ.Ο.	32,7	29,3	30,7	20,0	8,0
ΑΝΑ ΠΕΡΙΕΚΤ. ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	30,9			20,0	8,0
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ ΔΙΑΒΡ.	32,7	29,3	30,7		
ΕΠΙΔΡΑΣΗ Ν/Τ	28,2				8,0



Σχεδιάγραμμα 4.21: Μέτρηση βάθους διείσδυσης νερού σε mm

Στον παραπάνω πίνακα, εκτός από τα επιμέρους αποτελέσματα της κάθε σύνθεσης, δημιουργήθηκαν, για μεγαλύτερη κατανόηση και καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, τρεις συγκριτικές καταστάσεις.

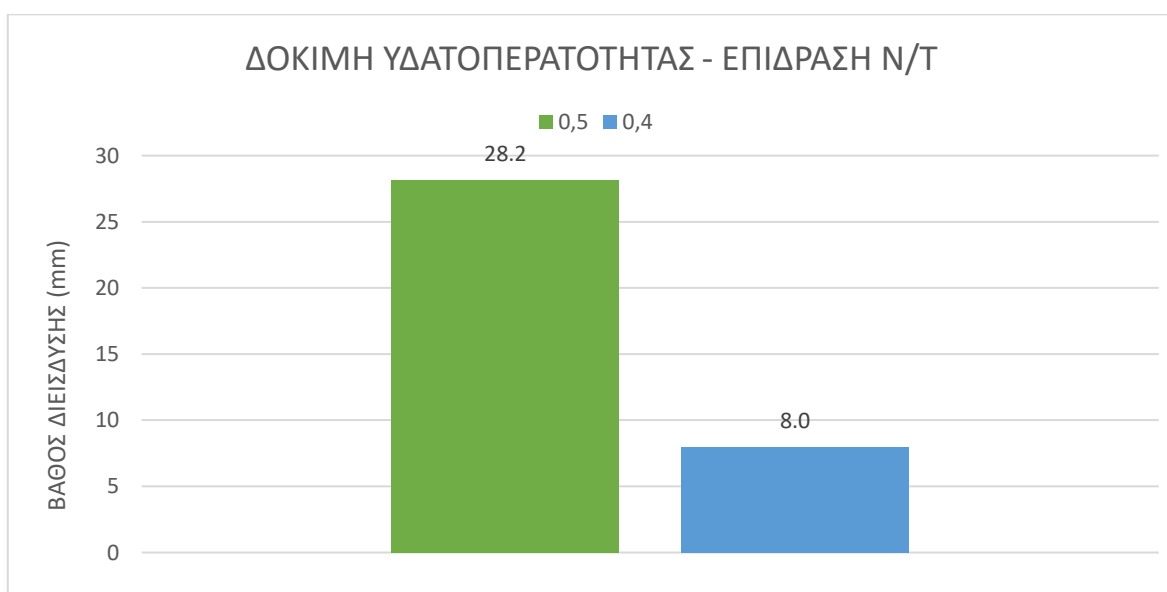
1) Υδατοπερατότητα - Περιεκτικότητα τσιμέντου



Σχεδιάγραμμα 4.22: Επίδραση περιεκτικότητας τσιμέντου στην υδατοπερατότητα

Η πρώτη διαπραγματεύεται την υδατοπερατότητα σε σχέση με την περιεκτικότητα των συνθέσεων σε τσιμέντο. Δημιουργούνται οπότε, αυτομάτως τρεις επιμέρους ομάδες. Στην πρώτη συναντά κανείς τις συνθέσεις 1.1, 1.2, 1.3 με 330 Kg/m³ τσιμέντο. Στη δεύτερη το Γαρμπυλομπετό (2.1) με 400 Kg/m³ τσιμέντο και στη τρίτη το ΑΣΣ (2.2) με 500 Kg/m³ τσιμέντο. Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα των μετρήσεων (για 330, 400 και 500 kg/m³ τσιμέντου έχουμε αντίστοιχα 30.9 > 20 > 8 βάθος διείσδυσης), όσο περισσότερο τσιμέντο περιέχει μια σύνθεση τόσο μικρότερη είναι η υδατοπερατότητα που τη χαρακτηρίζει (καλύτερη προστασία από εξωτερικούς βλαβερούς παράγοντες).

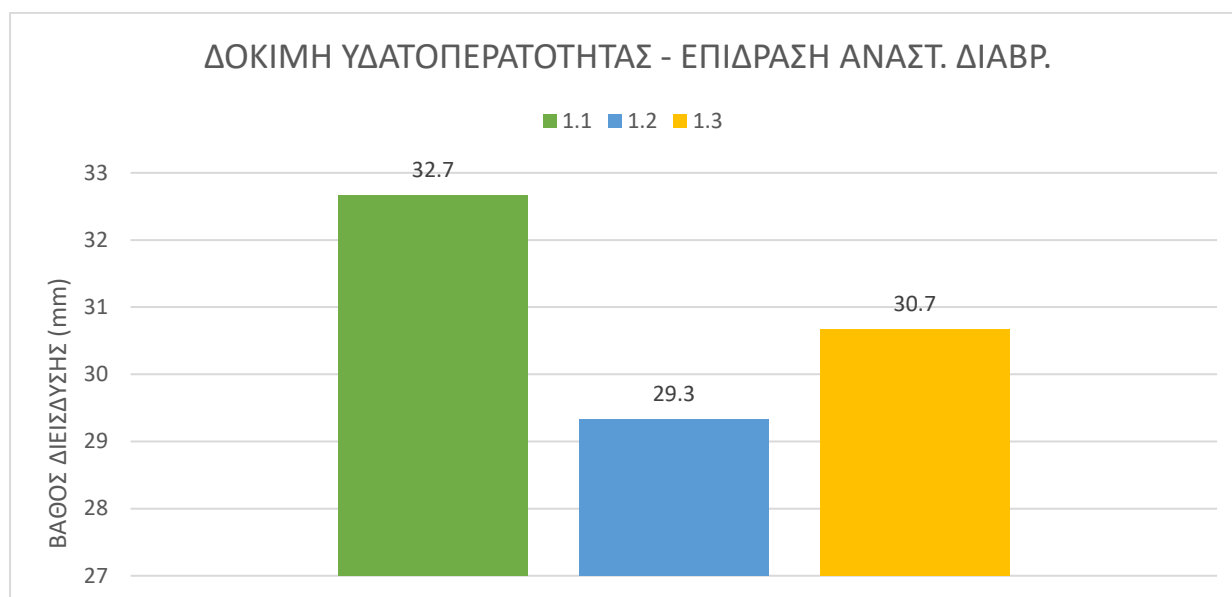
2) Υδατοπερατότητα - Λόγος Ν/Τ



Σχεδιάγραμμα 4.23: Επίδραση λόγου Ν/Τ στην υδατοπερατότητα

Η δεύτερη διαπραγματεύεται την υδατοπερατότητα σε σχέση με την επίδραση του λόγου νερό προς τσιμέντο. Σε παρόμοια λογική με την πρώτη συγκριτική κατάσταση όσο χαμηλότερος ο λόγος N/T τόσο μικρότερη η υδατοπερατότητα των κυβικών δοκιμίων. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι τέσσερις πρώτες συνθέσεις έχουν λόγο νερού προς τσιμέντο περίπου ίσο με 0,5 σε αντίθεση με το ΑΑΣ το οποίο έχει 0,40 ,γίνεται αντιληπτό πως τα δοκίμια του ΑΑΣ έχουν μικρότερη πορώδες. Τα πειραματικά αποτελέσματα όπως προέκυψαν από τη δοκιμή υδατοπερατότητας επιβεβαιώνουν τον εν λόγω ισχυρισμό καθώς οι τιμές δείχνουν απόλυτη αναλογία λόγου N/T και βάθους διείσδυσης.

3) Υδατοπερατότητα - Αναστολέας διάβρωσης



Σχεδιάγραμμα 4.24: Επίδραση αναστολέα διάβρωσης στην υδατοπερατότητα

Η τρίτη συγκριτική κατάσταση έχει να κάνει με την επίδραση του αναστολέα διάβρωσης σε όμοιες συνθέσεις (C30/37) σαν και τις 1.1, 1.2 και 1.3. Όπως φαίνεται από την ανάλυση των συνθέσεων, (πίνακας 4.5) η μόνη διαφορά των τριών αυτών συνταγών είναι η προσθήκη στην 1.2 αναστολέα διάβρωσης μέσα στο μίγμα (4% κατά βάρος του τσιμέντου), και ο ψεκάσμος των αντίστοιχων ώριμων δοκιμίων (28 ημερών) της 1.3 επίσης με αναστολέα διάβρωσης ο οποίος διεισδύει στο μπετόν και αντιδρά με αυτό, σχηματίζοντας κρυστάλλους που κλείνουν πόρους και ενισχύουν τη σκληρότητα. Τα δοκίμια της 1.1 (δοκίμια αναφοράς) δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ούτε ψεκάστηκαν με αυτόν.

Μερικό συμπέρασμα (iii)

Οι μετρήσεις αυτές αποκτούν νόημα καθώς οδηγούν σε ασφαλή συμπεράσματα για το πορώδες της κάθε σύνθεσης. Έχοντας ως κοινό παρονομαστή, για όλες τις σκυροδετήσεις,

- την καλή ποιότητα και καθαριότητα των αδρανών (για καλύτερη προσκόλληση της τσιμεντοκονίας
- την αποτελεσματική συμπύκνωση του νωπού σκυροδέματος
- την καλή συντήρηση των δοκιμίων κατά τη διάρκεια της πήξης

καταλήγουμε στα εξής:

- Όπως παρατηρούμε στο σχεδιάγραμμα 4.23, αύξηση της περιεκτικότητας τσιμέντου σε μια σύνθεση οδηγεί σε μικρότερη τιμή βάθους διείσδυσης του νερού και κατ' επέκταση καλύτερη στεγανωτική συμπεριφορά.
- Από το σχεδιάγραμμα 4.24 διαπιστώνουμε πως μειωμένος λόγος N/T οδηγεί σε σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα υδατοπερατότητας. Συγκεκριμένα παρατηρούμε πως σε μια σχετικά μικρή αλλαγή λόγου N/T (0,4 έναντι 0,5) η διαπερατότητα της σύνθεσης παρουσιάζεται σημαντικά βελτιωμένη (8 έναντι 28,2 mm) σε μία διαφορά της τάξεως του 35%.
- Τέλος παρατηρούμε πως η προσθήκη αναστολέα διάβρωσης είτε ως πρόσθετο είτε σε ψεκαζόμενη μορφή δεν αλλάζει ιδιαιτέρως τη συμπεριφορά της σύνθεσης παρουσιάζοντας ωστόσο μια μικρή βελτίωση (29.3 και 30.7 έναντι 32.7mm).

4.3.3.3 Επιταχυνόμενη διείσδυση χλωριόντων (ASTM.1202-Proovelt)

Η μέθοδος ASTM C 1202, είναι μία μέθοδος επιταχυνόμενης μέτρησης διαπερατότητας χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Σκοπός της μεθόδου είναι η εκτίμηση της διαπερατότητας ηλεκτρικού φορτίου από τη μάζα του σκυροδέματος (ηλεκτρική αγωγιμότητα σκυροδέματος). Η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που διαπερνά το σκυρόδεμα αποτελεί μία ένδειξη της ανθεκτικότητάς του σκυροδέματος στη διείσδυση χλωριόντων. Η πειραματική διαδικασία της μεθόδου που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

Στη φάση αυτή, χρησιμοποιήθηκαν 2 κυλινδρικά δοκίμια Φ100 ύψους 200 mm αφού πρώτα όμως αποκόπηκε ένας δίσκος πάχους 25 χιλιοστών από την πάνω επιφάνεια κάθε πυρήνα διαστάσεων Φ100 x 200mm με υγρή κοπή ώστε να περιοριστούν, στα προς μέτρηση δοκίμια, οι όποιες ανομοιογένειες προκλήθηκαν κατά τη διαδικασία της συμπύκνωσης. Έπειτα από κάθε πυρήνα αποκόπηκε και ένας δίσκος πάχους 50mm (εικόνα 4.26). Οι τελικές διαστάσεις των δοκιμών επί των οποίων πραγματοποιήθηκε η μέτρηση διαπερατότητας χλωριόντων ήταν Φ100 x 50mm. Τα δοκίμια στη συνέχεια μεταφέρθηκαν εντός του θαλάμου κενού και ενώ βρισκόντουσαν υπό κενό, πληρώθηκαν με απαερισμένο νερό για 18 περίπου ώρες υπό συνθήκες εργαστηριακού περιβάλλοντος. Τα δοκίμια μετά το πέρας των 18 ωρών, τοποθετήθηκαν στη συσκευή μέτρησης (εικόνα 4.27). Τα διαλύματα που τοποθετήθηκαν στην άνοδο και την κάθοδο του κελιού είναι 0,3N καυστικό νάτριο και 3% βάρος κατά όγκο χλωριούχο νάτριο αντίστοιχα. Ο αρνητικός ακροδέκτης συνδέθηκε με το ηλεκτρόδιο στο διάλυμα NaCl και ο θετικός ακροδέκτης συνδέθηκε με το ηλεκτρόδιο στο διάλυμα NaOH.

Οι συνθήκες υπό τις οποίες διεξήχθη η μέτρηση είναι η εξής:

- Διάρκεια πειράματος 6 ώρες
- Εφαρμοσμένη τάση 60 Volt
- Ανώτατη επιτρεπόμενη θερμοκρασία διαλύματος NaCl 90 °C

κατά τη διάρκεια της μέτρησης καταγράφονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα το ρεύμα που διαπερνούσε το δοκίμιο και η θερμοκρασία των διαλειμμάτων. Αφού η μέτρηση ολοκληρώθηκε σημειώθηκε η τελική τιμή του ρεύματος και της θερμοκρασίας. Στο Παράρτημα της παρούσας εργασίας επισυνάπτονται τα αρχεία με τα αποτελέσματα όπως εξάγονται από τη συσκευή Proove-it.



Εικόνα 4.25: Κοπή κυλινδρικών δοκιμίων



Εικόνα 4.26: Διάταξη συστήματος PROOVE-IT

Έπειτα εφαρμόστηκαν οι τιμές του ρεύματος που καταγράφηκαν στην παρακάτω εξίσωση υπολογίζοντας έτσι το συνολικό φορτίο που πέρασε μέσα από το δοκίμιο.

$$Q = 900 \cdot (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360})$$

Όπου:

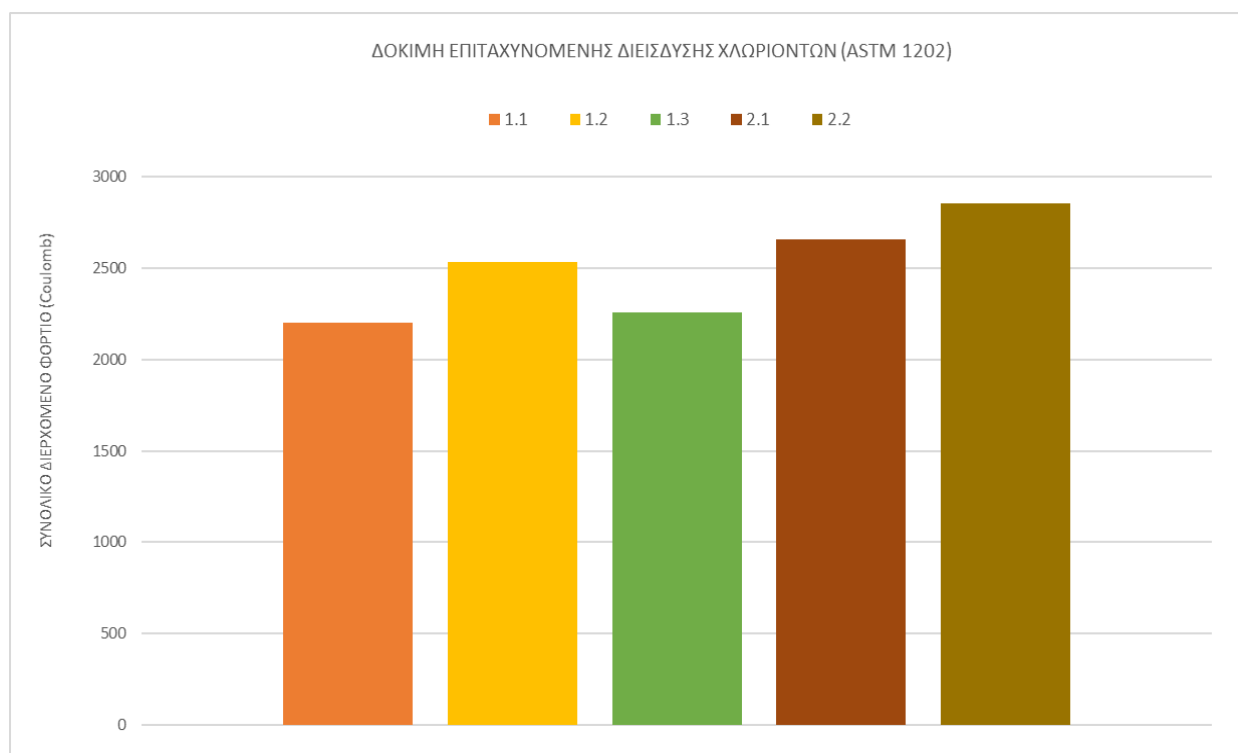
- Q (σε coulomb) το συνολικό φορτίο που πέρασε μέσα από το δοκίμιο κατά τη διάρκεια της μέτρησης
- I_0 (σε ampere) η αρχική ένταση του ρεύματος που καταγράφηκε τη στιγμή που εφαρμόστηκε τάση 60 Volt στο δοκίμιο
- I_t (σε ampere) Η ένταση του ρεύματος που καταγράφηκε σε χρονικό διάστημα t από τη στιγμή που εφαρμόστηκε στο δοκίμιο τάση 60 Volt.

Το ηλεκτρικό φορτίο που διαπέρασε τα δοκίμια της κάθε σύνδεσης κατά την πραγματοποίηση της μέτρησης διαπερατότητας χλωριόντων παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.27: Αποτελέσματα μετρήσεων διαπερατότητας χλωριόντων (ASTM 1202)

ΣΥΝΘΕΣΗ	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2
	Αναφοράς (C30/37)	Πρόσθετος Α.Δ.	Ψεκαζόμενος Α.Δ.	Γαρμπυλόδεμα	ΑΣΣ
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ (Coulomb) - 1	2179	2491	2403	2703	2937
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ (Coulomb) - 3	2229	2573	2117	2618	2777
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ - Μ.Ο.	2204,0	2532,0	2260,0	2660,5	2857,0
ΑΝΑ ΠΕΡΙΕΚΤ. ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	2332,0			2660,5	2857,0
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ ΔΙΑΒΡ.	2204,0	2532,0	2260,0		
ΕΠΙΔΡΑΣΗ Ν/Τ	2414,1				2857,0

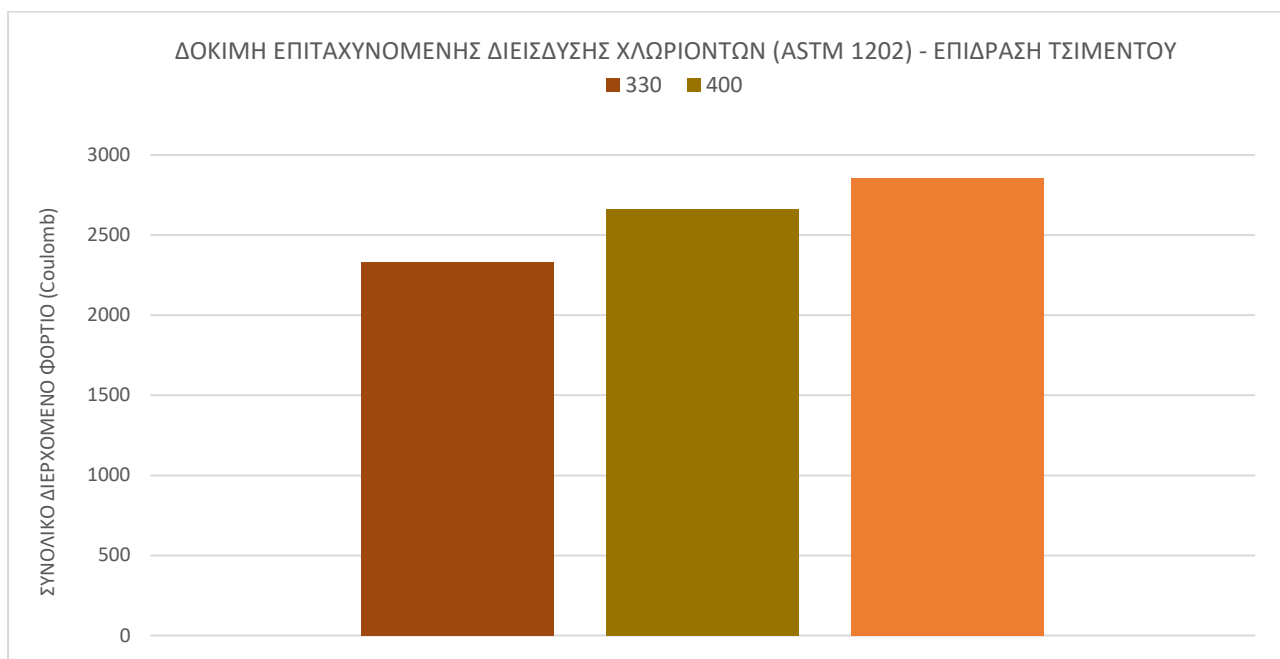
Οι ίδιες μετρήσεις παρουσιάζονται συγκεντρωτικά και συγκριτικά στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχεδιάγραμμα 4.28: Συγκριτικά αποτελέσματα συνολικά διερχόμενου φορτίου Coulomb

Στον πίνακα 4.28, εκτός από τα επιμέρους αποτελέσματα της κάθε σύνθεσης, δημιουργήθηκαν, για μεγαλύτερη κατανόηση και καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, τρεις συγκριτικές καταστάσεις όπως έγινε και στις προηγούμενες δοκιμές. Με την ίδια λογική λοιπόν και σύμφωνα με τα διαγράμματα για την κάθε περίπτωση έχουμε τα εξής:

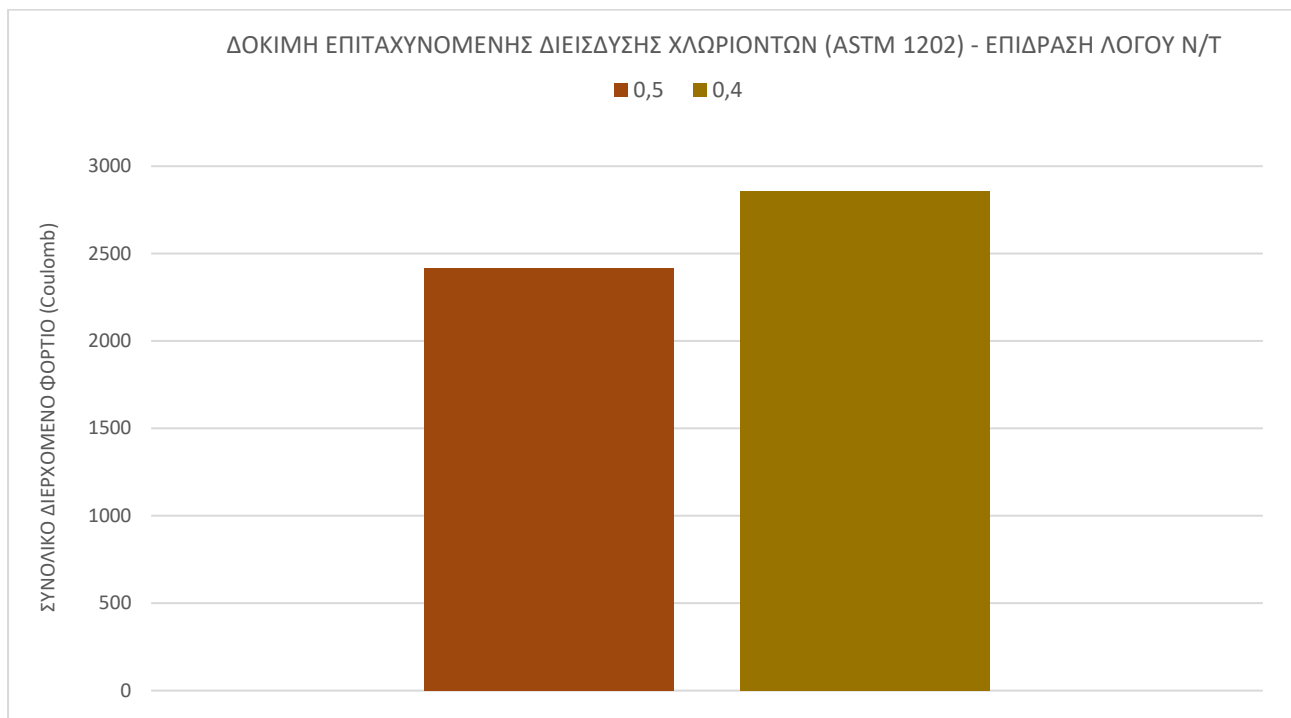
1) Διαπερατότητα χλωριόντων - Περιεκτικότητα τσιμέντου



Σχεδιάγραμμα 4.29: Διαπερατότητα χλωριόντων – επίδραση περιεκτικότητας τσιμέντου

Στην πρώτη περίπτωση εξετάζεται η διαπερατότητα των χλωριόντων σε σχέση με την περιεκτικότητα των συνθέσεων σε τσιμέντο. Δημιουργούνται οπότε αυτομάτως τρεις επιμέρους ομάδες. Στην πρώτη συναντά κανείς, όπως και σε προηγούμενες μεθόδους, τις συνθέσεις 1.1, 1.2, 1.3 με 330 kg/m³ τσιμέντο. Στη δεύτερη το Γαρμπιλομπετό (2.1) με 400 kg/m³ τσιμέντο και στη τρίτη το ΑΣΣ (2.2) με 500 kg/m³ τσιμέντο. Το παράδοξο των μετρήσεων έγκειται στη κοκκομετρία των συνθέσεων και όχι στην περιεκτικότητα τους σε τσιμέντο. Πιο συγκεκριμένα, οι μη αναμενόμενες χαμηλές τιμές των συνθέσεων 1.1, 1.2, 1.3 οφείλονται στο περιεχόμενο μεγάλων κλασμάτων αδρανών. Κάτι το οποίο, κατά την κοπή των κυλινδρικών δοκιμίων έπαιξε καθοριστικό ρόλο, καθώς η ενεργή επιφάνεια της διατομής μειώνεται σημαντικά. Τα αδρανή όπως εντοπίζουμε και στη βιβλιογραφία φράζουν τη διαπερατότητα του ηλεκτρικού ρεύματος και κατ' επέκταση δίνουν χαμηλότερες τιμές σε δοκιμές όπως αυτή που πραγματοποιήθηκε (κατά ASTM 1202).

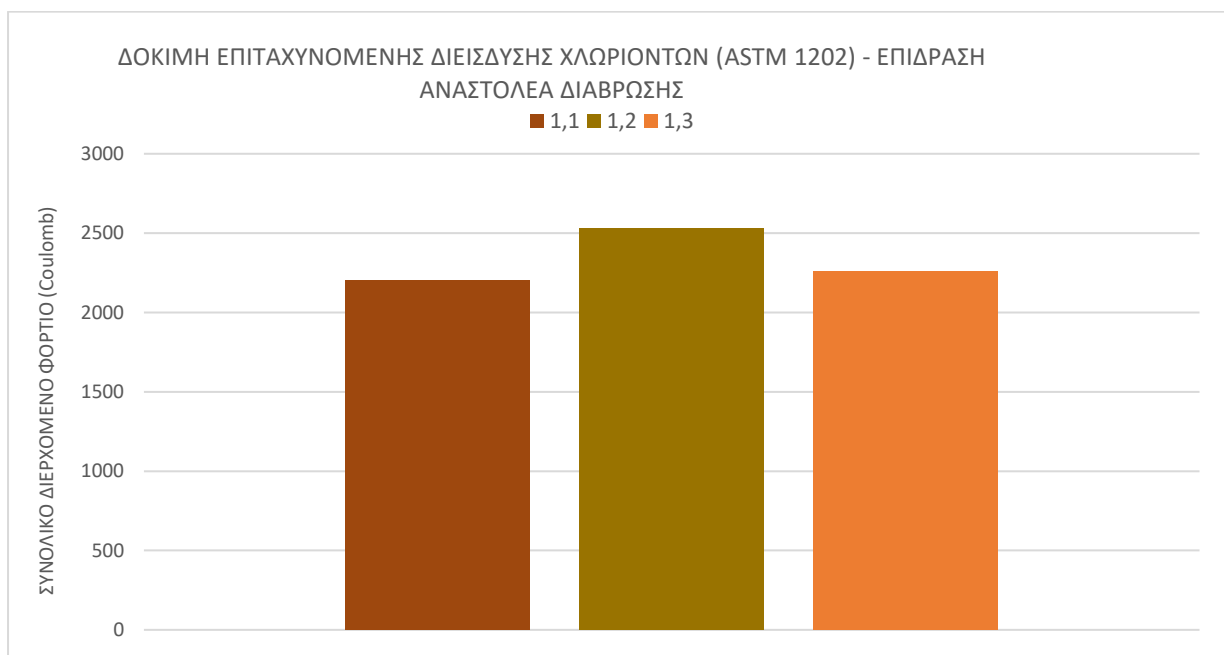
2) Διαπερατότητα χλωριόντων – Λόγος W/C



Σχεδιάγραμμα 4.30: Διαπερατότητα χλωριόντων – επίδραση λόγου W/C

Στην δεύτερη περίπτωση εξετάζεται η διαπερατότητα των χλωριόντων σε σχέση με την επίδραση του λόγου νερό προς τσιμέντο. Γενικότερα ο λόγος νερού προς τσιμέντο σχετίζεται με τη μεταβολή της διαπερατότητας των χλωριόντων μέσα από το σκυρόδεμα και μάλιστα όσο ο λόγος αυξάνεται, η διαπερατότητα των χλωριόντων αυξάνεται και αυτή, αφού ισχύει η σχέση: υψηλός λόγος Ν/Τ => υψηλό πορώδες. Όπως παρατηρεί κανείς τα πειραματικά αποτελέσματα δεν συνάδουν με τη θεωρία για τον ίδιο λόγο που αναφέρθηκε προηγουμένως. Τα «απροσπέλαστα» αδρανή στην διατομή των δοκιμίων δεν επέτρεψαν στο ηλεκτρικό ρεύμα να διαπεράσουν το σκυρόδεμα.

3) Διαπερατότητα χλωριόντων – Αναστολέας διάβρωσης



Σχεδιάγραμμα 4.31: Διαπερατότητα χλωριόντων – επίδραση αναστολέα διάβρωσης

Η τρίτη συγκριτική κατάσταση εξετάζει την επίδραση του αναστολέα διάβρωσης σε όμοιες συνθέσεις (1.1, 1.2 και 1.3). Όπως φαίνεται από τις συνθέσεις, (πίνακας 4.5) η διαφορά των τριών αυτών συνταγών είναι η προσθήκη αναστολέα διάβρωσης στην 1.2 μέσα στο μίγμα (4% κ.β. τσιμέντου), και ο ψεκάσμος των αντίστοιχων ώριμων δοκιμίων (28 ημερών) της 1.3. Τα δοκίμια της 1.1 δεν περιέχουν αναστολέα διάβρωσης ούτε ψεκάστηκαν με αυτόν (δοκίμια αναφοράς). Το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που διαπερνά τις εν λόγω συνθέσεις παρατηρούμε ότι είναι στα ίδια επίπεδα (2200-2500 Coulomb). Αυτό οφείλεται στην ομοιότητα των συνθέσεων (ίδια βάση σκυροδέματος C30/37) καθότι το πορώδες και ο λόγος νερού/τσιμέντο είναι κοινός. Η ενίσχυση της αντιδιαβρωτικής συμπεριφοράς των συνθέσεων με αναστολέα δεν διαφαίνεται καθώς στην συγκεκριμένη μέτρηση γίνεται εκτίμηση της διαπερατότητας των συνθέσεων και όχι ξεκάθαρα της αντιδιαβρωτικής συμπεριφοράς. Όπως παρατηρείται και στη βιβλιογραφία, δεν παρατηρούνται διαφορές στα αποτελέσματα των συνθέσεων που έχουν ίδια βάση σκυροδέματος. Με βάση αυτά μπορούμε να ερμηνεύσουμε το γεγονός πως τα αποτελέσματα είναι στην ίδια κατηγορία μεγέθους (2200-2500 Coulomb), παρουσιάζουν δηλαδή παρόμοια συμπεριφορά στην επιταχυνόμενη διείσδυση χλωριόντων στο εσωτερικό τους.

4.3.3.4 Διείσδυση CO₂ (Θάλαμος Ενανθράκωσης)

Η διαδικασία της ενανθράκωσης πραγματοποιήθηκε στο Πολυτεχνείο της Ξάνθης τη καλοκαιρινή περίοδο του έτους 2019.

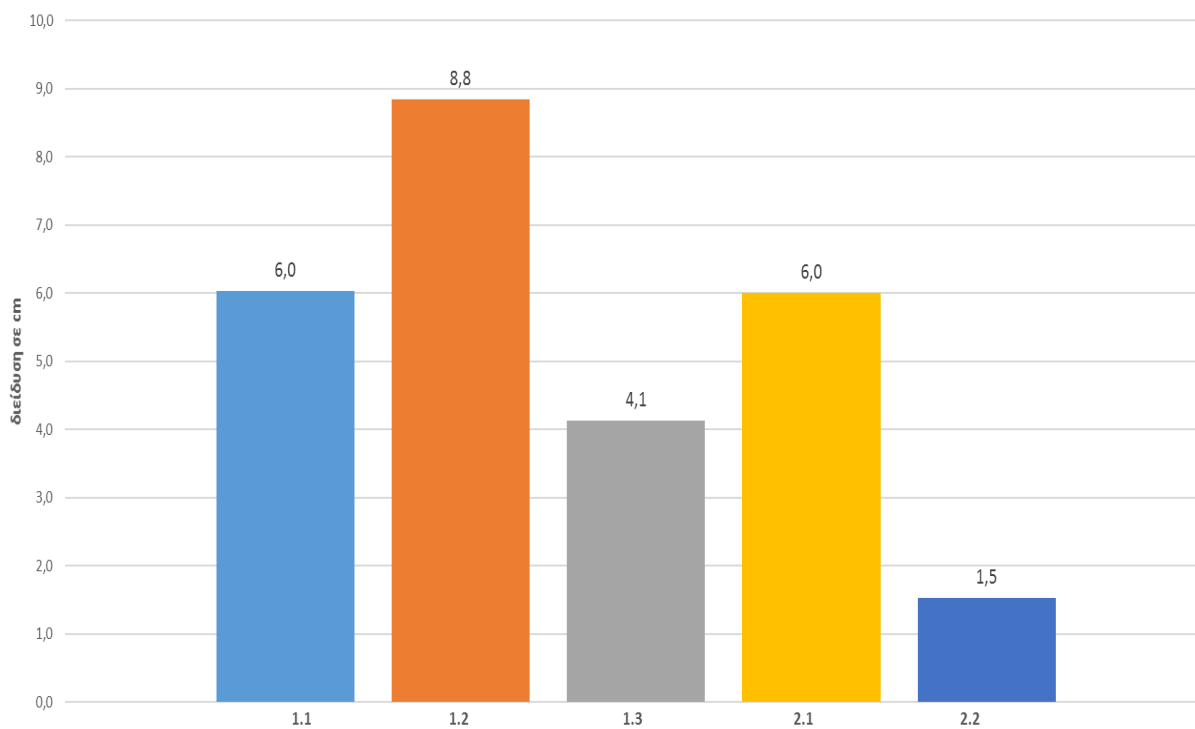
Στη δοκιμή αυτή υποβλήθηκαν τέσσερα κυβικά δοκίμια από κάθε σύνθεση.

Τα δοκίμια παρέμειναν στον θάλαμο ενανθράκωσης για 66 ημέρες.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων, του βάθους διείσδυσης δηλαδή του CO₂ στο σκυρόδεμα, φαίνονται αναλυτικά τόσο στον παρακάτω πίνακα όσο και στο διάγραμμα 4.33.

Πίνακας 4.32: Αποτελέσματα μετρήσεων ενανθράκωσης

Συνθέσεις	Σύνθεση 1.1 (Αναφοράς)	Σύνθεση 1.2 (Πρόσθετος Α.Δ)	Σύνθεση 1.3 (Ψεκαζόμενος Α.Δ)	Σύνθεση 2.1 (Γαρμπυλόδεμα)	Σύνθεση 2.2 (ΑΣΣ)
Μέσοι όροι μετρήσεων	6,0 cm	8,8 cm	4,1 cm	6,0 cm	1,5 cm



Σχεδιάγραμμα 4.33: Αποτελέσματα μετρήσεων ενανθράκωσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, επιχειρείται να δοθεί μια ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις 5 συνθέσεις που ακολουθούν.

- **Σύνθεση 1.1** – Σκυρόδεμα αναφοράς (C30/37) – περιέχει 330 kg/m^3 τσιμέντο CEM II 42.5 και μεγαλύτερα κλάσματα αδρανών.
- **Σύνθεση 1.2** – Σκυρόδεμα (C30/37) με προσθήκη αναστολέα διάβρωσης (4% κ.β. τσιμέντου) – περιέχει 330 kg/m^3 τσιμέντο CEM II 42.5 και μεγαλύτερα κλάσματα αδρανών.
- **Σύνθεση 1.3** – Σκυρόδεμα (C30/37) ψεκαζόμενο με αναστολέα διάβρωσης (4% κ.β. τσιμέντου) – περιέχει 330 kg/m^3 τσιμέντο CEM II 42.5 και μεγαλύτερα κλάσματα αδρανών.
- **Σύνθεση 2.1** – Γαρμπυλόδεμα – περιέχει 400 kg/m^3 τσιμέντο CEM II 42.5 και περιέχει μικρότερα κλάσματα αδρανών.
- **Σύνθεση 2.2** – Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ) – περιέχει 400 kg/m^3 τσιμέντο CEM II 42.5 και επιπλέον 100 kg/m^3 τσιμέντο CEM IV 32.5 ενώ είναι λεπτόκοκκο.

Έτσι, τα γενικά συμπεράσματα συνοψίζονται όπως παρακάτω:

- Όπως αναμενόταν, παρατηρήθηκε πως οι πιο “λεπτές” δομές σκυροδέματος, αυτές δηλαδή με μικρότερα κλάσματα αδρανών – Γαρμπυλόδεμα και ΑΣΣ – έδωσαν μεγαλύτερες τιμές κάθισης/εξάπλωσης (4-5cm και 60cm αντιστοίχως). Αυτό τα καθιστά περισσότερο εργάσιμα, πράγμα που επαληθεύτηκε και κατά την συμπύκνωση των συγκεκριμένων συνθέσεων στα δοκίμια, μιας και έγινε ελάχιστη χρήση της τράπεζας δονήσεως.
- Επιπλέον τα χημικά πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν στο σχεδιασμό των συνθέσεων επηρέασαν τα αποτελέσματα της κάθισης. Συγκεκριμένα, όπως παρατηρούμε από τις τιμές, η προσθήκη του ρυθμιστή ιξώδους VMA ($0,5 \text{ kg/m}^3$ σε Γαρμπυλόδεμα και ΑΣΣ) οδήγησε σε αύξηση της εργασιμότητας και κατεπέκταση σε μεγαλύτερες τιμές κάθισης.
- Όσο αφορά τη θλιπτική αντοχή, οι συνθέσεις με βάση το σκυρόδεμα C30/37 (1.1, 1.2 και 1.3) παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές (από 41,33 έως 43,64 Mpa), το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός πως και οι 3 συνθέσεις έχουν κοινά χαρακτηριστικά (λόγος N/T, περιεκτικότητα τσιμέντου, κλάσμα αδρανών). Παράλληλα οι συνθέσεις με πιο “λεπτές” δομές (2.1 και 2.2) παρουσιάζουν αντοχές (52,9-56,8 Mpa) ανώτερες των τριών πρώτων. Ο συγκριτικά μειωμένος λόγος N/T, η περιεκτικότητα του τσιμέντου αλλά και η απουσία αδρανών με διάμετρο $>16\text{mm}$ προσδίδει στις συνθέσεις υψηλές αντοχές.

- Σύμφωνα με τις μετρήσεις, μπορεί επίσης να εξαχθεί το συμπέρασμα πως η θλιπτική αντοχή επηρεάζεται αρνητικά από την αύξηση του μεγέθους των αδρανών. Όσο πιο χονδρόκοκκο είναι ένα σκυρόδεμα τόσο πιο εύθραυστο είναι. Το ΑΣΣ για παράδειγμα διαθέτει την χαμηλότερη κοκκομετρία και ταυτόχρονα την μεγαλύτερη αντοχή.
- Επίσης, η ηλικία του σκυροδέματος για τον ίδιο λόγο νερού προς τσιμέντο σχετίζεται ανάλογα με τη μεταβολή της αντοχής σε θλίψη αφού όσο μεγαλύτερη η ηλικία του σκυροδέματος τόσο μεγαλύτερη η αντοχή του. Κάτι που φαίνεται από όλες τις μετρήσεις κάθε σύνθεσης. Πιο συγκεκριμένα οι θλιπτική αντοχή των δοκιμίων στις 28 ημέρες ήταν μεγαλύτερη από αυτή στις 14 ημέρες και το αντίστοιχο για τις μετρήσεις των 7 ημερών.
- Όπως παρατηρούμε από τη διαφοροποίηση των τιμών της υδατοπερατότητας για την κάθε σύνθεση (για 330, 400 και 500 kg/m³ τσιμέντου έχουμε αντίστοιχα 30.9 > 20 > 8 βάθος διείσδυσης), αύξηση τις περιεκτικότητας τσιμέντου οδηγεί σε μικρότερη τιμή βάθους διείσδυσης του νερού και κατ' επέκταση σε καλύτερη στεγανωτική συμπεριφορά (καλύτερη προστασία από εξωτερικούς βλαβερούς παράγοντες).
- Πέρα από αυτό διαπιστώνουμε πως μειωμένος λόγος Ν/Τ οδηγεί σε σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα υδατοπερατότητας. Συγκεκριμένα παρατηρούμε πως σε μια σχετικά μικρή αλλαγή λόγου Ν/Τ (0,4 έναντι 0,5) η διαπερατότητα της σύνθεσης παρουσιάζεται σημαντικά βελτιωμένη (8 έναντι 28,2 mm) σε μία διαφορά της τάξεως του 35%.
- Η προσθήκη αναστολέα διάβρωσης (για τις τρεις πρώτες συνθέσεις) είτε ως πρόσθετο είτε σε ψεκαζόμενη μορφή δεν αλλάζει ιδιαίτερα τη συμπεριφορά της σύνθεσης παρουσιάζοντας ωστόσο μια μικρή βελτίωση (29.3 και 30.7 έναντι 32.7mm) όσον αφορά το βάθος διείσδυσης.
- Όσον αφορά τις μετρήσεις του βάθους ενανθράκωσης, παρατηρείται πως μεταξύ των τριών πρώτων συνθέσεων (6 - 8,8 και 4,1cm αντίστοιχα) καλύτερη συμπεριφορά επιδεικνύει αυτή που έχει ψεκαστεί με ΑΔ (33% μικρότερο βάθος σε σύγκριση με το αναφοράς).

Αυτό, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οφείλεται στην άμεση εφαρμογή και υψηλή αποδοτικότητα του αναστολέα διάβρωσης ο οποίος αφού ψεκαστεί πάνω σε επιφάνειες σκληρυμένου μπετόν διεισδύει άμεσα σε αυτό και αντιδρά σχηματίζοντας κρυστάλλους που κλείνουν τους ανοιχτούς πόρους.

- Ταυτόχρονα παρατηρείται πως, όπως και στην υδατοπερατότητα, αύξηση τις περιεκτικότητας τσιμέντου οδηγεί σε μικρότερη τιμή βάθους ενανθράκωσης και κατ' επέκταση σε καλύτερη στεγανωτική συμπεριφορά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η εξαιρετικά χαμηλή τιμή (μόλις 1,5 cm) που παρουσιάζει το ΑΣΣ.

Πιο γενικά μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι:

- *Ο λόγος νερού προς τσιμέντο σχετίζεται αντιστρόφως ανάλογα με τη μεταβολή της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη αφού υψηλός λόγος συνεπάγεται υψηλό πορώδες και επομένως η θλίψη του σκυροδέματος είναι ευκολότερη.*
- *Αντίστοιχα η περιεκτικότητα σε τσιμέντο σχετίζεται ανάλογα με τη μεταβολή της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη. Υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο οδηγεί σε σκυρόδεμα με μεγάλη ανθεκτικότητα. Με την ίδια λογική όσο περισσότερο τσιμέντο περιέχει μία σύνθεση τόσο μικρότερο είναι το πορώδες που τη χαρακτηρίζει.*
- *Η ελάττωση του νερού οδηγεί στην ελάττωση των πόρων που δημιουργούνται από την εξάτμιση του νερού που περισσεύει, άρα και στη μείωση του συνολικού πορώδους.*
- *Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών συντείνει στη μείωση του πορώδους. Συγκεκριμένα, όσο πιο λεπτόκοκο είναι ένα σκυρόδεμα τόσο μικρότερο πορώδες διαθέτει.*

Όπως παρατηρούμε από τη βιβλιογραφία και επαληθεύεται από τις πειραματικές μας μετρήσεις, η χρήση μιας καλής ποιότητας σκυροδέματος (υψηλή αντοχή-χαμηλό πορώδες) οδηγεί και σε καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά. Από τις συνθέσεις που μελετήσαμε το Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα είναι αυτό που επέδειξε την καλύτερη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά. Παράλληλα γίνεται αντιληπτό πως ο ψεκαζόμενος Α.Δ επιδεικνύει επίσης αξιοπρόσεκτη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., 2004, *Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π. Αθήνα
2. Μπατής Γ., 1999, "Φθορά και Προστασία των Υλικών", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα
3. Σ. Τσίμας, 2001, <Δομικά Υλικά (Τσιμέντο-Ασβέστης-Σκυρόδεμα-Κονιάματα)>, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα
4. Leonhard, F., Morning, E. *Ολόσωμες κατασκευές. Ειδικά κεφάλαια Σκυροδέματος*, Εκδόσεις Γκιούρδα, Αθήνα, 1977
5. Reinhard, W., 1981, 'Δομικά Υλικά', Έκδοση 21η, Μετάφραση: Τουλιάτος, Δ., Λεονταρίτης, Μ., Παπαγιάνης, Δ., Μπίσμπος, Χ., Εκδόσεις Γκιούρδα, Αθήνα
6. P. Kumar Mehta – Paulo J.M. Monteiro 2006, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* McGraw Hill professional
7. Σ. Η. Δρίτσος «Ενισχύσεις / επισκευές κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα» Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 2005
8. Θ.Π. Τάσιος, Κ. Αλιγιζάκη, 1992, «Ανθεκτικότητα Ωπλισμένου Σκυροδέματος», Αθήνα
9. Ρούτουλας Α., 2010, Σημειώσεις Μαθήματος «Έλεγχος Ποιότητας και Τεχνολογία Δομήσιμων Υλικών», Αθήνα
10. A.M. Neville, J.J.Brooks, <Concrete Technology>, Longman, 1987
11. Σκουλικίδης Θ., Βασιλείου Π., 2000, *Διάβρωση και Προστασία Υλικών*, Εκδόσεις Συμεών
12. J. M. R. Dotto, A. G. de Abreu, D. C. C. Dal Molin and I. L. Müller, 2004, "Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars", *Cement and Concrete Composites*
13. Μ. Φαρδής, 2004, *Ανθεκτικότητα του (οπλισμένου) σκυροδέματος σε διάρκεια*
14. *Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016*
15. ΕΛΕΝΗ ΖΑΧΑΡΙΟΥ – ΡΑΚΑΝΤΑ, ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ, ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΕΙΔΙΚΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ, Αθήνα 2010

16. Μαυροειδής Π., Ρακαντά Ε., Μπατής Γ, 2006, «Ανοξειδωτοι Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος: Μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορά απέναντι στην διάβρωση», 15ο Ελληνικό Συνέδριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη
17. G. De Schutter and L. Luo, 2004, "Effect of corrosion inhibiting admixtures on concrete properties", Construction and Building Materials, Volume 18, Issue 7
18. Παναγόπουλος Γ., Κίρτας Ε., «Κατασκευές Οπλισμένου Σκυροδέματος Ι», Εκπαιδευτικές Σημειώσεις, Τμήμα ΠΔΕ, ΤΕΙ Σερρών, 2005
19. ΕΛΟΤ EN 10080-2005 «Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος-Συγκολλησιμοι χάλυβες - Μέρος 1: Γενικές απαιτήσεις», ΕΛΟΤ 1421-2-2007 «Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος-Συγκολλησιμοι χάλυβες –Μέρος 2:Τεχνική κατηγορία B500A», ΕΛΟΤ 1421-3-2007 «Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος –Συγκολλησιμοι χάλυβες –Μέρος 3:Τεχνική κατηγορία B500C»
20. Γ. Μπατής, Καθηγητής ΕΜΠ «Χρήση νέων υλικών για την αύξηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών, Εισήγηση στην ημερίδα του ΤΕΕ «Ενίσχυση κτιρίων με σύγχρονα υλικά», 2007
21. Μεθοδολογία σύνθεσης σκυροδεμάτων τα οποία καταπονούνται σε κάμψη-Ιωάννα Κλάδου-2012
22. Ντάφλου Ε., «Ανθεκτικότητα Οργανικών Επικαλύψεων που περιέχουν Αναστολείς Διάβρωσης», Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., 2012
23. Okamura and Ozawa, 1995, Hwang, C.L. et al 1994, Peterson et al 1996, Domone and Chai 1997, Ouchi M. et al 1997, Ouchi M. t al, 1998, Pelova G. et al 1998, Domone P. et al. 1999, Edamatsu Y., et al 1999, F. de Larrard, 1999 Shaak et al 2001
24. Σίδερης Κ.Κ., Κυριτσάς Σ., Χανιωτάκης Ε., 2003: "Μηχανικά χαρακτηριστικά και Ανθεκτικότητα Αυτοσυμπυκνούμενων Σκυροδεμάτων παρασκευασθέντων με Ελληνικά Ποζολανικά Υλικά", Πρακτικά 14ου Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος, Κως, 15-17 Οκτωβρίου 2003
25. Κ.Κ.Σίδερης, 2009, Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα και Ελληνική Πραγματικότητα: Παρούσα Κατάσταση και προοπτικές εξέλιξης, 'Self-compacting concrete in the Greek market: Present situation and future development'
26. Comparative presentation of Concrete Technology Regulation (CTR-2016) with the Eurocodes and the EN Standards – Part I – Ν. Μαλακάτας, Ι. Πλέσσα, Αικ. Πλουμπίδου, Χ. Ζέρης, Α. Σακελλαρίου, Χ. Λεπτοκαρίδης, Α. Κατσούρα (Μέλη ΜΕΤΣ)
27. ΚΤΧ 2008

28. Γ. Μπατής, Κ. Μελετίου, Αθ. Ρούτουλας, 1999, «Η Προστασία του Οπλισμού του Σκυροδέματος με Ορυκτά Πρόσθετα», 13ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Ρέθυμνο
29. Γ. Μπατής, Ν. Κουλουμπή, 1989, Διάβρωση του σιδηροπλισμού του μπετόν σε περιβάλλον χλωριόντων με χρήση τσιμέντου Πόρταλντ και ανθεκτικό σε θειικά
30. Γ. Παρισάκης, Β. Κασελούρη, Σ. Τσίμας, Χ. Φτίκος, 1981, <Χημεία και Τεχνολογία Τσιμέντου>, Αθήνα
31. Δ. Κ. Υφαντής, 2000, «Υλικά – Διάβρωση και Προστασία», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα
32. ΕΛΟΤ 1421: Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος- Συγκολλησιμοι Χάλυβες – Μέρος 1: Γενικές Απαιτήσεις, Μέρος 2: Τεχνική κατηγορία Β500Α, Μέρος 3: Τεχνική κατηγορία Β500C, Ημερομηνία έκδοσης: 24/02/2004.
33. Chandler, K. A., and Kilcullen, M. B, 1968, “Survey of corrosion and atmospheric pollution in and around Sheffield”, Br. Corrosion Journal
34. D.A. Bayliss, D.H. Deacon, 2002, “Steelwork corrosion control”, Spon Press, Second edition
35. K. R. Trethewey, J. Chamberlain, 1995, “Corrosion for Science and Engineering”, Longman
36. Χρήστος Στρογγύλης, http://monosimacon.blogspot.com/2009/06/blog-post_10.html: Ενανθράκωση μπετόν και διάβρωση οπλισμών, Πολιτικός Μηχανικός – MBA – DipM
37. Broomfield, J.P., Rodriguez, J., Ortega, L.M., and Garcia, A.M., 1994, “Corrosion rate measurements in reinforced concrete structures by a linear polarization device”, in Weyers, R.E. (ed.) Philip D. Cady Symposium on Corrosion of Steel in Concrete, American Concrete Institute
38. Πρότυπο NORDTEST - NT Build 492: CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT FROM NON-STEADY-STATE MIGRATION EXPERIMENTS, 1999
39. Πρότυπο ASTM C 1202 - Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration
40. C.Ryden, B. Sederholm, G. Gamitz and L. Berthagen, “Cathodic Corrosion Protection of the Steel Reinforcement in Concrete Piers of Oland Bridge- Influence of Climatic Factors”



DOMYLCO
Construction Chemicals

Χημικά Δομικά Υλικά

Φουντουκιάς 6, 136 71 Αχαρνές, Αθήνα - Τηλ: 210 6254470, Φαξ: 210 6254478 - www.domylco.gr

Υλικά Επιφανειακής Προστασίας - Υλικά Δαπέδων

KRISTALION

ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟ ΣΦΡΑΓΙΣΤΙΚΟ - ΣΤΕΓΑΝΩΤΙΚΟ - ΣΚΛΗΡΥΝΤΙΚΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΜΠΕΤΟΝ ΚΑΙ ΚΟΝΙΩΝ ΣΕ ΥΓΡΗ ΜΟΡΦΗ

Κατηγορία: Υλικά Επιφανειακής Προστασίας - Υλικά Δαπέδων

Το KRISTALION είναι ένα ημιδιάφανο υγρό που ψεκάζεται πάνω σε επιφάνειες σκληρυμένου μπετόν. Διεισδύει στο μπετόν και αντιδρά με αυτό, σχηματίζοντας κρυστάλλους που κλείνουν πόρους και ενισχύουν τη σκληρότητα.

ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ

Το KRISTALION χρησιμοποιείται για την προστασία και τη βελτίωση επιφανειών μπετόν όσον αφορά την ανθεκτικότητα στο νερό, τους διαλύτες και την τριβή.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Βελτιώνει την σκληρότητα της επιφάνειας του μπετόν και την αντοχή του σε απότριψη.
- Βελτιώνει τη στεγανότητα του μπετόν μέσω σχηματισμού κρυστάλλων μέσα στους πόρους.
- Είναι ανόργανο, και γι' αυτό δεν είναι ευαίσθητο στους διαλύτες.
- Προσδίδει στο μπετόν καλύτερη συμπεριφορά έναντι του παγετού και των αντιπαγετικών αλάτων.

ΤΡΟΠΟΣ ΧΡΗΣΗΣ

Ανακατέψτε πριν από τη χρήση.

Το KRISTALION ψεκάζεται σε λεπτή στρώση χρησιμοποιώντας χειροκίνητο ή αυτόματο ψεκαστήρα. Ψεκάστε αφού πήξει και σκληρυνθεί το μπετόν. Μπορεί επίσης να ψεκαστεί και σε παλιό μπετόν, όσο η αλκαλικότητά του διατηρείται (έως και 20 χρόνια ηλικία). Προστατέψτε από τη βροχή για 3 ώρες μετά την εφαρμογή.

Το KRISTALION διεισδύει στο μπετόν και αντιδρά με αυτό. Δεν σχηματίζει φιλμ. Για το λόγο αυτό είναι πολύ αποτελεσματικό και ανθεκτικό.

Καθαρισμός εργαλείων: Με άφθονο νερό.

ΔΟΣΟΛΟΓΙΑ



DOMYLCO
Construction Chemicals

Χημικά Δομικά Υλικά

Φουντουκιάς 6, 136 71 Αχαρνές, Αθήνα - Τηλ: 210 6254470, Φαξ: 210 6254478
- www.domylco.gr

Διάφορα Υλικά

CHEM PROTECT

ΠΡΟΣΘΕΤΟ ΜΠΕΤΟΝ - ΑΝΑΣΤΟΛΕΑΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Κατηγορία: Διάφορα Υλικά

Το CHEM PROTECT είναι διάλυμα οργανικών ουσιών έτοιμο για χρήση σε οπλισμένα σκυροδέματα που αναστέλλει τη διάβρωση του οπλισμού.

ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ

Όπου χρειάζεται προστασία του σιδηρού οπλισμού από τη διάβρωση, π.χ. σε παραθαλάσσιες περιοχές, υποθαλάσσιες σκυροδετήσεις, κατασκευές με μεγάλο απαιτούμενο χρόνο ζωής, γέφυρες, κ.α.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Όταν χρησιμοποιείται σε νωπό μπετόν, στις κανονικές δοσολογίες δεν επηρεάζει αρνητικά τις αντοχές ή τον χρόνο πήξης. Δεν περιέχει χλώριο. Παρέχει στον οπλισμό μακροχρόνια αντοχή στην διάβρωση. Εύκολο στη χρήση.

ΤΡΟΠΟΣ ΧΡΗΣΗΣ

Το CHEM PROTECT:

α) προστίθεται στο νερό ανάμιξης πριν την προσθήκη στο ξηρό μείγμα τσιμέντου αδρανών. Μπορεί να προστεθεί και στο έτοιμο μείγμα, με την αντίστοιχη επιπλέον ανάμιξη.

β) ψεκάζεται ή επαλείφεται στην επιφάνεια του στεγνού σκληρυμένου μπετόν, μέχρι αυτό να κορεστεί. Αφού στεγνώσει μπορεί να επαναληφθεί ο ψεκασμός.

Δοσολογία:

Για συνήθεις συνθήκες σε νωπό μπετόν 1% έως 4% στο βάρος του τσιμέντου. Για ψεκασμό σε σκληρυμένο μπετόν 400 με 600 γραμμάρια ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας. Η αποτελεσματικότητα του CHEM PROTECT εξαρτάται από την δοσολογία, τον τύπο και την σύνθεση του τσιμέντου, την αναλογία Ν/Τ κ.α. Το CHEM PROTECT δεν υποκαθιστά αλλά προϋποθέτει μία σωστή μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος.

