

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



**ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΟΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗ
ΦΟΡΤΙΣΗ**

Διδακτορική Διατριβή

Λουκά Καραβοκυρού

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός

Επιβλέπουσα:

Μαργαρίτα Μπεάζη-Κατσιώτη

Ομότιμη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ 2020

Συμβουλευτική Επιτροπή:

Ομ. Καθ. Μαργαρίτα Μπεάζη-Κατσιώτη - Επιβλέπουσα
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών

Καθ. Κωνσταντίνα Κόλλια
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών

Καθ. Στυλιανός Χαμηλάκης
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών

Εξεταστική Επιτροπή:

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

Κωνσταντίνα Κόλλια, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Στυλιανός Χαμηλάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Μπατής, Ομ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αντωνία Μοροπούλου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Κοσμάς Σίδερης, Καθηγητής ΔΠΘ

Πέτρος Τσακιρίδης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Copyright © Λουκάς Καραβοκυρός, 2020.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος / All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στην χρήση της Διατριβής για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον Συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα σε αυτήν την Διατριβή εκφράζουν τον Συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η έγκριση της Διδακτορικής Διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα
(Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)

Στη μητέρα μου, Ελένη

“The most beautiful experience we can have is the mysterious. It is the fundamental emotion that stands at the cradle of true art and true science.”

– **Albert Einstein**

“I was not proud of what I had learned but I never doubted that it was worth knowing.”

– **Hunter S. Thompson**

Science is a way of thinking much more than it is a body of knowledge.

– **Carl Sagan**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στον Τομέα Ι “Χημικών Επιστημών”, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με Επιβλέπουσα την Ομότιμη Καθηγήτρια κα. Μαργαρίτα Μπεάζη-Κατσιώτη.

Αντικείμενο της Διατριβής είναι η μελέτη προστασίας οπλισμένου σκυροδέματος με ταυτόχρονη διερεύνηση της επιρροής μιας μόνιμης καμπτικής φόρτισης στην ανθεκτικότητά του. Η πραγματοποίηση της έρευνας περιέλαβε την παρασκευή δοκιμίων προσομοίωσης πραγματικών δοκών και τη διερεύνηση διαφορετικών συνθέσεων σκυροδέματος, με διαφορετικά επίπεδα φόρτισης καθώς και την εξέταση διαφορών παραμέτρων που επιδρούν στη διάβρωση του χάλυβα δοκών οπλισμού, όπως είναι η έκθεση σε προσομοίωση θαλάσσιου περιβάλλοντος, αλλά και σε μακροχρόνια έκθεση σε ατμοσφαιρική διάβρωση.

Η Διδακτορική Διατριβή περιλαμβάνει:

- Το Θεωρητικό Μέρος, το οποίο απαρτίζεται από δύο βασικά τμήματα: Το πρώτο είναι το γενικό θεωρητικό και αναφέρεται στο οπλισμένο σκυρόδεμα και τα συστατικά του, δηλαδή το τσιμέντο, το νερό, τα αδρανή και τους χάλυβες οπλισμού. Το δεύτερο είναι το ειδικό θεωρητικό και γίνεται αναφορά στη διάβρωση του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος και στα αίτια που την προκαλούν (ενανθράκωση, δράση χλωριόντων) και γίνεται ανάπτυξη των συνηθέστερων μεθόδων προστασίας του οπλισμού από τη διάβρωση. Γίνεται επίσης ιδιαίτερη αναφορά στους νεότερους κανονισμούς τεχνολογίας σκυροδέματος (εγχώριους και διεθνείς) και συγκεκριμένα στα όρια που θέτουν για τις περιπτώσεις περιβαλλοντικής έκθεσης.
- Το Πειραματικό Μέρος, όπου παρουσιάζονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν (οπλισμοί, τσιμέντο, αδρανή, αναστολείς διάβρωσης, πρόσθετα, υδατοαπωθητικές στρώσεις), ο τρόπος παρασκευής της πειραματικής διάταξης καθώς και η μεθοδολογία εκτίμησης της επίδρασης των διαφορών παραγόντων στη διάβρωση των οπλισμών. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων σε πίνακες και διαγράμματα και πραγματοποιείται μια σύγκριση των επιμέρους ομάδων με βάση τρία χαρακτηριστικά. 1) την επίδραση της σύστασης των εξεταζόμενων συνθέσεων (λόγος N/T, περιεκτικότητα τσιμέντου κτλ.), 2) την επίδραση των μεθόδων προστασίας που εφαρμόστηκαν (αναστολέας διάβρωσης ως πρόσθετο, επιφανειακός ψεκασμός) και 3) την επίδραση μιας μόνιμης καμπτικής φόρτισης στην εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης.
- Την Συζήτηση Αποτελεσμάτων, όπου αναλύεται η επίδραση όλων των παραγόντων που μελετήθηκαν υπό το πρίσμα της προστασίας από τη διάβρωση των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος και αποτιμώνται τα αποτελέσματα του πειραματικού μέρους της Διδακτορικής Διατριβής.
- Τις προοπτικές συνέχισης της Έρευνας, όπου τονίζονται οι τομείς στους οποίους θα μπορούσε να υπάρξει περαιτέρω ερευνά και μελέτη, σε σχέση με τη διερεύνηση της επίδρασης της μόνιμης φόρτισης στην ανθεκτικότητα μιας κατασκευής από σκυρόδεμα, καθώς και στη προστασία του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος από την διάβρωση.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η υποβάθμιση της αξιοπιστίας μιας κατασκευής από σκυρόδεμα με την πάροδο του χρόνου είναι αποτέλεσμα διαφόρων μηχανικών, φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, με τη διάβρωση του οπλισμού να αποτελεί το σοβαρότερο πρόβλημα ανθεκτικότητας των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Τα τελευταία πενήντα χρόνια, η διεθνής επιστημονική κοινότητα κατέβαλε τεράστιες προσπάθειες με εργαστηριακές έρευνες και πειραματικές μελέτες πεδίου με στόχο την αύξηση της αντίστασης του σκυροδέματος στη διάβρωση. 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. Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτέλεσε η μελέτη των μεθόδων προστασίας του οπλισμένου σκυροδέματος με ταυτόχρονη διερεύνηση της επιρροής της μόνιμης καμπτικής φόρτισης στην ανθεκτικότητα ενός φορέα. Οι συνθέσεις παρασκευάστηκαν σύμφωνα με τους πιο πρόσφατους κανονισμούς σκυροδέματος και τα διεθνή πρότυπα και έχουν ως εξής: συμβατικό σκυρόδεμα ποιότητας C30/37, συμβατικό σκυρόδεμα με αναστολέα διάβρωσης ως πρόσθετο, συμβατικό σκυρόδεμα με επιφανειακή στεγανοποιητική προστασία, γαρμπυλοσκυρόδεμα και αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Για το βασικό πειραματικό μέρος κατασκευάστηκαν 40 δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος 5 διαφορετικών συνθέσεων και εκτέθηκαν σε 2 διαφορετικές προσομοιωμένες περιβαλλοντικές συνθήκες σε 3 διαφορετικά επίπεδα φόρτισης για συνολική περίοδο 42 μηνών. Η συμπεριφορά τους κατά της διάβρωσης προσδιορίστηκε μέσω τακτικών μετρήσεων της ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος και του δυναμικού διάβρωσης των ενισχυμένων χαλύβδινων ράβδων με χρήση θειικού χαλκού ως ηλεκτρόδιο αναφοράς. Επιπλέον, η συμπεριφορά τους κατά της διάβρωσης προσδιορίστηκε μέσω των ακόλουθων εργαστηριακών δοκιμών: δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας, δοκιμή διαπερατότητας νερού υπό πίεση, ποροσιμετρία διείσδυσης υδραργύρου, δοκιμή ταχείας διείσδυσης σε χλωριόντα, δοκιμή επιταχυνόμενης ενανθράκωσης. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι τα συστήματα προστασίας που εξετάστηκαν παρέχουν ικανοποιητική προστασία στον οπλισμό έναντι της διάβρωσης σε σύγκριση με τα δοκίμια αναφοράς. Επίσης, παρατηρήθηκε μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση του λόγου N/T μιας σύνθεσης με την ικανότητα για προστασία από διάβρωση. Μικρότερες τιμές λόγου N/T (0,4 αντί 0,5) οδηγούν σε καλύτερη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά. Τέλος, παρατηρείται πως ο ρυθμός διάβρωσης του χάλυβα αυξάνεται σταδιακά με την αύξηση του μόνιμου φορτίου. Η αλληλεπίδραση της μόνιμης φόρτισης με την εξέλιξη της διάβρωσης είναι μια σχέση που δεν έχει ερευνηθεί σε βάθος έως τη συγγραφή του παρόντος. Δημιουργείται έτσι η ανάγκη να υπάρξει επιπλέον έρευνα σε αυτόν τον συσχετισμό προκειμένου οι νέες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα να λαμβάνουν υπόψην όλους τους ζημιογόνους παράγοντες και να είναι περισσότερο ανθεκτικές στο χρόνο.

Λέξεις κλειδιά

οπλισμένο σκυρόδεμα, ανθεκτικότητα, δοκός, μόνιμη φόρτιση, διάβρωση χάλυβα, αναστολέας διάβρωσης, επιφανειακή προστασία, ηλεκτροχημικές μετρήσεις, ενανθράκωση, χλωριόντα.

ABSTRACT

The deterioration of the reliability of a concrete structure over time is the result of various mechanical, physical, chemical and biological processes, with the corrosion of reinforcement being the most serious problem of durability of reinforced concrete structures. For the past fifty years, the international scientific community has made tremendous efforts with laboratory research and experimental field studies to increase the corrosion resistance of concrete. The infestation of structures by the penetration of chlorides is a key problem in our country as it mainly concerns coastal structures that are affected by seawater. The subject of this dissertation was the study of methods of protection of reinforced concrete while investigating the influence of permanent bending load on the strength of a carrier. The compositions were prepared according to the latest concrete regulations and international standards and are as follows: conventional quality concrete C30/37, conventional concrete with corrosion inhibitor as an additive, conventional concrete with surface protection, fine aggregate concrete and self-compacting concrete. For the experimental part, 40 reinforced concrete beams of 5 different compositions were constructed and exposed to 2 different simulated environmental conditions at 3 different loading levels for a total period of 42 months. Their anti-corrosion behavior was determined by regular tests of the electrical resistance of concrete and the corrosion potential of the reinforced steel bars using copper sulfate as the reference electrode. In addition, their anti-corrosion behavior was determined by the following laboratory tests: water absorption test, water pressure permeability test, mercury penetration porosimetry, rapid chloride penetration test, accelerated carbonation test. The experimental results showed that the protection systems tested provide adequate protection to the reinforcement against corrosion compared to the reference specimens. Also, an inversely proportional relationship of the Water/Cement ratio of a composition with the ability to protect against corrosion was observed. Lower Water/Cement values (0.4 instead of 0.5) lead to better anti-corrosion behavior. Finally, it is observed that the corrosion rate of steel gradually increases with increase of the permanent load. The interaction of permanent loading with the corrosion of the reinforcement is a relationship that has not been thoroughly investigated as of this writing. This creates a need for further research so that the new reinforced concrete structures take all harmful factors into account and prove to be more durable over time.

Keywords

reinforced concrete, durability, concrete beam, permanent loading, steel corrosion, corrosion inhibitor, surface protection, electrochemical tests, carbonation, chlorides.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς όλους όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίηση και ολοκλήρωση της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής και ιδιαίτερα:

Την Ομότιμη Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. κ. Μαργαρίτα Μπεάζη-Κατσιώτη, Επιβλέπουσα της Διδακτορικής Διατριβής, κατ' αρχήν για την ανάθεση της Διδακτορικής Διατριβής και στη συνέχεια για τις επιστημονικές γνώσεις που μου μετέδωσε, την αμέριστη υποστήριξη που μου παρείχε καθώς και την υπομονή που έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Την Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. κ. Κωνσταντίνα Κόλλια και τον Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. κ. Στυλιανό Χαμηλάκη, Μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, για τη καθοδήγηση, συμπαράσταση και συνεργασία σε όλα τα στάδια της έρευνας.

Τον Ομότιμο Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. κ. Γεώργιο Μπατή, για τις επιστημονικές γνώσεις που μου μετέδωσε, την αμέριστη υποστήριξή του καθώς και την ιδιαίτερως χρήσιμη καθοδήγησή που μου παρείχε στην εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών.

Τον Διευθυντή του Εργοστασίου Σκυροδέματος ΚΟΥΡΟΣ ΑΕ κ. Ηλία Κατσαφάδο, για τον καίριο ρόλο του τόσο στον σχεδιασμό, την εκτέλεση και τη φιλοξενία του βασικού πειραματικού μέρους όσο και για τις πολύτιμες υποδείξεις του καθ' όλη τη διάρκεια της Διδακτορικής Διατριβής.

Επίσης εκφράζονται ευχαριστίες προς τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, την Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. κ. Αντωνία Μοροπούλου, τον Καθηγητή Δ.Π.Θ. κ. Κοσμά Σίδηρη και τον Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Πέτρο Τσακιρίδη για την πολύ σημαντική επιστημονική υποστήριξη τους καθώς και για τη συνεργασία στην εκτέλεση πειραματικών δοκιμών.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να αποδώσω στους κ. Εμμανουήλ Τζανή, και Δρ. Μάριο Κατσιώτη από την Τεχνολογική Διεύθυνση του Ομίλου Τσιμέντων "TITAN" για την πολύτιμη τους συμβολή τόσο στην παροχή τεχνογνωσίας, υποστήριξης και εργαστηριακού εξοπλισμού, όσο και για τη διαθεσιμότητά τους για τις ερευνητικές συζητήσεις επί της Διατριβής.

Ευχαριστίες εκφράζονται στον κ. Ανδρέα Σαπαλίδη, για τη συνεργασία στη διεξαγωγή των εργαστηριακών δοκιμών ποροσιμετρίας στο Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος» (ΕΚΕΦΕ «Δ»).

Ευχαριστίες εκφράζονται στον κ. Ελευθέριο Σκόδρα για τη βοήθεια που προσέφερε κατά την επιλογή των χημικών πρόσθετων, την παραγωγή των εξεταζόμενων συνθέσεων αλλά και κατά τη διεξαγωγή εργαστηριακών δοκιμών.

Τον Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. κ. Μπαδογιάννη, καθώς και το προσωπικό του Εργαστηρίου Σκυροδέματος για τη συνεργασία στη διεξαγωγή εργαστηριακών δοκιμών μεγάλης κλίμακας στα πλαίσια της Έρευνας.

Ευχαριστίες επίσης εκφράζονται στον Δρ. Νικόλαο Κατσιώτη για τη βοήθεια που προσέφερε κατά την εκπόνηση της Διατριβής καθώς και για την συνολική υποστήριξη και συμβολή καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να αποδώσω στην Ακαδημία Αθηνών για την στήριξή της μέσω της χορήγησης υποτροφίας για την εκπόνηση της παρούσης διδακτορικής διατριβής στον τομέα «Ενέργεια» από τα «Γενικά Κληροδοτήματα υπέρ της Εκπαιδευσεως». Χωρίς την συγκεκριμένη ενίσχυση δεν θα μπορούσα να έχω την ίδια ευελιξία στον προγραμματισμό και την εξέλιξη της έρευνας καθώς και την ίδια ποιότητα στα παραγόμενα αποτελέσματα.

Τέλος, στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς που βρέθηκαν στο στενό μου περιβάλλον, για την αμέριστη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια εκπόνησης της Διδακτορικής Διατριβής μου. Η συμβολή τους τόσο σε επίπεδο μετάδοσης γνώσεων, όσο και στην ψυχολογική υποστήριξή τους, ήταν απαραίτητη για να φέρω εις πέρας το παρόν έργο. Ονομαστικά, στο σημείο αυτό, θα ήθελα να αναφέρω τον κ. Νικόλαο Παπαστόϊκα και τον κ. Νικόλαο Ηλιάδη. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλη την οικογένειά μου και πιο συγκεκριμένα τον πατέρα μου Ράλλη Καραβοκυρό, την γιαγιά μου Σταυρούλα Δραγώνα καθώς και τη μητέρα μου Ελένη Ανδρουλιδάκη στην οποία είναι αφιερωμένο και το παρόν σύγγραμμα, για την μεγάλη στήριξή τους κατά τη περίοδο διεκπεραίωσης του ερευνητικού μου έργου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΜΕΡΟΣ Α' – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	17
1. ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	17
1.1. Το σκυρόδεμα ως δομικό υλικό	17
1.1.1. Εισαγωγή	17
1.1.2. Ιστορική αναδρομή.....	19
1.1.3. Ιδιότητες σκυροδέματος	21
1.2. Τσιμέντο.....	28
1.2.1. Τύποι και κατηγορίες Ευρωπαϊκών τσιμέντων	28
1.2.2. Η παραγωγή του τσιμέντου.....	33
1.2.3. Υδραυλικές ιδιότητες τσιμέντου	35
1.2.4. Στατιστικά στοιχεία	38
1.3. Τα αδρανή	39
1.3.1. Εισαγωγή	39
1.3.2. Κατηγορίες αδρανών.....	40
1.3.3. Ιδιότητες των αδρανών	41
1.4. Το νερό.....	43
1.4.1. Ποιότητα Νερού	43
1.4.2. Λόγος νερού προς τσιμέντο	45
1.5. Χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος.....	45
1.5.1. Εισαγωγή	45
1.5.2. Ορισμοί.....	46
1.5.3. Ιστορική αναδρομή της παρασκευής χάλυβα	46
1.5.4. Η παραγωγή του χάλυβα	47
1.5.5. Διαδικασία Παραγωγής Χάλυβα Οπλισμού στην Ελλάδα	48
1.5.6. Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Προηγούμενοι	
Κανονισμοί	49
1.5.7. Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων οπλισμού	
σκυροδέματος	50
1.5.8. Σήμανση Χαλύβων Οπλισμού	51
1.5.9. Διάκριση χαλύβων	52
1.5.10. Χημικά Χαρακτηριστικά	52
1.5.11. Επίδραση των κραματικών στοιχείων στα χαρακτηριστικά	
των Χ.Ο.Σ.	53
1.6. Πρόσθετα Σκυροδέματος	55
1.6.1. Ορισμοί.....	55
1.6.2. Αποτελέσματα της χρήσης των πρόσθετων.....	56
1.6.3. Δοσολογία Πρόσθετων βάσει EN 206-1	57
1.7. Πρόσμικτα Σκυροδέματος.....	57
1.8. Κατηγορίες ειδικών σκυροδεμάτων.....	57

1.9.	ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	58
1.9.1.	Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο για το Σκυρόδεμα EN 206	58
1.9.2.	Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-2016) ..	59
2.	Διάβρωση χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος	66
2.1.	Εισαγωγή	66
2.2.	Είδη διάβρωσης	71
2.3.	Μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού.....	72
2.4.	Ενανθράκωση σκυροδέματος.....	73
2.5.	Η δράση των χλωριόντων	77
2.6.	Ο σχηματισμός μακροστοιχείων	80
2.7.	Αλκαλοπυριτική αντίδραση.....	81
2.8.	Επιπτώσεις της διάβρωσης	83
3.	Προστασία του οπλισμού από την διάβρωση	84
3.1.	Επιχρίσματα	85
3.2.	Ανόργανα χρώματα	86
3.3.	Οργανικά χρώματα	86
3.4.	Σφράγισμα ρωγμών	88
3.5.	Αναστολείς διάβρωσης.....	88
3.5.1.	Τύποι αναστολέων διάβρωσης	90
3.5.2.	Μηχανισμός προστασίας μέσω αναστολέων διάβρωσης	95
3.5.3.	Αναστολείς στο σκυρόδεμα	96
3.6.	Επιφανειακή προστασία	97
3.7.	Καθοδική προστασία	98
4.	Μέθοδοι εκτίμησης της διάβρωσης οπλισμένου σκυροδέματος .	104
4.1.	Ηλεκτροχημικές Μετρήσεις Αποτίμησης της Διάβρωσης	104
4.1.1.	Δυναμικό διάβρωσης.....	104
4.1.2.	Διαπερατότητα χλωριόντων κατά ASTM C1202	108
4.1.3.	Ηλεκτρική αντίσταση σκυροδέματος.....	109
4.2.	Μετρήσεις ιδιοτήτων που σχετίζονται άμεσα με την αποτίμηση της αντιδιαβρωτικής συμπεριφοράς.....	109
4.2.1.	Υδατοπερατότητα	110
4.2.2.	Μέτρηση επιφανειακής απορρόφησης.....	110
4.2.3.	Ποροσιμετρία Υδραργύρου.....	111
4.2.4.	Δοκιμή επιταχυνόμενης ενανθράκωσης.....	112
	ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	114

ΜΕΡΟΣ Β' – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	115
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	115
5. ΥΛΙΚΑ.....	117
5.1. Οπλισμός.....	117
5.2. Τσιμέντο.....	118
5.3. Αδρανή	119
5.4. Νερό.....	120
5.5. Χημικά Πρόσθετα.....	120
5.6. Μέθοδοι Προστασίας	121
5.7. Κατασκευή και έκθεση δοκιμών.....	121
6. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	125
6.1. Είδη δοκιμών διάβρωσης	125
6.2. Δοκιμές ελέγχου ποιότητας παραγόμενων συνθέσεων	126
6.2.1. Θλιπτική αντοχή.....	126
6.2.2. Θερμοκρασία σκυροδέματος.....	128
6.2.3. Δοκιμές Ελέγχου Εργασιμότητας.....	129
6.3. Παρακολούθηση του δυναμικού διάβρωσης οπλισμού	130
6.3.1. Μετρούμενα Μεγέθη	131
6.3.2. Εξοπλισμός και χρήση του	132
6.3.3. Ερμηνεία αποτελεσμάτων	133
6.4. Ηλεκτρική αντίσταση σκυροδέματος.....	134
6.4.1. Εξοπλισμός και χρήση του	135
6.4.2. Μετρούμενα Μεγέθη	135
6.4.3. Ερμηνεία μετρήσεων.....	136
6.5. Θεωρητικός υπολογισμός του ρυθμού διάβρωσης	137
6.6. Δοκιμή διαπερατότητας χλωριόντων στο σκυρόδεμα.....	139
6.7. Δοκιμή επιταχυνόμενης ενανθράκωσης.....	142
6.8. Δοκιμή τριχοειδούς απορρόφησης	143
6.9. Δοκιμή Υδατοπερατότητας.....	144
6.10. Ποροσιμετρία υδραργύρου	146
6.11. Καμπτική Αντοχή Δοκών	150
6.11.1. Χαρακτηριστικά δειγμάτων, πειραματική διάταξη.....	150
6.11.2. Υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας.....	152
7. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	153
7.1. Εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης.....	156
7.1.1. Επίδραση σύστασης (ποσότητα τσιμέντου, μέγεθος κόκκων αδρανών, λόγος ν/τ).....	161
7.1.2. Επίδραση μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας	163
7.1.3. Επίδραση μόνιμης φόρτισης	165

7.1.4.	Μερικά Συμπεράσματα I	168
7.2.	Μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης σκυροδέματος	170
7.2.1.	Επίδραση σύστασης	175
7.2.2.	Επίδραση μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας	177
7.2.3.	Επίδραση μόνιμης φόρτισης	179
7.2.4.	Μερικά Συμπεράσματα II	182
7.3.	Θεωρητικός υπολογισμός του ρυθμού διάβρωσης	184
7.3.1.	Επίδραση σύστασης	186
7.3.2.	Επίδραση μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας	189
7.3.3.	Επίδραση μόνιμης φόρτισης	191
7.3.4.	Μερικά Συμπεράσματα III	194
7.4.	Δοκιμή επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων	196
7.4.1.	Επίδραση σύστασης	197
7.4.2.	Επίδραση μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας	198
7.4.3.	Μερικά Συμπεράσματα IV	199
7.5.	Δοκιμή επιταχυνόμενης ενανθράκωσης	200
7.5.1.	Επίδραση σύστασης	201
7.5.2.	Επίδραση μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας	203
7.5.3.	Μερικά Συμπεράσματα V	204
7.6.	Δοκιμή τριχοειδούς απορρόφησης	205
7.6.1.	Επίδραση σύστασης	206
7.6.2.	Επίδραση μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας	208
7.6.3.	Μερικά Συμπεράσματα VI	209
7.7.	Δοκιμή Υδατοπερατότητας	210
7.7.1.	Επίδραση σύστασης	211
7.7.2.	Επίδραση μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας	213
7.7.3.	Μερικά Συμπεράσματα VII	214
7.8.	Ποροσιμετρία Υδραργύρου	215
7.8.1.	Μερικά Συμπεράσματα VIII	218
7.9.	Καμπτική Αντοχή Δοκών και Παρακολούθηση Ρηγματώσεων 219	
7.9.1.	Καμπτική αντοχή μη διαβρωμένων δοκών – δοκιμίων αναφοράς (Περίπτωση A)	225
7.9.2.	Καμπτική αντοχή διαβρωμένων δοκών χωρίς φόρτιση (Περίπτωση B)	228
7.9.3.	Καμπτική αντοχή διαβρωμένων δοκών υπό μόνιμη φόρτιση (Περίπτωση D)	231
7.9.4.	Μερικά Συμπεράσματα IX	234

ΜΕΡΟΣ Γ' – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ	235
8.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ.....	235
8.1. Συμπεράσματα Διδακτορικής Διατριβής.....	235
8.2. Προοπτικές και Προτάσεις για μελλοντικά ερευνητικά βήματα	238
ΜΕΡΟΣ Δ' – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	240
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	240
10. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	250
10.1. Appendix.a. Τεχνικά χαρακτηριστικά υλικών.....	250
10.2. Appendix.b. Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών.....	260

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1.1.Α ΠΥΡΙΤΙΚΟ ΤΡΙΑΣΒΕΣΤΙΟ (C ₃ S)	37
ΕΙΚΟΝΑ 1. 2 ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΗΜΙΤΕΛΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΧΑΛΥΒΑ	47
ΕΙΚΟΝΑ 1. 3 ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΧΑΛΥΒΑ	47
ΕΙΚΟΝΑ 3. 1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΘΟΔΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΜΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ ΣΕ ΓΕΦΥΡΑ ...	100
ΕΙΚΟΝΑ 4. 1.....	111
ΕΙΚΟΝΑ 4. 2 ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΜΕΝΗ ΚΑΙ ΜΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ.....	113
ΕΙΚΟΝΑ 5. 1 ΠΛΕΓΜΑ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΡΑΒΔΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΓΙΑ ΤΟΝ ΟΠΛΙΣΜΟ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ	118
ΕΙΚΟΝΑ 5. 2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΟΥ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΣΕ ΔΥΟ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΣΕ ΚΥΒΙΚΑ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ (ΔΕΞΙΑ) ΔΟΚΙΜΙΑ	121
ΕΙΚΟΝΑ 5. 3 ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ (ΜΕ ΔΟΝΗΣΗ) ΔΟΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	122
ΕΙΚΟΝΑ 5. 4 ΚΥΒΙΚΑ ΚΑΙ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΓΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ), ΘΑΛΑΜΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ (ΔΕΞΙΑ)	122
ΕΙΚΟΝΑ 5. 5 ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΟΚΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ	123
ΕΙΚΟΝΑ 6. 1 ΠΛΗΡΩΣΗ ΚΑΙ ΔΟΝΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΜΗΤΡΩΝ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ), ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ ΚΥΒΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (ΔΕΞΙΑ)	127
ΕΙΚΟΝΑ 6. 2 ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	128
ΕΙΚΟΝΑ 6. 3 ΈΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ - ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΘΙΣΗΣ ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	129
ΕΙΚΟΝΑ 6. 4 ΔΟΚΙΜΗ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	130
ΕΙΚΟΝΑ 6. 5 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΧΑΛΚΟΥ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ ΧΑΛΚΟ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ), ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ (ΔΕΞΙΑ)	131
ΕΙΚΟΝΑ 6. 6 ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ (WENNER PROBE) – ΔΟΚΙΜΗ ΠΕΔΙΟΥ.....	135
ΕΙΚΟΝΑ 6. 7 ΤΟΜΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) – ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ Φ95 X 50MM (ΔΕΞΙΑ)	140
ΕΙΚΟΝΑ 6. 8 ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΚΑΤΑ ASTM C 1202	141
ΕΙΚΟΝΑ 6. 9 ΣΤΑΔΙΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΤΑ BS1881	144
ΕΙΚΟΝΑ 6. 10 ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΔΟΚΙΜΗΣ (ΔΕΞΙΑ)	145
ΕΙΚΟΝΑ 6. 11 ΘΡΑΥΣΗ ΣΤΟ ΜΕΣΟ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΒΑΘΟΥΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΝΕΡΟΥ (ΔΕΞΙΑ)	145
ΕΙΚΟΝΑ 6. 12 ΣΤΑΔΙΑ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΗ ΠΟΡΟΣΙΜΕΤΡΙΑΣ	147
ΕΙΚΟΝΑ 6. 13 ΠΟΡΟΣΙΜΕΤΡΟ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ (POREMASTER, MODEL: PM 20 POROWIN™ VERSION: 8.1)	148
ΕΙΚΟΝΑ 6. 14 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ (ΔΕΞΙΑ)	150
ΕΙΚΟΝΑ 6. 15 ΘΡΑΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΑ ΔΟΚΟΥ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ (ΔΕΞΙΑ).....	151
ΕΙΚΟΝΑ 6. 16 ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΩΝ DCDT ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ 4 ΣΗΜΕΙΩΝ	151

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 1. 1 ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗΣ ΚΥΒΟΣ ΥΠΟ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ.....	24
ΣΧΗΜΑ 1. 2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ. ΑΡΙΣΤΕΡΑ: ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΟ ΧΩΡΟ. ΔΕΞΙΑ: ΤΥΠΙΚΗ ΤΟΜΗ ΜΕ ΤΟ ΑΠΟΚΛΙΝΟΝ ΕΠΙΠΕΔΟ	24
ΣΧΗΜΑ 1. 3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ	27
ΣΧΗΜΑ 1. 4 . ΟΙ ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.....	30
ΣΧΗΜΑ 1. 5 ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ	32
ΣΧΗΜΑ 1. 6 ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ % ΚΑΤΑΝΟΜΗ (ΚΑΤΑ ΤΥΠΟ) ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ	33
ΣΧΗΜΑ 1. 7 ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ 1 KG ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ [21].....	34
ΣΧΗΜΑ 1. 8 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΣΕ ΤΟΝΟΥΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΤΑ ΤΑ ΕΤΗ 2009-2018.....	38

ΣΧΗΜΑ 2. 1 ΣΧΕΣΗ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ – ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	66
ΣΧΗΜΑ 2. 2 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.	67
ΣΧΗΜΑ 2. 3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.	68
ΣΧΗΜΑ 2. 4 Η ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΟΔΗΓΕΙ ΣΕ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ ΟΓΚΟΥ.	68
ΣΧΗΜΑ 2. 5 ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.	69
ΣΧΗΜΑ 2. 6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	72
ΣΧΗΜΑ 2. 7 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΤΗΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΜΕΝΗΣ ΖΩΝΗΣ ΣΤΟΝ ΟΠΛΙΣΜΟ	75
ΣΧΗΜΑ 2. 8 ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ	78
ΣΧΗΜΑ 2. 9 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΑΚΡΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΣΕ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΧΛΩΡΙΟΝΤΑ	81
ΣΧΗΜΑ 3. 1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΥΡΒΑΙΧ.....	89
ΣΧΗΜΑ 3. 2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΝΟΣ ΑΝΟΔΙΚΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ ΣΤΟ ΡΥΘΜΟ ΔΙΑΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ.....	92
ΣΧΗΜΑ 3. 3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΝΟΣ ΚΑΘΟΔΙΚΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ ΣΤΟ ΡΥΘΜΟ ΔΙΑΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ.....	92
ΣΧΗΜΑ 3. 4 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΠΟΛΩΣΗΣ	94
ΣΧΗΜΑ 3. 5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	95
ΣΧΗΜΑ 3. 6 ΚΑΘΟΔΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΕ ΑΝΟΔΟ ΖΝ.....	103
ΣΧΗΜΑ 4. 1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΤΟΥ WEENER.....	109
ΣΧΗΜΑ 4. 2 ΓΩΝΙΑ ΕΠΑΦΗΣ ΥΓΡΟΥ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΟΥ ΓΙΑ (Α): ΔΙΑΒΡΕΧΟΝ ΥΓΡΟ ΚΑΙ (Β): ΜΗ ΔΙΑΒΡΕΧΟΝ ΥΓΡΟ....	111
ΣΧΗΜΑ 5. 1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΩΝ ΔΟΚΩΝ ΚΑΙ ΟΠΛΙΣΜΟΥ	122
ΣΧΗΜΑ 6. 1 ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΤΙΣ 7, 17, 28 ΗΜΕΡΕΣ	127
ΣΧΗΜΑ 6. 2 ΠΑΡΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ HALF CELL POTENTIAL ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	132
ΣΧΗΜΑ 6. 3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ WENNER PROBE.....	134
ΣΧΗΜΑ 6. 4 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ASTM C 1202	140
ΣΧΗΜΑ 6. 5 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ), ΜΕΤΡΗΣΗ ΒΑΘΟΥΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟ ΜΕ ΔΙΑΛΥΜΑ ΦΑΙΝΟΛΟΦΘΑΛΕΪΝΗΣ (ΔΕΞΙΑ).....	142
ΣΧΗΜΑ 6. 6 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΟΡΟΣΙΜΕΤΡΟ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ	148
ΣΧΗΜΑ 6. 7 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΔΟΚΟΥ ΜΕ ΤΑ ΜΗΚΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ DCDT ΣΕ 5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ	151
ΣΧΗΜΑ 7. 1 ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΠΡΟΤΟΥ ΟΙ ΤΙΜΕΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΦΤΑΣΟΥΝ ΤΟ ΟΡΙΟ ΤΩΝ -200MV ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗ CC1.....	157
ΣΧΗΜΑ 7. 2 ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΠΡΟΤΟΥ ΟΙ ΤΙΜΕΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΦΤΑΣΟΥΝ ΤΟ ΟΡΙΟ ΤΩΝ -350MV ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ.....	157
ΣΧΗΜΑ 7. 3 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΙΣ ΔΟΚΟΥΣ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ	158
ΣΧΗΜΑ 7. 4 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΙΣ ΔΟΚΟΥΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ CC1 ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ	158
ΣΧΗΜΑ 7. 5 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΙΣ ΔΟΚΟΥΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ CC2 ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ	159
ΣΧΗΜΑ 7. 6 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΙΣ ΔΟΚΟΥΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ CC3 ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ	159
ΣΧΗΜΑ 7. 7 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΙΣ ΔΟΚΟΥΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ FAC ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ	160

ΣΧΗΜΑ 7. 8 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΙΣ ΔΟΚΟΥΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ SCC ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ	160
ΣΧΗΜΑ 7. 9 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ – ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, FAC, SCC ΣΕ ΔΟΚΟΥΣ ΧΩΡΙΣ ΦΟΡΤΙΣΗ	161
ΣΧΗΜΑ 7. 10 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ – ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, FAC, SCC ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 7%	162
ΣΧΗΜΑ 7. 11 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ – ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, FAC, ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 20%	162
ΣΧΗΜΑ 7. 12 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ – ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, CC2, CC3 ΣΕ ΔΟΚΟΥΣ ΧΩΡΙΣ ΦΟΡΤΙΣΗ	163
ΣΧΗΜΑ 7. 13 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ – ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, CC2, CC3 ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 7%	164
ΣΧΗΜΑ 7. 14 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ – ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, CC2, CC3, ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 20%	164
ΣΧΗΜΑ 7. 15 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ CC1	165
ΣΧΗΜΑ 7. 16 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ CC2	166
ΣΧΗΜΑ 7. 17 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ CC3	166
ΣΧΗΜΑ 7. 18 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ FAC	167
ΣΧΗΜΑ 7. 19 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ SCC	167
ΣΧΗΜΑ 7. 20 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ	172
ΣΧΗΜΑ 7. 21 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ CC1	172
ΣΧΗΜΑ 7. 22 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ CC2	173
ΣΧΗΜΑ 7. 23 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ CC3	173
ΣΧΗΜΑ 7. 24 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ FAC	174
ΣΧΗΜΑ 7. 25 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ SCC	174
ΣΧΗΜΑ 7. 26 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ – ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, FAC, SCC ΣΕ ΔΟΚΟΥΣ ΧΩΡΙΣ ΦΟΡΤΙΣΗ	175
ΣΧΗΜΑ 7. 27 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ – ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, FAC, SCC ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 7%	176
ΣΧΗΜΑ 7. 28 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ – ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, FAC, SCC ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 20%	176
ΣΧΗΜΑ 7. 29 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ – ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, CC2, CC3 ΣΕ ΔΟΚΟΥΣ ΧΩΡΙΣ ΦΟΡΤΙΣΗ	177
ΣΧΗΜΑ 7. 30 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ – ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, CC2, CC3 ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 7%	178
ΣΧΗΜΑ 7. 31 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ – ΧΡΟΝΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, CC2, CC3, ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 20%	178
ΣΧΗΜΑ 7. 32 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ CC1	179
ΣΧΗΜΑ 7. 33 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ CC2	180
ΣΧΗΜΑ 7. 34 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ CC3	180

ΣΧΗΜΑ 7. 35 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ FAC	181
ΣΧΗΜΑ 7. 36 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ SCC	181
ΣΧΗΜΑ 7. 37 ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΑΦΟΡΤΙΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ	187
ΣΧΗΜΑ 7. 38 ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΦΟΡΤΙΣΗ 7%	187
ΣΧΗΜΑ 7. 39 ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΦΟΡΤΙΣΗ 20%	188
ΣΧΗΜΑ 7. 40 ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΑΦΟΡΤΙΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ CC1, CC2, CC3	189
ΣΧΗΜΑ 7. 41 ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ CC1, CC2, CC3 ΜΕ ΦΟΡΤΙΣΗ 7%	190
ΣΧΗΜΑ 7. 42 ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ CC1, CC2, CC3 ΜΕ ΦΟΡΤΙΣΗ 20%	190
ΣΧΗΜΑ 7. 43 ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΑΦΟΡΤΙΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ	192
ΣΧΗΜΑ 7. 44 ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΦΟΡΤΙΣΗ 7%	192
ΣΧΗΜΑ 7. 45 ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΦΟΡΤΙΣΗ 20%	193
ΣΧΗΜΑ 7. 46 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, FAC, SCC.....	197
ΣΧΗΜΑ 7. 47 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, CC2, CC3	198
ΣΧΗΜΑ 7. 48 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ (CC1, CC2, CC3, FAC, SCC)	201
ΣΧΗΜΑ 7. 49 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΣΕ 60 ΚΑΙ 120 ΗΜΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΣΤΟ ΘΑΛΑΜΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, FAC ΚΑΙ SCC	202
ΣΧΗΜΑ 7. 50 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΣΕ 60 ΚΑΙ 120 ΗΜΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ ΣΤΟ ΘΑΛΑΜΟ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, CC2 ΚΑΙ CC3	203
ΣΧΗΜΑ 7. 51 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΘΕ ΣΥΝΘΕΣΗ ΟΠΩΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΗΚΑΝ ΜΕ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ	206
ΣΧΗΜΑ 7. 52 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	207
ΣΧΗΜΑ 7. 53 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΛΟΓΟΥ Ν/Τ	207
ΣΧΗΜΑ 7. 54 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, CC2, CC3 ΟΠΩΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΗΚΑΝ ΜΕ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ	208
ΣΧΗΜΑ 7. 55 ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΘΕ ΣΥΝΘΕΣΗ ΟΠΩΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΗΚΑΝ ΜΕ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	211
ΣΧΗΜΑ 7. 56 ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΘΕ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	212
ΣΧΗΜΑ 7. 57 ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΘΕ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΛΟΓΟΥ Ν/Τ.....	212
ΣΧΗΜΑ 7. 58 ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, CC2, CC3 ΟΠΩΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΘΗΚΑΝ ΜΕ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ	213
ΣΧΗΜΑ 7. 59 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΠΟΡΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΔΙΑΜΕΤΡΟ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ (HIGH PRESSURE STATION) ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, CC2, FAC ΚΑΙ SCC	216
ΣΧΗΜΑ 7. 60 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΠΟΡΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΔΙΑΜΕΤΡΟ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ (LOW PRESSURE STATION) ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, CC2, FAC ΚΑΙ SCC	216
ΣΧΗΜΑ 7. 61 ΣΧΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΙΣΕΡΧΟΜΕΝΟΥ ΟΓΚΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΚΤΙΝΑ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ CC1, CC2, FAC ΚΑΙ SCC	217
ΣΧΗΜΑ 7. 62 ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΜΨΗΣ 4 ΣΗΜΕΙΩΝ	219
ΣΧΗΜΑ 7. 63 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΒΥΘΙΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ CC1 ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΚΘΕΣΗΣ (A,B,D)	221

ΣΧΗΜΑ 7. 64 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΒΥΘΙΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ C23 ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΚΘΕΣΗΣ (A,B,D).....	221
ΣΧΗΜΑ 7. 65 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΒΥΘΙΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ CC3 ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΚΘΕΣΗΣ (A,B,D).....	221
ΣΧΗΜΑ 7. 66 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΒΥΘΙΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ FAC ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΚΘΕΣΗΣ (A,B,D).....	222
ΣΧΗΜΑ 7. 67 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΒΥΘΙΣΗΣ ΔΟΚΟΥ ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ SCC ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΚΘΕΣΗΣ (A,B,D).....	222
ΣΧΗΜΑ 7. 68 ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΡΩΓΜΩΝ ΜΕ ΕΙΔΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ	224
ΣΧΗΜΑ 7. 69 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ Ρ (ΚΝ) – ΒΥΘΙΣΗΣ D (ΜΜ) ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΟΚΟΥΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΚΑΘΕ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	226
ΣΧΗΜΑ 7. 70 : ΜΟΤΙΒΟ ΡΩΓΜΩΝ ΜΕΤΑ ΤΟ ΠΕΡΑΣ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΕΩΣ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α) ΣΕ ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ	227
ΣΧΗΜΑ 7. 71 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ Ρ (ΚΝ) – ΒΥΘΙΣΗΣ D (ΜΜ) ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΕΣ ΔΟΚΟΥΣ ΚΑΘΕ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	229
ΣΧΗΜΑ 7. 72 ΜΟΤΙΒΟ ΡΩΓΜΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ ΤΩΝ ΑΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΜΕ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΕ ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ.....	230
ΣΧΗΜΑ 7. 73 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ Ρ (ΚΝ) – ΒΥΘΙΣΗΣ D (ΜΜ) ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΕΣ ΔΟΚΟΥΣ ΥΠΟ ΜΟΝΙΜΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	232
ΣΧΗΜΑ 7. 74 ΜΟΤΙΒΟ ΡΩΓΜΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΕ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ D).....	233

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. 1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (ΒΑΣΕΙ ΚΤΣ-2016).....	18
ΠΙΝΑΚΑΣ 1. 2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ.....	30
ΠΙΝΑΚΑΣ 1. 3 ΤΥΠΟΙ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ EN 197-1	31
ΠΙΝΑΚΑΣ 1. 4 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΕΣ ΟΡΙΖΟΜΕΝΕΣ ΩΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 1. 5 ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ (ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ % Κ.Β.) [38].....	53
ΠΙΝΑΚΑΣ 1. 6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ ΕΚΘΕΣΗΣ - ΚΤΣ-2016	61
ΠΙΝΑΚΑΣ 1. 7 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΕΚΘΕΣΗΣ (ΚΤΣ 2016 Β2-7)	65
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 1 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.	105
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ, ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ASTM C876-15 [124].....	105
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 3 ΣΥΝΗΘΗ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	106
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. 4 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ	108
ΠΙΝΑΚΑΣ 5. 1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ	117
ΠΙΝΑΚΑΣ 5. 2 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ (%) ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	118
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (%) ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	118
ΠΙΝΑΚΑΣ 5. 4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	119
ΠΙΝΑΚΑΣ 5. 5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΝΕΡΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΑΝΑΜΙΞΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ	120
ΠΙΝΑΚΑΣ 5. 6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΚΘΕΣΗΣ	124
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΝΩΠΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΟΚΙΜΑΖΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ	128
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΘΙΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΚΤΣ 2016	130
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ASTM C876 ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ ΧΑΛΚΟΥ ΚΑΙ ΑΡΓΥΡΟΥ [124]	133

ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 4 ΕΜΠΕΡΙΚΟΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΕΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ WENNER PROBE ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ.....	136
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ EN ISO 12944-2	137
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 6 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ.....	141
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΣΥΝΘΕΣΗ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΚΘΕΣΗΣ.....	154
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ASTM C876 ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΘΕΙΙΚΟΥ ΧΑΛΚΟΥ	156
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ: ΕΛΑΧΙΣΤΟ, ΜΕΓΙΣΤΟ ΚΑΙ ΜΕΣΟΣ ΟΡΟ ΚΑΘΕ ΔΟΚΟΥ ΣΕ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ 42 ΜΗΝΩΝ.....	171
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (Μ%/ΕΤΟΣ) ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	186
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (Μ% / ΕΤΟΣ) ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ CC1, FAC, SCC	188
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (Μ% / ΕΤΟΣ) ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ CC1, CC2, CC3	191
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 7 ΡΥΘΜΟΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (Μ%/ΕΤΟΣ) ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	193
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 8 ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ASTM 1202	196
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ (ΣΕ COULOMB) ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗ ΣΥΝΘΕΣΗ – ASTM 1202.....	196
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 10 ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ CO ₂ ΣΤΙΣ ΔΟΚΙΜΑΖΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΓΙΑ 60, 120 ΗΜΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΟ ΘΑΛΑΜΟ	200
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 11 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΑΖΟΜΕΝΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ	205
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 12 ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΜΙΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ	210
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 13 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΟΠΩΣ ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ ΑΠΟ ΤΗ ΠΟΡΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ.....	215
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 14 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΔΟΚΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (PF) ΚΑΙ ΔΟΚΟΥ ΥΠΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗ (PF')	220
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 15 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΑΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ 4 ΣΗΜΕΙΩΝ	223
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 16 ΜΕΣΟ ΠΛΑΤΟΣ ΡΩΓΜΩΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΟΠΩΣ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ ΜΕ ΤΟ ΡΩΓΜΟΜΕΤΡΟ	224
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 17 ΠΛΑΤΟΣ ΡΩΓΜΩΝ (Μ.Ο., ΜΑΧ, ΜΙΝ) ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΟΠΩΣ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ ΜΕ ΤΟ ΡΩΓΜΟΜΕΤΡΟ	227
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 18 ΠΛΑΤΟΣ ΡΩΓΜΩΝ (Μ.Ο., ΜΑΧ, ΜΙΝ) ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΟΠΩΣ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ ΜΕ ΤΟ ΡΩΓΜΟΜΕΤΡΟ	230
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 19 ΠΛΑΤΟΣ ΡΩΓΜΩΝ (ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ, ΜΑΧ, ΜΙΝ) ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΟΠΩΣ ΜΕΤΡΗΘΗΚΑΝ ΜΕ ΤΟ ΡΩΓΜΟΜΕΤΡΟ	233

ΜΕΡΟΣ Α' – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1. Το σκυρόδεμα ως δομικό υλικό

1.1.1. Εισαγωγή

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 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 Ευρωπαϊκό πρότυπο (EN 206) αλλά και τον εθνικό κανονισμό τεχνολογίας σκυροδέματος (ΚΤΣ 2016), προβλέπεται η προσθήκη και άλλων ομάδων συστατικών (βελτιωτικά πρόσθετα και πρόσμικτα συστατικά) οι οποίες, με διαφορετική αποστολή και με διαφορετικό μηχανισμό κάθε μία, τροποποιούν κατά συγκεκριμένο τρόπο μερικές από τις ιδιότητές του. [1]

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 φθινό 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 διάστρωσή του και η συντήρησή του μετά τη 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 ανάπτυξή 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.

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. Κεφαλαιώδους όμως σημασίας για την πρόβλεψη όλης της μετέπειτα συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων του σκυροδέματος είναι η εμβάθυνση 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]

Ως σκυρόδεμα ορίζεται το υλικό που σχηματίζεται από την ανάμειξη τσιμέντου, χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών και νερού, (με ή χωρίς την ενσωμάτωση των υλικών που χαρακτηρίζονται πρόσθετα και βελτιωτικά), το οποίο αναπτύσσει τις ιδιότητές του με τη 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 πυκνότητά 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 (βάσει ΚΤΣ-2016)

Κατηγορία Σκυροδέματος	$f_{ck,κυλ.}$ (MPa)	$f_{ck,κύβου}$ (MPa) N/mm ²
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C35/45	35	45
C 40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

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 υλικό υψηλής επιτελεστικότητας. Προκειμένου να ανταποκριθούν οι κατασκευαστές στις όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις των οικοδομών, δημιουργούνται συνεχώς νέοι τύποι ειδικών τσιμεντών, ενισχυμένης σύστασης χάλυβες και ειδικά πρόσθετα, με συνεχώς βελτιούμενες ιδιότητες και εφαρμογές για οικονομικότερη και μακροβιότερη διάρκεια ζωής των κατασκευών. [3]

1.1.2. Ιστορική αναδρομή

Η ύπαρξη ενός τεχνητού στερεού υλικού που προκύπτει από την ανάμειξη φυσικών υλικών με συνδετικές κονίες και νερό για να αποτελέσει ένα σώμα και έχει μετεξελιχθεί στο σημερινό σκυρόδεμα, έχει ιστορία 9000 ετών. Το αρχαιότερο γνωστό σήμερα σκυρόδεμα χρονολογούμενο από το 7000 π.Χ. βρίσκεται στη νότια Γαλιλαία, στο Ισραήλ. Αποτελείται από μίγμα ασβέστη με πέτρες. Ο ασβέστης όταν αναμιχθεί με νερό και άμμο δημιουργεί ένα κονίαμα το οποίο ερχόμενο σε επαφή με το διοξείδιο του άνθρακα του ατμοσφαιρικού αέρα σκληραίνει και δημιουργεί ένα στερεό σώμα. Αν το κονίαμα αυτό ανακατευτεί με πέτρες, συνδέει τις πέτρες και δημιουργεί ένα είδος σκυροδέματος. [4]

Εύρημα σκυροδέματος υπάρχει στις όχθες του Δούναβη στο Lepenski Vir στη Γιουγκοσλαβία και χρονολογείται από το 5600 π.Χ.. Αποτελεί το δάπεδο μιας προϊστορικής καλύβας. Στη μεγάλη πυραμίδα στην Γκίζα της Αιγύπτου (2500 π.Χ.) οι λίθοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με κάποιο κονίαμα από ασβέστη ή γύψο. Στην ίδια χώρα, στις αρχαίες Θήβες, υπάρχει τοιχογραφία με αναπαράσταση των εργασιών παρασκευής ασβεστοκονιάματος και χτισίματος με το υλικό αυτό. Την ίδια εποχή αναφέρεται ότι στην Κίνα χρησιμοποιήθηκαν τσιμεντοειδή υλικά για την κατασκευή του Σινικού Τείχους.

Η τέχνη αυτή του χτισίματος φαίνεται ότι μεταφέρθηκε και στην αρχαία Ελλάδα όπου χρησιμοποιήθηκαν διάφορα μίγματα ασβέστη για χτίσιμο και για επικάλυψη πλίνθων φτιαγμένων από πηλό και ξεραμένων στον ήλιο. [5]

Ο Ρωμαίος αρχιτέκτονας-συγγραφέας Marcus Vitruvius Pollio αποτελεί μία σημαντική πηγή πληροφοριών για την αρχαία Ελληνική αρχιτεκτονική και οικοδομική. Χρησιμοποιεί την ελληνική λέξη "έμπλεκτον" για να περιγράψει ένα υλικό, πρόδρομο του σημερινού σκυροδέματος, που αποτελείται από ένα συνδετικό κονίαμα στο οποίο αναμιγνύονται μικρά τεμάχια λίθων. Σε χειρόγραφο του γραμμένα περί το 13 π.Χ. («Δέκα βιβλία Αρχιτεκτονικής») έδινε οδηγίες στους αρχιτέκτονες για την παρασκευή κονιάματος που πήζει τόσο στον αέρα όσο και στο νερό. Τα αερικά κονιάματα με ασβέστη και νερό για να πήξουν και να σκληρυνθούν χρειάζεται να παραμείνουν στον αέρα ώστε να γίνει η χημική αντίδραση της άσβεστου με το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας. Οι αρχαίοι Έλληνες ήταν ίσως οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν υδραυλικές κονίες δηλ. κονίες που όταν ανακατευτούν με το νερό μπορούν να πήξουν και να σκληρυνθούν τόσο στον αέρα όσο και μέσα στο νερό. Έτσι τα κονιάματα και τα σκυροδέματα που παρασκευάζονται με υδραυλικές κονίες έχουν πολύ μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στις χρόνιες επιδράσεις του περιβάλλοντος.

Οι αρχαίοι Έλληνες χρησιμοποίησαν υδραυλικά κονιάματα, όπως μίγμα ασβέστη και ηφαιστειακής γης από τη Θήρα ή τη Νίσυρο στην Ελλάδα ή τη Δικαιαρχεία, αργότερα Pozzuoli, στην ελληνική αποικία της Ιταλίας κοντά στη Νάπολη. Το μίγμα αυτό έχει τη δυνατότητα να πήζει και να σκληραίνει μέσα στο νερό (υδραυλική κονία) χωρίς να διαλύεται όπως τα ασβεστοκονιάματα. Από την άποψη αυτή το μίγμα ασβέστη και ηφαιστειακής γης είναι πολύ συγγενές με το τσιμέντο και θα μπορούσε να θεωρηθεί ως πρόδρομο υλικό του σημερινού τσιμέντου. Τέτοιο μίγμα φαίνεται ότι χρησιμοποιήθηκε για να γίνει υδατοστεγανή δεξαμενή χωρητικότητας 600 m³ στο ναό της Αθηνάς στην αρχαία Κάμιρο στη Ρόδο, καθώς και στην κατασκευή του λιμανιού του Πειραιά (Ζέα). Επίσης μίγματα ασβέστη τριμμένης ηφαιστειακής γης και μαρμαρόσκονης χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα στην κατασκευή σοβάδων,

ειδικών επικαλύψεων για να αποτελέσουν την επιφάνεια για ζωγραφική (στούκο) αλλά και για "συγκόλληση σπασμένων τεμαχίων μαρμάρων" (αρχαϊκός ναός Αρτέμιδος). Τα υλικά αυτά περιγράφονται από τους αρχαίους συγγραφείς Θεόφραστο, Στράβωνα και Vitruvius, αλλά και από σύγχρονους ερευνητές.

Οι Ρωμαίοι φαίνεται ότι πήραν τις γνώσεις αυτές από τους Έλληνες, πιθανότατα των Ελληνικών αποικιών της Ιταλίας, και ήδη από το 300 π.Χ. τις ανέπτυξαν σε μεγάλο βαθμό τόσο ως προς τα ασβεστοκονιάματα (αερικά κονιάματα) όσο και ως προς τη χρήση μίγματος ασβέστη και ηφαιστειακής γης (υδραυλικά κονιάματα). Την ηφαιστειακή γη την προμηθεύονταν από το χωριό Pozzuoli κοντά στο Βεζούβιο. Το χωριό αυτό έδωσε το όνομα "Ποζολάνη" στα ηφαιστειακά υλικά αλλά και σε τεχνητά υλικά με τις ίδιες περίπου ιδιότητες που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη έκταση σήμερα (ποζολανικά τσιμέντα- ποζολανική χημική αντίδραση). Ένα από τα πρώτα σημαντικά έργα των Ρωμαίων είναι το αρχαίο Θέατρο Πομπηίας χωρητικότητας 20.000 θεατών (75 π.Χ.). Ακολουθούν πλήθος θαυμαστών από τεχνικής και αρχιτεκτονικής άποψης έργων, όπως το Κολοσσαίο (82 μ.Χ.), το Πάνθεον (123 μ.Χ.) και τα διάφορα υδραγωγεία, όπως το υδραγωγείο στη πόλη Nimes στη Γαλλία (150 μ.Χ.).

Οι Ρωμαίοι επίσης προσέθεταν μερικές φορές στο σκυρόδεμα διάφορα υλικά για να βελτιώσουν τις ιδιότητές του, που θεωρούνται ως πρόδρομα των σύγχρονων χρησιμοποιούμενων χημικών προσθέτων. Για παράδειγμα, χρησιμοποίησαν αίμα του οποίου η δράση είναι παρόμοια με εκείνη των αερακτικών προσθέτων (υλικών που εισάγουν αέρα στο σκυρόδεμα με σκοπό να βελτιώσουν την ανθεκτικότητά του στη δράση του παγετού και να αυξήσουν την εργασιμότητα). Επίσης προσέθεσαν κατά την ανάμιξη τριχών αλόγου "πρόδρομο" υλικό των χρησιμοποιούμενων σήμερα πλαστικών και χαλύβδινων ινών (ινοπλισμένο σκυρόδεμα). Παρόμοιο υλικό χρησιμοποιήθηκε επίσης για την κατασκευή των κογχών και των τόξων στα κατώτερα επίπεδα της Αγίας Σοφίας στην Κωνσταντινούπολη περί το 540 μ.Χ.

Κατά το μεσαίωνα δεν παρουσιάζεται καμία εξέλιξη. Η ανακάλυψη των χειρογράφων του Vitruvius το 1414 μ.Χ. όμως, αναθέρμανε το ενδιαφέρον για το σκυρόδεμα και λίγα χρόνια μετά, το 1500 μ.Χ. χρησιμοποιείται ποζολανικό κονίαμα στα βάρη της Παναγίας των Παρισίων που αποτελεί την πρώτη διαπιστευμένη χρήση σκυροδέματος στην νεότερη εποχή. [6]

Το πρώτο ουσιαστικά βήμα για τη δημιουργία του τσιμέντου υπό τη μορφή που χρησιμοποιείται σήμερα θα μπορούσε να αποδοθεί στον Άγγλο μηχανικό J.Smeaton στα μέσα του 1.700 μ.Χ., στον οποίο ανατέθηκε η κατασκευή ενός φάρου κοντά στο Plymouth. Ο φάρος είχε προηγουμένως κατασκευασθεί από ξύλο και είχε δύο φορές καταστραφεί, αρχικά από πυρκαγιά και τελικά από θύελλα, και θα έπρεπε πλέον να κατασκευαστεί από πέτρα αλλά η γειτνίαση με τη θάλασσα και η βραδύτητα πήξεως και σκλήρυνσης των ασβεστοκονιαμάτων δεν επέτρεπαν το ασφαλές χτίσιμο. Ο Smeaton άρχισε να ερευνά τα διάφορα υλικά και διαπίστωσε ότι τα ασβεστοκονιάματα με ασβέστη ο οποίος έχει παρασκευαστεί από το ψήσιμο ασβεστόλιθου που περιείχε άργιλο (δηλ. πυρίτιο και αργίλιο) μπορούσαν να πήξουν τόσο στον αέρα όσο και μέσα στο νερό. Αυτή η παρατήρηση θεωρείται ότι αποτελεί το πρώτο σημαντικό βήμα για την παραγωγή του τσιμέντου με τη μορφή που παράγεται σήμερα. Ανάλογες εξελίξεις την ίδια εποχή αναφέρονται στη Γαλλία αποδιδόμενες στους Vicat και Lesage. Ακολουθούν διάφορες άλλες εφευρέσεις με αντίστοιχα διπλώματα ευρεσιτεχνίας όπως του εφημέριου J.Parker με το "Ρωμαϊκό τσιμέντο". Η συστηματικότερη όμως παρασκευή τσιμέντου αποδίδεται στον Άγγλο μηχανικό J.Asplin ο οποίος έδωσε στο υλικό το όνομα που και σήμερα χρησιμοποιείται, τσιμέντο Portland, για το οποίο πήρε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Το όνομα αυτό δόθηκε γιατί το χρώμα του σκληρυμένου τσιμέντου ήταν πολύ κοντά στο χρώμα των πετρωμάτων στο Portland. Σήμερα σώζεται (σε εγκαταστάσεις Βρετανικής Τσιμεντοβιομηχανίας) ένας από τους πέτρινους κλιβάνους που χρησιμοποίησε ο γιος του Asplin, William για την παραγωγή του τσιμέντου.

Έκτοτε η παραγωγή του τσιμέντου εξαπλώθηκε σε όλο τον κόσμο και παρουσίασε σημαντικές εξελίξεις για να φθάσει στο σημερινό επίπεδο εξέλιξης. Παράλληλα προχώρησε η εξέλιξη του σκυροδέματος και αναφέρεται η κατασκευή της πρώτης γέφυρας από άοπλο σκυρόδεμα στην Γαλλία το 1816, ενώ το 1818 ο Βρετανός μηχανικός R.Dodd απέκτησε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την προσθήκη ράβδων σφυρήλατου σιδήρου στο σκυρόδεμα. Εισάγεται έτσι αρχικά η έννοια του οπλισμού στο σκυρόδεμα

που διευρύνεται σύντομα με την χρήση σιδηροδοκών με σκυρόδεμα για κατασκευή δαπέδων (F.Corgnet, 1855) και σύρματος για την ενίσχυση γλαστρών από σκυρόδεμα (J.Monier 1850-1861), που αποτελεί και την πλέον εξελιγμένη μέχρι τότε μορφή οπλισμένου σκυροδέματος. Το 1902 ο A.Rerrert κατασκεύασε στο Παρίσι πολυκατοικία με χρήση «συστήματος οπλισμένου σκυροδέματος» όπως το ονόμασε. Αυτή ήταν και η πρώτη εμφάνιση κτιρίου με φέροντα οργανισμό από υποστυλώματα, δοκούς και πλάκες χωρίς φέρουσες τοιχοποιίες.

Η πρόοδος της τεχνολογίας ήταν στη συνέχεια μεγάλη, τόσο σε ότι αφορά τα δομικά συστήματα κατασκευής με χρήση εξελιγμένων ποιοτήτων χάλυβα, συστημάτων προέντασης, ινοπλισμού, όσο και σε ότι αφορά το σκυρόδεμα με την εξέλιξη των μεθόδων παραγωγής και ποιοτικού ελέγχου και τη χρήση βελτιωτικών χημικών προσθέτων.

Σήμερα παράγονται ετησίως σε όλο τον κόσμο πάνω από 4 δισεκατομμύρια τόνοι τσιμέντου και το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται από το τσιμέντο αυτό υπερβαίνει τα 10 δισεκατομμύρια τόνους. Το γεγονός αυτό καθιστά το τσιμέντο και το σκυρόδεμα τα σπουδαιότερα και πλέον διαδεδομένα δομικά υλικά της εποχής μας. Παρασκευάζεται σκυρόδεμα με θλιπτική αντοχή μεγαλύτερη από 200 MPa αλλά και σκυρόδεμα με προεπιλεγμένες ιδιότητες, όπως χαμηλής αντοχής, υψηλής ανθεκτικότητας σε διαβρωτικές επιδράσεις του περιβάλλοντος, αυτοσυμπυκνούμενο, με αντοχή σε τριβή και κρούση και σκυρόδεμα που απορροφά αέρειες ενώσεις NOx που μολύνουν το περιβάλλον. [7]

1.1.3. Ιδιότητες σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα ως υλικό διακρίνεται κατά την ανάπτυξή του σε:

Νωπό σκυρόδεμα: Ονομάζεται το σκυρόδεμα το οποίο προκύπτει από την ανάμιξη των πρώτων υλών του και χαρακτηρίζεται έτσι για όσο χρονικό διάστημα διατηρεί το εργάσιμο, δηλαδή για όσο είναι δυνατόν να μεταφέρεται και να διαστρώνεται.

Σκληρυμένο σκυρόδεμα: Ονομάζεται το σκυρόδεμα το οποίο έχει σκληρυνθεί, έχει αποκτήσει την οριστική μορφή του και έχει αναπτύξει μηχανικές αντοχές.

1.1.3.1. Ιδιότητες Νωπού Σκυροδέματος

Τα βασικά χαρακτηριστικά του νωπού σκυροδέματος τα οποία επηρεάζουν άμεσα τις ιδιότητες του σκληρυθέντος σκυροδέματος, γι' αυτό και πρέπει να υπολογίζονται πάντα πριν την τοποθέτηση του σκυροδέματος στο καλούπι, είναι:

Η Εργασιμότητα

Ως εργασιμότητα (workability) ή εργάσιμο χαρακτηρίζεται γενικά η ευκολία με την οποία είναι δυνατόν να μεταφερθεί, να διαστρωθεί και να 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 (fluidity), που σημαίνει η ευκολία ροής ενός υλικού. Η ρευστότητα εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του νερού ανάμιξης.

Η πλαστικότητα (plasticity), δηλαδή η ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς διακοπή της συνέχειάς του.

Η συνοχή (cohesion), που εκφράζει το αποτέλεσμα των δυνάμεων που έλκουν τα μόρια μεταξύ τους και επομένως συντελεί στην πλαστικότητα.

Η συμπυκνωσιμότητα (condensation), που εκφράζει τη δυνατότητα του υλικού να συμπυκνωθεί και εξαρτάται από τον αρχικό βαθμό συμπύκνωσης.

Πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος *συνεκτικότητα* για να εκφρασθεί άλλοτε το εργάσιμο και άλλοτε η ρευστότητα. Η εργασιμότητα δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Για το σκοπό αυτό έχουν προταθεί μέθοδοι με τις οποίες μετρούνται μία ή περισσότερες από τις παραπάνω ιδιότητες. Η κυριότερη χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η κάθιση (slump) η οποία εκφράζεται με την απώλεια ύψους, σε cm, που παρουσιάζει μια κωνική στήλη νωπού σκυροδέματος όταν ανασυρθεί η κωνική με την οποία μορφώθηκε. [8], [9]

Η Πυκνότητα

Η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος είναι η μάζα σε kg ανά m^3 νωπού, κανονικά συμπτυκνωμένου σκυροδέματος. Με δεδομένη τη χρήση ίδιας ποσότητας τσιμέντου και αδρανών, χαμηλότερη πυκνότητα σκυροδέματος είναι ενδεικτική χαμηλότερης αντοχής σκυροδέματος, επειδή η πυκνότητα μειώνεται όσο το περιεχόμενο νερό και τα κενά στη μάζα του σκυροδέματος αυξάνονται.

Η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος μειώνεται όσο:

- αυξάνεται το περιεχόμενο νερό
- αυξάνονται τα κενά στο εσωτερικό του

Η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος αυξάνεται όσο:

- αυξάνεται το περιεχόμενο τσιμέντο
- μειώνεται ο λόγος νερού/ τσιμέντο
- μειώνονται τα περιεχόμενα κενά

Ο καθορισμός της πυκνότητας του νωπού σκυροδέματος πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-6. [10]

Ο Περιεχόμενος Αέρας

Όλα τα σκυροδέματα κατά την παρασκευή τους εγκλωβίζουν ποσότητα αέρα στη μάζα τους. Ακόμα και μετά από προσεκτική συμπίκνωση, το υπολειπόμενο περιεχόμενο αέρα, π.χ. με μέγιστο κόκκο αδρανών 32mm, καταλαμβάνει ποσοστό 1- 2% κατά όγκο και αυτό το σύνηθες περιεχόμενο μπορεί να ανέλθει σε ποσοστό 4% κατά όγκο σε σκυροδέματα με λεπτά αδρανή. Ο εγκλεισμός ποσότητας αέρα στη μάζα του σκυροδέματος αποτελεί μία από τις βασικές αιτίες ύπαρξης πορώδους στο σκυρόδεμα, βασική ιδιότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος. [11]

Η Θερμοκρασία

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. Βασικές προϋποθέσεις όσον αφορά τη θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος είναι:

Η θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος δεν πρέπει να πέσει κάτω από τους $+5^{\circ}\text{C}$ κατά την διάστρωσή του.

Το μόλις τοποθετημένο σκυρόδεμα πρέπει να προστατεύεται από τον παγετό. Για σκυρόδεμα με αντίσταση σε παγετό απαιτείται θλιπτική αντοχή περίπου $10\text{N}/\text{mm}^2$.

Από την άλλη μεριά, πολύ υψηλές θερμοκρασίες σκυροδέματος μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα κατά την έγχυσή του όπως επιφανειακές ρηγματώσεις και μείωση ορισμένων ιδιοτήτων του σκληρυμένου σκυροδέματος. Για να αποφευχθεί αυτό, η θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος δε θα πρέπει να ξεπερνά τους 30°C κατά την εφαρμογή του.

1.1.3.2. Ιδιότητες σκληρυμένου σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα αποτελεί το πιο διαδομένο υλικό όσον αφορά τις κατασκευές του 20^{ου} αλλά και του 21^{ου} αιώνα. Στόχος των περισσότερων από τις κατασκευές αυτές είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής και αυτό συνήθως επιτυγχάνεται εξαιτίας των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων που αναπτύσσει το σκυρόδεμα όταν περνάει σε φάση σκλήρυνσης, όπως οι μηχανικές αντοχές του και η υψηλή ανθεκτικότητά του απέναντι στα στοιχεία του περιβάλλοντος.

Μηχανική αντοχή

Η αντοχή του σκυροδέματος σε μηχανική καταπόνηση θεωρείται ως η πιο σημαντική ιδιότητά 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/mm² ή MPa). Η αντοχή συνδέεται άμεσα με τη δομή της τσιμεντόπαστας και είναι μια αναντικατάστατη μεταβλητή στο σχεδιασμό των κατασκευών.

Η αντοχή του σκυροδέματος, σε συγκεκριμένη ηλικία, συντήρηση και θερμοκρασία θεωρείται ότι εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες:

- Το λόγο νερού/τσιμέντο (N/T)
- Το βαθμό συμπύκνωσης.

Μονοαξονική θλιπτική αντοχή

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 επιπόνηση 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. [12]

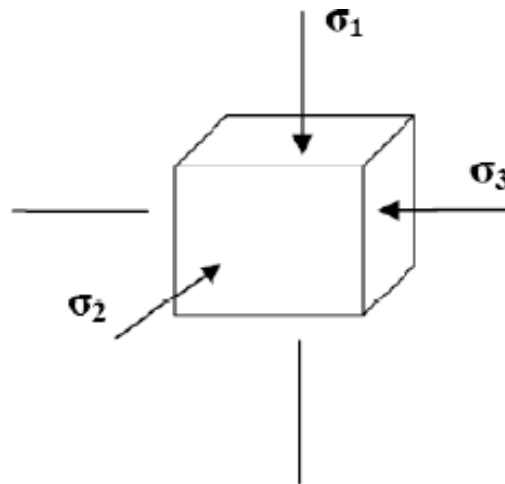
Μονοαξονική εφελκυστική αντοχή

Η αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό είναι περίπου το 10% της αντοχής του σε θλίψη. Γι' αυτό στις κατασκευές το σκυρόδεμα είναι ρηγματωμένο στις περιοχές ανάπτυξης εφελκυστικών τάσεων (από τα φορτία λειτουργίας ή από έμμεσες δράσεις). Λόγω του μικρού μεγέθους της, η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος θεωρείται σ' αρκετές περιπτώσεις αμελητέα κατά το σχεδιασμό κατασκευών.

Για τον άμεσο προσδιορισμό της έχουν διατυπωθεί εμπειρικές σχέσεις έκφρασης της εφελκυστικής αντοχής συναρτήσει της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη και έχουν αναπτυχθεί έμμεσες δοκιμές για τον προσδιορισμό της, όπως οι δοκιμές εφελκυσμού σε διάρρηξη (Brazilian Test) ή σε κάμψη.

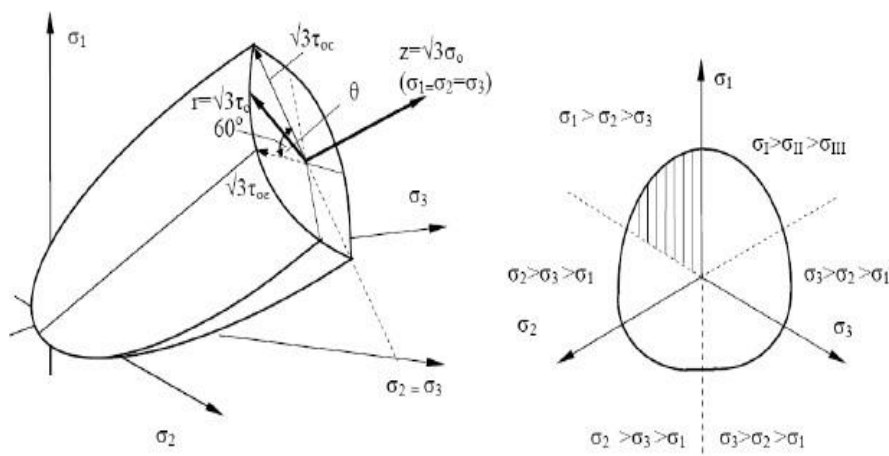
Αντοχή σε τριαξονική επιπόνηση

Η εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό ενός δομικού στοιχείου από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό φορτίο είναι πολύπλοκη. Εάν απομονωθεί από την κατασκευή ένας στοιχειώδης κύβος από σκυρόδεμα με έδρες κάθετες στη διεύθυνση των τροχιών των κυρίων τάσεων, τότε η εντατική κατάστασή του περιγράφεται από τις τρεις κύριες τάσεις, έστω θλιπτικές.



Σχήμα 1. 1 Στοιχειώδης κύβος υπό τριαξονική ένταση

Ο συνδυασμός των τιμών των κυρίων τάσεων που προκαλούν αστοχία του κύβου ορίζει μια επιφάνεια στο χώρο των τάσεων (Σχήμα 1.2). Οι τομές της επιφάνειας αυτής με οποιοδήποτε από τα επίπεδα που περιέχουν τους άξονες (σ_1, σ_2) ή (σ_2, σ_3) ή (σ_3, σ_1) περιγράφουν την αντοχή του σκυροδέματος σε διαξονική ένταση, ενώ οι τομές της με τα επίπεδα που σχηματίζουν ένας από τους άξονες σ_1 ή σ_2 ή σ_3 και η διαγώνιος $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ περιγράφει την αντοχή του σκυροδέματος σε αξονοσυμμετρική ένταση. Η μονοαξονική αντοχή αντιστοιχεί στα σημεία τομής της επιφάνειας με τους άξονες σ_1, σ_2 και σ_3 . [12]



Σχήμα 1. 2 Επιφάνεια αστοχίας. αριστερά: Σχηματική απεικόνιση των τάσεων στο χώρο. δεξιά: Τυπική τομή με το αποκλίνον επίπεδο

Ανθεκτικότητα

Η ανθεκτικότητα εκφράζει τη δυνατότητα του σκυροδέματος να διατηρεί την αντοχή του και τη λειτουργικότητά του στην κατασκευή, στο χρόνο. Συγκεκριμένα αναφέρεται στην ικανότητα του υλικού να μη φθείρεται από το περιβάλλον (φυσικό ή μη) στο οποίο εκτίθεται. Η φθορά είναι το αποτέλεσμα των φυσικών και χημικών δράσεων που συμβαίνουν μεταξύ των συστατικών του σκυροδέματος και των συστατικών (διαβρωτικών μέσων) που συνιστούν το περιβάλλον όπου εκτίθεται. Εκδηλώνεται με ρωγμές και διογκώσεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος αλλά και με μείωση της μηχανικής αντοχής του και απώλεια μάζας του οπλισμού.

Οι βασικότερες αιτίες φθοράς που καταγράφονται στην πράξη είναι:

- Η διάβρωση του σιδηροπλισμού
- Η ψύξη - απόψυξη στα ψυχρά κλίματα
- Οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ του ενυδατωμένου τσιμέντου και των διαφόρων διαβρωτικών μέσων
- Οι φυσικοχημικές δράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του σκυροδέματος μεταξύ των συστατικών του.

Η μελέτη των διαφόρων φυσικοχημικών δράσεων της φθοράς είναι σύνθετη και απαιτεί τη συνολική και πολύπλευρη εξέτασή τους. Η κατανόηση των φαινομένων, που προκαλούν τη φθορά του σκυροδέματος επιτρέπει την αναγωγή τους σε παράγοντες ανθεκτικότητας. Σε αυτά τα πλαίσια, η παρούσα έρευνα επιχειρεί να αξιολογήσει μεταξύ άλλων τον παράγοντα της μόνιμης φόρτισης που φέρει μια κατασκευή σκυροδέματος, η οποία δεν έχει ερευνηθεί επαρκώς έως τώρα. [12]

Πορώδες

Το πορώδες της σκληρυμένης πάστας τσιμέντου αποτελεί την πλέον σημαντική ιδιότητα μετά τη θλιπτική αντοχή. Τα χαρακτηριστικά του πορώδους είναι αυτά που καθορίζουν τη συμπεριφορά της κατασκευής και την ανθεκτικότητά της απέναντι στα επιβλαβή στοιχεία του περιβάλλοντος, τα οποία διεισδύουν στο σκυρόδεμα και προκαλούν φθορές. Το σκυρόδεμα, όπως και οι φυσικοί λίθοι, δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές και πλήρες αλλά περιέχει πλήθος από εσωτερικές κοιλότητες που ονομάζονται πόροι και οι οποίοι περιέχουν αέρα ή νερό. Το σύνολο αυτών των κοιλιοτήτων ονομάζεται πορώδες του σκυροδέματος. Οι πόροι στα κονιάματα και σκυροδέματα διαφέρουν ως προς το μέγεθος, σχήμα και καταγωγή και μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Πόροι στην πάστα τσιμέντου που περιλαμβάνουν του πόρους του πήγματος (gel pores), τους τριχοειδείς πόρους (capillary pores), τους κοίλους πόρους (hollow-shell pores), και τα κενά αέρος (air voids)
- Πόροι που σχετίζονται με την διεπιφάνεια ανάμεσα στα αδρανή και την πάστα τσιμέντου
- Κενά με νερό, π.χ. κενά κάτω από αδρανή ή κάτω από τον οπλισμό που δημιουργήθηκαν από την απομάκρυνση του νερού έξω από το σκυρόδεμα, και κενά λόγω κακοτεχνιών π.χ. κυψελίδες λόγω κακής συμπύκνωσης
- Εσωτερικές ασυνέπειες στην πάστα τσιμέντου που σχετίζονται με αστάθειες που συμβαίνουν λόγω αλλαγών στην υγρασία και θερμοκρασία

Το πήγμα του C-S-H είναι το κύριο συστατικό της πάστας τσιμέντου και είναι υπεύθυνο για την αντοχή και τη μικροδομή της. Το C-S-H είναι ένα άμορφο κολλοειδές πήγμα, που περιέχει πόρους μεγέθους περίπου μερικών νανομέτρων που καλούνται πόροι του πήγματος. Το πήγμα του C-S-H έχει ένα πορώδες της τάξης του 28%. Μελέτες από τους S. Diamond [13] και H. Jennings et al. [14] έδειξαν ότι το πήγμα του C-S-H βρίσκεται σε μια ποικιλία από μορφές: ινώδη σωματίδια, κυψελίδες, επίπεδα σωματίδια και ακανόνιστους κόκκους. Το πήγμα C-S-H μπορεί να παραχθεί μόνο μέσα στα αρχικά πληρωμένα με νερό τριχοειδή κενά της φρεσκοαναμεμιγμένης πάστας τσιμέντου. Ο κύριος όγκος του πήγματος C-S-H αφού ένας κόκκος τσιμέντου έχει πλήρως ενυδατωθεί απαιτεί 60% περισσότερο όγκο από τον αρχικό όγκο των άνυδρων κόκκων τσιμέντου και του νερού, και αυτή η διόγκωση μετακινείται μόνο μέσα στους τριχοειδείς πόρους. Καθώς η ενυδάτωση προχωράει, το ποσοστό και η κατανομή των τριχοειδών πόρων και των πόρων του πήγματος αλλάζουν σημαντικά: ο όγκος των τριχοειδών πόρων μειώνεται γιατί οι τριχοειδείς πόροι πληρώνονται με προϊόντα ενυδάτωσης, και ο όγκος των πόρων του πήγματος αυξάνεται αφού περισσότερο πήγμα δημιουργείται.

Το πορώδες του πήγματος έχει μεγάλη επίδραση στον ρυθμό της ενυδάτωσης, γιατί οι πόροι του πήγματος υπάρχουν μέσα στα προϊόντα ενυδάτωσης που συσσωρεύονται ανάμεσα στην υγρή φάση και στους άνυδρους κόκκους τσιμέντου.[15] Οι πόροι του πήγματος έχουν μέγεθος περίπου 0,5 nm. Η επιλογή αυτού του μεγέθους βασίζεται στην υπόθεση ότι τα προϊόντα ενυδάτωσης δεν μπορούν να ιζηματοποιηθούν μέσα σε πόρους που έχουν διαμέτρους μικρότερες από 2 nm. Λόγω του μικρού μεγέθους των πόρων του πήγματος, που είναι μόνο μια τάξη μεγέθους μεγαλύτεροι από το μέγεθος των μορίων του νερού και λόγω της μεγάλης συγγένειας των μορίων του νερού με το επιφανειακό πήγμα, η κίνηση του νερού μέσα στους πόρους του πήγματος δεν συνεισφέρει πολύ στην διαπερατότητα της πάστας τσιμέντου. Οι πόροι διαχωρίζονται ως προς το μέγεθός τους σε αρκετές κατηγορίες. Ένα χαρακτηριστικό ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι το πλάτος των πόρων, π.χ. η διάμετρος ενός κυλινδρικού πόρου ή η απόσταση ανάμεσα στις πλευρές ενός πόρου με σχήμα σχισμής. Η ορολογία που αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους (πόροι πήγματος, τριχοειδείς πόροι, κοίλοι πόροι ή κελύφη και κενά αέρος) χρησιμοποιείται στην επιστήμη του σκυροδέματος. Μια πιο γενική ταξινόμηση των πόρων στα στερεά σύμφωνα με το μέσο πλάτος τους προτάθηκε αρχικά από τον M.Dubinin [16] το 1960 και είναι πλέον επίσημα αναγνωρισμένος από την IUPAC, τα ακόλουθα μεγέθη διαμέτρου πόρων:

- Μικροπόροι που έχουν μέγεθος λιγότερο από 2 nm
- Μεσοπόροι που έχουν μέγεθος από 2 έως 50 nm
- Μακροπόροι που έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από 50 nm

Τα σύνορα μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών δεν είναι αυστηρά και εξαρτώνται από το σχήμα των πόρων. Ο Dubinin επίσης πρότεινε τους όρους εξαιρετικά μικροπόροι (ultramicropores) για πόρους μικρότερους από 0.6 nm και υπερμικροπόροι (supermicropores) για πόρους που έχουν εύρος 0.6 έως 1,6 nm. Οι εξαιρετικά μικροί πόροι αναφέρονται στη βιβλιογραφία και ως υπομικροπόροι. Πρέπει να σημειωθεί πως μερικές φορές στην επιστήμη του σκυροδέματος οι όροι μικρο, μέσο και μακροπόροι χρησιμοποιούνται διαφορετικά. Για παράδειγμα, οι Young et al. [17] καθορίζουν πόρους μικρότερους από 2.5 nm ως μικροπόρους, τους πόρους από 2.5 έως 100 nm ως μεσοπόρους και πόρους με μέγεθος 100 nm ως μακροπόροι. Παρόλο που οι διαφορές στον ορισμό των μεγεθών ανάμεσα στην επιστήμη του σκυροδέματος και στην εφαρμοσμένη επιστήμη της φυσικής και των υλικών δεν είναι σημαντική, πρέπει να υπάρχει προσοχή όσον αφορά το πώς πρέπει να ορίζονται οι πόροι όταν γίνεται αναφορά σε πειραματικά δεδομένα από διαφορετικές περιοχές. Οι μηχανισμοί των φαινομένων μεταφοράς για τις διαφορετικές κατηγορίες των πόρων είναι αρκετά διαφορετικοί. Για παράδειγμα, στους μεσοπόρους, ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα τοιχώματα των πόρων και το υγρό των πόρων επεκτείνονται πέρα από ένα σημαντικό ποσοστό της διασταυρούμενης περιοχής των πόρων, για αυτό το λόγο, τα ηλεκτροστατικά φαινόμενα μπορεί να εμποδίζουν τα φαινόμενα μεταφοράς μέσω των πόρων που έχουν μεγέθη από 2 και 50 nm. Οι ηλεκτροστατικές επιδράσεις δεν συμβαίνουν στους μακροπόρους. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι στην τεχνική βιβλιογραφία οι όροι ακτίνα πόρων, διάμετρος πόρων και πλάτος πόρων χρησιμοποιούνται για να τον καθορισμό του σχήματος ενός πόρου. Το γεγονός ότι οι πόροι στο τσιμέντο δεν έχουν συγκεκριμένο σχήμα δικαιολογεί τη χρήση οποιουδήποτε από τους παραπάνω όρους.

Ο διαχωρισμός σύμφωνα με τον P.Mehta [18] δεν κατηγοριοποιεί τους πόρους από 50 nm έως 3 μm και μεταξύ 5 και 50 μm. Ο διαχωρισμός σύμφωνα με τον S.Mindess et al. δεν κατηγοριοποιεί τους πόρους που έχουν μέγεθος μεταξύ 10 και 100 μm.[19] Από όσα αναφέρθηκαν για τα εύρη των μεγεθών των πόρων και τους όρους που χρησιμοποιούνται είναι εμφανές ότι δεν υπάρχει ακόμα μια διακριτή ορολογία η οποία να χρησιμοποιείται για τα διάφορα μεγέθη των πόρων στην πάστα τσιμέντου. Επιπροσθέτως, το μέγεθος που διαχωρίζει τους τριχοειδείς πόρους από τους πόρους του πήγματος είναι σε μεγάλο βαθμό αυθαίρετο, γιατί το φάσμα των μεγεθών των πόρων στην πάστα τσιμέντου είναι συνεχές.

Δύο κατηγορίες πορώδους μπορούν να προσδιοριστούν: το ολικό (ή απόλυτο) πορώδες και το αποτελεσματικό πορώδες. Το ολικό πορώδες είναι το κλάσμα του όγκου των πόρων ως προς τον συνολικό όγκο του υλικού όπως εκφράζεται από την εξίσωση 1. Το συνολικό πορώδες είναι αδιάστατο μέγεθος, συνήθως εκφράζονται ως ποσοστό, και λαμβάνονται ανεξάρτητα από τη σύνδεση των πόρων.

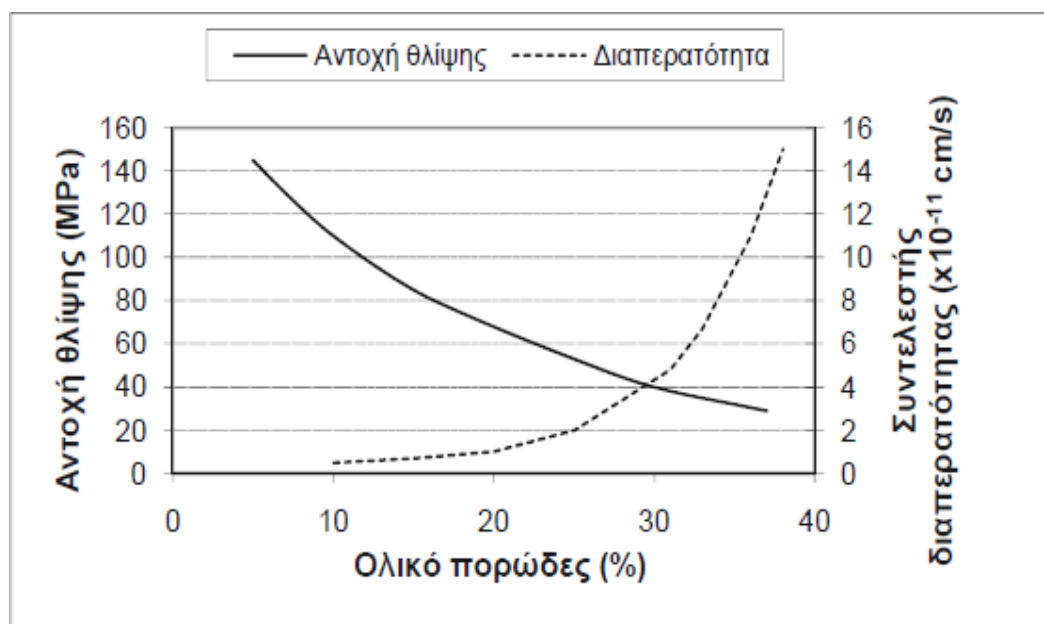
$$p = \frac{V_k}{V} = \frac{\rho - \rho\phi}{\rho} \quad (1.1)$$

όπου:

- p : Το ολικό πορώδες του υλικού,
- V_k : Ο όγκος των πόρων (κενών),
- V : Ο φαινόμενος όγκος του υλικού,
- $\rho\phi$: Το φαινόμενο ειδικό βάρος του υλικού,
- ρ : Το ειδικό βάρος του υλικού.

Το αποτελεσματικό πορώδες είναι το κλάσμα των πόρων ως προς τον συνολικό όγκο του υλικού που συνίσταται μόνο από τους ανοικτούς και διασυνδεδεμένους πόρους. Το αποτελεσματικό πορώδες είναι πάντοτε μικρότερο ή ίσο με το ολικό πορώδες.

Οι κλειστοί πόροι επηρεάζουν τις μακροσκοπικές ιδιότητες όπως η συνολική πυκνότητα, η μηχανική αντοχή και η θερμική αγωγιμότητα αλλά είναι ανενεργοί όσον αφορά την ροή υγρών ή την απορρόφηση αερίων. Οι διασυνδεδεμένοι πόροι παρέχουν ένα συνεχές κανάλι επικοινωνίας με την εξωτερική επιφάνεια του υλικού και συνεπώς, το αποτελεσματικό πορώδες μπορεί να αποτελέσει ένδειξη της διαπερατότητας του υλικού. Το πορώδες επηρεάζει το σκυρόδεμα, κυρίως επιδρώντας στις αντοχές και στη διαπερατότητά του (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1. 3 Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής και διαπερατότητας με το πορώδες

Στο σκυρόδεμα το ολικό πορώδες κυμαίνεται μεταξύ 8 και 25%. Όμως, ως ιδιότητα του σκυροδέματος, δεν δίνει πληροφορίες για τη μορφή, το σχήμα, το μέγεθος καθώς και για την κατανομή των κοιλότητων που αποτελούν ουσιώδη χαρακτηριστικά για τη συμπεριφορά του υλικού και τη διείδυση του νερού.[20]

1.2. Τσιμέντο

Το τσιμέντο είναι βιομηχανικό υλικό που παράγεται με την έψηση σε ειδικούς κλιβάνους μίγματος από αλεσμένο ασβεστόλιθο και άργιλο, σε θερμοκρασίες της τάξης των 1450 °C. Το προϊόν που προκύπτει στις συνθήκες αυτές από τον ορυκτολογικό μετασχηματισμό των πρώτων υλών ονομάζεται κλίνκερ και στην συνέχεια αλέθεται σε σκόνη. Το τσιμέντο είναι το βασικό συστατικό για την παραγωγή του σκυροδέματος, που είναι το πλέον διαδεδομένο δομικό υλικό παγκοσμίως. Η παραγωγή τσιμέντου παγκοσμίως παρουσιάζει αλματώδη αύξηση και το 2009 ξεπέρασε τα 2,3 δισεκατομμύρια τόνους.

Το τσιμέντο ανήκει στις υδραυλικές κονίες λόγω της ιδιότητας του να αντιδρά με το νερό και να δημιουργεί ισχυρές ενώσεις οξειδίων του πυριτίου, του ασβεστίου και του αργιλίου ανθεκτικές στο νερό, οι οποίες του προσδίδουν τις συνδετικές του ιδιότητες. Για την επιβράδυνση της διαδικασίας της ενυδάτωσης και για τον έλεγχο της σκλήρυνσης και της εργασιμότητας, προστίθεται κατά την άλεση μικρή ποσότητα γύψου.

Ο λόγος αξία προς βάρος είναι μικρός για το τσιμέντο γεγονός που το κάνει να είναι πολύ ακριβό για μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις. Επίσης, επειδή οι πρώτες ύλες (θραυσμένος ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα, χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομετάλλευμα, βωξίτης) για την παραγωγή του τσιμέντου είναι ακόμη χαμηλότερης αξίας, για την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς των πρώτων υλών οι μονάδες παραγωγής τσιμέντου χωροθετούνται πολύ κοντά στις πηγές πρώτων υλών (ιδιαίτερα κοντά στο λατομείο ασβεστολιθικού πετρώματος). Η μεγαλύτερη ποσότητα του παραγόμενου τσιμέντου, για τους παραπάνω λόγους, πρέπει να διατίθεται σε περιοχές και μονάδες παραγωγής σκυροδέματος σχετικώς κοντά στα εργοστάσια παραγωγής του. [21]

1.2.1. Τύποι και κατηγορίες Ευρωπαϊκών τσιμέντων

Οι τύποι των τσιμέντων που παρασκευάζονται σε κάθε χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης εξαρτώνται από τις διαθέσιμες πρώτες ύλες, όπως επίσης από τη ζήτηση κάθε τύπου τσιμέντου. Έτσι, ανάλογα με τις διαθέσιμες και χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες, δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων που μπορούν να παραχθούν. Οι τύποι αυτοί είναι το κοινό τσιμέντο Portland, τα τσιμέντα με ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα (πυριτική ή ασβεστιτική), τσιμέντα με σκωρία υψικαμίνου, τσιμέντα με πυριτική παιπάλη, με ασβεστόλιθο κλπ. Το τσιμέντο αποτελείται από:

- Τα κύρια συστατικά (περιλαμβάνεται και το κλίνκερ)
- Τα δευτερεύοντα συστατικά
- Το θεικό ασβέστιο
- Τα πρόσθετα

Τα κύρια και δευτερεύοντα συστατικά, που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σύνθετων τσιμέντων και εμφανίζονται στον αναλυτικό πίνακα του ευρωπαϊκού προτύπου EN 197-1, δίνονται παρακάτω με το χαρακτηριστικό κεφαλαίο λατινικό γράμμα που αναφέρεται σε κάθε ένα από αυτά: [22], [21]

S – blastfurnace slag (σκωρία υψικαμίνων)

D – silica fume (πυριτική παιπάλη)

P – natural pozzolana (φυσική ποζολάνη)

Q – natural calcined pozzolana (φυσική ποζολάνη μετά από πύρωση)

V – siliceous fly ash (πυριτική ιπτάμενη τέφρα)

W – calcareous fly ash (ασβεστιτική ιπτάμενη τέφρα)

L, LL – limestone (ασβεστόλιθος)

T – burnt shale (τέφρα καύσης βιτουμενιούχων σχιστολίθων)

M – two or more of the above (μείγμα των παραπάνω).

Η σκωρία υψικαμίνων (S) είναι υλικό με λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες που παρουσιάζει ποζολανικές ιδιότητες όταν ενεργοποιείται κατάλληλα. Η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων παράγεται με ταχεία ψύξη ενός τήγματος σκωρίας κατάλληλης σύστασης που προκύπτει από την παραγωγή σιδήρου στις υψικαμίνους.

Η πυριτική παιπάλη (D): Είναι υποπροϊόν της αναγωγής υψηλής καθαρότητας χαλαζία με άνθρακα σε καμίνους ηλεκτρικού τόξου. Πρέπει να καλύπτει τις ακόλουθες απαιτήσεις για την συμμετοχή του ως κύριο συστατικό:

- Το άμορφο διοξείδιο του πυριτίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 85% κ.β.
- Η απώλεια πύρωσης πρέπει να είναι μικρότερη του 4% κ.β.
- Η ειδική του επιφάνεια πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 15m²/g.

Οι φυσικές ποζολάνες (P) είναι υλικά συνήθως ηφαιστειογενούς προελεύσεως ή ιζηματογενή πετρώματα με κατάλληλη χημική και ορυκτολογική σύσταση. Μετά την άλεση τους συμπεριφέρονται όπως οι ιπτάμενες τέφρες.

Οι φυσικές ψημένες ποζολάνες (Q) είναι υλικά ηφαιστειογενούς προελεύσεως, άργιλοι, σχιστόλιθοι ή ιζηματογενή πετρώματα τα οποία έχουν ενεργοποιηθεί με θερμική κατεργασία.

Η πυριτική ιπτάμενη τέφρα (V) αποτελείται κυρίως από δραστικά SiO₂ και Al₂O₃ και σε μικρότερα ποσοστά από Fe₂O₃ και άλλα οξείδια.

Η ασβεστιτική ιπτάμενη τέφρα (W) είναι το λεπτόκοκκο υλικό που έχει υδραυλικές και ποζολανικές ιδιότητες. Συνίσταται από δραστικό CaO, SiO₂, Al₂O₃ και σε μικρότερα ποσοστά από Fe₂O₃ και άλλα οξείδια.

Ο ασβεστόλιθος (L) πρέπει να καλύπτει τις ακόλουθες απαιτήσεις:

Το περιεχόμενο CaCO₃ να είναι τουλάχιστον 75% κ.β.

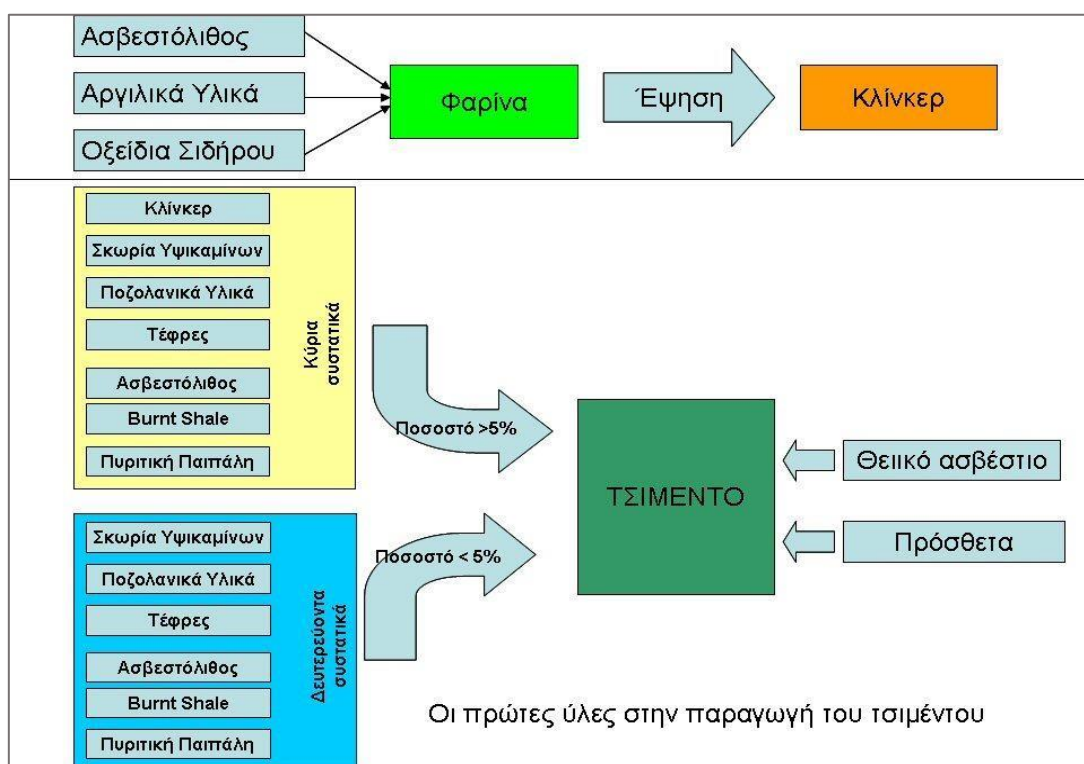
Η περιεχόμενη άργιλος να είναι μικρότερη του 1.2g/100g.

Ο περιεχόμενος ολικός οργανικός άνθρακας δε πρέπει να ξεπερνά το 0.5% για τους ασβεστόλιθους με κωδικοποίηση L και το 0.2% για τους ασβεστόλιθους LL.

Ο ψημένος σχιστόλιθος (T) παράγεται με πύρωση στους 800°C. Εμφανίζει υδραυλικές ιδιότητες καθώς και ποζολανικές αφού περιέχει μικρά ποσοστά ελεύθερου CaO και CaSO₄ καθώς και SiO₂ σε μεγαλύτερες αναλογίες. Αλέθεται σε μεγάλη λεπτότητα και πρέπει να έχει αντοχή σε θλίψη τουλάχιστον 25 MPa σε ηλικία 28 ημερών όταν η δοκιμή διεξάγεται σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 196-1. [22] Στο Σχήμα 1.4 φαίνονται συνολικά οι πρώτες ύλες στην παραγωγή του τσιμέντου. Το πρότυπο EN 197-1 προδιαγράφει σε γενική μορφή τους πέντε τύπους τσιμέντου που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2. [22]

Πίνακας 1. 2 Βασικοί τύποι τσιμέντων ευρωπαϊκού προτύπου

ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
CEM I	Κοινό τσιμέντο Portland
CEM II	Σύνθετο τσιμέντο Portland
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό τσιμέντο
CEM V	Σύνθετο τσιμέντο



Σχήμα 1. 4 . Οι πρώτες ύλες στην παραγωγή του τσιμέντου

Το πρότυπο προβλέπει μεγάλο αριθμό προϊόντων τσιμέντου τα οποία, για προφανείς λόγους, όμως δεν κυκλοφορούν κατ' ανάγκη όλα σε κάθε χώρα μέλος. Στον Πίνακα 1.3 δίνονται αναλυτικά, σύμφωνα με το πρότυπο, το είδος και το ποσοστό των συστατικών του τσιμέντου τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και καθορίζουν τα 27 διαφορετικά είδη.

Επίσης, το πρότυπο προδιαγράφει και 6 κατηγορίες αντοχών, στις οποίες τα τσιμέντα κατατάσσονται ανάλογα με την αντοχή σε θλίψη κονιάματος πρότυπης σύνθεσης και τρόπου παρασκευής, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-1 (Μέθοδοι δοκιμών τσιμέντου Μέρος 1 : Προσδιορισμός αντοχών).

Πίνακας 1.3 Τύποι τσιμέντου και σύνθεσή τους σύμφωνα με το Πρότυπο EN 197-1

Κυριότεροι Τύποι Τσιμέντου	Σύνθεση (% μέρη κατά βάρος)													
	Κύρια συστατικά												Δευτερεύοντα συστατικά	
	Ονομασία	Τύπος Τσιμέντου	Κλίβερ τσιμέντου Portland	Σκωρία	Πυριτική Παυτάλη	Ποζολάνη		Ιπτάμενη Τέφρα		Ψημένο σχιστόλιθος	Ασβεστόλιθος			
						Φυσική	Τεχνητή	Πυριτική	Ασβετούχος		L	LL		
Κ	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Τσιμέντο Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Τσιμέντο Portland με σκωρία υψικαμίνων	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Τσιμέντο Portland με πυριτική παυτάλη	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	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	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	CEM II/A	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	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	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	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEM III/B			20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM III/C			5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Ποζολανικό Τσιμέντο	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

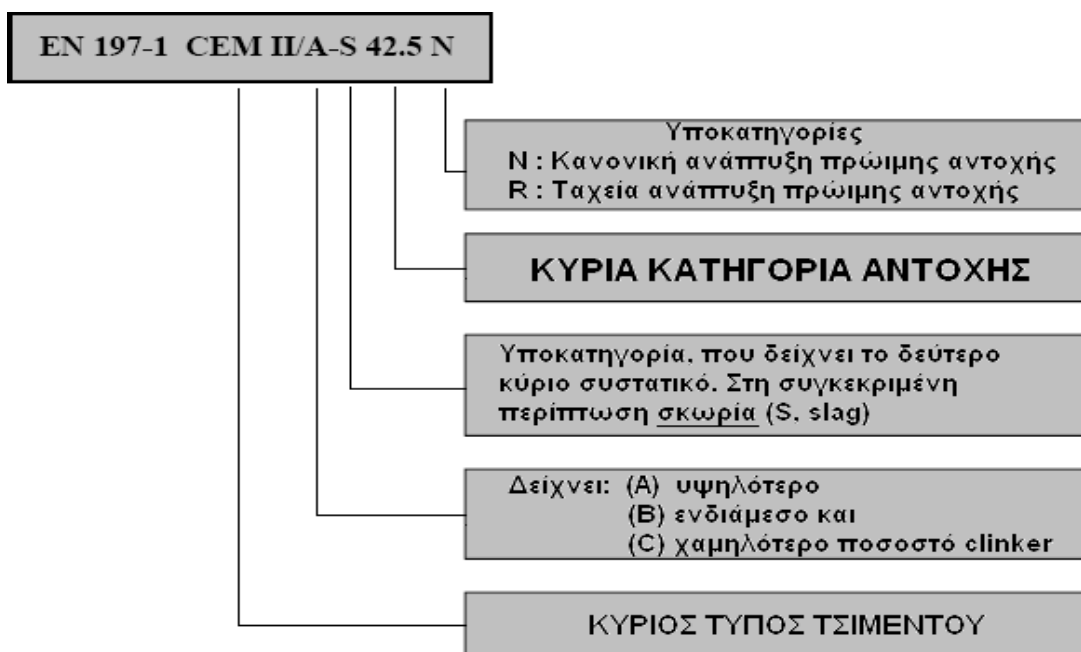
Κάθε κατηγορία αντοχής ορίζεται από ένα κατώτερο και ένα ανώτερο όριο αντοχής. Το κατώτερο όριο αντοχής σε θλίψη (28 ημερών) χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη κατηγορία. Κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες περιλαμβάνει δύο υποκατηγορίες πρώιμης αντοχής N και R (Πίνακας 1.4).

Πίνακας 1. 4 Απαιτήσεις μηχανικές και φυσικές οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμές

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

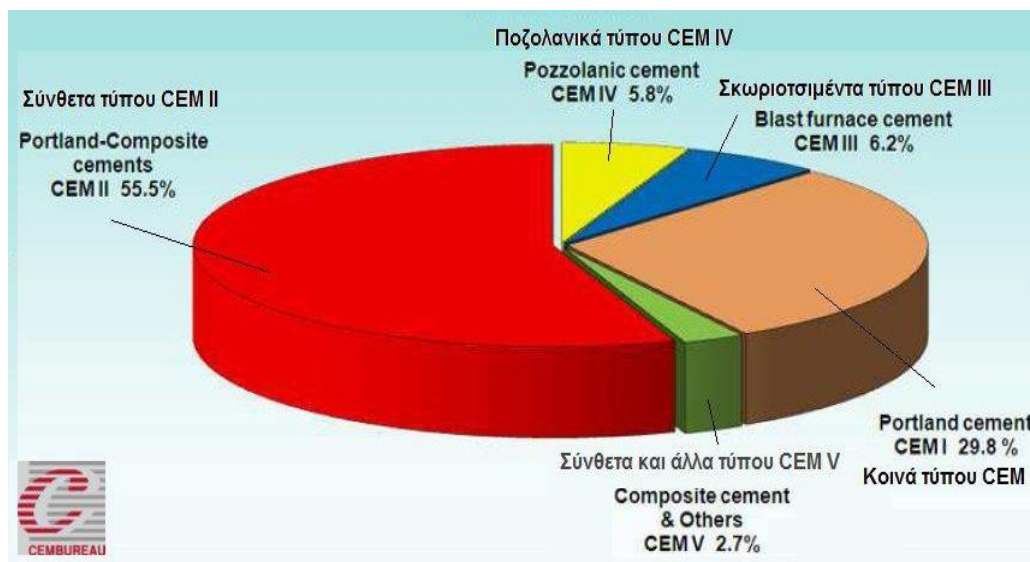
Ο συμβολισμός των διαφόρων τσιμεντών, σύμφωνα με το πρότυπο EN 197-1, άρα και με το ΕΛΟΤ EN 197-1 (Σχήμα 1.5), καθορίζεται από:

- 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

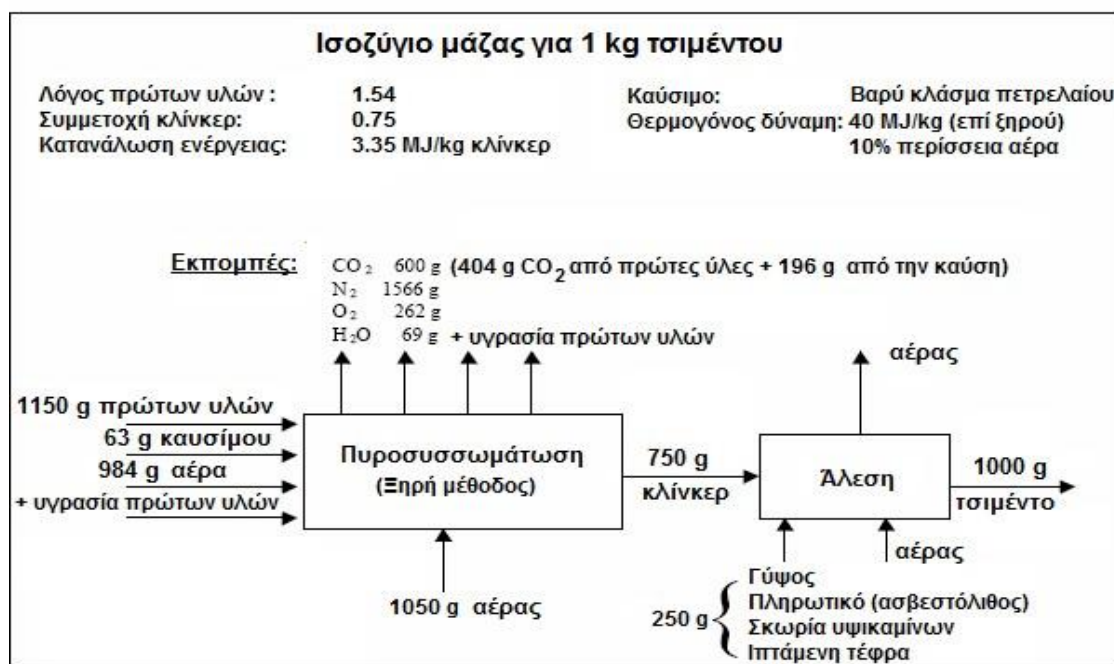
Η ποσοστιαία % κατανομή των παραγόμενων (κατά τύπο) ευρωπαϊκών τσιμεντών δίνεται στο Σχήμα 1.6. Είναι φανερό ότι, μεγάλο μερίδιο της ευρωπαϊκής παραγωγής αφορά σε σύνθετα τσιμεντά (CEM II), κυρίως για περιβαλλοντικούς λόγους (μείωση των εκπεμπόμενων ποσοτήτων CO₂, αξιοποίηση των βιομηχανικών παραπροϊόντων). Οι ποσότητες αυτές CO₂ είναι πολύ σημαντικές στην περίπτωση της τσιμεντοβιομηχανίας και αφορούν: πρωτογενώς στην πύρωση (διάσπαση) του ασβεστόλιθου και στην καύση ορυκτών καυσίμων στην κυρίως μεταλλουργική διεργασία και δευτερογενώς επίσης στην καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλίσκεται για την παραγωγή τσιμέντου. [21]



Σχήμα 1. 6 Ποσοστιαία % κατανομή (κατά τύπο) των παραγόμενων ευρωπαϊκών τσιμεντών

1.2.2. Η παραγωγή του τσιμέντου

Η σημαντικότερη πρώτη ύλη για την παραγωγή του κλίνκερ τσιμέντου είναι τα ασβεστολιθικά πετρώματα, που εξορύσσονται επιφανειακά κοντά στη μονάδα παραγωγής του τσιμέντου. Επειδή, ποσοστό περίπου 80% από τους 1.50-1.65 τόνους πρώτων υλών, που απαιτούνται για την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ, είναι ασβεστολιθικό υλικό, είναι προφανής η αναγκαιότητα γειτνίασης της θέσης εξόρυξης ασβεστολιθικών πετρωμάτων και της μονάδας παραγωγής κλίνκερ τσιμέντου. Ενδεικτικό ισοζύγιο πρώτων υλών και οι πρώτες ύλες, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή τσιμέντου, δίνεται στο Σχήμα 1.7.



Σχήμα 1. 7 Ισοζύγιο πρώτων υλών και προϊόντων στην παραγωγή 1 kg τσιμέντου [21]

Το μείγμα των πρώτων υλών (θραυσμένος ασβεστόλιθος (CaO), αργιλικά πετρώματα (Al₂O₃), χαλαζιακά πετρώματα (SiO₂), σιδηρομετάλλευμα (Fe₂O₃), βωξίτης, κ.ά.) αναμειγνύονται σε κατάλληλη αναλογία και λειοτριβούνται. Το λειοτριβημένο μείγμα («φαρίνα») υφίσταται πυρομεταλλουργική κατεργασία μέσα σε περιστροφική κάμινο (rotary kiln). Στην περιστροφική κάμινο οι λειοτριβημένες πρώτες ύλες, με χρήση καυσίμων (φυσικό αέριο, πετρέλαιο, γαιάνθρακες ή και εναλλακτικά καύσιμα), θερμαίνονται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, με φυσικοχημικές διεργασίες, μετατρέπονται σε ένα υλικό γκριζοπράσινου χρώματος μορφής σφαιριδίων διαμέτρου 10-25 mm, το οποίο ονομάζεται κλίνκερ τσιμέντου. Το κλίνκερ αποτελείται κυρίως από τέσσερις βασικές σύνθετες χημικές ενώσεις (άλατα) σε ποσοστά που βρίσκονται στα παρακάτω όρια και με την εξής ορυκτολογική σύσταση: 40-80% C₃S (πυριτικό τριασβέστιο, άσπρο), 0-30% C₂S (πυριτικό διασβέστιο, άσπρο), 7-15% C₃A (αργιλικό τριασβέστιο, άσπρο) και 4-15% C₄AF (αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο, σκούρο καφέ ή γκριζοπράσινο) όπου χρησιμοποιούνται οι συντομογραφίες C=CaO, S=SiO₂, A=Al₂O₃, F=Fe₂O₃ και H=H₂O, δηλ. C₃S = 3CaO·SiO₂, C₂S = 2CaO·SiO₂, C₃A = 3CaO·Al₂O₃, C₄AF = 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃. [23]

Εκτός τα τέσσερα βασικά συστατικά στο τσιμέντο Portland υπάρχουν σε μικρά ποσοστά:

- Μαγνησία (οξειδίο του μαγνησίου, MgO).
- Οξείδια αλκαλίων (K₂O και Na₂O).
- Γύψος (CaSO₄·2H₂O) σε ποσοστό 2-3% ως ρυθμιστής του χρόνου πήξης του τσιμέντου.

Οι ποσότητες των πρώτων υλών που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτώνται από τις χημικές και ορυκτολογικές τους ιδιότητες και από τις ιδιότητες (απαιτήσεις) του κλίνκερ που θα παραχθεί. Μετά τον προσδιορισμό της κατάλληλης σύνθεσης του φορτίου, οι πρώτες ύλες (για ξηρή μέθοδο παραγωγής τσιμέντου) αναμειγνύονται κατάλληλα και ομογενοποιούνται για την παραγωγή ενός ομοιόμορφου μείγματος (φαρίνα) που θα υποστεί ελάττωση μεγέθους (λειοτρίβηση). Η καλή ανάμειξη εξασφαλίζει ομοιόμορφη κατανομή των πρώτων υλών στην τροφοδοσία του κυκλώματος θραύσης και λειοτρίβησης και οδηγεί στην παραγωγή κλίνκερ ομοιόμορφης ποιότητας.

Οι αναλογίες των πρώτων υλών καθορίζονται με τη βοήθεια τριών δεικτών ποιότητας κλίνκερ και συγκεκριμένα του δείκτη κορεσμού σε άσβεστο LSF (Lime Saturation Factor), του πυριτικού δείκτη SR (Silica Ratio) και του αργιλικού δείκτη AR (Alumina Ratio). Τα συνήθη όρια μεταβολής των δεικτών είναι 0.92-0.98 για τον LSF, 2.2-2.8 για τον SR και 1.2-2 για τον AR. [24]

1.2.3. Υδραυλικές ιδιότητες τσιμέντου

Το τσιμέντο που σήμερα αποτελεί το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο υλικό στη δομική βιομηχανία, ανήκει στην κατηγορία των υδραυλικών υλικών, τα οποία σε λεπτόκοκκο διαμερισμό είναι ικανά να πήζουν και να σκληραίνουν, μετά από ανάμειξη με νερό, δίνοντας ένα στερεό προϊόν. Η ανάμειξη του τσιμέντου με το νερό δίνει αρχικά ένα πολτό (πάστα), πλαστικό και κατεργάσιμο, ο οποίος διατηρεί αυτά τα χαρακτηριστικά για μια λανθάνουσα περίοδο. Στο τέλος αυτής της περιόδου, ο πολτός παρόλο που είναι ακόμα μαλακός δεν είναι πια κατεργάσιμος (αρχικό πήξιμο). Ακολουθεί μια περίοδος που ο πολτός πήζει και εμφανίζεται σαν ένα δύσκαμπτο στερεό (τελικό πήξιμο), που είναι γνωστό σαν σκληρυνόμενος τσιμεντοπολτός, ο οποίος με την πάροδο του χρόνου συνεχίζει να σκληραίνει και να αναπτύσσει αντοχές (σκλήρυνση). Το πήξιμο και η σκλήρυνση είναι αποτέλεσμα της ενυδάτωσης των συστατικών του τσιμέντου.

Η ενυδάτωση του τσιμέντου είναι μια διαδικασία, που συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας και περιλαμβάνει ένα σύνολο χημικών και φυσικοχημικών μεταβολών. Είναι μια λειτουργία περισσότερο περίπλοκη από την απλή μετατροπή άνυδρων ενώσεων στις αντίστοιχες ενυδατωμένες, η οποία πραγματοποιείται είτε με ένα μηχανισμό μέσω διαλύματος, είτε με μηχανισμό απευθείας τοποχημικών αντιδράσεων στερεάς κατάστασης. Σύμφωνα με τον πρώτο μηχανισμό τα αντιδρώντα διαλύονται ή υδρολύονται και δίνουν ιόντα σε διάλυμα, τα οποία συνενώνονται σχηματίζοντας άλλα προϊόντα, τα οποία καταβυθίζονται. Στον δεύτερο μηχανισμό οι αντιδράσεις πραγματοποιούνται απευθείας στην επιφάνεια του στερεού, χωρίς τα συστατικά να μεταφερθούν στο διάλυμα. Κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου είναι πιθανόν να συμβαίνουν και οι δύο μηχανισμοί, κυρίως όμως στα πρώτα στάδια επικρατεί ο μηχανισμός μέσω διαλύματος και στα επόμενα ο μηχανισμός των τοποχημικών αντιδράσεων στερεάς κατάστασης.

Επειδή το τσιμέντο αποτελείται από διαφορετικά συστατικά, με συνέπεια την πραγματοποίηση ταυτόχρονων αντιδράσεων κατά την ενυδάτωσή του, συνηθίζεται να εξετάζεται ανεξάρτητα η ενυδάτωση των επιμέρους συστατικών του τα οποία είναι:

Αντιδράσεις ενυδάτωσης πυριτικού τριασβεστίου - C₃S

Το πυριτικό τριασβέστιο είναι το κυριότερο συστατικό του κλίνκερ και αυτό που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την πορεία της πήξης και της σκλήρυνσης. Δεν έχει σταθερή σύσταση και δραστηριότητα σε όλα τα τσιμέντα, καθώς κατά τον σχηματισμό του ενσωματώνει στο πλέγμα του και άλλα ιόντα, δίνοντας ένα στερεό διάλυμα που ονομάζεται αλίτης. Το προϊόν της ενυδάτωσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι μια άμορφη φάση, το ένυδρο πυριτικό ασβέστιο ο σχηματισμός του οποίου μπορεί να αποδοθεί ως εξής:



Το υδροξείδιο του ασβεστίου Ca(OH)₂ είναι υπεύθυνο για την αλκαλικότητα του πολτού (τιμές pH περίπου 12.5) και συνεπώς την προστασία που αυτή προσφέρει στον σιδηροπλισμό του σκυροδέματος. Το πυριτικό τριασβέστιο προσδίδει στο τσιμέντο πρώιμες και μακροχρόνιες αντοχές.

Αντιδράσεις ενυδάτωσης πυριτικού διασβεστίου - C₂S

Η δραστηριότητα του πυριτικού διασβεστίου είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή του πυριτικού τριασβεστίου, ενώ από τις υπάρχουσες μορφές του η β-C₂S, που καλείται μπελίτης είναι η πλέον

σημαντική. Η μορφή αυτή είναι μετασταθής σε όλες τις θερμοκρασίες αλλά με την είσοδο ξένων ιόντων στο πλέγμα επιτυγχάνεται σταθεροποίηση της σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

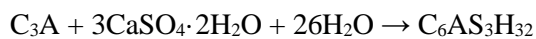
Η ενυδάτωση του πυριτικού διασβεστίου μπορεί να αποδοθεί ως εξής:



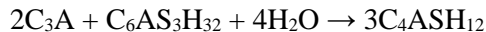
Τα προϊόντα ενυδάτωσης είναι παρόμοια με αυτά του πυριτικού τριασβεστίου με μόνη διαφορά τα μικρότερα ποσοστά υδροξειδίου του ασβεστίου $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Το πυριτικό διασβέστιο προσδίδει στο τσιμέντο μακροχρόνιες αντοχές.

Αντιδράσεις ενυδάτωσης αργλικού τριασβεστίου - C_3A

Η αντίδραση του αργλικού τριασβεστίου με το νερό θα ήταν ταχύτατη και θα προκαλούσε γρήγορο πήξιμο όλου του τσιμέντου, όμως λόγω της γύψου που υπάρχει στο τσιμέντο ενυδατώνεται διαφορετικά από το καθαρό συστατικό. Η αντίδραση του αργλικού τριασβεστίου με τη γύψο δίνει βελονοειδείς κρυστάλλους ενός ένυδρου θεικού αργλικού τριασβεστίου που ονομάζεται ετρινγκίτης.



Η επιβραδυντική επίδραση της γύψου αποδίδεται στο σχηματισμό μιας στοιβάδας ετρινγκίτη πάνω στην επιφάνεια των κόκκων του αργλικού τριασβεστίου, η οποία καθυστερεί την ενυδάτωσή του, με αποτέλεσμα το πήξιμο του τσιμέντου να εξαρτάται κύρια από την ενυδάτωση του πυριτικού τριασβεστίου. Όταν καταναλωθεί η γύψος πραγματοποιείται η αντίδραση του C_3A με τον ετρινγκίτη και παράγεται μονοθεικό ενυδατωμένο άλας ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται αύξηση του ρυθμού της ενυδάτωσης.



Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος η ενυδάτωση του αργλικού τριασβεστίου μπορεί να ολοκληρωθεί μετά από διάστημα αρκετών μηνών. Το αργλικό τριασβέστιο προσδίδει στο τσιμέντο πρώιμες αντοχές.

Αντιδράσεις ενυδάτωσης αργλοσιδηρικού τετρασβεστίου

Η ενυδάτωση της φάσης του φερρίτη επιβραδύνεται σημαντικά παρουσία γύψου και παριστάνεται κατά προσέγγιση με την αντίδραση:



Το στερεό διάλυμα που προέκυψε με την εξάντληση των θεικών μετατρέπεται σε $\text{C}_3(\text{AF}) \cdot \text{CaSO}_4 (\text{aq})$ και $\text{C}_3(\text{AF}) \cdot \text{Ca}(\text{SO}_4(\text{OH})_2) (\text{aq})$



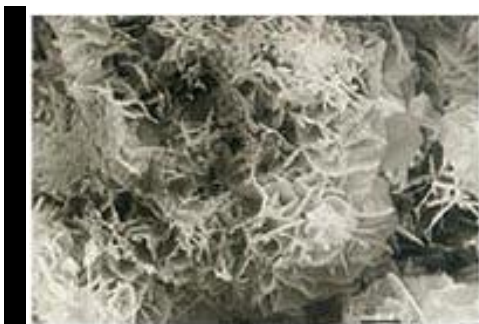
Εικόνα 1.1.α Προϊόν Ενυδάτωσης Πυριτικού τριασβεστίου (C₃S)



Εικόνα 1.2.β Προϊόν Ενυδάτωσης Πυριτικού διασβεστίου (C₂S)



Εικόνα 1.2.γ Προϊόν Ενυδάτωσης Αργλικού τριασβεστίου (C₃A)



Εικόνα 1.2.δ Προϊόν Ενυδάτωσης Αργλιοσιδηρικού τετρασβεστίου (C₄AF)

Γενικότερα με την προσθήκη νερού στο τσιμέντο τα συστατικά του ενυδατώνονται κυρίως προς ένυδρο πυριτικό ασβέστιο (CSH gel) και υδροξείδιο του ασβεστίου Ca(OH)₂, με τα υπόλοιπα προϊόντα να είναι αργλικά και φερρίτες.

Η πορεία της ενυδάτωσης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, οι κυριότεροι των οποίων είναι:

Ηλικία

Η ταχύτητα ενυδάτωσης αρχικά είναι μεγάλη και βαθμιαία μειώνεται με το χρόνο, ώσπου να σταματήσει εντελώς.

Σύσταση τσιμέντου

Στα πρώτα στάδια η ταχύτητα ενυδάτωσης είναι μεγαλύτερη σε τσιμέντα πλούσια σε C₃S και C₃A, ενώ αργότερα η ενυδάτωση πραγματοποιείται με ίσες ταχύτητες.

Λεπτότητα

Ο τελικός βαθμός ενυδάτωσης δεν επηρεάζεται, όμως στα πρώτα στάδια αλλά αυξάνεται με την λεπτότητα.

Λόγος N/T

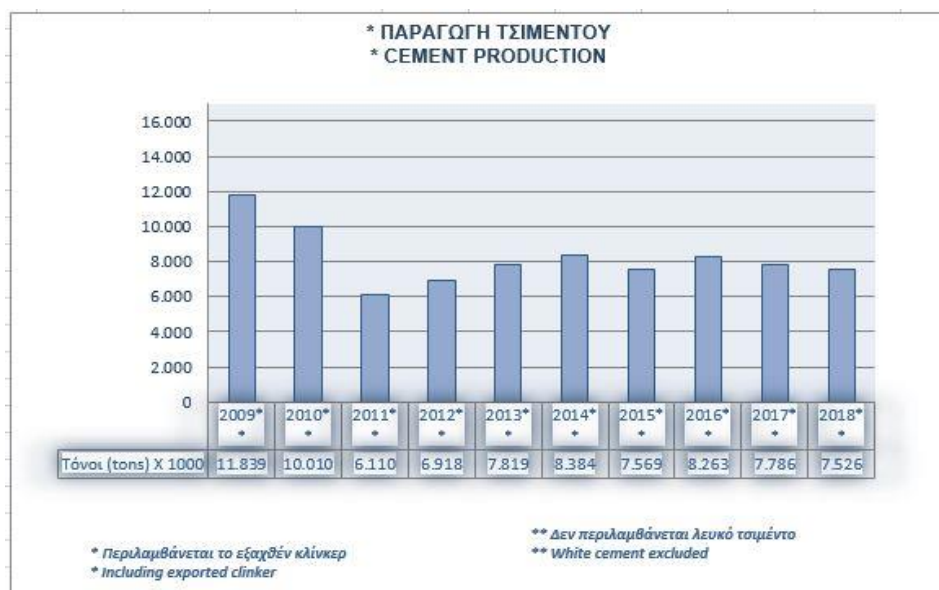
Αρχικά δεν επηρεάζει την ταχύτητα ενυδάτωσης, αλλά όσο μικρότερος είναι ο λόγος N/T τόσο πιο σύντομα αρχίζει να ελαττώνεται. Άρα ο τελικός βαθμός ενυδάτωσης μειώνεται με τη μείωση του λόγου N/T.

Θερμοκρασία

Η ταχύτητα ενυδάτωσης αρχικά αυξάνει με τη θερμοκρασία του τσιμεντοπολτού, χωρίς όμως να επηρεάζεται ο τελικός βαθμός ενυδάτωσης.

1.2.4. Στατιστικά στοιχεία

Η ετήσια παραγωγή της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας ανήλθε το 2018 σε 7.5 εκατ. τόνους τσιμέντου. Το 35 % της παραγωγής εξήχθη σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στις Η.Π.Α. και τις χώρες της Μ. Ανατολής και της Αφρικής, ενώ το 65% διατίθεται στην ελληνική αγορά.



Σχήμα 1. 8 Παραγωγή τσιμέντου σε τόνους στην Ελλάδα κατά τα έτη 2009-2018

Από το διατιθέμενο τσιμέντο στην ελληνική αγορά (Ι.Ο.Β.Ε, Ινστιτούτο Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών), ποσοστό 70% διατίθεται χύμα και 30% ενσασκισμένο. Το 80% του διατιθέμενου «χύμα» τσιμέντου στην ελληνική αγορά απορροφάται από τις εταιρείες παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος και κονιαμάτων, το 12- 15% από τις κατασκευαστικές εταιρείες και το 5-8% από τις μονάδες παραγωγής προϊόντων τσιμέντου. [21]

1.3. Τα αδρανή

1.3.1. Εισαγωγή

Αδρανή είναι τα διαβαθμισμένα, ορυκτής ή βιομηχανικής προέλευσης, υλικά που χρησιμοποιούνται είτε με συγκολλητικό μέσο (για παρασκευή κονιαμάτων, σκυροδεμάτων, ασφαλτομιγμάτων κλπ.) είτε αυτούσια (έρμα σιδηροδρομικών γραμμών, στραγγιστηριών, φίλτρων διηθήσεως ή καθαρισμού, βράχοι θωράκισης, κλπ.), σε πάσης φύσεως τεχνικά έργα. Τα αδρανή δεν παρουσιάζουν χημικές συνδετικές ιδιότητες μεταξύ τους, παρά μόνο φυσική συνοχή λόγω της γεωμετρικής ταξινόμησης των κόκκων τους και του βάρους τους. Επίσης, σύμφωνα με την κλασική αντίληψη, δεν αντιδρούν χημικά με το συγκολλητικό μέσο παρά μόνο συγκρατούνται από αυτό. [25]

Τα αδρανή στην Ελλάδα είναι χημικώς αδρανή τεμάχια ασβεστολιθικών κυρίως πετρωμάτων τα οποία χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σκυροδέματος και ως υλικά οδόστρωσης, ενώ τα μεγάλου μεγέθους τεμαχίων ως σκύρα σιδηροδρομικών γραμμών.

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 συγκριτικά το τσιμέντο είναι 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 (ή 60-75 % του όγκου) 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. Είναι λιγότερο παραμορφώσιμα σε σχέση με την τσιμεντόπαστα και αντιστέκονται στην διάδοση και ανάπτυξη των μικρορηγματώσεων που προκαλούνται από την συστολή ξήρανσης.

Τα αδρανή υλικά θα πρέπει να ικανοποιούν ορισμένες απαιτήσεις για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν στο σκυρόδεμα. Θα πρέπει να αποτελούνται από κόκκους υγιείς, σκληρούς ανθεκτικούς απαλλαγμένους από βλαπτικές αργλικές προσμίξεις οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τόσο την ενυδάτωση της τσιμέντου όσο και την πρόσφυση των κόκκων των αδρανών με την τσιμεντόπαστα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η φύση των δεσμών που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια αδρανών και τσιμεντόπαστας, οδηγούν στις μηχανικές αντοχές του σκυροδέματος.

Τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά (προδιαγραφές αντοχής και χρήσης) του σκυροδέματος καθορίζουν τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των αδρανών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Η εκλογή του αδρανούς είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τη σύνθεση και την ποιότητα του σκυροδέματος ο οποίος πρέπει να εξετάζεται σε συνάρτηση με τις επιδιωκόμενες απαιτήσεις, και ιδιαίτερα λαμβάνοντας υπόψη την ανθεκτικότητα

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. [21]

1.3.2. Κατηγορίες αδρανών

Τα αδρανή που συμμετέχουν στην παραγωγή σκυροδέματος πρέπει να είναι καθαρά, χωρίς επιφανειακή σκόνη, άργιλο και οργανικές ύλες, σκληρά και μεγάλης αντοχής. Διακρίνονται στις εξής κατηγορίες: [26]

1. **Με βάση την προέλευσή τους**, σε (σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12620 για αδρανή σκυροδέματος):

- Φυσικής προέλευσης
- Τεχνητά ή βιομηχανικά
- Ανακυκλωμένα.

Φυσικής προέλευσης είναι τα αδρανή τα οποία έχουν ληφθεί από το φυσικό περιβάλλον και έχουν υποστεί μόνο μηχανική επεξεργασία θραύσης, πλυσίματος και διαλογής (π.χ. θραυστά πετρώματα, αλλουβιακοί σχηματισμοί, ποταμίσιες λιμναίες ή θαλάσσιες αποθέσεις, αποθέσεις άμμων ή χαλικιών, λάβα, ηφαιστειακοί τόφοι, λατομικά προϊόντα κλπ).

Τεχνητά ή βιομηχανικά είναι τα αδρανή που έχουν προκύψει ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας από χημική ή θερμική επεξεργασία πρώτων υλών ορυκτής ή άλλης προέλευσης (πχ τέφρες, σκωρίες, υπολείμματα καύσεων, άργιλοι, βερμικουλίτης, περλίτης, υλικά στίλβωσης, κλπ).

Ανακυκλωμένα είναι τα αδρανή που προκύπτουν από την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση δομικών υλικών από υφιστάμενες κατασκευές (υλικά κατεδαφίσεως σκυροδέματος, τοιχοποιίας, ασφαλτικών έργων κλπ).

2. **Με βάση την πηγή λήψης τους**, σε:

- Φυσικά ή συλλεκτά αδρανή
- Αδρανή λατομείων

Οι παραπάνω κατηγορίες αναφέρονται στα πρωτογενή αδρανή φυσικής προέλευσης, ανεξάρτητα αν ακολουθεί άλλη κατεργασία που μπορεί να τα μετατρέψει σε τεχνητά – βιομηχανικά.

Φυσικά ή συλλεκτά ονομάζονται τα αδρανή που λαμβάνονται από φυσικές αποθέσεις (π.χ. ποτάμια, ορυχεία κτλ.). Χρησιμοποιούνται όπως είναι ή χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία ανάλογα με τις απαιτήσεις (π.χ. θραύση, πλύσιμο, κτλ.). Τα φυσικά αδρανή μπορεί να έχουν αργλική παιπάλη, οπότε ελέγχονται για την παρουσία της. Επειδή η τυποποίηση των φυσικών αδρανών είναι δύσκολη και η βελτίωση των ιδιοτήτων τους αντιοικονομική, η χρήση των φυσικών αδρανών είναι πλέον περιορισμένη.

Αδρανή λατομείων ονομάζονται τα αδρανή που προκύπτουν από εξόρυξη και θραύση όγκων πετρώματος. Πρόκειται για την κύρια κατηγορία αδρανών υλικών που χρησιμοποιούνται στον Ελλαδικό χώρο και ως προς τη χημική τους σύσταση είναι κυρίως ασβεστολιθικής και σπανιότερα πυριτικής προέλευσης.

3. **Με βάση το ειδικό τους βάρος**, σε:

- Κανονικού ειδικού βάρους
- Ελαφροβαρή
- Βαριά

Κανονικού ειδικού βάρους είναι τα αδρανή με ειδικό βάρος από 2000 – 3000 kg/m³. Είναι τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα αδρανή για τεχνικά έργα (ασφαλτικά, οδοστρώσις, παραγωγή σκυροδέματος, κονιαμάτων, κτλ).

Ελαφροβαρή είναι τα αδρανή με ειδικό βάρος <2000 kg/m³. Χρησιμοποιούνται κυρίως για ελαφροβαρή θερμομονωτικά σκυροδέματα ή κονιάματα.

Βαριά είναι τα αδρανή με ειδικό βάρος >3000 kg/m³. Έχουν ειδικές χρήσεις (πχ κατασκευές από σκυρόδεμα για προστασία από την ακτινοβολία κλπ).

4. **Με βάση το μέγεθος των κόκκων** τους, σε (σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12620 για αδρανή σκυροδέματος):

- Χονδρόκοκκα
- Λεπτόκοκκα
- Παιπάλη (Filler)

Λεπτόκοκκα είναι τα αδρανή με μέγιστο μέγεθος κόκκου 4 mm (διάφορα είδη άμμων).

Χονδρόκοκκα είναι τα αδρανή με μέγιστο μέγεθος κόκκου >4 mm, και ελάχιστο >2 mm (ογκόλιθοι, κροκάλες, έρμα, χαλίκι, γαρμπίλι, ρυζάκι).

Filler ή παιπάλη είναι το διαβαθμισμένο λεπτομερές αδρανές υλικό με μέγιστο κόκκο 2 mm, και το οποίο διέρχεται σε ποσοστό 70-100% από το κόσκινο 0,063 mm

Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή σκυροδέματος έχουν διάφορα μεγέθη και ακανόνιστο σχήμα. Κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθός τους, συνήθως ως εξής:

Άμμος: μέσο μέγεθος κόκκων έως 8 mm ή 3/8" (=9,5 mm) (χονδρόκοκκη) και έως 4 mm (λεπτόκοκκη),

Γαρμπίλι: μέσο μέγεθος κόκκων από 5 έως 12,5 mm (λεπτόκοκκο ή χονδρόκοκκο)

Σκύρα: μέσο μέγεθος κόκκων από 12,5 έως 38 mm ή ακόμη μεγαλύτερα.

1.3.3. Ιδιότητες των αδρανών

Η καταλληλότητα των αδρανών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σκυροδέματος προδιαγράφεται από τις απαιτήσεις του ΕΛΟΤ 408 και του ΚΤΣ-2016, ενώ αντίστοιχα η καταλληλότητα των αδρανών σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές Προδιαγραφές καθορίζεται στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN12620. Οι ιδιότητες που πρέπει να πληρούν ελέγχονται ως προς τα εξής χαρακτηριστικά: [27], [28]

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη σύνθεση και την αντλησιμότητα του σκυροδέματος (η συνολική επιφάνεια των αδρανών, το μέγεθος των κόκκων, το σχήμα του κόκκου). Το μέγεθος του κόκκου d είναι ανάλογο με τη μικρότερη διάσταση D της διατομής του στοιχείου της κατασκευής που θα σκυροδετηθεί. Πρέπει $D/5 < D/3$. Ανάλογα με το σχήμα τους οι κόκκοι διακρίνονται σε σφαιρικούς,γωνιώδεις, πλακοειδείς επιμήκεις, ή κυβικούς. Τα γωνιώδη αδρανή χρειάζονται μεγαλύτερη ποσότητα τσιμεντοπολτού σε σχέση με τα σφαιρικά, για την ίδια εργασιμότητα του σκυροδέματος αλλά παρουσιάζουν καλύτερη συνοχή μεταξύ τους και καλύτερη πρόσφυση με το κονίαμα.

Φυσικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος:

α) Αντοχή μητρικού πετρώματος

Το μητρικό πέτρωμα βάσει του κανονισμού πρέπει να έχει θλιπτική αντοχή τουλάχιστον 65 MPa (ΕΛΟΤ 408), αλλά ο ΚΤΣ-2016 προβλέπει δυνατότητα χρήσης και χαμηλότερης αντοχής εφόσον από την μελέτη σύνθεσης αποδειχθεί ότι επιτυγχάνεται η απαιτούμενη αντοχή και ανθεκτικότητα του σκυροδέματος για το έργο που προορίζονται. Στο EN12620 δεν υπάρχει απαίτηση για έλεγχο αντοχής μητρικού πετρώματος.

β) Αντοχή σε επιφανειακή φθορά και κρούση

Για τα φυσικά αδρανή, στα οποία ο προσδιορισμός της αντοχής μητρικού πετρώματος είναι αδύνατος, η δοκιμή αυτή προσδιορίζει την καταλληλότητα τους στο σκυρόδεμα εφόσον το αποτέλεσμα ελέγχου με την μέθοδο Los Angeles δεν υπερβαίνει το 40%. Στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN12620 υπάρχουν κατηγορίες αντίστασης σε θρυμματισμό (προσδιορίζεται με τη μέθοδο της αντοχής σε Los Angeles).

γ) Ανθεκτικότητα σε αποσάθρωση (υγεία).

Η σταθερότητα του όγκου και η μη απώλεια υλικού λόγω ύγρανσης, ξήρανσης, ψύξης απόψυξης είναι προϋποθέσεις για τα αδρανή στο σκυρόδεμα. Η ανθεκτικότητα προσδιορίζεται είτε με την επίδραση διαλυμάτων θεικών αλάτων (κατά ΚΤΣ-2016 συνήθως χρησιμοποιείται το NaSO₄ ενώ στο ΕΛΟΤ EN12620 το MgSO₄) είτε με εναλλαγή σε κύκλους ψύξης - απόψυξης.

δ) Ειδικό βάρος

Διακρίνονται σε απόλυτο, φαινόμενο και μικτό. Οι τιμές του ειδικού βάρους για τα αδρανή του σκυροδέματος πρέπει να βρίσκονται μεταξύ 2,40kg/L και 3,0kg/L. Στο ΕΛΟΤ EN12620 δεν υπολογίζονται ειδικά βάρη αλλά πυκνότητα αδρανών, ενώ δεν δίνονται όρια πυκνότητας για τα αδρανή που ενσωματώνονται στο σκυρόδεμα.

ε) Πορώδες.

Σημαντική ιδιότητα που είναι σε αντίστροφη αναλογία με την αντοχή και την ανθεκτικότητά τους. Η τιμή του προσδιορίζεται με την μέτρηση της υδατοαπορροφητικότητάς τους. Η δοκιμή προσδιορισμού της υδατοαπορροφητικότητας σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN12620 παρουσιάζει διαφορές σε σχέση με την αντίστοιχη του προτύπου ASTM. Έτσι για τον προσδιορισμό της υδατοαπορροφητικότητας των λεπτόκοκκων υλικών, κατά EN, πρέπει προηγουμένως να έχει πλυθεί το υλικό στο κόσκινο των 0,063mm, και μετά να γίνει η δοκιμή, ενώ στο ASTM συμμετέχει και η παιπάλη στον υπολογισμό της υδατοαπορροφητικότητας του υλικού. Αντίστοιχα για τον υπολογισμό της υδατοαπορροφητικότητας των χονδρόκοκκων υλικών το μεν πρότυπο ASTM προδιαγράφει ότι το υλικό είναι σε κορεσμένη και επιφανειακώς ξηρή κατάσταση όταν φαίνεται ένα φιλμ νερού πάνω στον κόκκο.

στ) Κοκκομετρική διαβάθμιση, δηλαδή την επί τοις % σύνθεση του αδρανούς σε κόκκους διαφόρων μεγεθών.

Τα αδρανή ανάλογα με το μέγεθος τους κατατάσσονται σε 4 βασικές κατηγορίες α) Άμμος (0-4mm) και β) Ρυζάκι (4-8mm) γ) Γαρμπίλι (8-16mm) και δ) Χαλίκι (16-31,5mm). Το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12620 καθιερώνει εκτός των βασικών κόσκινων της σειράς DIN την οποία υιοθετεί και ενδιάμεσα κόσκινα, ενώ καταργεί τα Αμερικάνικα κόσκινα και ορίζει την παιπάλη ως το διερχόμενο ποσοστό στο κόσκινο 0,063 αντί 0,075mm.

Χημικά χαρακτηριστικά. Δεν πρέπει να επηρεάζουν δυσμενώς α) την πήξη β) την σκλήρυνση γ) την αντοχή δ) την σταθερότητα του όγκου και ε) την προστασία του οπλισμού από την διάβρωση. Οι παρακάτω ενώσεις θεωρούνται επιβλαβείς

- α) Ενώσεις θείου (ανυδρίτης γύψος). Προκαλούν διόγκωση. Η περιεκτικότητα σε SO₃ πρέπει να είναι μικρότερη από 1%.
- β) Ενώσεις σιδήρου. Προκαλούν διόγκωση και κηλίδες.
- γ) Άλατα και αλογόνα. Προκαλούν διάβρωση. Η περιεκτικότητα σε Cl⁻ πρέπει να είναι < 0,2%.
- δ) Ενώσεις του μόλυβδου ή του ψευδαργύρου. Προκαλούν μείωση της αντοχής.
- ε) Χλωριούχες ή φωσφορικές ενώσεις. Επιδρούν στον χρόνο πήξης.
- στ) Πυριτικοί άργιλοι (ασβεστίου, νατρίου, καλίου). Επιβραδύνουν δραστικά την αντοχή του σκυροδέματος,
- ζ) Αποσαθρώσιμα συστατικά (αργιλικό σχιστόλιθο). Προκαλούν μείωση αντοχής.
- η) Οργανικά. Προκαλούν μείωση αντοχής και καθυστέρηση στην πήξη.
- θ) Γαιάνθρακες ή λιγνίτες. Προκαλούν μείωση αντοχής. Η περιεκτικότητά τους πρέπει να είναι < 1%.
- ι) Κερατόλιθοι (ε.β. <2,35kg/L) να μην υπερβαίνουν το 5%.

Επίσης οι προδιαγραφές συνιστούν να αποφεύγονται πετρώματα με συστατικά που περιέχουν: οπάλιο, ανδεσίτη, ρυόλιθο και δολομίτες γιατί προκαλούν διόγκωση και ζεόλιθους λόγω αντίδρασης με τα αλκάλια του τσιμέντου, γνωστή ως αλκαλοπυριτική αντίδραση. [29]

Τα μεγέθη των τεμαχίων των αδρανών σκυροδέματος, κυμαίνονται από μερικές δεκάδες mm μέχρι μεγεθών περίπου 0,1mm. Το μέγιστο μέγεθος αδρανών που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές από σκυρόδεμα ποικίλει και εξαρτάται από την κατασκευή στην οποία θα χρησιμοποιηθούν. Σ' ένα μίγμα τεμαχίων (σύνθεση διαφορετικών μεγεθών) αδρανών, η ποσοστιαία % κατά βάρος κατανομή μεγέθους των τεμαχίων αναφέρεται ως “διαβάθμιση” (grading) και περιλαμβάνει επίσης ιδιότητες που δεν έχουν άμεση σχέση με το μητρικό πέτρωμα όπως:

- Μέγεθος και σχήμα τεμαχίων
- Επιφανειακή δομή (υφή)
- Απορροφητικότητα (πορώδες αδρανών)
- Κατάσταση κορεσμού των τεμαχίων.

1.4. Το νερό

Το νερό που προστίθεται στο τσιμέντο για τη δημιουργία της τσιμεντόπαστας, είναι απαραίτητο για τις 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 τις αντιδράσεις ενυδάτωσης ή να προκαλέσουν διάβρωση του εγκιβωτισμένου οπλισμού.[30]

1.4.1. Ποιότητα Νερού

Το νερό ανάμιξης που χρησιμοποιείται στην παραγωγή σκυροδέματος πρέπει να ικανοποιεί τις 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 τις 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, όπως

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.[30]

Οι έλεγχοι που γίνονται στο νερό είναι οι εξής:

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 500mg/L, εάν πρόκειται για προεντεταμένο σκυρόδεμα ή κονίαμα χυτών αγκυρώσεων, τα 1000mg/L για σκυρόδεμα με οπλισμό ή εμβαπτισμένα μεταλλικά στοιχεία τα επίπεδα ή τέλος τα 4500mg/L για σκυρόδεμα χωρίς οπλισμό ή εμβαπτισμένα μεταλλικά στοιχεία.

Το περιεχόμενο του νερού σε θειικά δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2000mg/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 Na_2O) δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 1500mg/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 το χρόνο πήξης και τη θλιπτική αντοχή. Τα όρια ουσιών κατά τη χημική ανάλυση είναι:

Σάκχαρα 100mg/L

Φωσφορικά άλατα, εκφρασμένα σε P_2O_5 : 100mg/L

Νιτρικά άλατα, εκφρασμένα σε NO^- : 3500mg/L

Μόλυβδος, εκφρασμένος σε Pb_2^+ : 100mg/L

Ψευδάργυρος, εκφρασμένος σε Zn^{2+} : 100mg/L

Η αρχή της πήξης κατά τον έλεγχο των δοκιμίων 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 το χρόνο ολοκλήρωσης της πήξης σε δοκίμια με απιονισμένο ή απεσταγμένο νερό.[31]

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 δοκιμίων 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 ($5^\circ\text{C} \leq \theta \leq 32^\circ\text{C}$).

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. [32]

1.4.2. Λόγος νερού προς τσιμέντο

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 0.6/1 και 0.4/1, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ρευστότητα του παραγόμενου υλικού προκειμένου να έχει την κατάλληλη εργασιμότητα αλλά και αντοχή στη διάβρωση. Όταν η αναλογία νερού προς τσιμέντο ξεπεράσει το 0.6/1, η διαπερατότητα του σκυροδέματος, άρα και η πιθανότητα χημικής προσβολής, αυξάνεται εξαιτίας της μεγάλης αύξησης του μεγέθους και του αριθμού των τριχοειδών πόρων. Όταν η αναλογία νερού προς τσιμέντο κυμαίνεται μεταξύ 0.40/1 και 0.45/1 εξασφαλίζεται τόσο η μείωση του πορώδους όσο και η αύξηση της μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος. [33]

1.5. Χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος

1.5.1. Εισαγωγή

Σε μια χώρα με έντονη σεισμική δραστηριότητα, όπως η Ελλάδα, είναι μεγάλο το ενδιαφέρον των τεχνικών επιστημόνων και γενικότερα του τεχνικού κόσμου για την ποιότητα των βασικών δομικών υλικών. Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και περισσότερο αντιληπτή η ξεχωριστή σημασία που έχουν, μεταξύ άλλων, οι λειτουργικές ιδιότητες και η ποιότητα των χαλύβων οπλισμού, τόσο στην Ελλάδα και τις υπόλοιπες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αλλά και σε όλο τον κόσμο, καθώς εισάγονται νέες απαιτήσεις και τροποποιούνται οι παλιές. Οι μεταβολές είναι ριζικές. Ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι κατηγορίες ποιότητας χαλύβων οπλισμού, που ως πρόσφατα προδιαγράφονταν ως επαρκείς και χαρακτηρίζονταν σύγχρονες, σήμερα θεωρούνται επικίνδυνες, κατάλληλες μόνο για βοηθητικές κατασκευές.

Οι νέες απαιτήσεις που εισάγονται συμβαδίζουν με τις σύγχρονες απαιτήσεις σχεδιασμού των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα και περιλαμβάνονται στα νέα Πρότυπα για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3. Ο Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος ΚΤΧ 2008 (ΦΕΚ 1416/Β/17-07-2008 και ΦΕΚ 2113/Β/13-10-2008) προδιαγράφει τις ελάχιστες γενικές και ειδικές απαιτήσεις τις οποίες πρέπει να ικανοποιούν οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος.

Ο χάλυβας είναι κράμα σιδήρου (Fe) με περιεκτικότητα σε άνθρακα (C) έως 2% και με προσθήκη άλλων στοιχείων σε μικρές περιεκτικότητες όπως μαγγάνιο και πυρίτιο έτσι ώστε να επιτυγχάνονται οι απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες. Ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος είναι χάλυβας με κυκλική ή πρακτικά κυκλική διατομή που χρησιμοποιείται για τον οπλισμό του σκυροδέματος και διατίθενται σε μορφή ράβδων, ρολών και πλεγμάτων.

Είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό μετά το σκυρόδεμα και το ξύλο. Χρησιμοποιείται παντού: από την αρχιτεκτονική και τη ναυπηγική μέχρι την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων. Το ατσάλι είναι ένα από τα σημαντικότερα βιομηχανικά υλικά και οι χαλυβουργίες (εργοστάσια παραγωγής χάλυβα) ανήκουν στις βαριές βιομηχανίες. Σε παλαιότερες εποχές, η βιομηχανική παραγωγή μιας χώρας αξιολογούνταν από την παραγωγή της σε χάλυβα. [34]

Ο Χάλυβας Οπλισμού Σκυροδέματος χρησιμοποιείται με σκοπό την ανάληψη των εφελκυστικών δυνάμεων στις κατασκευές. Αποτελεί μαζί με το σκυρόδεμα (μπετόν), το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλή θλιπτική αντοχή, τον φέροντα οργανισμό (σκελετό) του κτιρίου. Τα δύο υλικά συμπεριφέρονται ως ενιαίος φορέας, και ο χάλυβας προφυλάσσει το σκυρόδεμα (μπετόν) από το να υποστεί ρωγμές σε κρίσιμα σημεία (περιοχές κόμβων). Επιπλέον, σε σεισμική δραστηριότητα ο χάλυβας απορροφά τη

σεισμική ενέργεια μειώνοντας τις βλάβες και σε οριακές καταστάσεις διασφαλίζει την μη κατάρρευση της κατασκευής. [35]

Η συνάφεια που είναι απαραίτητη για την συνεργασία των ράβδων οπλισμού με το σκυρόδεμα εξασφαλίζεται από την γεωμετρία της επιφάνειας των ράβδων. Η γεωμετρία της επιφάνειας τους καθορίζεται από την ύπαρξη νευρώσεων καθώς και από τη γεωμετρία αυτών (ύψος και απόσταση νευρώσεων, μορφολογία, κλπ.). [36]

1.5.2. Ορισμοί

Σίδηρος (καθαρός): Ως καθαρός σίδηρος χαρακτηρίζεται συνήθως κράμα με περιεκτικότητα σε άνθρακα και λοιπά κραματικά στοιχεία μικρότερη από 0,05%.

Χάλυβας: Κράμα σιδήρου-άνθρακα (Fe-C) με περιεκτικότητα σε άνθρακα έως 2% και προσθήκες άλλων στοιχείων.

Χάλυβας οπλισμού: Χάλυβας με κυκλική ή πρακτικά κυκλική διατομή, για τον οπλισμό του σκυροδέματος.

Χάλυβας οπλισμού με νευρώσεις: Χάλυβας οπλισμού με δύο τουλάχιστον σειρές πλάγιων ανάγλυφων νευρώσεων, ομοιόμορφα κατανεμημένων κατά μήκος.

Λείος χάλυβας οπλισμού: Χάλυβας οπλισμού με πρακτικά λεία επιφάνεια.

Χάλυβας οπλισμού με έγγλυφες αυλακώσεις: Χάλυβας οπλισμού με καθορισμένες αυλακώσεις, ομοιόμορφα κατανεμημένες κατά μήκος.

Μορφοσίδηρος (δομικός χάλυβας - structural steel): Χάλυβας κατασκευών σε διάφορες μορφές διατομής.

1.5.3. Ιστορική αναδρομή της παρασκευής χάλυβα

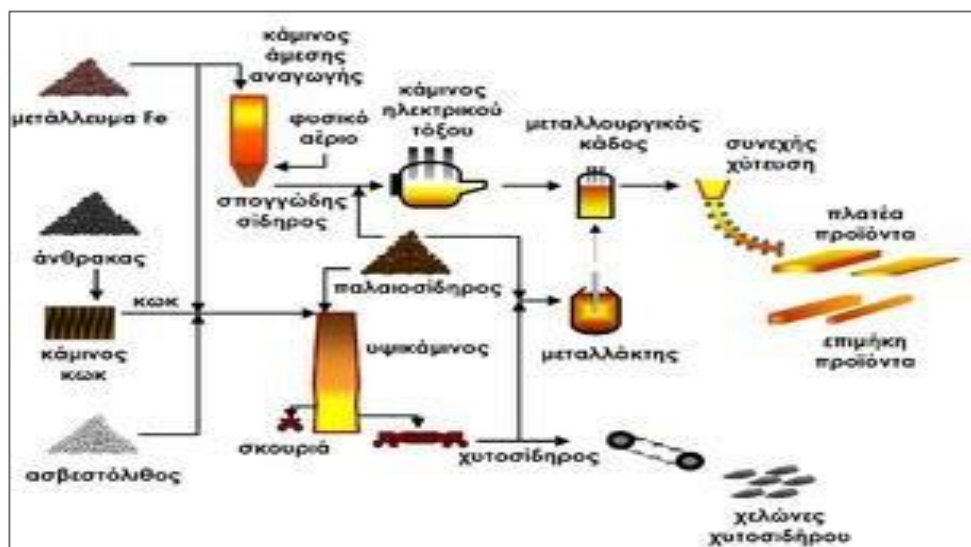
Η ιστορία του χάλυβα ξεκινά γύρω στο 1000 π.Χ., όταν μεταλλουργοί της εποχής εκείνης άρχισαν να παράγουν χάλυβα συστηματικά με ενανθράκωση σπογγώδους σιδήρου. Πάντως οι Χετταίοι γνώριζαν μια παρόμοια μέθοδο παραγωγής χάλυβα ήδη από το 2300 π.Χ. Την εποχή της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, πολλοί μεσογειακοί λαοί, αλλά και οι Ινδοί, οι Κινέζοι και οι Ιάπωνες γνώριζαν την τέχνη της παραγωγής σπογγώδους σιδήρου και χάλυβα, καθώς και την τέχνη της σκλήρυνσης του χάλυβα με θέρμανση και απότομη ψύξη («βαφή»). Περίφημα ήταν τα σφυρήλατα χαλύβδινα δαμασκηνά σπαθιά, που κατασκευάζονταν κατά τον Μεσαίωνα στη Συρία και στην Ιαπωνία.

Αν και από την εποχή της Αναγέννησης υπήρχε η τεχνολογική δυνατότητα ανάπτυξης των υψηλών θερμοκρασιών τήξης του χάλυβα, οι πρώτοι χάλυβες σε κάμινο παρήχθησαν το 1740. Μέχρι τότε κατασκευάζονταν μόνο λεπτού πάχους τεμάχια από χάλυβα, όπως ξίφη και εργαλεία, με ενανθράκωση σιδήρου, δηλαδή με τεχνικές διάχυσης του άνθρακα σε τεμάχια σιδήρου. Η σύγχρονη ιστορία του χάλυβα αρχίζει ουσιαστικά στα μέσα του 19ου αιώνα, με τη δυνατότητα για πρώτη φορά μαζικής παραγωγής χάλυβα υψηλής ποιότητας, όταν το 1856 ο Άγγλος εφευρέτης H. Bessemer ανακάλυψε πως να μετατρέπει τον τηγμένο χυτοσίδηρο σε χάλυβα με εμφύσηση οξυγόνου σε έναν κάδο («μεταλλάκτη») επενδυμένο με πυρίμαχα τούβλα. Την ίδια εποχή ανακαλύφθηκε η μετατροπή του χυτοσιδήρου σε χάλυβα σε καμίνους ανοικτής εστίας (κάμιнос Siemens-Martin). Σήμερα, η ανακάλυψη του Bessemer χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για την απανθράκωση του χυτοσιδήρου. Η κάμιнос Siemens-Martin εγκαταλείφθηκε ως πιο ενεργοβόρος και λιγότερο φιλική προς το περιβάλλον.[34]

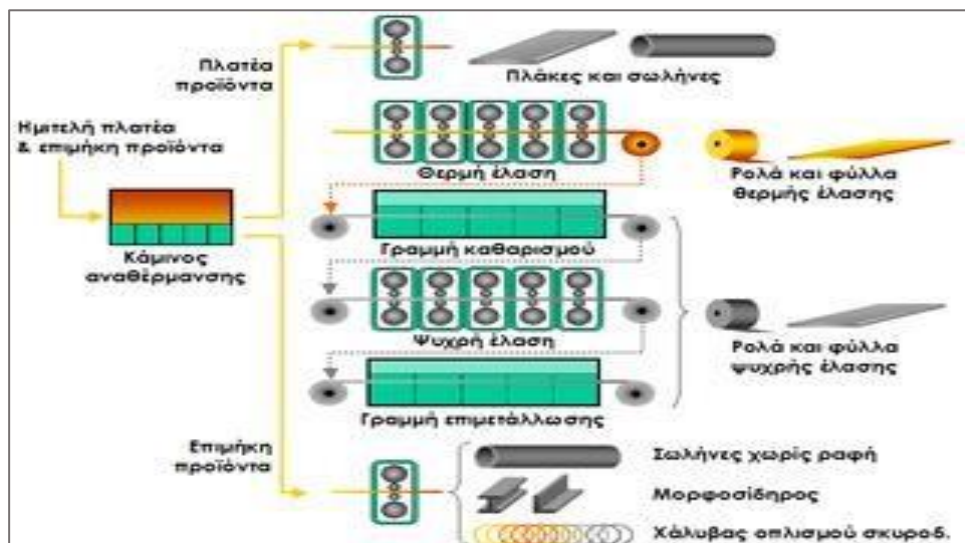
1.5.4. Η παραγωγή του χάλυβα

Ο χάλυβας παράγεται με τρεις βασικές μεθόδους: [35]

- 1) με αναγωγή σιδηρομεταλλευμάτων σε υψικάμινο για την παραγωγή χυτοσιδήρου, και την μετατροπή του χυτοσιδήρου σε χάλυβα μέσα σε μεταλλάκτη με εμφύσηση οξυγόνου·
- 2) με την άμεση αναγωγή σιδηρομεταλλευμάτων (δηλ. αναγωγή σε στερεά κατάσταση) σε φρεατώδη κάμινο για την παραγωγή σπογγώδους σιδήρου (Direct Reduced Iron - DRI), και την μετατροπή του σπογγώδους σιδήρου σε χάλυβα μέσα σε κάμινο (κλίβανο) ηλεκτρικού τόξου
- 3) ε την ανάτξη παλαιοσιδήρου (σκραπ) σε κάμινο (κλίβανο) ηλεκτρικού τόξου (Electric Arc Furnace - EAF).



Εικόνα 1. 2 Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής χυτοσιδήρου και ημιτελών προϊόντων χάλυβα



Εικόνα 1. 3 Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής τελικών προϊόντων χάλυβα

1.5.5. Διαδικασία Παραγωγής Χάλυβα Οπλισμού στην Ελλάδα

Πρώτη ύλη: Παλαιοσίδηρος

Στην Ελλάδα, η παραγωγή χάλυβα βασίζεται στην τήξη παλαιοσιδήρου (scrap) με χρήση ηλεκτρικών καμίνων (EAF, Electric Arc Furnace). Η ανακύκλωση του παλαιοσιδήρου συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος. Η σημασία της ποιότητας του scrap στην παραγωγική διαδικασία, αποτυπώνεται στον αυστηρό έλεγχο ποιότητας τόσο κατά την προμήθεια όσο και κατά την παραλαβή του παλαιοσιδήρου στο εργοστάσιο. [36]

Φόρτωση παλαιοσιδήρου σε καλάθια

Κατάλληλες ποσότητες παλαιοσιδήρου φορτώνονται σε καλάθια, με την βοήθεια γερανών μεγάλης δυναμικότητας, ώστε να μεταφερθούν στην ηλεκτρική κάμινο. Στο στάδιο αυτό μπορούν να φορτωθούν επίσης κατάλληλες ποσότητες πρόσθετων βοηθητικών υλών (ασβέστης, ανθρακίτης κλπ.) με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου χάλυβα.

Ηλεκτρική κάμινο – Φόρτωση πρώτων υλών

Η ηλεκτρική κάμινο έχει κατάλληλη περιστρεφόμενη οροφή, ενώ το καλάθι ανοίγει στο κάτω μέρος του και το φορτίο αδειάζει μέσα στην ηλεκτρική κάμινο. Μετά τη φόρτωση της ηλεκτρικής καμίνου, η οροφή της κλείνει, προστίθενται κατάλληλες ποσότητες βοηθητικών πρώτων υλών (ασβέστης, ανθρακίτης κλπ.) με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου χάλυβα και ξεκινά η διαδικασία τήξης του φορτίου.

Ηλεκτρική κάμινο - Τήξη

Η θέρμανση και η τήξη του παλαιοσιδήρου επιτυγχάνεται με τη διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω ηλεκτροδίων γραφίτη και τη χρήση ειδικών καυστήρων φυσικού αερίου και οξυγόνου, με αποτέλεσμα τη λήψη ρευστού χάλυβα σε θερμοκρασία περίπου 1700 °C.

Ηλεκτρική κάμινο - Απόχυση

Ο υγρός χάλυβας αποχύνεται από την ηλεκτρική κάμινο μέσα σε ειδικά πυρίμαχα δοχεία (κάδοι) και προστίθενται στον κάδο κατάλληλες ποσότητες άλλων προσμίξεων με σκοπό τη ρύθμιση της χημικής σύστασης και τον μεταλλουργικό καθαρισμό του χάλυβα.

Μεταλλουργία κάδου (Ladle Furnace)

Ο κάδος που περιέχει τον υγρό χάλυβα με τις κατάλληλες προσμίξεις οδηγείται στην ηλεκτρική κάμινο κάδου, όπου συντελείται ο ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας και της χημικής σύστασης του χάλυβα καθώς επίσης και ο μεταλλουργικός καθαρισμός του. Για αυτό προστίθενται σιδηροκράματα και άλλες βοηθητικές ύλες (ασβέστης, αντιοξειδωτικά και αποθιωτικά πρόσθετα κλπ) στον κάδο με τον υγρό χάλυβα, διοχετεύεται ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτροδίων γραφίτη και παρέχεται αέριο αργό από τον πυθμένα του κάδου.

Συνεχής χύτευση (Continuous Casting Machine)

Ο υγρός χάλυβας αποχύνεται από τον κάδο σε κατάλληλο διανομέα (σκάφη) που έχει ορισμένο αριθμό οπών στον πυθμένα, μέσα από τις οποίες το τήγμα ρέει σε αντίστοιχο αριθμό γραμμών συνεχούς χύτευσης. Στο στάδιο της χύτευσης συντελείται η στερεοποίηση του υγρού χάλυβα σε ημιτελικά προϊόντα (μπιγέτες). Η στερεοποίηση του χάλυβα επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων χάλκινων καλουπιών, τον ψεκασμό με νερό και τέλος με απλή έκθεση στον αέρα. Όταν ολοκληρωθεί η στερεοποίηση, οι μπιγέτες κόβονται στο κατάλληλο και επιθυμητό μήκος.

Θερμή έλαση

Οι μπιγέτες χάλυβα τροφοδοτούνται μέσα σε φούρνο αναθέρμανσης έτσι ώστε να θερμανθούν σε κατάλληλη θερμοκρασία (περίπου στους 1000°C) προκειμένου να ξεκινήσει η θερμή έλαση. Κατά τη διάρκεια της έλασης, οι μπιγέτες διέρχονται μεταξύ ισχυρών ζευγών χαλύβδινων κυλίνδρων με αποτέλεσμα να μειώνεται η διατομή τους και να αυξάνεται αντίστοιχα το μήκος τους. Όσο μειώνεται η διατομή τόσο αυξάνεται το μήκος και κατά συνέπεια η ταχύτητα της έλασης, ο έλεγχος της οποίας είναι πλήρως αυτοματοποιημένος.

Θερμική κατεργασία

Μετά το στάδιο της θερμής έλασης ακολουθεί άμεση θερμική κατεργασία των χαλύβων. Η χαλύβδινη ράβδος μετά το τέλος της έλασης, εισέρχεται σε ειδικά υδροδοχεία μέσα στα οποία διοχετεύεται νερό με υψηλή πίεση. Εκεί συντελούνται μετασχηματισμοί της μικροδομής των χαλύβων που συνοδεύονται από αύξηση της αντοχής τους και παράλληλης διατήρησης υψηλής ολκιμότητάς τους. Στο στάδιο αυτό προσδίδονται στους χάλυβες οπλισμού οι τελικές ιδιότητες που εξασφαλίζουν την υψηλή ποιότητά τους.

Τελικά προϊόντα

Τα τελικά προϊόντα, αφού ψυχθούν, κόβονται και συσκευάζονται ανάλογα με τη μορφή τους σε α) ευθύγραμμες ράβδους, β) συμπαγείς κουλούρες και γ) χονδρόσυρμα (κουλούρες), και αποθηκεύονται.

Συγκόλληση - Πλέγματα

Ειδικότερα, για την παραγωγή (ηλεκτροσυγκολλημένων) πλεγμάτων ακολουθεί συγκόλληση με αυτόματες μηχανές και κοπή, έτσι ώστε να παραχθούν φύλλα πλέγματος στις κατάλληλες κάθε φορά διαστάσεις.

Αποθήκευση - Διανομή

Κατά την αποθήκευσή τους οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος θα ταξινομούνται ανάλογα με την κατηγορία ποιότητας και την προέλευση (προμηθευτής, χώρα). Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να είναι δυνατή η ευχερής επιτόπου επαλήθευση της ταυτότητας των προϊόντων. Κάθε μονάδα διακίνησης χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος πρέπει να ικανοποιεί τις βασικές απαιτήσεις σχετικά με την οργάνωση, τον εξοπλισμό και την τεχνική στελέχωση. Ειδικότερα, τα ζυγιστικά όργανα θα είναι διακριβωμένα, το δε Πιστοποιητικό Διακρίβωσης θα έχει εκδοθεί το πολύ προ ενός έτους. Η μονάδα υποχρεούται να παρακολουθεί τις ενδεχόμενες τροποποιήσεις των κατασκευαστικών απαιτήσεων των Κανονισμών, να ενημερώνει κατάλληλα το προσωπικό και να προσαρμόζει τον εξοπλισμό της, αν ταυτόχρονα λειτουργεί και ως μονάδα διαμόρφωσης. [37]

1.5.6. Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Προηγούμενοι Κανονισμοί

Μέχρι πριν από λίγα χρόνια, ο πιο γνωστός τρόπος διακρίσεως των χαλύβων σκυροδέματος ήταν (σε συμφωνία και με τους Γερμανικούς Κανονισμούς και τα DIN που ακολουθούσε η Ελλάδα) ο διαχωρισμός τους στις κατηγορίες St I, St III και St IV (η κατηγορία St II είχε καταργηθεί). Οι κατηγορίες St III και St IV (οι “σκληροί” χάλυβες) διακρίνονταν σε υποκατηγορίες St IIIa, St IIIb και St IVa, St IVb αντίστοιχα, όπου η ένδειξη α έδειχνε τους φυσικούς σκληρούς χάλυβες, ενώ η ένδειξη b τους εν ψυχρό κατεργασμένους. Στην κατηγορία St I η τάση διαρροής ήταν 2200 kp/cm² και η επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας 1400 kp/cm², στην κατηγορία St III οι αντίστοιχες τιμές ήταν 4200 kp/cm² για τη διαρροή και 2400 kp/cm² για την επιτρεπόμενη τάση και στην κατηγορία St IV οι τιμές ήταν 5000 kp/cm² και 2600 kp/cm² ή 2800 kp/cm² αντίστοιχα (1 kp ≈ 10 N και 1 kp/cm² ≈ 100kN/m²).[37] Στον Γερμανικό Κανονισμό Σκυροδέματος του 1972, οι συμβολισμοί τροποποιήθηκαν σε BSt 22/34 (για το St I), BSt 42/50 (για το St III) και BSt 50/55 (για το St IV), όπου

ο αριθμητής του κλάσματος έδειχνε το εγγυημένο όριο διαρροής και ο παρονομαστής το εγγυημένο όριο θραύσεως σε εφελκυσμό, π.χ. για το BSt 22/34 έδειχνε όριο διαρροής 2200 kP/cm² και όριο θραύσεως 3400 kP/cm². Άλλωστε, με τον ίδιο τρόπο εμφανιζόταν εξ αρχής και προ πολλού χρόνου ο χαρακτηρισμός των χαλύβων προεντάσεως (ένδειξη διαρροής και θραύσεως). [38]

Αργότερα, η ποιότητα, οι διαστάσεις, οι ανοχές και οι λοιπές απαιτήσεις χαρακτηριστικών που έπρεπε να ικανοποιούνται από τους χάλυβες του οπλισμού σκυροδέματος που κυκλοφορούσαν στην Ελλάδα, προδιαγράφονταν στα Πρότυπα ΕΛΟΤ 959 “Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος” και ΕΛΟΤ 971 “Συγκολλησιμοι Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος”, που έγιναν υποχρεωτικά με την υπ’ αριθμ. Β 21538/2228/ 3-12-1987 (ΦΕΚ 702/Β/4-12-87) Απόφαση του Υπουργού Βιομηχανίας, όπως (ύστερα από διαδοχικές τροποποιήσεις - καταργήσεις - επαναφορές) διαμορφώθηκε τελικά με την Υπουργική Απόφαση 15283/Φ7/422/8-8-95 (ΦΕΚ 746/Β/30-8-95). Σύμφωνα με αυτά καθορίστηκαν τρεις κατηγορίες χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος, με βάση την χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής τους (πραγματικού ή συμβατικού, για παραμένουσα παραμόρφωση 0,2%), ήτοι οι κατηγορίες S220, S400 και S400s, S500 και S500s, που κάθε μία τους είχε τάση ορίου διαρροής 220 MPa (≈ 2200 kP/cm²), 400 MPa (≈ 4000 kP/cm²) και 500 MPa (≈ 5000 kP/cm²), αντίστοιχα. Η ένδειξη s έδειχνε τους συγκολλησίμους χάλυβες. Για τον χάλυβα S220 δεν υπήρχε ιδιαίτερη κατηγορία S220s, ήταν όμως σχεδόν πάντα συγκολλησίμος. Οι λοιποί χάλυβες S400 και S500 ήταν επίσης συγκολλησίμοι, αλλά υπό προϋποθέσεις.

1.5.7. Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος

Ο Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος (KTX 2008) (ΦΕΚ 1416/Β/17-07-2008 και ΦΕΚ 2113/Β/13-10- 2008) προδιαγράφει τις ελάχιστες γενικές και ειδικές απαιτήσεις τις οποίες πρέπει να ικανοποιούν οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος. Στον Κανονισμό γίνονται παραπομπές στα παρακάτω Πρότυπα και κανονιστικά κείμενα:

- ΕΛΟΤ EN 10080 (2005): Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος - Συγκολλησίμοι χάλυβες
Γενικές απαιτήσεις
- ΕΛΟΤ 1421-2 (2007): Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος - Συγκολλησίμοι χάλυβες - Μέρος 2:
Τεχνική κατηγορία B500A
- ΕΛΟΤ 1421-3 (2007): Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος - Συγκολλησίμοι χάλυβες - Μέρος 3:
Τεχνική κατηγορία B500C

Στο Εθνικό Πρότυπο (ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3) η Ελλάδα έχει επιλέξει για το όριο διαρροής (που ορίζει την κατηγορία του χάλυβα) την τιμή των 500MPa. Όλες οι τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών που αναγράφονται στα Πρότυπα είναι χαρακτηριστικές τιμές, έχουν δηλαδή γενικώς πιθανότητα 5% να υπολείπονται ή να υπερβάλλονται.[37]

Η μέση ολκιμότητα (B) έχει αποκλεισθεί για τους χάλυβες που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα ως οπλισμός σκυροδέματος (εθνική επιλογή). Η μικρή ολκιμότητα (A) επιτρέπεται μόνο για τους χάλυβες τους χρησιμοποιούμενους σε πλέγματα και μόνο μέχρι τη διάμετρο Φ8 (Πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-2). Η σεισμικότητα της Ελλάδας υποδεικνύει ή και υποχρεώνει για χάλυβες μεγάλης ολκιμότητας, οι οποίοι επιτρέπουν μεγάλες πλαστιμότητες φερόντων στοιχείων. Έτσι, ο κύριος, ραβδόμορφος οπλισμός αντοχής που επιτρέπεται να χρησιμοποιείται πλέον στην Ελλάδα, είναι κατηγορίας B500C (Πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3).

Ο πλήρης χαρακτηρισμός της κατηγορίας του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος γίνεται με την ένδειξη του ορίου διαρροής σε MPa και της ολκιμότητας (π.χ. B500C). Δεν υπάρχει πια ανάγκη αναφοράς στη συγκολλησιμότητα, αφού όλοι οι χάλυβες είναι συγκολλησίμοι.

Οι νέες κατηγορίες B500A και B500C αντιστοιχούν, από πλευράς αντοχής, προς αυτές των παλιών χαλύβων St IV και S500 (αν και υπάρχουν σημαντικές διαφορές στη σύνθεση των κραμάτων και ακόμα μεγαλύτερες στις μεθόδους παραγωγής, με επίπτωση κυρίως στη συγκολλησιμότητα και την ολκιμότητα). Άλλωστε, πολλοί ονόμαζαν μέχρι προ ολίγου το S400 και το S500 με τα “παλιά” τους ονόματα St III και St IV, ίσως και για τη διευκόλυνση της συνεννόησης με τους τεχνίτες.

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

Οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά, που δεν διαφέρουν αισθητά από αυτά του σιδήρου:

- Μέτρο ελαστικότητας : $E = 200 \text{ GPa} (\approx 2.0 \times 10^6 \text{ kp/cm}^2)$
- Μέτρο ολίσθησης (διάτμησης) : $G = 80 \text{ GPa} (\approx 0.8 \times 10^6 \text{ kp/cm}^2)$ Μέτρο διόγκωσης : $K = 165 \text{ GPa} (\approx 1.65 \times 10^6 \text{ kp/cm}^2)$
- Λόγος Poisson ν : $\nu = 0.30 (0.27 \div 0.33)$
- Συντελεστής θερμικής διαστολής : $\alpha = 12 \times 10^{-6}/\text{grad}$
- Πυκνότητα : $d = 7.85 \text{ g/cm}^3$

Οι παραπάνω τιμές είναι οι χρησιμοποιούμενες για πρακτικές εφαρμογές και ισχύουν για θερμοκρασία περί τους $20 \text{ }^\circ\text{C}$, μεταβαλλόμενες αισθητά υπό την επίδρασή της (π.χ. τα E και G μειώνονται κατά 40% περίπου στους $650 \text{ }^\circ\text{C}$, ενώ ο συντελεστής α της θερμικής διαστολής αυξάνει κατά 15% περίπου για την ίδια θερμοκρασία). Η μεταβολή δεν είναι, αλλά μπορεί να θεωρηθεί, γραμμική για τις ενδιάμεσες θερμοκρασίες. [35], [37]

1.5.8. Σήμανση Χαλύβων Οπλισμού

Όλα τα δέματα προϊόντων φέρουν ειδική ετικέτα ταυτοποίησης που εξασφαλίζει την ιχνηλασιμότητα τους. Η μετακίνηση των προϊόντων πραγματοποιείται κυρίως με μαγνητικούς γεραμούς που προσφέρουν μεγάλη ταχύτητα φόρτωσης στους πελάτες και προστατεύουν την ασφάλεια των εργαζομένων. Η αποθήκευση πραγματοποιείται σε κατάλληλα διαμορφωμένους χώρους στους οποίους διασφαλίζεται η προστασία της ποιότητας των προϊόντων.

Η σήμανση για την αναγνώριση της κατηγορίας ποιότητας των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος γίνεται με το διαφορετικό τρόπο διάταξης των πλάγιων νευρώσεων στην επιφάνεια της ράβδου. Οι χάλυβες κατηγορίας B500C φέρουν στην επιφάνειά τους δύο σειρές πλάγιων διαδοχικών νευρώσεων αντίθετης φοράς. Σε κάθε σειρά, οι διαδοχικές νευρώσεις έχουν εναλλασσόμενες γωνίες κλίσης ως προς το διαμήκη άξονα της ράβδου.

Η αναγνώριση της χώρας και της μονάδας παραγωγής ενός χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος γίνεται, συνήθως, μέσω ενός αριθμητικού συστήματος κανονικών πλάγιων νευρώσεων ανάμεσα σε ενισχυμένες που παρουσιάζονται επαναλαμβανόμενες στη μία πλευρά των πλάγιων νευρώσεων της ράβδου. Το σύμβολο για την έναρξη της σήμανσης καθώς και για την κατεύθυνση της ανάγνωσης υποδηλώνεται με δύο διαδοχικές ενισχυμένες πλάγιες νευρώσεις. Μετά την έναρξη ακολουθεί η σήμανση της χώρας παραγωγής. Ακολουθεί το πλήθος των νευρώσεων που συμβολίζει τη χώρα παραγωγής (κωδικός αριθμός χώρας) και μετά ακολουθεί η σήμανση της μονάδας παραγωγής του χάλυβα. Εάν ο αριθμός που δηλώνει τη μονάδα παραγωγής είναι διψήφιος (το 10 και τα πολλαπλάσια του απαγορεύονται) τότε

συμβολίζεται με δύο ομάδες πλάγιων νευρώσεων ανάμεσα σε ενισχυμένες, εκ των οποίων η πρώτη ομάδα δίνει το πρώτο ψηφίο και η δεύτερη ομάδα το δεύτερο ψηφίο του κωδικού του εργοστασίου.[36]

1.5.9. Διάκριση χαλύβων

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος διακρίνονται σε υποκατηγορίες με βάση τα εξής: [39]

Με κριτήριο τη μέθοδο παραγωγής, σε:

- Θερμής έλασης, χωρίς καμία άλλη περαιτέρω θερμική ή θερμομηχανική κατεργασία οποιασδήποτε μορφής (χάλυβες ΘΕ-Χ)
- Θερμής έλασης, που ακολουθείται από μία άμεση εν σειρά διαδικασία θερμικής κατεργασίας (χάλυβες ΘΕ-Θ)
- Ψυχρής κατεργασίας, με ολική ή έλαση του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση (χάλυβες ΨΚ-Ο) ή με στρέψη του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση (χάλυβες ΨΚ-Σ) ή με συνδυασμό των παραπάνω.

Με κριτήριο τη μορφή της επιφάνειας της ράβδου σε:

- Λείους χάλυβες κυκλικής διατομής
- Χάλυβες με ανάγλυφες νευρώσεις, υψηλής συνάφειας
- Χάλυβες με κοιλότητες (έγγλυφες αυλακώσεις).

Με κριτήριο την ολκιμότητα, σε:

- Χάλυβες χαμηλής ολκιμότητας
- Χάλυβες μέσης ολκιμότητας
- Χάλυβες υψηλής ολκιμότητας.

Με κριτήριο τη συγκολλησιμότητα, σε:

- Χάλυβες συγκολλησίμους
- Χάλυβες μη συγκολλησίμους ή συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις.

Με κριτήριο την αντοχή τους σε διάβρωση, σε:

- Κοινούς χάλυβες, που είναι κράματα σιδήρου με άνθρακα (Fe-C) και με άλλα στοιχεία σε μικρές περιεκτικότητες
- Ανοξειδωτους χάλυβες, που είναι κράματα σιδήρου με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο (Cr) 12%. Οι χάλυβες αυτοί είναι ανθεκτικοί σε διάβρωση. Η αντοχή τους σε διαβρωτικό περιβάλλον είναι μεγαλύτερη αν περιέχουν και άλλα κραματικά στοιχεία όπως νικέλιο (Ni), μολυβδαίνιο (Mo), τιτάνιο (Ti) κ.λπ.

1.5.10. Χημικά Χαρακτηριστικά

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος είναι χάλυβες ελαφρά κραματωμένοι ή μη κραματωμένοι. Η διαδικασία παραγωγής (μεταλλουργική μέθοδος) και ο τύπος της αποξείδωσης του χάλυβα επαφίενται στην κρίση του παραγωγού. Οι ακόλουθοι περιορισμοί για τη χημική σύσταση εξασφαλίζουν τη συγκολλησιμότητα και την ανθεκτικότητα στο χρόνο των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος.

Συγκολλησιμότητα είναι η ικανότητα ενός μετάλλου να συγκολλάται υπό προδιαγεγραμμένες συνθήκες, έτσι ώστε η προκύπτουσα σύνδεση να ικανοποιεί τις απαιτήσεις σχεδιασμού.

Σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 10080, οι χάλυβες θεωρούνται συγκολλησιμοι όταν οι περιεκτικότητες σε άνθρακα (C), θείο (S), φωσφόρο (P), άζωτο (N), χαλκό (Cu), καθώς και η ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα C_{eq} δεν υπερβαίνουν τις αντίστοιχες τιμές που δίνονται στον Πίνακα 1.5.

Η ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα, C_{eq} , υπολογίζεται σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

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

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

Πίνακας 1.5 Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές για τη χημική σύσταση (περιεκτικότητα % κ.β.) [38]

	Άνθρακας C ⁽²⁾	Θείο S	Φωσφόρος P	Άζωτο N ⁽¹⁾	Χαλκός Cu	Ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα C_{eq} ⁽²⁾
Ανάλυση ρευστού χάλυβα κατά τη χύτευση	0,22	0,050	0,050	0,012	0,80	0,50
Ανάλυση τελικού προϊόντος	0,24	0,055	0,055	0,014	0,85	0,52

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

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

1.5.11. Επίδραση των κραματικών στοιχείων στα χαρακτηριστικά των Χ.Ο.Σ.

Άνθρακας (C). Στους Χ.Ο.Σ., ο άνθρακας είναι από τα βασικότερα κραματικά στοιχεία καθώς επηρεάζει σημαντικά την αντοχή και τη συγκολλησιμότητα τους. Αύξηση της περιεκτικότητας σε C οδηγεί σε αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής αλλά παράλληλα σε αναπόφευκτη μείωση της ολκιμότητας και της συγκολλησιμότητας. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε C αυξάνει την εμβατότητα (ικανότητα σκλήρυνσης με μαρτενσιτικό μετασχηματισμό - hardenability) του χάλυβα που σχετίζεται με το βάθος βαφής των χάλυβων. Η τελευταία ιδιότητα είναι ιδιαίτερα σημαντική στους Χ.Ο.Σ. αφού είναι συνυφασμένη με συγκεκριμένη θερμομηχανική μεταλλοτεχνική επεξεργασία (θερμιά ελάση με άμεση θερμική κατεργασία), η οποία ακολουθείται κατά την παραγωγή της πλειονότητας των Χ.Ο.Σ. σήμερα στην Ευρώπη (Tempcore, Thermex κ.λπ.). Στην πράξη, περιεκτικότητα σε C μεταξύ 0,18-0,24% στο τελικό προϊόν αποτελεί έναν συμβιβασμό μεταξύ των παραπάνω αντικρουόμενων ιδιοτήτων και εξασφαλίζει υψηλή αντοχή, ικανοποιητική επιμήκυνση και καλή συγκολλησιμότητα.

Μαγγάνιο (Mn). Η κραμάτωση των χάλυβων με άνθρακα έχει ορισμένους περιορισμούς, επειδή με την αύξηση του ποσοστού του μειώνεται η συγκολλησιμότητα. Η επίδραση του μαγγάνιου στη συγκολλησιμότητα είναι περίπου 5 με 6 φορές μικρότερη σε σχέση με τον άνθρακα (σύμφωνα και με τον υπολογισμό της τιμής του ισοδύναμου άνθρακα). Κατά συνέπεια η προσθήκη Mn αποτελεί έναν ιδιαίτερα ευέλικτο τρόπο ρύθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων των Χ.Ο.Σ. (αύξηση της περιεκτικότητας από 0,1-1% μπορεί να έχει θετική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες μέχρι 15%). Επίσης, το Mn είναι ιδιαίτερα ωφέλιμο διότι δεσμεύει το ελεύθερο θείο (MnS), μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο δημιουργίας θειούχου σιδήρου (FeS) ο οποίος προκαλεί ψαθυροποίηση του χάλυβα κατά τη θέρμανση περί τους 900°C.

Πυρίτιο (Si). Το πυρίτιο και το μαγγάνιο υπάρχουν σχεδόν σε όλους τους χάλυβες, επειδή περιέχονται στα μεταλλεύματα από τα οποία εξάγεται ο σίδηρος. Επί πλέον, το πυρίτιο προέρχεται τόσο από τη διαδικασία κάθαρσης (αποξειδωσης) του τήγματος, όσο και από τις πυρίμαχες επενδύσεις που χρησιμοποιούνται στους κλιβάνους τήξης, στους οποίους εισάγεται στο τήγμα κατά τη διαδικασία παραγωγής του χάλυβα. Κραμάτωση με πυρίτιο οδηγεί σε σκλήρυνση του χάλυβα, δίχως να επηρεάζεται σημαντικά η εμβαιότητα και κατά συνέπεια και η συγκολλησιμότητα των χαλύβων. Αύξηση της περιεκτικότητας κατά ποσοστό 1% συνεπάγεται αύξηση της αντοχής κατά περίπου 100MPa, ενώ αντίστοιχη είναι και η αύξηση του ορίου διαρροής.

Φωσφόρος (P). Ο φωσφόρος αποτελεί κατά κανόνα επιβλαβή ακαθαρσία για τους χάλυβες. Ο P συνδέεται με ψαθυροποίηση και μικροδιαφορισμό κατά τη στερεοποίηση του χάλυβα. Ως εκ τούτου, κατά τη μεταλλουργική διαδικασία παραγωγής, καταβάλλεται προσπάθεια, τα επίπεδα περιεκτικότητας για χάλυβες κατασκευών να διατηρούνται σε ποσοστά χαμηλότερα του 0,03%-0,05%. Για τους Χ.Ο.Σ., περιεκτικότητες μέχρι 0,055% είναι αποδεκτές.

Θείο (S). Η παρουσία θείου είναι ιδιαίτερα επιβλαβής στους χάλυβες επειδή αυξάνει την ευθραυστότητα. Προέρχεται κυρίως από τις πρώτες ύλες (scrap κ.λπ.), και ελέγχεται κατά την παραγωγική διαδικασία. Περιεκτικότητες 0,025%-0,030% είναι αποδεκτές για τους ειδικούς χάλυβες, ενώ για τους Χ.Ο.Σ. αποδεκτά ποσοστά είναι μέχρι 0,055%. Η παρουσία Mn είναι ιδιαίτερα ωφέλιμη διότι δεσμεύει το ελεύθερο θείο (MnS), μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο ψαθυροποίησης των χαλύβων.

Άζωτο (N). Ο ρόλος του αζώτου είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Παρ' ότι συναντάται σε χαμηλές περιεκτικότητες στους Χ.Ο.Σ., θεωρείται γενικά ως ανεπιθύμητη πρόσμιξη. Η παρουσία αζώτου πέραν ενός ορίου είναι βλαπτική επειδή μειώνει την ολκιμότητα και ευνοεί την ευθραυστότητα επαναφοράς (ευθραυστότητα στο κυανούν). Επιπροσθέτως, είναι ενδεχόμενο να προκαλέσει πέραν της ευθραυστότητας και φαινόμενα γήρανσης στους χάλυβες που έχουν υποστεί εν ψυχρώ κατεργασία/καταπόνηση. Για τους Χ.Ο.Σ. σε παλαιότερες τυποποιήσεις (π.χ. DIN 488), είχε καθορισθεί ανώτερο όριο περιεκτικότητας 0,01% (ανάλυση χυτηρίου) και σε περίπτωση που η περιεκτικότητα σε φωσφόρο ήταν χαμηλότερη του 0,05% επιτρεπόταν η περιεκτικότητα σε άζωτο να φτάσει μέχρι το 0,012%. Στο Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 10080 ορίζονται μέγιστες περιεκτικότητες 0,012% (ανάλυση χυτηρίου) και 0,014% (ανάλυση προϊόντος), και αναφέρεται σε υποσημείωση ότι είναι επιτρεπτές και μεγαλύτερες περιεκτικότητες εάν υπάρχουν επαρκείς ποσότητες στοιχείων που δεσμεύουν το άζωτο, χωρίς όμως να γίνεται περαιτέρω διευκρίνιση για τις «ποσότητες» και το «είδος» αυτών των κραματικών στοιχείων.

Χαλκός (Cu). Στους Χ.Ο.Σ. ο χαλκός προέρχεται κατά κανόνα από την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται. Παρά το γεγονός ότι, ακόμη και σε ελάχιστα ποσοστά, ο Cu, αυξάνει την αντοχή του χάλυβα σε οξείδωση κατά την έκθεσή του στις ατμοσφαιρικές συνθήκες και δεν επηρεάζει σημαντικά τη συγκολλησιμότητα, σχετίζεται άμεσα με τη θερμή ρηγμάτωση των κοινών χαλύβων. Ο χαλκός, ως ευγενέστερο του σιδήρου μέταλλο, δεν μπορεί να απομακρυνθεί από το τήγμα, με αποτέλεσμα να παρατηρείται συσσώρευσή του και αύξηση της περιεκτικότητάς του στους χάλυβες που παράγονται από τήξη παλαιοσιδήρου (scrap). Αυτό δεν παρατηρείται κατά την παραγωγή του χάλυβα μέσω χυτοσιδήρου, στην οποία χρησιμοποιούνται σιδηρομεταλλεύματα. Ο μόνος τρόπος ελέγχου της περιεκτικότητας του Cu στους Χ.Ο.Σ. (οι οποίοι ως επί το πλείστον παράγονται μέσω ηλεκτρικών καμίνων) είναι με κατάλληλη επιλογή της πρώτης ύλης, δηλ. της ποιότητας του παλαιοσιδήρου ή με αντικατάσταση ποσοστού του παλαιοσιδήρου με DRI (Direct Reduced Iron, δηλ. υψηλής καθαρότητας σίδηρος).

Βανάδιο (V). Το βανάδιο έχει χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή Χ.Ο.Σ., αφού και σε μικρές αναλογίες στο προϊόν (μικροκραμάτωση) επιτρέπει την απόκτηση των μηχανικών χαρακτηριστικών που προδιαγράφονται για την κατηγορία B500C (και παλαιότερα του S500s) δίχως να απαιτείται περαιτέρω

θερμική κατεργασία. Το V είναι ισχυρό καρβιδιογόνο στοιχείο (ενώνεται με τον άνθρακα, τον οποίο δεσμεύει για σχηματισμό καρβιδίων). Ακόμη και σε μικρές περιεκτικότητες αυξάνει την αντοχή σε εφελκυσμό και το όριο διαρροής στη θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά και σε υψηλότερες, εμποδίζοντας την αύξηση του μεγέθους του κόκκου στη μικρογραφική μορφή του χάλυβα, σε καθορισμένες συνθήκες έλασής του. Σε συνδυασμό με προσθήκες Cr και W, χρησιμοποιείται στην παραγωγή ειδικών χάλυβων θερμών κατεργασιών και ταχυχάλυβων (εργαλείων).

Νιόβιο (Nb), Ταντάλιο (Ta). Όπως το βανάδιο, έτσι και το νιόβιο και το ταντάλιο μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως κραματικά στοιχεία αύξησης της αντοχής των Χ.Ο.Σ., διατηρώντας την ολκιμότητα σε σχετικά υψηλά επίπεδα. Τα στοιχεία αυτά συναντώνται συνήθως ως προσθήκες σταθεροποίησης στους ανοξείδωτους χάλυβες.

Νικέλιο (Ni), Χρώμιο (Cr), Μολυβδαίνιο (Mo). Τα στοιχεία αυτά είναι κατ' εξοχήν κραματικά για ειδικούς χάλυβες (χρωμονικελιούχοι, μολυβδαινιούχοι κ.λπ.). Οι περιεκτικότητες 18% Cr, 8% Ni είναι τυπικές αναλογίες των πλέον διαδεδομένων ποιοτήτων ανοξείδωτων χάλυβων (18/8). Στους Χ.Ο.Σ. συναντώνται συνήθως ως προσμίξεις από την πρώτη ύλη (scrap). Σε αναλογίες άνω του 0,5% (ιδίως για τα Cr και Mo) σε συνδυασμό με την περιεκτικότητα σε άνθρακα, είναι ενδεχόμενο να επηρεάσουν σημαντικά τα χαρακτηριστικά των χάλυβων (υπεραντοχή, ευθραυστότητα κατά τη διαδικασία παραγωγής κ.λπ.). Τα στοιχεία αυτά, λόγω και του κόστους τους, δεν εμφανίζονται σε μεγάλες αναλογίες στις συνθέσεις των Χ.Ο.Σ. και έτσι δεν δημιουργούνται προβλήματα στο τελικό προϊόν. Ενδεχόμενη παρουσία τους σε αυξημένα ποσοστά γίνεται αμέσως αντιληπτή κατά την παραγωγική διαδικασία (έλαση) και το πρόβλημα αντιμετωπίζεται πριν παραχθούν τελικά προϊόντα.

1.6. Πρόσθετα Σκυροδέματος

1.6.1. Ορισμοί

Τα πρόσθετα σκυροδέματος είναι ουσίες σε υγρή μορφή ή σκόνη, οι οποίες προστίθενται στο σκυρόδεμα σε μικρές ποσότητες κατά τη φάση ανάμιξης, συνήθως βάσει του περιεχόμενου τσιμέντου (η δοσολογία τους εκφράζεται σε λίτρα/100 Kg τσιμέντο). Το ποσοστό τους δεν υπερβαίνει το 5% κβ τσιμέντου, αλλά συνήθως προστίθενται σε ποσοστά μέχρι 0,3 – 1,5%. Επηρεάζουν τις ιδιότητες του φρέσκου και/ή του σκληρυμένου σκυροδέματος με χημικό ή/και φυσικό τρόπο. Σύμφωνα με το Πρότυπο EN 206-1, οι ορισμοί και οι χρήσεις των πρόσθετων σκυροδέματος καθορίζονται από το Πρότυπο EN 934-2. Αυτό το πρότυπο περιλαμβάνει τους ακόλουθους ορισμούς. [40]

Τα κύρια χημικά πρόσθετα είναι:[41]

Αερακτικό (air entrainer). Εισάγει συγκεκριμένη ποσότητα αέρα στο μίγμα με τη μορφή μικρών και ομοιόμορφα κατανεμημένων φυσαλίδων αέρα κατά τη φάση ανάμιξης και οι οποίες παραμένουν στη σκληρυμένη μάζα σκυροδέματος.

Επιβραδυντής (retarder). Επιβραδύνει το χρόνο για την αρχική πήξη και επιμηκώνει την εργασιμότητα.

Επιταχυντής πήξης (accelerator). Μειώνει το χρόνο που απαιτείται για την αρχική πήξη, αυξάνοντας τις πρώιμες αντοχές.

Μειωτής νερού (water reducer). Καθιστά δυνατή τη μείωση του περιεχόμενου νερού σε ένα μίγμα χωρίς επίδραση στη συνεκτικότητά του, ή αυξάνει το εργάσιμό του χωρίς αλλαγή του περιεχόμενου νερού, ή επιτυγχάνει και τα δύο αποτελέσματα.

Επίσης υπάρχουν και ειδικά χημικά πρόσθετα, όπως: [42]

Αντιπαγωτικά. Για σκυροδετήσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες όπου απαιτείται η επιτάχυνση του χρόνου πήξης ή του χρόνου σκλήρυνσης του σκυροδέματος.

Επιταχυντής σκλήρυνσης. Επιταχύνει τις πρώιμες αντοχές με ή χωρίς επίδραση στον χρόνο πήξης.

Ρυθμιστής ιξώδους (viscosity modifying agent). Μειώνει το νερό απόμειξης που προκύπτει λόγω εξίδρωσης στο νωπό σκυρόδεμα.

Σταθεροποιητές ενυδάτωσης (stabilizer/water retaining admixture). Πρόσθετα που χρησιμοποιούνται για παράταση του χρόνου εργασιμότητας του σκυροδέματος για μεγάλα χρονικά διαστήματα, χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα του σκυροδέματος. Απαραίτητα σε περιπτώσεις ιδιαίτερα αυξημένων απαιτήσεων για μεγάλους χρόνους διατήρησης εργασιμότητας.

Στεγανωτικό μάζας (water proofing). Μειώνει την απορρόφηση νερού από τους τριχοειδείς πόρους του σκληρυμένου σκυροδέματος.

Υπερρευστοποιητής (superplasticizer). Καθιστά δυνατή τη σημαντική μείωση του περιεχόμενου νερού σε ένα δεδομένο μίγμα σκυροδέματος, χωρίς επίδραση στη συνεκτικότητά του ή αυξάνει σημαντικά το εργάσιμο του χωρίς αλλαγή του περιεχόμενου νερού, ή επιτυγχάνει και τα δύο αποτελέσματα.

Τέλος, υπάρχουν προϊόντα που δεν περιλαμβάνονται στο Πρότυπο EN 934-2, όπως:

Αναστολείς διάβρωσης (corrosion inhibitors). Υλικά που παρεμποδίζουν τη διάβρωση του οπλισμού. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις έντονα διαβρωτικού περιβάλλοντος

Μειωτές συρρίκνωσης (Shrinkage reducing admixtures).

Βοηθητικά Άντλησης (Pumping aid). Βοηθητικά υλικά για τη διαδικασία της σκυροδέτησης, της άντλησης, της ωρίμανσης και της σκλήρυνσης του σκυροδέματος.

Βελτιωτικά επιφάνειας (Surface improving admixtures).

1.6.2. Αποτελέσματα της χρήσης των πρόσθετων.

Με την εφαρμογή των προσθέτων επηρεάζονται οι ακόλουθες ιδιότητες του σκυροδέματος: [43]

- Η εργασιμότητα του νωπού μείγματος (μεταβολή της σύστασης και του χρόνου εφαρμογής)
- Η ανθεκτικότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος (επιμήκυνση του χρόνου ζωής)
- Βελτίωση των συνθηκών μεταφοράς και διάστρωσης
- Η ταχύτητα πήξης και σκλήρυνσης του σκυροδέματος
- Η στεγανότητα του σκυροδέματος
- Ο περιεχόμενος αέρας στο νωπό και σκληρυμένο σκυρόδεμα
- Μείωση των απαιτήσεων σε νερό και ενέργεια
- Υψηλότερη θλιπτική αντοχή
- Μείωση της συστολής ξήρανσης

1.6.3. Δοσολογία Πρόσθετων βάσει EN 206-1

Η επιτρεπόμενη δοσολογία είναι $\leq 5\%$ κατά βάρος τσιμέντου (η επίδραση μεγαλύτερης δοσολογίας στην απόδοση και ανθεκτικότητα του σκυροδέματος πρέπει να επαληθεύεται.)

Χαμηλές δοσολογίες προσθέτων $< 0,2\%$ του τσιμέντου επιτρέπονται μόνο σε περίπτωση που είναι διαλυμένα σε μέρος του νερού ανάμιξης.

Σε περίπτωση που η ολική ποσότητα υγρού προσθέτου είναι $> 3 \text{ l/m}^3$ σκυροδέματος, η ποσότητα του νερού που περιέχεται στο πρόσθετο πρέπει να συνυπολογίζεται κατά τον υπολογισμό του λόγου νερού / τσιμέντο.

Σε περίπτωση που περισσότερα από ένα πρόσθετα προστίθενται στο σκυρόδεμα, πρέπει η συμβατότητά τους να επαληθεύεται με ξεχωριστή δοκιμή. [44]

1.7. Πρόσμικτα Σκυροδέματος

Η ποιοτική βελτίωση της τεχνολογίας του σκυροδέματος είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την παράλληλη εξέλιξη των χημικών προσμίκτων. Τα πρόσμικτα συστατικά (additives) είναι τα λεπτομερώς διαμερισμένα ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα με στόχο τη βελτίωση ή τη ρύθμιση κάποιων ιδιοτήτων.

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία >Χημικών Προσμίκτων (EFCA) πρόσμικτα είναι χημικές ενώσεις, οι οποίες προστίθενται στο σκυρόδεμα κατά τη διαδικασία ανάμιξης με στόχο τη βελτίωση των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς του σκυροδέματος. [45]

Η επιλογή του σωστού χημικού πρόσμικτου πρέπει να ακολουθεί την επόμενη διαδικασία:

- Προσδιορισμός απαιτήσεων συμπεριφοράς σκυροδέματος
- Έλεγχος διαδικασίας μίξης με επιλογή των κατάλληλων υλικών
- Εκτέλεση εργαστηριακών και επι τόπου δοκιμών
- Προσδιορισμός μεταβολής του κόστους λόγω χρήσης πρόσμικτου

Τα χημικά πρόσμικτα στα πρώτα χρόνια εφαρμογής παρουσίαζαν αρκετά προβλήματα. Σήμερα η τεχνολογική εξέλιξη έχει οδηγήσει σε προϊόντα φιλικότερα προς το περιβάλλον. [46]

1.8. 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: [47]

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

- 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

Οι κατηγορίες ειδικών σκυροδεμάτων που εξετάστηκαν στην παρούσα έρευνα είναι το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα και το γαμπιλόδεμα.

1.9. ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1.9.1. 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 πίνακα, ο οποίος καθορίζει τα ελάχιστα κιλά τσιμέντου ανά m³ σκυροδέματος που απαιτούνται για τη σκυροδέτηση, τον μέγιστο λόγο N/T 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.[44]

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 800kg/m^3
- Πυρίμαχου σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα προδιαγράφεται ως κατά παραγγελία σκυρόδεμα (λαμβάνοντας υπόψη την τάξη έκθεσης και τις απαιτήσεις) ή ως σκυρόδεμα προκαθορισμένης σύνθεσης (προδιαγράφοντας τη σύνθεσή του).[48]

1.9.2. 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/m^3 ως και 2.600 kg/m^3 , το οποίο παράγεται με ανάμιξη των παρακάτω υλικών: τσιμέντο, φυσικά (λίθινα) αδρανή υλικά πυκνότητας από 2.000 kg/m^3 έως 3.000 kg/m^3 , 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.[49] 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 (φέρων) 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.

Οι κατηγορίες έκθεσης στο περιβάλλον σύμφωνα με τον ΚΤΣ-2016

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

ΕΛΟΤ EN 206 +Εθνικό Προσάρτημα (24.2.2011)

ΕΛΟΤ EN 13670

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 (Πίνακας

B2-7, σελ.18091 του ΦΕΚ. Ο Κανονισμός στοχεύει στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος έναντι διαφόρων δράσεων προσβολής όπως: Ενανθράκωση (carbonation): XC1-XC4, χλωριόντων θαλασσινού νερού: XS1-XD1, ψύξη/απόψυξη: XF1-XF4, χημική προσβολή: XA1-XA3, τριβή/αποτριβή: XM1-XM3. [50]

Συνολικά υπάρχουν 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/m³

Ελάχιστη επικάλυψη οπλισμού, π.χ 35-45 mm

Στον ΚΤΣ-2016 οι περιβαλλοντικές επιδράσεις κατηγοριοποιούνται ως κατηγορίες έκθεσης. Οι περιπτώσεις 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 ανοξειδώτου χάλυβα ή άλλου μετάλλου με αντοχή σε διάβρωση και τη χρήση προστατευτικών βαφών για το σκυρόδεμα ή τον οπλισμό. 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 έρευνα είναι η ενανθράκωση (XC) και η προσβολή από χλωριόντα (XS, XD). Στον Πίνακα 1.6 παρουσιάζονται οι κατηγορίες εκθέσεις του σκυροδέματος σε διάφορα περιβάλλοντα βάσει του ΚΤΣ-2016.

Πίνακας 1. 6 Χαρακτηρισμός κατηγορίας έκθεσης - ΚΤΣ-2016

Χαρακτηρισμός κατηγορίας	Περιγραφή περιβάλλοντος	Παραδείγματα επεξήγησης για το πού δύναται 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 1,5km. Οι επιφάνειες του σκυροδέματος αυτού εκτίθενται στον αέρα που περιέχει θαλάσσια άλατα (αλλά δεν διαβρέχονται από θάλασσα, ούτε καταιονίζονται με θαλασσινό νερό, ούτε βέβαια βρίσκονται μέσα στη θάλασσα). Σκυρόδεμα με εκτεθειμένες επιφάνειες σε αέρα που περιέχει θαλάσσια άλατα εντάσσεται (από το μελετητή του έργου) στη κατηγορία XS1, με τις ακόλουθες απαιτήσεις (Πίνακας 1.7):

- Μέγιστος λόγος N/T: 0,50
- Ελάχιστη 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 1.7 παρακάτω με τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Μέγιστος λόγος N/T: 0,40 έως 0,50
- Ελάχιστη 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 αντιολισθηρές επιφάνειες σκυροδέματος. Οι απαιτήσεις αντιολισθηρών 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: XS1, XS2, XS3, που αναφέρονται στον Πίνακα 1.7 με τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Μέγιστος λόγος N/T: 0,45 έως 0,50
- Ελάχιστη 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:

- Μέγιστος λόγος N/T: 0,55
- Ελάχιστη 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:

- Μέγιστος λόγος N/T: 0,50
- Ελάχιστη 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 1.7, με τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Μέγιστος λόγος N/T: 0,50 έως 0,55
- Ελάχιστη 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: ΧΑ1, ΧΑ2, ΧΑ3, έτσι όπως περιγράφονται στον Πίνακα 1.7, με τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Μέγιστος λόγος Ν/Τ: 0,45 έως 0,55
- Ελάχιστη Περιεκτικότητα Τσιμέντου: 320 kg έως 360 kg

Οι απαιτήσεις του Πίνακα 1.7 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 ΧΑ1, 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 ΧΑ2 και ΧΑ3, τότε είναι απαραίτητη η χρήση τσιμέντου ανθεκτικού σε θειικά, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1. Εάν η ένταξη στις κατηγορίες ΧΑ2 και ΧΑ3 γίνεται λόγω των υπόλοιπων παραγόντων που αναφέρονται στον Πίνακα 1.7, 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. Στον Πίνακα 1.7 αναγράφονται οι απαιτήσεις για το σκυρόδεμα, ανάλογα με την κατηγορία έκθεσης. [51]

Πίνακας 1. 7 Απαιτήσεις για το σκυρόδεμα ανάλογα με την κατηγορία έκθεσης (ΚΤΣ 2016 Β2-7)

Κατηγορία έκθεσης	Χωρίς κίνδυνο διάβρωσης ή προσβολής	Διάβρωση λόγω χλωριόντων												Προσβολή από ψύξη/απόψυξη			Χημική προσβολή ^β			Τριβή / Απόρριψη				
		Θαλασσινό νερό						Χλωριόντα που δεν προέρχονται από θαλασσινό νερό																
		Τσιμέντα II, III, IV (Εκτός CEM II/B-LL + CEM II/B-L)			Τσιμέντα I (+ CEM II/B-LL + CEM II/B-L)			XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3				
1	max NT	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
2	μη κατηγορία αντοχής	0,65	0,80	0,55	0,50	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	0,55	0,55	0,55	0,50	0,55	0,50	0,45	0,50	0,45	0,40
3	μη περιεκτικότητα σε τσιμέντο kg/m ³	C 20/25	C 25/30	C 25/30	C 30/37	C 25/30	C 25/30	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 35/45	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 35/45	C 35/45	C 35/45	C 40/50	C 50/60
4	μη επικάλυψη για ανθεκτικότητα ^γ	25	25	35	35	45	45	50	40	40	50	35	40	50	320	300	300	320	320	340	360	320	340	360
5	μη περιεκτικότητα σε αέρα (%)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	4,0 ^δ	4,0 ^δ	4,0 ^δ	...	...	...	...	...	...
6	Άλλες απαιτήσεις	Σημ.: Άσπλο σκυρόδεμα				Σημ.: Παραβολή 1,5 km	Σημ.: Μόλις μέσα στη θαλάσσια	Σημ.: Διαβροχές χόιμενες ζώλασσες								...	...	...	Αδρανή σύμφωνα με ΕΛΟΤ EN12620 με ικανοποιητική αντοχή σε παγετό ^δ		Τσιμέντο σφαιρικό σε θειικά ^δ	LA s 27	LA s 25	LA s 22

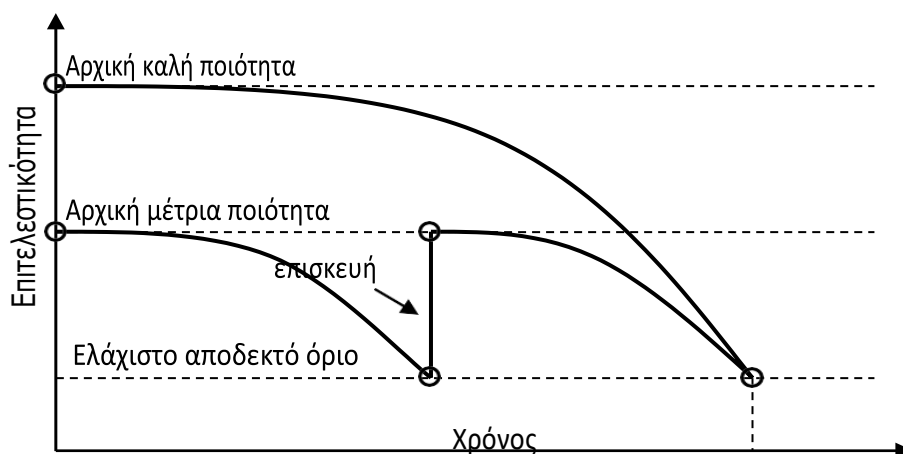
2. Διάβρωση χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος

2.1. Εισαγωγή

Στην Ελλάδα, αλλά και παγκοσμίως, τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται έντονα προβλήματα μη ικανοποιητικής ανθεκτικότητας των κατασκευών, καθώς η διάβρωση του οπλισμού αναδεικνύεται το σημαντικότερο πρόβλημα στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι συνέπειες της διάβρωσης είναι σημαντικές και αφορούν και στο οικονομικό κόστος και σε σημαντικές επιπτώσεις στην ασφάλεια της κατασκευής έναντι επιβαλλόμενων δράσεων, όπως ο σεισμός. [52]

Ο τύπος και ο ρυθμός των διεργασιών φθοράς του σκυροδέματος και του οπλισμού του καθορίζει την αντίσταση των υλικών, των στοιχείων και των τμημάτων που συνθέτουν την κατασκευή. Η κατασκευή πληροί τις απαιτήσεις της επιτελεστικότητας (performance), όταν ταυτόχρονα καλύπτει τις προϋποθέσεις της ασφάλειας, της λειτουργικότητας και της εμφάνισης. Ανθεκτικότητα (durability) μιας κατασκευής σε διάρκεια ονομάζεται η ικανότητα της κατασκευής να αντιστέκεται σε περιβαλλοντικές επιδράσεις χωρίς η επιτελεστικότητά της να υποχωρεί κάτω από ένα ελάχιστο αποδεκτό όριο. Φθορά (deterioration) μιας κατασκευής στον χρόνο ορίζεται κάθε απώλεια επιτελεστικότητας και είναι αποτέλεσμα περιβαλλοντικών δράσεων, όπως μηχανικών, φυσικών, χημικών και βιοχημικών διεργασιών. [53]

Η επιθυμητή διάρκεια ζωής, δηλαδή η περίοδος του χρόνου που η επιτελεστικότητα της κατασκευής διατηρείται σε ένα αποδεκτό, σύμφωνα με προδιαγραφές επίπεδο, ακολουθώντας ένα κανονικό πρόγραμμα συντήρησης, μπορεί να επιτευχθεί είτε λόγω καλής αρχικής ποιότητας κατασκευής είτε λόγω συνεχών σοβαρών επισκευών μιας κακής αρχικής ποιότητας κατασκευής (Σχήμα 2.1). [52]

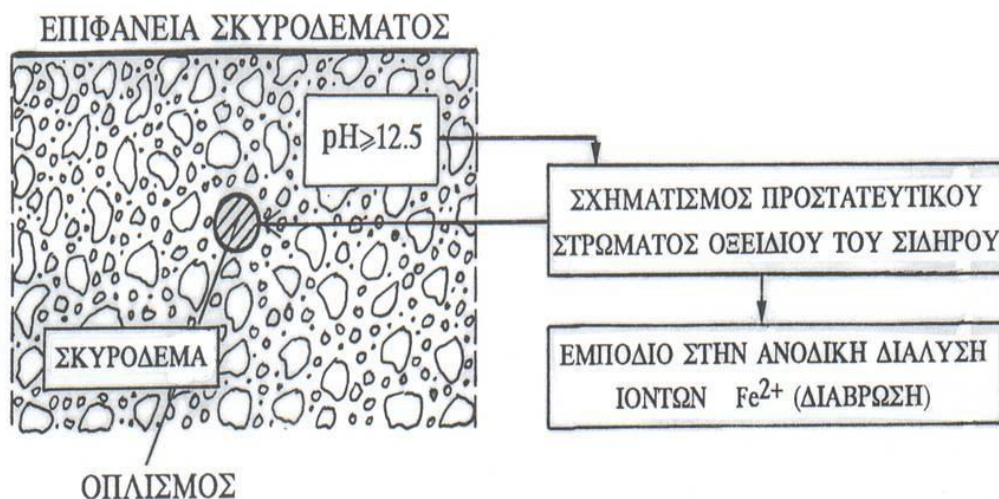


Σχήμα 2. 1 Σχέση επιτελεστικότητας – διάρκειας ζωής κατασκευών από σκυρόδεμα

Διάβρωση (corrosion) είναι η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου ή κράματος με το περιβάλλον του με αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου (ή κράματος) που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του μετάλλου (ή κράματος), του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος, που αυτά αποτελούν τμήμα. Στον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων 2008 (ΚΤΧ 2008) αναφέρεται ότι διάβρωση είναι κάθε αυθόρμητη, κατ' επέκταση εκβιασμένη, ηλεκτροχημικής φύσεως, κατ' επέκταση χημικής, κατ' επέκταση μηχανικής, αλλοίωση της επιφάνειας μετάλλων ή κραμάτων, η οποία οδηγεί σε απώλεια υλικού και άλλες συνέπειες. Η διάβρωση είναι φαινόμενο θερμοδυναμικά αυθόρμητο και μπορεί να συμβεί σε οποιοδήποτε φυσικό περιβάλλον, όπως στον αέρα, στο γλυκό ή το θαλασσίνο νερό ή και στο έδαφος. Χαρακτηριστικό της διάβρωσης είναι η επιφανειακή αλλοίωση του

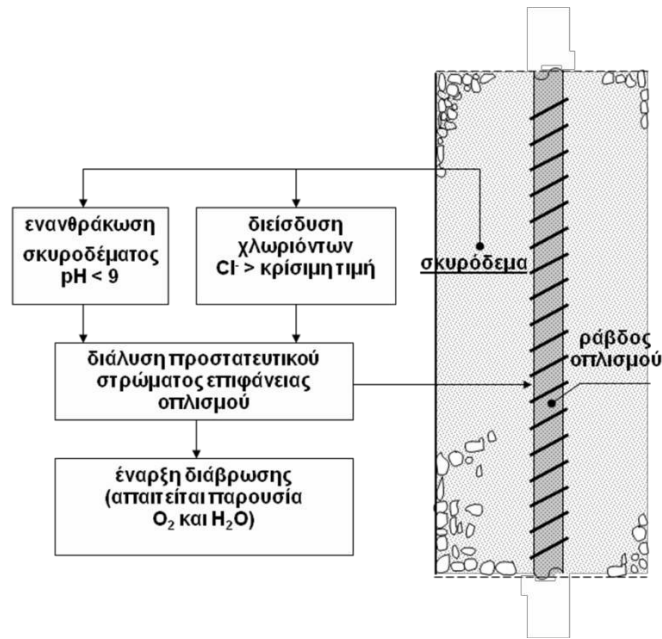
υλικού που οφείλεται στα προϊόντα διάβρωσης, τα οποία είτε συσσωρεύονται στην επιφάνεια καλύπτοντάς την τοπικά ή σε όλη την έκτασή της, είτε διαφεύγουν προς το διαβρωτικό περιβάλλον, χωρίς να αποκλείονται και τα δύο. Σε κάθε περίπτωση τα προϊόντα είναι χημικώς διάφορα από το μέταλλο ή το κράμα, δηλαδή συμβαίνει απώλεια υλικού. Η απώλεια υλικού δεν σημαίνει πάντα ότι η μάζα του υλικού μειώνεται, διότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι ενώσεις που σχηματίζονται έχουν ισχυρή πρόσφυση στο υλικό και μπορεί να φαίνεται ότι η μάζα του υλικού αυξάνει. [24]

Το σκυρόδεμα παρέχει στον εγκιβωτισμένο χάλυβα προστασία έναντι της διάβρωσης, εξαιτίας της ισχυρά αλκαλικής φύσης του που οφείλεται στο υδροξείδιο του ασβεστίου $\text{Ca}(\text{OH})_2$, προϊόν της ενυδάτωσης του τσιμέντου. Οι μεγάλες τιμές του pH (μεταξύ 12,5 και 13,5) στο σκληρυμένο σκυρόδεμα επιτρέπουν τον σχηματισμό στην επιφάνεια του χάλυβα ενός λεπτού, συνεκτικού και σφικτά προσκολλημένου παθητικού στρώματος οξειδίων του σιδήρου, που εμποδίζει την ανάπτυξη της διάβρωσης (Σχήμα 2.2).[53] Το στρώμα οξειδίων σχηματίζεται μόνο σε καθαρή επιφάνεια του μετάλλου. Όσο το προστατευτικό στρώμα είναι ακεραίο, δεν θα συμβεί διάβρωση του χάλυβα, ακόμη και αν υπάρχουν οι παράγοντες που απαιτούνται για την εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης. [53]



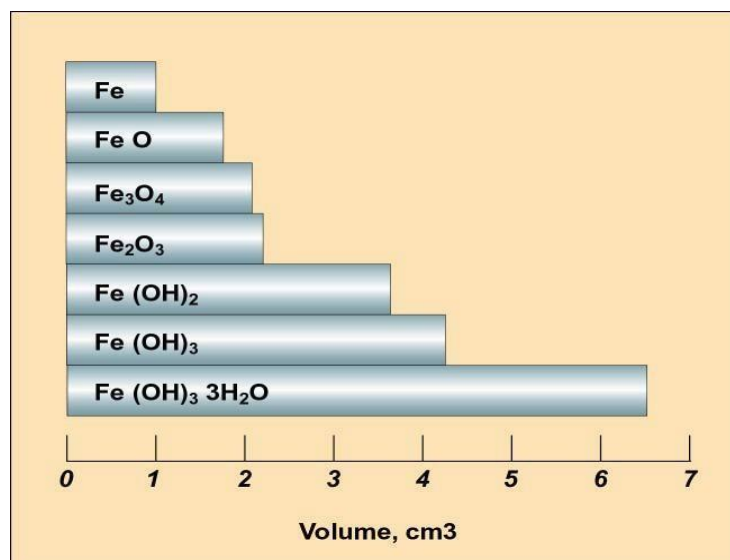
Σχήμα 2. 2 Προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα.

Το προστατευτικό στρώμα οξειδίων καταστρέφεται, είτε όταν συμβεί μείωση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος, λόγω της αντίδρασης του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) με τα αλκάλια που υπάρχουν στο σκυρόδεμα, είτε όταν συμβεί διάτρηση του παθητικού στρώματος από τα χλωριόντα (Cl^-), που μπορεί να προκαλέσει διάβρωση ακόμη και σε συνθήκες υψηλού pH (Σχήμα 2.3).[54] Είναι επίσης δυνατόν να έχει καταστραφεί το στρώμα των οξειδίων, αλλά ο χάλυβας να μην διαβρώνεται επειδή οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν είναι «ευνοϊκές», π.χ. σε σκυρόδεμα βυθισμένο σε νερό λόγω ανεπάρκειας οξυγόνου ή σε σκυρόδεμα στο εσωτερικό κτιρίων λόγω έλλειψης υγρασίας.

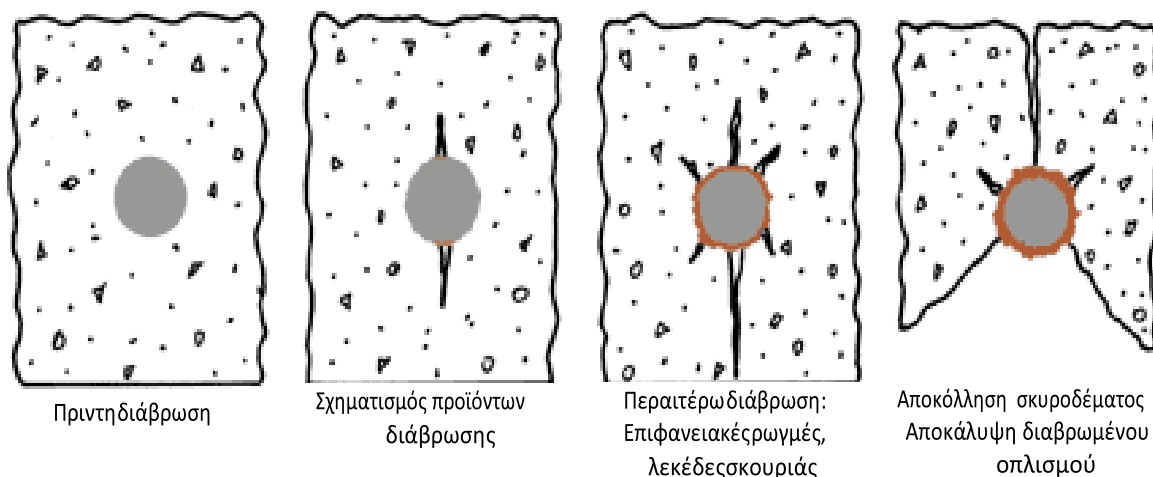


Σχήμα 2. 3 Μηχανισμοί έναρξης διάβρωσης οπλισμού σκυροδέματος.

Ο μετασχηματισμός του μεταλλικού σιδήρου σε σκουριά συνοδεύεται από αύξηση του όγκου του που ανάλογα με την κατάσταση της οξείδωσης, μπορεί να είναι τόσο μεγάλη που τα τελικά προϊόντα να καταλαμβάνουν έως και 6 φορές μεγαλύτερο όγκο από το αρχικό μέταλλο (Σχήμα 2.4) [18]. Η σκουριά μπορεί να ασκήσει πιέσεις έως 27.6 MPa στο σκυροδέμα που περιβάλλει τον χάλυβα, που προκαλούν ρηγματώσεις, αποκόλληση τμημάτων του σκυροδέματος και τέλος αποκάλυψη του διαβρωμένου οπλισμού (Σχήμα 2.5). [55]



Σχήμα 2. 4 Η διάβρωση του χάλυβα οδηγεί σε αύξηση του στερεού όγκου.



Σχήμα 2. 5 Συνέπειες της διάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα.

Διάβρωση του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος μπορεί να συμβεί εάν:

- Το σκυρόδεμα είναι κακής ποιότητας και δεν παρέχει παθητική προστασία στον χάλυβα, π.χ. σκυρόδεμα υψηλής διαπερατότητας που επιτρέπει τη διείσδυση χλωριόντων.
- Το περιβάλλον δεν είναι το προβλεπόμενο ή άλλαξε κατά τη χρήση της κατασκευής, π.χ. χώροι αυξημένης υγρασίας.
- Ο χάλυβας εφάπτεται σε υλικά που δεν έχουν αλκαλικότητα, όπως π.χ. το έδαφος ή το νερό, και που έρχονται σε επαφή με το χάλυβα μετά από τυχόν ρηγμάτωση του σκυροδέματος.
- Ο χάλυβας έχει κατασκευαστικές ατέλειες, ή είναι εξαιρετικά ευαίσθητος, ή έρχεται σε επαφή με άλλα μέταλλα [55]

Η ταχύτητα διάβρωσης (corrosion rate) αναφέρεται στον ρυθμό ανάπτυξης του προϊόντος της γενικής διάβρωσης στην επιφάνεια ενός μετάλλου στη μονάδα του χρόνου. Η ταχύτητα αποδίδεται ποσοτικά, είτε ως απώλεια μάζας (mass loss) του μετάλλου ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου, είτε ως αύξηση του βάθους προώθησης της διάβρωσης στη μονάδα του χρόνου (penetration rate). Στην πρώτη περίπτωση μετράται το βάρος ενός καθαρού δοκιμίου πριν την έκθεση στο διαβρωτικό μέσο και μετά την έκθεση και την προσεκτική αφαίρεση του προϊόντος διάβρωσης από την επιφάνεια. Ισχύει η σχέση:

$$r = k \cdot M / (A \cdot t \cdot d) \quad (2.1)$$

όπου

r : η ταχύτητα διάβρωσης

k : σταθερά

M : απώλεια μάζας σε g μετρούμενη στο πλησιέστερο mg μέτρησης

A : η επιφάνεια του δοκιμίου στο πλησιέστερο 0,01 cm²

t : ο χρόνος του πειράματος σε ώρες

d : η πυκνότητα του υλικού σε g/cm³.

Για την ταχύτητα χρησιμοποιούνται διάφορες μονάδες, με συνηθέστερη στις αγγλοσαξονικές χώρες το mpy (mils per year, χιλιοστά της ίντσας τον χρόνο) ή το mmpry (mm per year, χιλιοστά τον χρόνο). Ταχύτητα μικρότερη του 1 mpy θεωρείται πολύ μικρή, ενώ μεγαλύτερη των 50 mpy θεωρείται πολύ υψηλή. [56]

Η ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα αυξάνεται, τόσο εντός όσο και εκτός σκυροδέματος, με [57]:

- Την αύξηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας
- Τη μείωση του pH
- Την αύξηση της παρουσίας αλάτων (π.χ. θαλάσσιο περιβάλλον)
- Την επαφή του χάλυβα με το έδαφος, το νερό κ.λπ.
- Την επαφή του χάλυβα με διαφορετικά υλικά ή περιβάλλοντα.
- Την ύπαρξη ενεργών “κέντρων” στην επιφάνεια του χάλυβα (όπως π.χ. οξείες αιχμές ή πληγές, κάμψεις με μικρή ακτίνα καμπυλότητας κ.λπ.)
- Την ύπαρξη επιφανειακής αλλοίωσης λόγω προϋπάρχουσας διάβρωσης
- Την επαφή χαλύβων διαφορετικού είδους και διαφορετικού ηλεκτροχημικού δυναμικού
- Την επαφή χαλύβων διαφορετικού βαθμού διάβρωσης
- Την ψυχρή κατεργασία (ολκή, έλαση κ.λπ.)
- Το αυξημένο πορώδες του σκυροδέματος.

Η ύπαρξη προϊόντων διάβρωσης στην επιφάνεια του οπλισμού επηρεάζει την ταχύτητα της περαιτέρω διάβρωσης και τη συνάφεια μεταξύ του οπλισμού και του σκυροδέματος. Η ύπαρξη οξειδίων του σιδήρου στην επιφάνεια του χάλυβα, σε μικρές μεν ποσότητες βελτιώνει τη συνάφεια μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος, αλλά σε μεγαλύτερες ποσότητες τη μειώνει. Η ποσότητα οξειδίων του σιδήρου που δεν μπορεί να αφομοιωθεί από το νωπό σκυρόδεμα μέσω της μετατροπής των οξειδίων σε φερριτική φάση (C_4AF) θεωρείται βλαπτική και εξαρτάται από τη σύσταση του τσιμέντου, και ιδίως από την περιεκτικότητα σε C_3A , καθώς και από το πορώδες του σκυροδέματος. Με βάση θεωρητικούς υπολογισμούς, η ποσότητα οξειδίων του σιδήρου που μπορούν να αντιδρούν με αμιγές τσιμέντο Πόρτλαντ, κατά την παραπάνω διαδικασία, ανέρχονται σε 350g/m^2 (ή πάχος οξειδίων σιδήρου της τάξης των $150\mu\text{m}$). Για τα συνήθη τσιμέντα (CEM II) οι τιμές είναι μικρότερες, της τάξης των 300g/m^2 [57].

Για τον καθορισμό της διάρκειας ζωής μιας κατασκευής, είναι απαραίτητο να γίνει εκτίμηση της πιθανής χρονικής έναρξης της διάβρωσης του χάλυβα καθώς και των παραμέτρων και του τρόπου που επηρεάζουν τη διαδικασία διάβρωσης. Ο Tuutti (1980) [58], χωρίζει τη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής σε δύο περιόδους, την αρχική περίοδο (t_0) και την περίοδο εξέλιξης της διάβρωσης (t_1). Κατά την αρχική περίοδο συμβαίνουν εκείνες οι διαδικασίες οι οποίες καταστρέφουν την παθητική προστασία του χάλυβα (π.χ. ενανθράκωση του σκυροδέματος, διείδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα κ.λπ.). Κατά την περίοδο εξέλιξης προάγεται η διαδικασία διάβρωσης με την παρουσία επαρκούς ποσότητας οξυγόνου και υγρασίας, έως ότου επέλθει η τελική αστοχία. Σε αυτή τη φάση δεν έχει συμβεί οπωσδήποτε καταστροφή του Χ.Ο.Σ., αλλά η κατασκευή δεν πληροί πλέον τις απαιτήσεις της επιτελεστικότητας, δηλαδή ταυτόχρονα της ασφάλειας, της λειτουργικότητας και της εμφάνισης. [59]

2.2. Είδη διάβρωσης

Ο τρόπος με τον οποίο διαβρώνεται ο χάλυβας ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την αιτία που προκαλεί τη διάβρωση. Οι μορφές διάβρωσης που παρουσιάζονται στους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος κατατάσσονται στις ακόλουθες περιπτώσεις: [60]

- Γενική ή ομοιόμορφη διάβρωση (uniform or general corrosion)
- Τοπική διάβρωση
- Διάβρωση με βελονισμούς (pitting corrosion)
- Διάβρωση σε σχισμές (crevice corrosion)
- Περικρυσταλλική διάβρωση (intergranular)
- Διάβρωση λόγω ανάπτυξης εξωτερικής διαφοράς δυναμικού
- Γαλβανική ή διμεταλλική διάβρωση (galvanic corrosion)
- Διάβρωση με μηχανική καταπόνηση (stress corrosion cracking).

Κατά τη γενική διάβρωση η επιφάνεια του μετάλλου καλύπτεται σχεδόν ομοιόμορφα από τα προϊόντα της διάβρωσης και συμβαίνει όταν η αλκαλικότητα του σκυροδέματος έχει χαθεί σε ευρεία περιοχή. Τότε το προστατευτικό στρώμα των οξειδίων καταστρέφεται και αρχίζει η διάβρωση. Οι αιτίες μείωσης του pH σε ευρεία περιοχή στο σκυρόδεμα μπορεί να είναι η απόπλυση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ από το σκυρόδεμα λόγω επίδρασης του νερού, η ενανθράκωση του σκυροδέματος και η επίδραση ανθρακικών ή θειικών αλάτων. [39]

Η διάβρωση με βελονισμούς συμβαίνει υπό την επίδραση των χλωριόντων, οπότε και εμφανίζεται εκλεκτικός τοπικός σχηματισμός προϊόντος διάβρωσης, ακόμα και όταν το μέταλλο ή κράμα έχει καλυφθεί με προστατευτικό επίστρωμα, ή εκλεκτική διάλυση της επιφάνειας, δηλαδή σχηματίζονται εσοχές και κρατήρες. Είναι ένα από τα πιο καταστρεπτικά είδη διάβρωσης, γιατί προκαλεί καταστροφή των υλικών λόγω διάτρησης ακόμα και για πολύ μικρές απώλειες μάζας της κατασκευής, επειδή συχνά είναι δύσκολο να εντοπιστούν οι βελονισμοί, είτε λόγω του μικρού τους μεγέθους, είτε γιατί συχνά καλύπτονται από προϊόντα διάβρωσης. [61]

Η διάβρωση σε σχισμές είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ύπαρξη σχισμών ή προφυλαγμένων περιοχών μεταλλικής επιφάνειας, που μπορούν να προκαλέσουν συχνά έντονη εντοπισμένη διάβρωση εξαιτίας εμφάνισης διαφορετικής συγκέντρωσης μέσα και έξω από αυτή.

Η περικρυσταλλική διάβρωση παρουσιάζεται στα περατωτικά όρια των κόκκων, τα οποία είναι ανοδικότερα του κυρίως μετάλλου λόγω συγκέντρωσης σε αυτά ακαθαρσιών και στοιχείων κραματοποίησης. Έχει σαν συνέπεια την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, το οποίο υπό την επίδραση τάσεων υφίσταται περικρυσταλλικές ρηγματώσεις, ακόμη και αν το επιβαλλόμενο φορτίο είναι αρκετά μικρότερο από εκείνο της αντοχής του σε εφελκυσμό.

Γαλβανική διάβρωση συμβαίνει όταν δύο διαφορετικά μέταλλα ή κράματα έρχονται σε επαφή παρουσία ενός ηλεκτρολύτη (διαβρωτικό ή αγωγίμο περιβάλλον). Μεταξύ των δύο υλικών δημιουργείται διαφορά δυναμικού που προκαλεί ροή ηλεκτρονίων στο σύστημά τους, με συνέπεια την αύξηση της ταχύτητας διάβρωσης του λιγότερου ανθεκτικού στη διάβρωση μετάλλου και την ελάττωση της ταχύτητας διάβρωσης του περισσότερο ανθεκτικού μετάλλου. Το λιγότερο ανθεκτικό (λιγότερο ευγενές) μέταλλο γίνεται άνοδος και το περισσότερο ανθεκτικό (περισσότερο ευγενές) κάθοδος. [55]

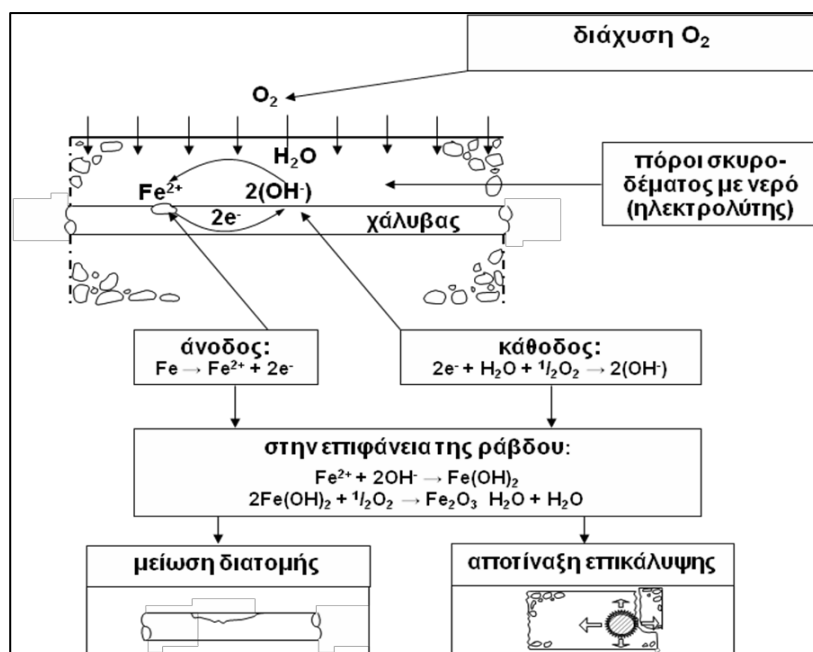
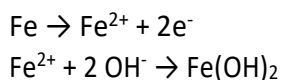
Η διάβρωση με μηχανική καταπόνηση εμφανίζεται μόνο στους προεντεταμένους χάλυβες.

2.3. Μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού

Η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού του σκυροδέματος είναι ένα σύνθετο ηλεκτροχημικό φαινόμενο που απαιτεί την ύπαρξη ανοδικών και καθοδικών περιοχών και ενός ηλεκτρολύτη 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. Το φαινόμενο οφείλεται στη μικροσκοπική και μακροσκοπική ανομοιογένεια της επιφάνειας του χάλυβα σε συνδυασμό με το υγρό των πόρων του σκυροδέματος. Η ανοδική και η καθοδική δράση συμβαίνουν ταυτόχρονα σε διαφορετικές περιοχές του χάλυβα, ενώ ένας αριθμός ηλεκτρονίων μετακινείται μέσα στον χάλυβα. Ο λόγος σχηματισμού στην επιφάνεια του χάλυβα ταυτόχρονα ανοδικών και καθοδικών περιοχών οφείλεται στην δημιουργία τοπικών γαλβανικών στοιχείων. [62]

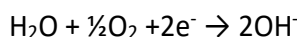
Ένα κράμα όπως ο δομικός χάλυβας από την μεταλλουργική διαδικασία παραγωγής του έχει αιτίες σχηματισμού τοπικών γαλβανικών στοιχείων. Ανομοιομορφίες μικρής κλίμακας στη χημική σύσταση του κράματος, γεωμετρικές ανωμαλίες ή η ύπαρξη οξειδίων στην επιφάνεια οδηγούν στον σχηματισμό τοπικών γαλβανικών στοιχείων με μία διαφορά ηλεκτρικού συνεχούς δυναμικού της τάξης των μερικών δεκάδων mV. Οι διαφορές αυτές δυναμικού είναι αρκετές για να οδηγήσουν στον σχηματισμό τοπικών ανοδικών και καθοδικών περιοχών. [63]

Η διάβρωση του χάλυβα σε επαφή με το νερό προκαλείται από τις ακόλουθες αντιδράσεις στην 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 (Σχήμα 2.6). [53]



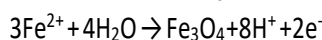
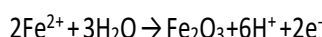
Σχήμα 2. 6 Μηχανισμοί και αποτελέσματα διάβρωσης οπλισμού σκυροδέματος

Αντίστοιχα στην καθοδική περιοχή συμβαίνει η ακόλουθη αντίδραση:



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 τον ρυθμό διάχυσης του οξυγόνου. Το διαλυμένο στο νερό οξυγόνο φθάνει στην καθοδική περιοχή μέσω των τριχοειδών πόρων και των ρωγμών του σκυροδέματος και προκαλεί τη διάβρωση του χάλυβα 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 πλήρη μετατροπή του σιδήρου σε υδροξείδιο του σιδήρου. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη 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:

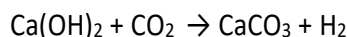


Τα προϊόντα των αντιδράσεων αυτών, δηλαδή τα οξείδια Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , σχηματίζουν ένα συμπαγές και αδιαπέραστο στρώμα που παθητικοποιεί τον οπλισμό και τον απομονώνει από το διαβρωτικό περιβάλλον.

Όσο η τιμή του pH του υγρού των πόρων του σκυροδέματος βρίσκεται μεταξύ 12,5 και 13,5, ο εγκιβωτισμένος οπλισμός 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. Η διάβρωση του χάλυβα επηρεάζεται επίσης από τις μεταβολές της υγρασίας του σκυροδέματος στην περιοχή του και ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. [64]

2.4. Ενανθράκωση σκυροδέματος

Ενανθράκωση είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την επίδραση του διοξειδίου του άνθρακα σε ένα υλικό. Το φαινόμενο οδηγεί σε προβλήματα ασφάλειας των έργων από οπλισμένο σκυρόδεμα, λόγω της μείωσης της διατομής του οπλισμού και την εμφάνιση ρωγμών στις κατασκευές. Η ενανθράκωση του σκυροδέματος προκαλείται από τη χημική αντίδραση του διοξειδίου του άνθρακα το οποίο υπάρχει στην ατμόσφαιρα, με το υδροξείδιο του ασβεστίου του σκυροδέματος.

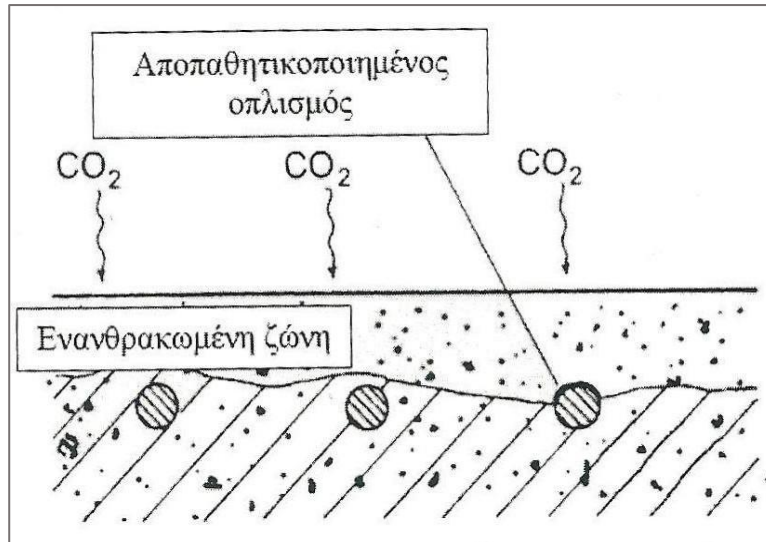


Αρχικά το διοξείδιο του άνθρακα διασκορπίζεται μέσω των πόρων του σκυροδέματος, λόγω διαφοράς συγκέντρωσης μεταξύ της ατμόσφαιρας και του αέρα στους πόρους. Ένα λεπτό στρώμα ενανθρακωμένου σκυροδέματος αναπτύσσεται, που μπορεί να είναι μικρότερο από ένα χιλιοστό στο πάχος. Η περαιτέρω πορεία της ενανθράκωσης του σκυροδέματος είναι συνάρτηση της διαπερατότητας του CO_2 και του ποσού του υδροξειδίου του ασβεστίου που είναι διαθέσιμο για την αντίδραση. Το διοξείδιο του άνθρακα σταδιακά διεισδύει σε βάθος στο σκυρόδεμα και τελικά το ενανθρακωμένο μέτωπο φθάνει στον οπλισμό, μειώνει το pH, και προκαλεί αποπαθητικοποίηση, δηλαδή την καταστροφή του προστατευτικού στρώματος οξειδίων. Η ενανθράκωση λοιπόν δεν έχει σοβαρές επιπτώσεις στο ίδιο το σκυρόδεμα, αλλά επηρεάζει την αντοχή του οπλισμού (Σχήμα 2.7). [65]

Για την πραγματοποίηση της αντίδρασης, απαιτούνται μικρές ποσότητες νερού. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενανθράκωσης παρατηρείται σε αέρα με σχετική υγρασία 50% ÷ 70%. Το ξηρό σκυρόδεμα δεν ενανθρακώνεται, λόγω απουσίας της απαιτούμενης υγρασίας, ενώ σε κορεσμένο με νερό

σκυρόδεμα εμποδίζεται η διάχυση του αερίου CO₂ στους πόρους του σκυροδέματος. Το νερό που δημιουργείται μετά την αντίδραση, διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος και η διαδικασία συνεχίζεται σε μεγαλύτερα βάθη του σκυροδέματος. Το pH μειώνεται, σε πλήρως δε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα παίρνει περίπου την τιμή 8.3. [53]

Η μέτρηση του βάθους ενανθράκωσης γίνεται με τη βοήθεια διαλύματος δείκτη φαινολοφθαλεΐνης σύμφωνα με τα οριζόμενα στο πρότυπο BS EN 14630-2006: Βάθος ενανθράκωσης είναι η μέση απόσταση, μετρούμενη σε χιλιοστά, από την επιφάνεια του σκυροδέματος ή κονιάματος, όπου το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) έχει μειώσει την αλκαλικότητα του ενυδατωμένου τσιμέντου σε βαθμό τέτοιο ώστε το διάλυμα δείκτη φαινολοφθαλεΐνης που ψεκάζεται στην επιφάνεια να παραμένει άχρωμο[66]. Το μη ενανθρακωμένο κονίαμα χρωματίζεται ιώδες-ερυθρό.



Σχήμα 2. 7 Διείσδυση της ενανθρακωμένης ζώνης στον οπλισμό

Το βάθος ενανθράκωσης παρουσιάζεται να είναι ανάλογο προς τον λόγο νερού προς τσιμέντο και την τετραγωνική ρίζα του χρόνου [65]:

$$d_k = k \times t^{0.5} \quad (2.2)$$

όπου

d_k : βάθος ενανθράκωσης

k : παράγοντας εξαρτώμενος από τη διάχυση του CO_2 , την αλκαλικότητα του σκυροδέματος, τη συγκέντρωση του CO_2 στην ατμόσφαιρα και τις συνθήκες έκθεσης της κατασκευής.

t : χρόνος έκθεσης της κατασκευής στο συγκεκριμένο περιβάλλον.

Άλλοι ερευνητές, όπως οι Siemes, Vrouwenvelder και Van den Deukel [67] εκτιμούν προσεγγιστικά το μέσο βάθος ενανθράκωσης από την εξής σχέση:

$$d_k = a \times t^n \quad (2.3)$$

όπου

d_c : μέσο βάθος ενανθράκωσης (mm) t : χρόνος (έτη)

n : 2 για ξηρό περιβάλλον (εσωτερικοί χώροι)

$n > 2$ για μεταβαλλόμενη υγρασία (εξωτερικοί χώροι)

a : σταθερά ($\text{mm}^b/\text{έτος}$), η οποία υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$a = (17 \times \omega - 6.5) \times R \times K \quad (2.4)$$

Το a εισάγει την επίδραση της ποιότητας του σκυροδέματος εφόσον η παράμετρος ω εξαρτάται από τον λόγο N/T και η παράμετρος R από την περιεκτικότητα σε τσιμέντο και το είδος του τσιμέντου και την επίδραση των συνθηκών του περιβάλλοντος αφού η παράμετρος K εξαρτάται από την υγρασία του σκυροδέματος και την περιεκτικότητα του αέρα σε CO_2 .

Για τις σταθερές K και R ισχύουν οι ακόλουθες τιμές :

$K=0.3$ για υγρό σκυρόδεμα

$K=0.5$ για εξωτερικούς χώρους

$K=1.0$ για εσωτερικούς χώρους (ξηρό σκυρόδεμα) $R=1.0$ για τσιμέντο Portland

R=2.2 για τσιμέντο Portland με σκωρίες υψικαμίνων σε περιεκτικότητα 60%.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ενανθράκωση του σκυροδέματος είναι [68]:

α. Υγρασιακή καταπόνηση.

Το μέγιστο ποσοστό ενανθράκωσης παρατηρείται για σχετική υγρασία του αέρα 50%÷70%. Δεν μπορεί να γίνει διείσδυση των βλαπτικών ουσιών του περιβάλλοντος όσο αυτές είναι σε αέρια μορφή, παρά μόνο όταν διαλυθούν σε νερό.

β. Περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο.

Η αυξημένη περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης λόγω αύξησης της περιεκτικότητας σε $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

γ. Είδος τσιμέντου

Το ποσοστό του υδροξειδίου του ασβεστίου στο σκυρόδεμα είναι ανάλογο προς την περιεκτικότητα του τσιμέντου σε C_3S και C_2S . Επίσης η αλκαλικότητα στο σκυρόδεμα από σύνθετα τσιμέντα είναι χαμηλότερη από αυτή του καθαρού τσιμέντου Πόρτλαντ.

δ. Ο λόγος νερού-τσιμέντου

Το τσιμέντο δεσμεύει χημικά και φυσικά, περίπου 0,4 του βάρους του σε νερό. Για να επιτυγχάνεται όμως εργασιμότητα, συχνά αυξάνεται ο λόγος αυτός σε 0,5 ή και 0,6. Το πλεονάζον και μη δυνάμενο να δεσμευθεί νερό εξατμίζεται αφήνοντας τριχοειδείς πόρους, από όπου γίνεται η διείσδυση της υγρασίας και η διάχυση των αερίων.

ε. Ποιότητα και πάχος της επικάλυψης

Επικάλυψη με χαμηλή διαπερατότητα μειώνει ή και αναστέλλει τη διείσδυση του CO_2 , ενώ η ύπαρξη ρωγμών επιταχύνει πολύ τη διαδικασία ενανθράκωσης. Ο R.Currie αναφέρει ότι τα προϊόντα της ενανθράκωσης εναποτίθενται στους τριχοειδείς πόρους του σκυροδέματος και μειώνουν το πορώδες. Συνεπώς, σκυροδέματα με ενανθράκωση σε εξέλιξη μπορεί να εμφανίζουν μειωμένη διαπερατότητα. Η αύξηση του πάχους της επικάλυψης δεν εξασφαλίζει πάντα τον χάλυβα από τον κίνδυνο της διάβρωσης. Μικρό πάχος επικάλυψης καλής ποιότητας είναι καλύτερη επιλογή από επικάλυψη μεγάλου πάχους αλλά χαμηλής ποιότητας. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το βάθος ενανθράκωσης είναι συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου. Επομένως, αν διπλασιασθεί το πάχος της επικάλυψης, τετραπλασιάζεται ο χρόνος για να φθάσει η ενανθράκωση στην επιφάνεια των οπλισμών και προκαλέσει την έναρξη της διάβρωσής τους. Επιπλέον, το πάχος της επικάλυψης δεν πρέπει να ξεπεράσει ένα ορισμένο όριο, διότι τότε απαιτείται πρόσθετος οπλισμός για να περιορισθεί το εύρος των ρωγμών. Το πάχος της επικάλυψης πρέπει να είναι επαρκές βάσει του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ 2016) και συνιστάται συνήθως να είναι από 15 έως 50 mm.

στ. Η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στο περιβάλλον

Το ποσοστό της ενανθράκωσης αυξάνεται με την αυξανόμενη περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα. Τα υψηλότερα ποσοστά CO_2 στην ατμόσφαιρα εκτός από τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις βρίσκονται μέσα στα κτίρια και ποικίλει από ένα ελάχιστο στα παράκτια περιβάλλοντα σε ένα μέγιστο στα αστικά περιβάλλοντα.

ζ. Κακή δόνηση.

Τα σημεία που δεν έχουν δονηθεί καλά αποτελούν αφετηρίες ενανθράκωσης.

2.5. Η δράση των χλωριόντων

Τα χλωριόντα (Cl⁻) βρίσκονται στο σκυρόδεμα είτε εξαρχής με την παρασκευή του σκυροδέματος, είτε διεισδύουν από το περιβάλλον αργότερα και βρίσκονται ως:

- Τυχαίο συστατικό σε αδρανή, π.χ. άμμος που προέρχεται από τη θάλασσα.
- Μέσα σε πρόσθετο που επιταχύνει τη σκλήρυνση του σκυροδέματος, πχ. χλωριούχο ασβέστιο.
- Στο νερό ανάμιξης, π.χ. θαλασσινό νερό ανάμιξης.

Η αρχική παρουσία των χλωριόντων μπορεί να περιορισθεί αν γίνει κατάλληλη επιλογή και έλεγχος των υλικών σύνθεσης του σκυροδέματος. Διείσδυση χλωριόντων μπορεί να γίνει επίσης με :

- Χρήση αντιπαγωτικών αλάτων
- Βιομηχανικά αλμυρά ύδατα
- Άμεση επαφή θαλασσινού νερού με κατασκευές
- Σταγονίδια θαλασσινού νερού, τα οποία μεταφέρονται με τον αέρα. Έχει παρατηρηθεί ότι τα σταγονίδια μπορεί να επηρεάσουν κατασκευή σε απόσταση μέχρι 10 km από τη θάλασσα.
- Μετά από πυρκαγιά στην οποία κάηκαν αντικείμενα από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC). Το πολυβινυλοχλωρίδιο διασπάται και δίνει αέριο HCl το οποίο διεισδύει στο σκυρόδεμα, αντιδρά με την άσβεστο και ελευθερώνει τελικά ιόντα χλωρίου. [69]

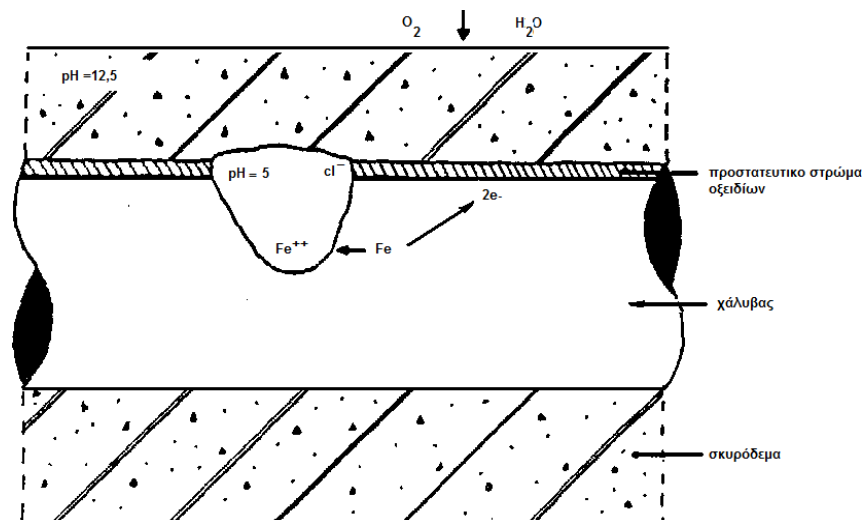
Η διείσδυση γίνεται μέσω του υγρού των πόρων του σκυροδέματος και η χρονική της εξέλιξη είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου. Ιδιαίτερα επικίνδυνη είναι η εναλλασόμενη διαβροχή και ξήρανση της επιφάνειας του σκυροδέματος από νερό το οποίο περιέχει χλωριούχα άλατα. Κατά τη διάρκεια της διαβροχής, μεγάλες ποσότητες νερού με διαλυμένα άλατα διεισδύουν στο σκυρόδεμα. Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, το νερό εξατμίζεται, ενώ τα άλατα παραμένουν στο σκυρόδεμα. Όταν η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, δημιουργούνται μεγάλες συγκεντρώσεις χλωριόντων στην περιοχή του σκυροδέματος που διαβρέχεται και ξηραίνεται.

Από τα χλωριόντα που υπάρχουν στο σκυρόδεμα, μια ποσότητα δεσμεύεται χημικά από τον τσιμεντοπολτό, ενώ τα υπόλοιπα παραμένουν ελεύθερα. Η διάβρωση του χάλυβα προκαλείται από τα ελεύθερα χλωριόντα. Το τσιμέντο μπορεί να δεσμεύσει ποσότητα χλωριόντων μέχρι 0.4% κ.β. τσιμέντου. Σχηματίζεται έτσι άλας Friedel [$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$] το οποίο είναι αβλαβές για τον χάλυβα. Για μεγαλύτερες όμως ποσότητες χλωριόντων, επιτυγχάνεται μια κατάσταση ισορροπίας, ώστε να υπάρχουν πάντα ελεύθερα χλωριόντα. Όταν οι συνθήκες είναι ευνοϊκές, αυτά τα ελεύθερα χλωριόντα θα προκαλέσουν διάβρωση του οπλισμού. Η αντίδραση για τον σχηματισμό του άλατος Friedell γίνεται πιο δύσκολα αν τα χλωριόντα βρεθούν σε σκληρυμένο σκυρόδεμα.[70]

Έχει βρεθεί πειραματικά ότι σε σκυρόδεμα το οποίο περιέχει εξαρχής χλωριόντα, ο χάλυβας διαβρώνεται λιγότερο από ότι θα συνέβαινε αν ο χάλυβας βρισκόταν σε σκυρόδεμα στο οποίο η ίδια ποσότητα χλωριόντων διεισδύει απ' έξω. Αυτό οφείλεται κατά τους Mehta και Monteiro [18], στην ευκολότερη χημική δέσμευση των χλωριόντων τα οποία βρίσκονται στο σκυρόδεμα πριν από τη σκλήρυνσή του, από το C₃A της τσιμεντοκονίας.

Ο μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα λόγω επίδρασης χλωριόντων βασίστηκε στη θεωρία ότι τα χλωριόντα μειώνουν το pH των πόρων, καταστρέφοντας έτσι την παθητική προστασία την οποία παρέχει το σκυρόδεμα στον χάλυβα. Νεότερες έρευνες όμως έδειξαν ότι η τιμή του pH στο σκυρόδεμα μετά την προσθήκη χλωριούχου άλατος εξαρτάται από το κατιόν του χλωριούχου άλατος. Για παράδειγμα, με την προσθήκη χλωριούχου νατρίου στο σκυρόδεμα, το pH δε μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου, ενώ με την προσθήκη χλωριούχου ασβεστίου το pH μειώνεται. [71]

Ο Marqueset (2008) συγκρίνοντας την πιθανότητα διάβρωσης με την κρίσιμη περιεκτικότητα σε χλωριόντα (% κ.β. του τσιμέντου) και υποθέτοντας σκυροδέμα με 350 kg τσιμέντο και πυκνότητα 2350 kg/m³, θεωρεί ότι η πιθανότητα διάβρωσης είναι αμελητέα, όταν η περιεκτικότητα είναι μικρότερη από 0,4%, είναι δυνατόν να συμβεί για 0,4÷1,0%, είναι πιθανή για 1,0÷2,0% και είναι σίγουρη για περιεκτικότητα σε χλωριόντα μεγαλύτερη από 2,0% [72]. Επίσης έχει διατυπωθεί η άποψη ότι σημασία έχει ο λόγος [Cl⁻]/[OH⁻] και όχι το pH του νερού στους πόρους του σκυροδέματος. Σε σκυροδέμα που περιέχει χλωριούχο ασβέστιο, ο λόγος [Cl⁻]/[OH⁻] είναι μεγαλύτερος από τον λόγο [Cl⁻]/[OH⁻] σκυροδέματος που περιέχει χλωριούχο νάτριο χωρίς βλαπτικό αποτέλεσμα. Ο Hausmann [73], διατύπωσε την άποψη ότι διάβρωση του χάλυβα συμβαίνει όταν ο λόγος [Cl⁻]/[OH⁻] πάρει τιμή μεγαλύτερη από 0.6. Χαρακτηριστικό της διάβρωσης με βελονισμούς είναι ότι ο χάλυβας διαβρώνεται σε πολύ μικρές περιοχές της επιφάνειάς του. Εξαιτίας της διατήρησης της αλκαλικότητας του σκυροδέματος σε υψηλά επίπεδα και λόγω της τοπικής διάβρωσης, ο μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα λόγω της επίδρασης χλωριόντων είναι διαφορετικός από τον μηχανισμό της γενικής διάβρωσης του χάλυβα. Εφόσον η ποσότητα των χλωριόντων υπερβεί κάποιο όριο, τότε υπάρχουν ελεύθερα χλωριόντα, που διαχεόμενα φθάνουν στην επιφάνεια του χάλυβα και προκαλούν την αποπαθητικοποίησή του. Η διάβρωση του οπλισμού παρουσία χλωριόντων περιγράφεται στο Σχήμα 2.8 [53].

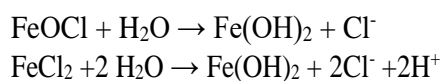


Σχήμα 2. 8 Απλοποιημένο προσομοίωμα της διάβρωσης του χάλυβα λόγω της επίδρασης των χλωριόντων

Στην άνοδο πραγματοποιείται η διάλυση του σιδήρου: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

Στην κάθοδο πραγματοποιείται η δράση: $\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$

Τα ιόντα του σιδήρου αρχικά σχηματίζουν με τα χλωριόντα χλωριούχο σίδηρο (FeCl_2). Στη συνέχεια ένα μέρος του FeCl_2 με τη βοήθεια του οξυγόνου μετατρέπεται σε FeOCl (οξείδωση του σιδήρου σε τρισθενή σίδηρο) και παρουσία του νερού συμβαίνει υδρόλυση των προϊόντων της διάβρωσης:



Με την υδρόλυση τα χλωριόντα που είχαν δεσμευθεί στα προϊόντα διάβρωσης επιστρέφουν πάλι στο διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος με ταυτόχρονη τοπική οξίνιση του διαλύματος. Επιβεβαιώνεται έτσι, ότι η δράση των χλωριόντων είναι μια αυτοκαταλύομενη αντίδραση. Στην περίπτωση αυτή ακόμη

και αν η περαιτέρω είσοδος των χλωριόντων παρεμποδιστεί η διάβρωση συνεχίζεται, γιατί η ποσότητα των χλωριόντων στην επιφάνεια του οπλισμού παραμένει σταθερή. Η αναγκαία ροή των ηλεκτρονίων πραγματοποιείται μέσω του χάλυβα, ενώ η μετακίνηση των ιόντων διαμέσου των πόρων του σκυροδέματος.

Η διείδυση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα θεωρείται γενικά ότι ακολουθεί το δεύτερο νόμο του Fick για τη διάχυση, σχηματίζοντας ένα μέτωπο χλωριόντων με βάθος μέσα στο σκυρόδεμα [74]:

$$d[Cl^-]/dt = D_c \cdot d^2[Cl^-]/dx^2 \quad (2.5)$$

όπου

$[Cl^-]$: η συγκέντρωση των χλωριόντων σε βάθος x και χρόνο t

D_c : είναι ο συντελεστής διάχυσης (συνήθως της τάξης των $10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση από χλωριόντα του χάλυβα στο σκυρόδεμα είναι [70]:

α. Η ποιότητα και το πάχος της επικάλυψης

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

β. Η περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο και πρόσθετα

Ένα ποσοστό των χλωριόντων που βρίσκονται στο σκυρόδεμα δεσμεύονται χημικά από το C_3A του τσιμέντου. Επομένως, όσο αυξάνεται η ποσότητα του C_3A στο τσιμέντο, τόσο μειώνεται ο κίνδυνος διάβρωσης των οπλισμών από χλωριόντα. Σύμφωνα με τους Mehta και Monteiro (2009) το τσιμέντο πρέπει να περιέχει περισσότερο από 8% C_3A κ.β. τσιμέντου για να δεσμεύει τα χλωριόντα. Όταν όμως πιθανολογείται ταυτόχρονη επίδραση θεικών και χλωριούχων αλάτων, μεγάλη περιεκτικότητα του τσιμέντου σε C_3A είναι καταστροφική για το σκυρόδεμα, γιατί τα θειικά ιόντα διασπούν το άλας Friedell ελευθερώνοντας τα χλωριόντα, ενώ ο ετρινγκίτης που δημιουργείται διογκώνεται και προκαλεί θραύση στο σκυρόδεμα.

γ. Το είδος και η συγκέντρωση των χλωριούχων αλάτων

Πειραματικά αποτελέσματα συνηγορούν ότι το είδος του κατιόντος των χλωριούχων αλάτων επηρεάζει τον βαθμό διάβρωσης του χάλυβα στο σκυρόδεμα. Για παράδειγμα, το $CaCl_2$ προκαλεί μεγαλύτερη διάβρωση του χάλυβα απ' ό,τι το $NaCl$. Επίσης η διάχυση των χλωριόντων του $CaCl_2$ είναι 3 έως 4 φορές μεγαλύτερη από τη διάχυση των χλωριόντων του $NaCl$. Έχει δε πρόσφατα αποδειχθεί ότι για τον σχηματισμό του άλατος Friedell, το $CaCl_2$ αντιδρά ευκολότερα απ' ό,τι το $NaCl$.

δ. Το περιβάλλον

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

2.6. Ο σχηματισμός μακροστοιχείων

Εάν υπήρχε μόνο η διαδικασία διάβρωσης μέσω των τοπικών γαλβανικών στοιχείων τότε οι αστοχίες από την διάβρωση θα ήταν σημαντικά μικρότερες από αυτές που έχουν παρατηρηθεί. Τα γαλβανικά μακροστοιχεία, σε αντίθεση με τα τοπικά γαλβανικά στοιχεία, εμφανίζονται σε μεγάλες περιοχές του οπλισμού και οφείλονται στην όλη συγκρότηση και λειτουργία του οπλισμένου σκυροδέματος και όχι μόνο στον χάλυβα. [56]

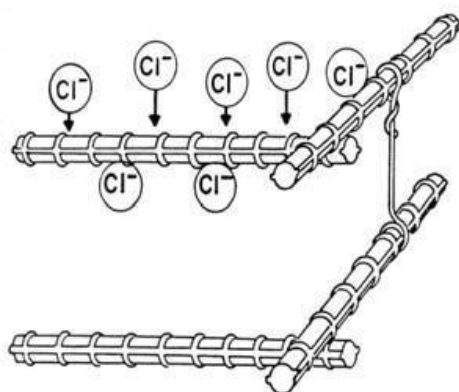
Ένα μακροστοιχείο δημιουργείται και στην περίπτωση της επαφής δύο διαφορετικών μετάλλων. Εάν ένας επιψευδαργυρωμένος χάλυβας έλθει σε ηλεκτρικά αγώγιμη επαφή με έναν κοινό χάλυβα μέσα στην μάζα του σκυροδέματος δημιουργείται γαλβανικό μακροστοιχείο λόγω διαφορετικών μετάλλων. Το ίδιο θα συμβεί και στην επαφή ανοξειδωτού χάλυβα με κοινό χάλυβα.

Στην περίπτωση όμως του οπλισμένου σκυροδέματος η δημιουργία μακροστοιχείων οφείλεται σε επιδράσεις του περιβάλλοντος. Η δημιουργία ενός μακροστοιχείου λόγω χλωριόντων εικονίζεται στα Σχήματα 2.9α,β,γ και δ. Λόγω του θαλασσίου περιβάλλοντος τα χλωριόντα εισέρχονται στο σκυρόδεμα από μία διεύθυνση, όπως δείχνει το Σχήμα 2.9α. Τα χλωριόντα φθάνουν μετά από ένα χρονικό διάστημα στους πρώτους οπλισμούς, ενώ οι ευρισκόμενοι προς το εσωτερικό τμήμα της κατασκευής δεν έχουν γύρω τους χλωριόντα. Μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών χαλύβων δημιουργείται μέσω των συνδετήρων μακροστοιχείο, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 2.9β. Οι οπλισμοί που έχουν ήδη γύρω τους χλωριόντα αποτελούν την άνοδο, ενώ οι οπλισμοί χωρίς χλωριόντα αποτελούν την κάθοδο του γαλβανικού στοιχείου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9γ. Στο ίδιο Σχήμα περιγράφονται και οι ηλεκτροχημικές δράσεις του γαλβανικού μακροστοιχείου. Μέσω των πόρων του σκυροδέματος αρχίζει η μεταφορά των ιόντων, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 2.9δ. [63]

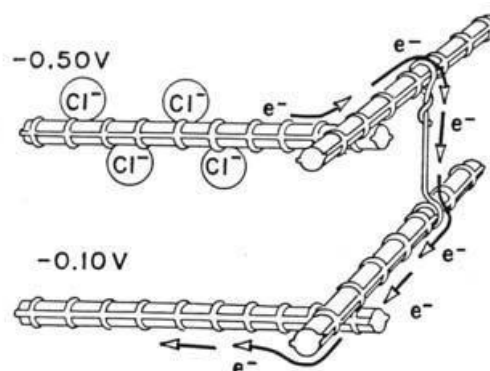
Η ταχύτητα διάβρωσης εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος του γαλβανικού μακροστοιχείου. Η ένταση του ρεύματος εξαρτάται από το δυναμικό του μακροστοιχείου, την ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος και τον λόγο μεταξύ της ανοδικής προς την καθοδική επιφάνεια.

Γαλβανικά μακροστοιχεία επίσης εμφανίζονται όταν υπάρχουν:

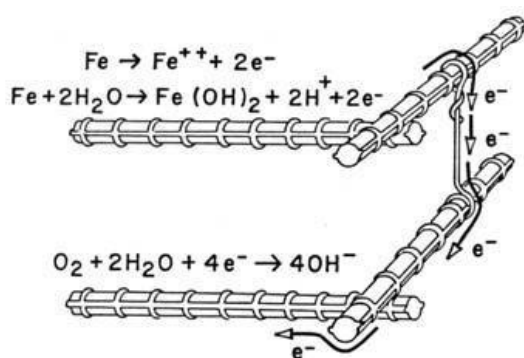
- Περιοχές οπλισμένου σκυροδέματος αεριζόμενες δίπλα σε μη αεριζόμενες.
- Περιοχές οπλισμένου σκυροδέματος υγρές δίπλα σε στεγνές.
- Περιοχές οπλισμένου σκυροδέματος με χαμηλό pH (λόγω ενανθράκωσης) δίπλα σε περιοχές με υψηλό pH.
- Η ύπαρξη και λειτουργία γαλβανικών μακροστοιχείων οδηγεί σε διάβρωση μεγάλης έκτασης και ταχύτητας που οδηγεί σε:
- Μείωση της διατομής του οπλισμού, με συνέπειες τη μείωση της συνάφειας οπλισμού και σκυροδέματος και τέλος τη μείωση της στατική ικανότητας της κατασκευής.
- Δημιουργία ρωγμών λόγω του σχηματισμού οξειδίων στην επιφάνεια του οπλισμού, τα οποία με τον μεγαλύτερο όγκο τους από του χάλυβα ασκούν εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα.



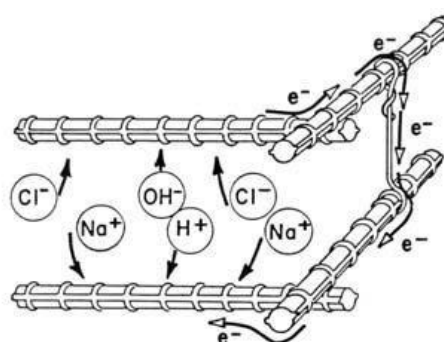
(α) Διείσδυση των χλωριόντων



(β) Δημιουργία γαλβανικού μακροστοιχείου



(γ) Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις

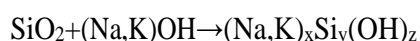


(δ) Μεταφορά ιόντων του γαλβανικού μακροστοιχείου

Σχήμα 2. 9 Σχηματισμός μακροστοιχείου σε σκυρόδεμα με χλωριόντα

2.7. Αλκαλοπυριτική αντίδραση

Οι κατασκευές από σκυρόδεμα ή σπλισμένο σκυρόδεμα μπορούν να υποστούν φθορά από διάφορα φυσικά (π.χ. παγετός, τριβή) ή χημικά φαινόμενα (π.χ. ενανθράκωση, προσβολή από θεϊκές ενώσεις). Για να εμφανισθούν τα αποτελέσματα αυτών των φαινομένων απαιτείται κάποιο χρονικό διάστημα σχετικά μεγάλο. Υπάρχει όμως ένα χημικό φαινόμενο του οποίου τα αποτελέσματα εμφανίζονται άμεσα, δηλ. εντός ολίγων εβδομάδων. Το φαινόμενο αυτό είναι η αντίδραση του υδροξειδίου του ασβεστίου με τα αδρανή (τα οποία σε αυτήν την περίπτωση παύουν να είναι αδρανή). Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται σαν Alkali-Aggregate Reaction (AAR) και διακρίνεται σε Alkali-Carbonate Reaction (ACR) και Alkali-Silica Reaction (ASR) [75]. Η αλκαλοπυριτική αντίδραση προκαλείται από την αλληλεπίδραση του πυριτίου του αδρανούς και των αλκαλίων στην πάστα του τσιμέντου (Na_2O , K_2O και σε μικρότερο βαθμό Li_2O), σχηματίζοντας ένα αλκαλοπυριτικό ζελέ, σύμφωνα με την ακόλουθη γενικευμένη αντίδραση. [76]



Η ταχύτητα αυτής της αντίδρασης ελέγχεται από πολλούς παράγοντες, που περιλαμβάνουν την ποσότητα του ενεργού πυριτίου στο αδρανές, την ποσότητα των διαθέσιμων αλκάλων και την παρουσία υγρασίας. Το ζελέ αυτό διογκώνεται με την πρόσληψη νερού και προκαλεί θραύση της πάστας του τσιμέντου, αλλά και του αδρανούς. Τα αποτελέσματα του φαινομένου αυτού είναι η διόγκωση του σκυροδέματος και ο σχηματισμός ρωγμών.

Τα κύρια αποτελέσματα της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης που εμφανίζονται στο εξωτερικό του σκυροδέματος είναι τα εξής [65]:

- Εμφάνιση μικρορωγμών στην επιφάνεια του σκυροδέματος
- Εμφάνιση εξανθημάτων στην επιφάνεια του σκυροδέματος
- Διαστολή του σκυροδέματος

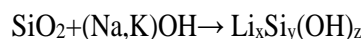
Ενώ στο εσωτερικό του σκυροδέματος:

- Σχηματισμός περιβλήματος στην επιφάνεια του ευπαθούς κόκκου των αδρανών από τη δράση της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης
- Εμφάνιση εσωτερικών τάσεων στο σκυρόδεμα

Η ρηγμάτωση που προκαλείται από την αλκαλοπυριτική δράση, ευνοεί την διάβρωση του σιδηροπλισμού, ο οποίος εξαιτίας των ρωγμών, εκτίθεται πλέον στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Τα ορυκτά που μπορούν να εμφανίσουν το φαινόμενο αυτό είναι τα πυριτικά (χαλαζίας υψηλής ενέργειας, τριδυμίτης, χριστοβαλίτης) αλλά και ανθρακικά (δολομίτης). Το φαινόμενο αυτό είναι ασυνήθιστο στην Ελλάδα, όπου η πλειοψηφία των πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή σκυροδέματος είναι ασβεστολιθικής προέλευσης, γεγονός που από μόνο του αποκλείει την εκδήλωση της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται πυριτικά αδρανή, όμως σε αυτά συνήθως το πυρίτιο είναι σε κρυσταλλική μορφή και δεν αντιδρά με τα αλκάλια. Γενικά, η αλκαλοπυριτική αντίδραση δεν αποτελεί πρόβλημα στην Ελλάδα, τουλάχιστον όσον αφορά το σκυρόδεμα που προέρχεται από οργανωμένες μονάδες που λειτουργούν με αδρανή από γνωστά λατομεία [76]. Μόνο σε περιπτώσεις φυσικών αδρανών μπορεί να παρατηρηθεί το φαινόμενο αυτό. Σε άλλες χώρες, όπου συνήθως τα αδρανή προέρχονται από φυσικές πηγές, το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται συχνά και η ένταση του προβλήματος είναι τόσο μεγάλη, ώστε η αλκαλοπυριτική αντίδραση έχει χαρακτηριστεί ως «ο καρκίνος του σκυροδέματος».

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού χρησιμοποιούνται τσιμέντα με χαμηλό ποσοστό αλκαλίων (ισοδύναμο $\text{Na}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \cdot \text{K}_2\text{O} \leq 0,6\%$), ποζολανικά τσιμέντα και προσθήκη ενώσεων λιθίου όπως το φθοριούχο λίθιο σε ποσοστό 1% κ.β. του [77], [78]. Σύμφωνα με ένα προτεινόμενο μηχανισμό, βάσει του οποίου το άλας αυτό μειώνει τη διόγκωση από την ASR, ένα αδιάλυτο, μη-διογκούμενο ζελέ λιθίου-πυριτίου σχηματίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη γενικευμένη αντίδραση [79], [80]:



Η χρήση των ενώσεων του λιθίου θεωρείται αποτελεσματική, αλλά ταυτόχρονα οδηγεί σε αύξηση της αγωγιμότητας του σκυροδέματος. Η αύξηση της αγωγιμότητας του σκυροδέματος είναι πιθανόν να αυξήσει την διάβρωση του οπλισμού. [76]

Αλκαλοανθρακική αντίδραση (Alkali Carbonate Reaction – ACR)

Η αλκαλοανθρακική αντίδραση, η οποία παρατηρήθηκε αρχικά από τον Swenson (1955) στον Καναδά, λαμβάνει χώρα μεταξύ των ανθρακικών αδρανών που περιέχουν δολομίτη και των υδροξυλιόντων που προέρχονται από την διαλυτοποίηση των περιεχόμενων αλάτων νατρίου και καλίου στο τσιμέντο. Ο μηχανισμός της αλκαλοανθρακικής αντίδρασης δεν είναι τόσο κατανοητός όσο ο αντίστοιχος της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης. [81] Η παρατηρούμενη διόγκωση ξεκινά μέσα από τα ίδια τα δολομιτικά αδρανή με συνέπεια την εμφάνιση ρωγμών τόσο στα αδρανή όσο και στην πάστα τσιμέντου, γεγονός το οποίο τελικά είναι δυνατόν να οδηγήσει σε σημαντική διόγκωση της συνολικής μάζας του σκυροδέματος. Η ACR κυρίως συναντάται στην περίπτωση των αργιλοδολομιτικών ασβεστόλιθων. Τα

εν λόγω αδρανή περιέχουν ασβεστίτη, δολομίτη και σημαντικό ποσοστό αργιλικών συστατικών, τα οποία είναι δυνατόν να περιέχουν ενεργό διοξείδιο του πυριτίου. Θα πρέπει να επισημανθεί, ότι η ACR εμφανίζεται σχετικά σπάνια (συνήθως αποφεύγεται) λόγω του ότι τα αδρανή τα οποία είναι ευπαθή σε αυτή την αντίδραση είναι συνήθως ακατάλληλα ως προς την χρήση τους στο σκυρόδεμα, για άλλους λόγους (π.χ. θλιπτική αντοχή).

2.8. Επιπτώσεις της διάβρωσης

Οι συνέπειες της διάβρωσης είναι τεράστιες σε παγκόσμια κλίμακα. Κάποιες είναι προφανείς, όπως οι οικονομικές, αλλά μπορούν να αναφερθούν και οι περιβαλλοντικές (κατανάλωση φυσικών πόρων – προστασία πλουτοπαραγωγικών πηγών), οι αισθητικές (τα διαβρωμένα υλικά δεν είναι ευχάριστα στην όψη), αλλά υφίστανται και θέματα υγείας και ασφάλειας των εργαζομένων. Εκτός από το άμεσο κόστος, που περιλαμβάνει το κόστος για την προστασία και την αντικατάσταση των κατασκευών που διαβρώθηκαν, το έμμεσο κόστος είναι πιο δύσκολο να υπολογισθεί και περιλαμβάνει:

- Την απώλεια παραγωγής λόγω προληπτικής συντήρησης ή αναστολής λειτουργίας προς αντικατάσταση διαβρωμένου εξοπλισμού.
- Τη μείωση της απόδοσης της εγκατάστασης από συσσώρευση προϊόντων διάβρωσης με συνέπεια ενεργειακές απώλειες.
- Τη μόλυνση των προϊόντων παραγωγής, αλλά και του περιβάλλοντος.
- Τον υπερσχεδιασμό των εγκαταστάσεων ή τις ειδικές κατασκευές.
- Την απώλεια της αξίας του πάγιου εξοπλισμού.
- Τα διαφυγόντα κέρδη.
- Τα ατυχήματα.

Εκτίμηση του κόστους της διάβρωσης σε παγκόσμια κλίμακα προσδιορίζει ότι η διάβρωση συμμετέχει κατά 3,5% στο Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν. Αντιστοιχεί σε 50-100 δολάρια ανά κάτοικο χώρας, ενώ η ποσότητα σιδήρου που καταστρέφεται από διάβρωση ανά έτος μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι το ένα τέταρτο έως ένα τρίτο της ετήσιας παραγωγής, με κατανάλωση 150.106 τόνων ανά έτος ή 5 τόνων ανά δευτερόλεπτο.

Στη δυτική Ευρώπη εκτιμάται ότι δαπανώνται 5 δισεκατομμύρια ευρώ για επισκευή διαβρωμένων κατασκευών από σκυρόδεμα [81]. Άλλοι ερευνητές υπολογίζουν ότι στην Ευρώπη το 40-60% του προϋπολογισμού για τις κατασκευές αφιερώνεται στην επισκευή και συντήρηση των υπάρχουσών δομών, ενώ μόνο στο Ηνωμένο Βασίλειο κάθε χρόνο δαπανώνται 550 εκατομμύρια λίρες για τη συντήρηση και επισκευή κατασκευών σκυροδέματος [82]. Η διάβρωση των μετάλλων κοστίζει στην οικονομία των Η.Π.Α. περίπου 300 δισεκατομμύρια δολάρια τον χρόνο σε τιμές 2000. Το 25% όλων των προβλημάτων διάβρωσης θα μπορούσαν να προληφθούν με τη χρήση καθιερωμένων, συμβατικών τεχνικών. [81]

3. Προστασία του οπλισμού από την διάβρωση

Σκοπός των επεμβάσεων είναι η αποκατάσταση των βλαβών, έτσι ώστε να διατηρεί η κατασκευή κατά τη διάρκεια της ζωής της τα λειτουργικά και αισθητικά χαρακτηριστικά της. Όταν ανακαλυφθεί η φθορά, τα στοιχεία που χρειάζεται να γνωρίζει ο Μηχανικός για να αποφασίσει τα απαιτούμενα μέτρα που χρειάζεται να ληφθούν είναι η ηλικία της κατασκευής, η μέση ετήσια διακύμανση της σχετικής υγρασίας στην περιοχή, η ταχύτητα φθοράς της κατασκευής, αλλά και η σκοπούμενη μελλοντική χρήση της.

Η ανθεκτικότητα κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο.Σ) επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες επιδρούν στην κατασκευή εσωτερικά και εξωτερικά. Σε χώρες που περιβάλλονται από θάλασσα και με ζεστό κλίμα όπως η Ελλάδα η επίδραση της θερμοκρασίας, η σχετική υγρασία τα χλωριόντα και άλλοι αέριοι ρύποι όπως το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 , διοξείδιο του θείου SO_2 και τα οξείδια του αζώτου NO_x , είναι παράγοντες θεμελιώδους σημασίας για τη φθορά και κατά συνέπεια την καταστροφή του σκυροδέματος, η οποία προκαλείται κατά κύριο λόγο από τη διάβρωση του οπλισμού και την ενανθράκωση του σκυροδέματος. Η Ελλάδα ως γνωστό είναι χώρα, η οποία περιβρέχεται από θάλασσα. Η μεταφορά του χλωριούχου νατρίου από τη θάλασσα με τον άνεμο έχει διαπιστωθεί ακόμη και σε ορεινές περιοχές. Επιπλέον στη χώρα μας, λόγω των ευνοϊκών για την ανάπτυξη του φαινομένου συνθηκών, παρουσιάζεται έντονο το πρόβλημα της διάβρωσης του σιδηρού οπλισμού λόγω της ενανθράκωσης του σκυροδέματος. 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. Από μελέτες ανθεκτικότητας που πραγματοποιήθηκαν στις πληττόμενες περιοχές από τον σεισμό του 1999 στην Αθήνα, εμφανίστηκαν ζημιές οικοδομών λόγω της διάβρωσης του οπλισμού, οι οποίες δεν είχαν ανακαλυφθεί έως τότε. Πολλές μάλιστα από αυτές εμφανίστηκαν σε περιοχές με μεγάλη απόσταση από τη θάλασσα. Τα προϊόντα διάβρωσης λόγω του μεγαλύτερου μοριακού τους όγκου από αυτόν του σιδήρου ασκούν εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών, καθώς επίσης μειώνουν τη συνάφεια οπλισμού /σκυροδέματος. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται και μελετώνται οι παράγοντες καθώς και τα είδη διάβρωσης του οπλισμού 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 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 (Fe_2O_3), το οποίο είναι αρκετά συνεκτικό, λεπτό με το υπόστρωμα και προστατεύει από τη διάβρωση τον χάλυβα. Η έναρξη της αποπαθητικοποίησης του χάλυβα προκαλείται από τη διάχυση ή την τριχοειδή όδευση αερίων διαβρωτικών όπως CO_2 , 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 εγγενείς 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ στους πόρους του σκυροδέματος και προκαλεί γενικά ομοιόμορφη διάβρωση, ενώ η αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου προκαλεί διάβρωση με βελονισμούς. [83]

Το μοντέλο διάβρωσης κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, περιγράφει τη διάβρωση του Ο.Σ. συνάρτηση του χρόνου και αποτελείται από τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο αφορά τη διάχυση των χλωριόντων στη μάζα του σκυροδέματος έως ότου η συγκέντρωσή τους στη διεπιφάνεια σκυροδέματος/επιφάνεια οπλισμών ξεπεράσει την κρίσιμη συγκέντρωση στην οποία ο χάλυβας αποπαθητικοποιείται. Το δεύτερο στάδιο είναι το στάδιο της διάβρωσης, το οποίο περιλαμβάνει την έναρξη της διάβρωσης των οπλισμών έως την εμφάνιση των πρώτων ρωγμών στο σκυρόδεμα. Παράγοντες οι οποίοι επιδρούν καθοριστικά σε αυτό το στάδιο είναι το μέγεθος των οπλισμών, η απόσταση τους, το πάχος επικάλυψης των οπλισμών. Το τρίτο στάδιο αφορά τον ρυθμό φθοράς της όλης κατασκευής. Στο χρονικό αυτό διάστημα η κατασκευή φθείρεται με εμφανή πλέον τα σημάδια της διάβρωσης έως ότου η επισκευή αυτής κρίνεται αναγκαία για τη βιωσιμότητα και τη λειτουργικότητα του κτιρίου ή γενικότερα της κατασκευής από Ο.Σ. Συνιστώσες (παράγοντες) όπως ρηγματώσεις, αποφλοιώσεις, τοπική ρήξη του πάχους επικάλυψης των οπλισμών επιδρούν και επηρεάζουν το χρόνο στον οποίο η επισκευή της κατασκευής κρίνεται αναγκαία. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι αποκατάστασης οι οποίες διακρίνονται σε ήπιες και ενεργές. [84]

3.1. Επιχρίσματα

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος προστασίας τόσο του οπλισμού όσο και του σκυροδέματος είναι η χρήση ανόργανων, οργανικών επικαλύψεων στην επιφάνεια του. Οι ιδιότητες που θα πρέπει να πληρούν οι επικαλύψεις είναι οι ακόλουθες :

1. Μικρή διαπερατότητα σε νερό
2. Αυξημένη διαπερατότητα σε ατμούς
3. Καλή πρόσφυση σε αλκαλικό υπόστρωμα
4. Μικρή διαπερατότητα σε CO₂ και SO₂

Η επιφανειακή προστασία του οπλισμένου σκυροδέματος με ανόργανες ή οργανικές επικαλύψεις μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους:

Διαποτισμός: Είναι η δημιουργία ενός λεπτού στρώματος στην επιφάνεια του σκυροδέματος χωρίς την κάλυψη των πόρων του σκυροδέματος.

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

Επικάλυψη: Είναι η δημιουργία ενός ομοιόμορφου στρώματος στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Διακρίνεται σε: διαποτισμό, με σφράγιση ή με λεπτή επικάλυψη.

Λεπτή επικάλυψη: Το πάχος της είναι μεγαλύτερο του 0,3 και μικρότερο του 1,0 mm. Η επικάλυψη αυτή δεν καλύπτει πλήρως όλες τις ανωμαλίες της επιφάνειας του σκυροδέματος.

Χονδρή επικάλυψη: Το πάχος της είναι μεγαλύτερο του 1,0 mm και μικρότερο του 5,0 mm. Η επικάλυψη αυτή καλύπτει πλήρως όλες τις ανωμαλίες της επιφάνειας του σκυροδέματος.

Επικάλυψη με κονιάματα. Το πάχος των κονιαμάτων πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 5,0 mm.

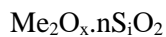
Η επιφανειακή προστασία του σκυροδέματος με χρώματα ανόργανα ή οργανικά είναι μια συνηθισμένη μέθοδος προστασίας, όπως για παράδειγμα τα χρώματα υδατικών ακριλικών διασπορών. Επίσης έχει αποδειχθεί ότι οι ρητίνες από ακρυλικά και μεθακρυλικά συμπολυμερή παρουσιάζουν πολύ μικρή διαπερατότητα σε νερό και διοξείδιο του άνθρακα. Αν το πάχος του χρώματος (συνολικά) δεν υπερβαίνει τα 300μm, η επικάλυψη του σκυροδέματος ανήκει στην κατηγορία του σφραγίσματος. Σε ισχυρά διαβρωτικό προτιμούνται χρώματα δύο συστατικών (εποξικών και πολυουρεθάνης).

Γενικά η επιλογή του κατάλληλου συστήματος χρωμάτων βασίζεται στην εκτίμηση των ιδιοτήτων του περιβάλλοντος του κτιρίου, καθώς και από ποία αναμένεται να είναι η κύρια αιτία φθοράς στο σκυρόδεμα, στα προβλεπόμενα έξοδα συντήρησης και στις αισθητικές απαιτήσεις της κατασκευής. [86]

Τα επιχρίσματα στον οπλισμό εμποδίζουν επίσης τη διάβρωση. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα μεταλλικά και τα μη μεταλλικά επιχρίσματα. Τα μη μεταλλικά, ανόργανες ή οργανικές ενώσεις όπως εποξειδικές ρητίνες ή το χλωριούχο πολυβινύλιο, έχουν μικρή διαπερατότητα στο νερό, τα αέρια, τους ηλεκτρολύτες και μεγάλη αντοχή στα οξέα και τις βάσεις. Μειονεκτήματα τους η εύκολη καταστροφή τους κατά τις συνήθεις και αναγκαίες οικοδομικές εργασίες (κάμψη ράβδων), είναι μια από τις ακριβές μεθόδους προστασίας, η μικρή αντοχή τους σε πυρκαγιά και το ότι εάν εφαρμοστούν σε μεγάλο πάχος (> 0,2mm) επιδρούν αρνητικά στη συνάφεια χάλυβα - σκυροδέματος. [85]

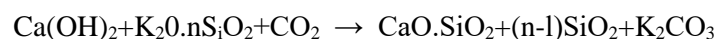
3.2. Ανόργανα χρώματα

Τα ανόργανα χρώματα έχουν σαν συνδετικό μέσο την υδρύαλο και ως χρωστικές ανόργανα πιγμέντα. Υδρύαλος είναι η συνήθης ονομασία των πυριτικών αλάτων των αλκαλίων με γενικό τύπο:



όπου το Me είναι K ή Na και σπάνια Li, που άλλωστε είναι τα μόνα υδατοδιαλυτά (κολλοειδή) πυριτικά άλατα με υψηλό pH μεταξύ 11-13. Όσο μεγαλύτερο είναι το pH τόσο πιο δυσδιάλυτη στο νερό είναι η υδρύαλος.

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



δηλαδή η υδρύαλος, η οποία έρχεται σε επαφή λόγω διάχυσης με ιόντα ασβεστίου, και με την ενεργό συμμετοχή του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας μεταβάλλεται σε πυριτικό ασβέστιο και ανθρακικό κάλιο. Τα ανόργανα πιγμέντα που περιέχονται στην υδρύαλο συγκρατούνται στο σχηματιζόμενο πλέγμα από την προαναφερθείσα αντίδραση. [87]

3.3. Οργανικά χρώματα

Η επικάλυψη (βαφή) με οργανικές ουσίες είναι ιστορικά η παλαιότερη μέθοδος προστασίας και διακόσμησης επιφανειών. Σήμερα 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. Εφαρμογή ενα χέρι υπόστρωμα (αστάρι) με το ίδιο συνδετικό μέσο με το χρώμα που θα επικαλυφθεί και δύο χέρια τελικού στρώματος

Τα υποστρώματα (αστάρια) έχουν την ίδια περίπου χημική σύσταση με το χρώμα που θα ακολουθήσει αλλά περιέχουν μεγαλύτερο ποσοστό διαλυτών, πράγμα που διευκολύνει τη διείσδυση του χρώματος στους πόρους του σκυροδέματος. Η σωστή εφαρμογή του υποστρώματος είναι μεγάλης σημασίας για τη διάρκεια ζωής του χρώματος. [88]

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. [89] Οι ρητίνες από ακρυλικά και μεθακρυλικά συμπολυμερή διαλυτές σε οργανικούς διαλύτες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παραγωγή προστατευτικών χρωμάτων στο σκυροδέμα. Τα χρώματα της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν πολύ καλή διαπερατότητα σε νερό και διοξείδιο του άνθρακα καθώς και καλή αντοχή στην ακτινοβολία UV με προσθήκη κατάλληλων προσθέτων (UV-absorbers). Επίσης παρουσιάζουν πολύ καλή διεισδυτικότητα στους πόρους του σκυροδέματος και καλή συνάφεια.

Χρώματα δύο συστατικών με βάση τις εποξικές και πολυουρεθανικές ρητίνες έχουν χρησιμοποιηθεί για την προστασία του σκυροδέματος. Η σκλήρυνσή τους γίνεται με την αρχή της πολυπροσθήκης. Τα δύο συστατικά ρητίνη και σκληρυντής αναμιγνύονται λίγο πριν την εφαρμογή και αντιδρούν σχηματίζοντας ένα υψηλού μοριακού βάρους πολυμερές. Ακόμη ακόρεστοι πολυεστέρες και μεθακρυλικές ρητίνες που σκληρύνονται με την αρχή του πολυμερισμού βρίσκουν εφαρμογή στην προστασία του σκυροδέματος. Τα χρώματα της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν πολύ καλή αντοχή σε αλκαλικά και όξινα διαλύματα, διαλύτες οργανικούς αλλά και πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Η χρήση τους σε γκαράζ, βιομηχανικές κατασκευές, στα τούνελ κ.λ.π, είναι ιδιαίτερα συνηθισμένη. Η χρήση πολυουρεθανικών ρητινών σε συνδυασμό με πίσσα για την προστασία του σκυροδέματος σε ισχυρά διαβρωτικά περιβάλλοντα αποτελεί μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εφαρμογή. Μία νεότερη εξέλιξη στα χρώματα της κατηγορίας αυτής είναι η χρήση ακόρεστων πολυεστερικών ρητινών σε συνδυασμό με ίνες για την κάλυψη δεξαμενών από οπλισμένο σκυροδέμα. [90]

Οι παραβολικοί πύργοι ψύξεως είναι ένα κλασικό παράδειγμα κατασκευής από σκυροδέμα που υφίσταται έντονη καταπόνηση από το περιβάλλον. Στο εσωτερικό του πύργου ψύξεως κυκλοφορεί νερό θερμοκρασίας υψηλότερης του περιβάλλοντος. Λόγω της ύπαρξης νερού υψηλότερης θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στο εσωτερικό του πύργου ψύξεως δημιουργείται μέσω του σκυροδέματος ένα ρεύμα υδρατμών από μέσα προς τα έξω. [84]

Η κατάσταση αυτή γίνεται δυσμενέστερη όταν ο πύργος ψύξεως χρησιμοποιείται για πλύσιμο των καυσαερίων, οπότε η οξύτητα των καυσαερίων κατεβάζει το pH του νερού. Ακόμη το διοξείδιο του άνθρακα των καυσαερίων διευκολύνει την ενανθράκωση του σκυροδέματος. Επίσης όταν χρησιμοποιείται θαλασσινό νερό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η διαβρωτική επίδραση των χλωριόντων. [91]

Αυτές οι συνθήκες λειτουργίας δημιουργούν στο εσωτερικό και το εξωτερικό κέλυφος του πύργου ψύξεως διαβρωτικές επιδράσεις. Η εσωτερική πλευρά αντιμετωπίζει υψηλότερες θερμοκρασίες και την μηχανική δράση του νερού που κυκλοφορεί. Όταν το νερό έχει τέτοια σύσταση ώστε να προσβάλει χημικά το σκυροδέμα (χαμηλό pH – χλωριόντα) αντιμετωπίζει και χημική διάβρωση. Σε όσα σημεία δεν φθάνει το νερό η σχετική υγρασία είναι κοντά στο 100 %. Στην εξωτερική πλευρά υπάρχει ο αέρας που είναι όμως επιβαρυνμένος με ρύπους όπως διοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του θείου. Η μεταφορά ατμών μέσω του σκυροδέματος δημιουργεί κατάλληλες συνθήκες για ενανθράκωση. Ο άνεμος δημιουργεί μηχανικές καταπονήσεις και στην περίπτωση γειτονίας με την θάλασσα μεταφέρει και χλωριόντα. Στην εσωτερική επιφάνεια των πύργων ψύξεως εμφανίζονται συχνά φαγώματα λόγω της επίδρασης της κυκλοφορίας του νερού, ρωγμές λόγω τοπικών μεταβολών θερμοκρασίας. Η εξωτερική επιφάνεια των πύργων εμφανίζει ρωγμές από την διάβρωση του οπλισμού λόγω ενανθράκωσης αλλά και από την επίδραση των χλωριόντων. [92]

Η διαβρωτική αυτή διαδικασία επιβάλλει την λήψη μέτρων προστασίας ώστε ο πύργος ψύξεως να λειτουργήσει απρόσκοπτα στη διάρκεια της ζωής του. Η προστασία των πύργων ψύξεως συνήθως επιτυγχάνεται με οργανικές επικαλύψεις. Λόγω των διαφορετικών περιβαλλοντικών επιδράσεων στην εσωτερική και εξωτερική πλευρά του πύργου ψύξεως προβλέπεται διαφορετικό σύστημα βαφής. Οι απαιτήσεις για τα συστήματα χρωμάτων περιγράφονται στην οδηγία της VGB “R 612 Ue” (Protection Measures on Reinforced Concrete Cooling Towers and Chimneys against Operational and Environmental Impacts). Στην ίδια οδηγία περιγράφεται η πειραματική διαδικασία ή η δοκιμή επί τόπου για την αποδοχή των χρωμάτων.

Από Ελληνικής πλευράς δύο βιομηχανίες παραγωγής χρωμάτων έχουν επιτύχει την πιστοποίηση των χρωμάτων τους σύμφωνα με την διαδικασία αυτή. Χρώματα των βιομηχανιών αυτών χρησιμοποιήθηκαν για την προστασία πύργου ψύξεως που επισκευάστηκε και αναβαθμίστηκε για τον καθαρισμό των αερίων καύσεως. Στην εργασία αυτή αναφέρονται τα προβλήματα, η διαδικασία ελέγχου ποιότητας και η εφαρμογή των χρωμάτων αυτών. [90]

3.4. Σφράγισμα ρωγμών

Η ύπαρξη ρωγμών στο σκυρόδεμα αποτελούν μέσο για να περάσουν, τόσο το διοξείδιο του άνθρακα όσο και τα χλωριόντα στον οπλισμό και να επιταχύνουν την διαδικασία της διάβρωσης. Οι ρωγμές αυτές μπορεί να προέρχονται από συστολή ξήρανσης, από υψηλές εντάσεις ή από διάφορες συγκρούσεις. [93]

Το σφράγισμα των ρωγμών μπορεί να πραγματοποιηθεί με έναν από τους παρακάτω τρόπους

- Ενέσεις ρητινών
- Ενέσεις τσιμέντου
- Επανακαλοποίηση σκυροδέματος

Οι ρητίνες αποτελούν ένα υλικό που μπορεί να γεμίσει το κενό μιας ρωγμής, επιτυγχάνοντας τελικά την πλήρη συνέχεια του υλικού. Επίσης λόγω της σύστασής τους, παρεμποδίζουν την ελεύθερη διείσδυση οξυγόνου και υγρασίας, των κύριων δηλαδή συστατικών της οξειδωτικής διαδικασίας. Κατά την διαδικασία αυτή οι οπλισμοί εγκιβωτίζονται, με αποτέλεσμα την προστασία τους από την διάβρωση. Επίσης οι υψηλές αντοχές εφελκυσμού και συνάφειας των ρητινών εμποδίζουν την διεύρυνση των ρωγμών. Μεγάλο πλεονέκτημα στις ρητίνες είναι το γεγονός ότι δεν είναι υλικά ευάλωτα σε εξωτερικούς παράγοντες και άρα έχουν αντοχή στο χρόνο. Το βασικό μειονέκτημα των ρητινών είναι η χαμηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες (κίνδυνος σε πυρκαγιά), καθώς και το υψηλό τους κόστος.

3.5. 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. [94]

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

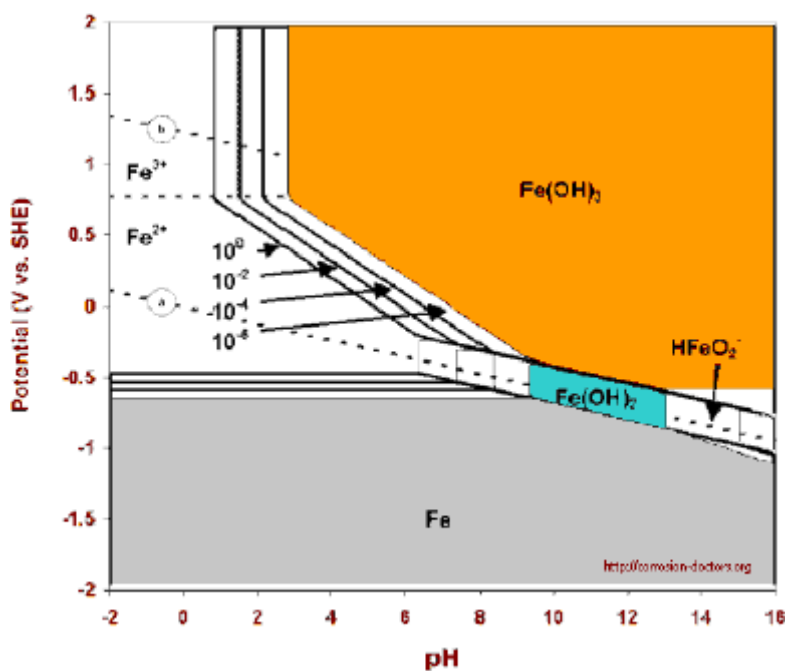
- Αύξηση της ανοδικής ή καθοδικής πολικότητας (κλίσεις Tafel).

- 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 συγκέντρωση του αναστολέα στο διάλυμα. Είναι σημαντικό κατά την προστασία με χρήση αναστολέων, η συγκέντρωσή τους να διατηρείται σε επαρκή επίπεδα στο ρευστό. [95]

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 καθυστερείται. 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. [96]

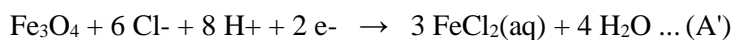
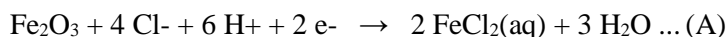
Το διάγραμμα Pourbaix (Σχήμα 3.1) δείχνει ότι το φιλμ από Fe_3O_4 και Fe_2O_3 των σιδερένιων βραστήρων μπορεί να διαλυθεί είτε στις όξινες είτε στις αλκαλικές περιοχές διάβρωσης (Σχήμα 3.1). Το διάγραμμα E-pH δείχνει ακόμη ότι η διάλυση της ακαθαρσίας από οξειδία είναι επίσης δυνατή στα αλκαλικά διαλύματα, 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. 1 Διάγραμμα Pourbaix

Στην πράξη, το υδροχλωρικό οξύ με χρήση αναστολέα έχει αποδειχθεί επανειλημμένα η αποδοτικότερη μέθοδος για να αφαιρεθεί η ακαθαρσία. [97]

Τέσσερις εξισώσεις απαιτούνται για την εξήγηση της αφαίρεσης της ακαθαρσίας. Τρεις από αυτές αντιπροσωπεύουν τις καθοδικές διαβρώσεις:



και μια την ανοδική, δηλαδή η διάλυση του υλικού



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.

3.5.1. Τύποι αναστολέων διάβρωσης

ΑΝΟΔΙΚΟΙ ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ (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. [98]

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. [99]

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 περιοριστούν λοιπόν όσο το δυνατόν αυτά τα φαινόμενα είναι σημαντικό να ακολουθηθεί η εξής 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:

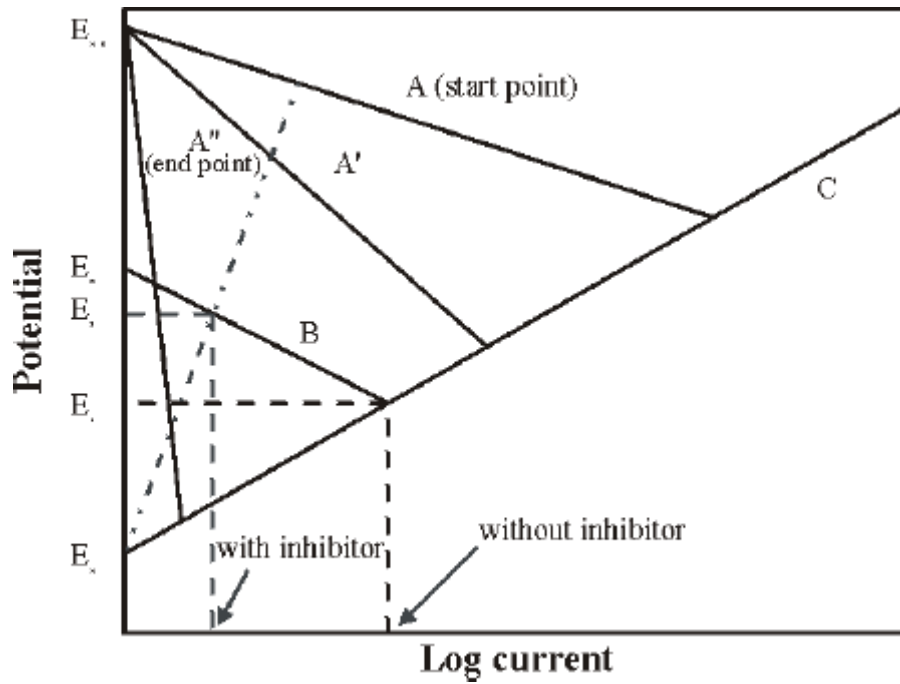
- Ενώσεις του χρωμίου, του μολυβδενίου και του αζώτου: Καταλύουν την αντίδραση μεταξύ του μετάλλου και του οξυγόνου και δημιουργούν ένα στρώμα παθητικοποίησης. Είναι οι μόνοι ανοδικοί αναστολείς που δρουν χωρίς την παρουσία οξυγόνου.
- Ορθοφωσφορικές ενώσεις: Καταλύουν επίσης την αντίδραση μεταξύ του 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. [100], [101]

ΚΑΘΟΔΙΚΟΙ ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ (cathodic inhibitors)

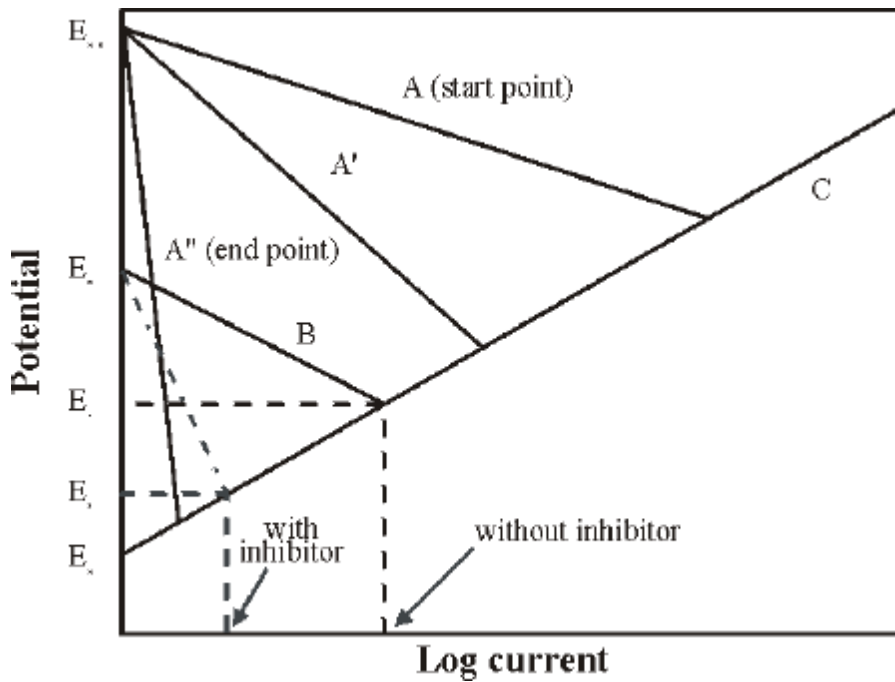
Οι καθοδικοί αναστολείς είναι γενικά λιγότερο αποτελεσματικοί από τους ανοδικούς. Σε αντίθεση με τους τελευταίους, οι καθοδικοί αναστολείς δημιουργούν ένα ορατό στρώμα στα καθοδικά σημεία του μετάλλου το οποίο πολώνει το μέταλλο, περιορίζοντας την πρόσβαση του διαλυμένου οξυγόνου στην επιφάνεια του μετάλλου. Όπως φαίνεται και παρακάτω, 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. [101]

Μερικές Ενώσεις που χρησιμοποιούνται ως καθοδικοί αναστολείς:

- Υδροξείδιο του ψευδαργύρου
- Φωσφορικός ψευδάργυρος
- Ανθρακικό ασβέστιο
- Φωσφορικό ασβέστιο.



Σχήμα 3. 2 Επίδραση ενός ανοδικού αναστολέα στο ρυθμό διάλυσης του σιδήρου και των οξειδίων του σιδήρου.



Σχήμα 3. 3 Επίδραση ενός καθοδικού αναστολέα στο ρυθμό διάλυσης του σιδήρου και των οξειδίων του σιδήρου.

Παρατηρείται από τα Σχήματα 3.2 και 3.3 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. [32]

ΜΙΚΤΟΙ ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ

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. [99] 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. [102]

ΟΡΓΑΝΙΚΟΙ ΚΑΙ ΑΝΟΡΓΑΝΟΙ ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ

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.

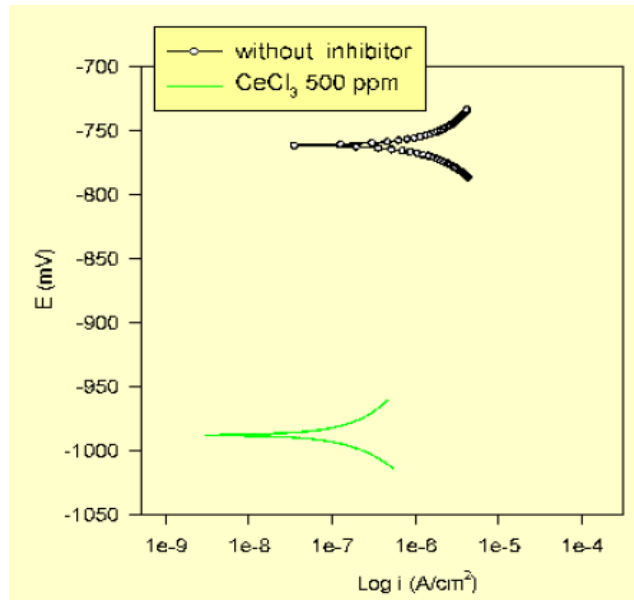
- Φωσφορούχοι εστέρες
- Φωσφονικά

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 μολυβδαινίου
- Φωσφορικά άλατα
- Νιτρικά άλατα
- Σύμπλοκα θεικών 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 ανοξειδωτού 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. 4 Καμπύλες Πόλωσης

Οι καμπύλες πόλωσης του Σχήματος 3.4 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. [103]

ΙΖΗΜΑΤΟΠΟΙΟΙ ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ (Precipitation inducing inhibitors)

Οι ιζηματοποιοί 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.

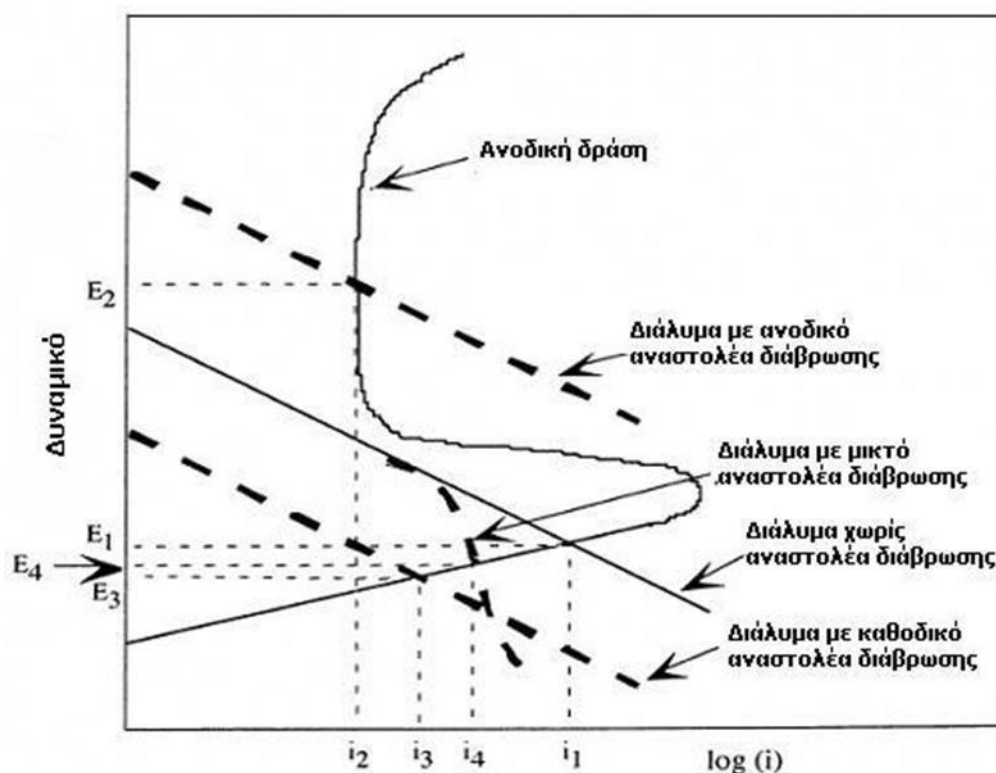
Τα θειικά και τα φωσφορικά άλατα δεν μπορούν να συγκριθούν με την αποδοτικότητα των χρωματικών και νιτροδών αλάτων, παρ' όλα αυτά, χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου η πρόσθεση μη τοξικών ουσιών είναι απαραίτητη. [104]

ΠΗΤΗΤΙΚΟΙ ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ (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 υψηλή πτητικότητα, ενώ για μακροχρόνια λειτουργία, η χαμηλή πτητικότητα. [101]

3.5.2. Μηχανισμός προστασίας μέσω αναστολέων διάβρωσης

Από την πλευρά της ηλεκτροχημικής προσέγγισης του φαινομένου της διάβρωσης η επίδραση των αναστολέων διάβρωσης συνοψίζεται και δίνεται στο Σχήμα 3.5 οι καμπύλες πόλωσης οι οποίες δείχνουν την ανοδική και καθοδική δράση ως συνάρτηση της διαφοράς δυναμικού στη διεπιφάνεια χάλυβα (οπλισμού) / σκυροδέματος. [32]



Σχήμα 3.5 Επίδραση του αναστολέα διάβρωσης στο δυναμικό και την πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης

Οι συμπαγείς γραμμές αντιπροσωπεύουν την ανοδική δράση (διάλυση /οξείδωση 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 κωδικό 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. [101]

3.5.3. Αναστολείς στο σκυρόδεμα

Οι αναστολείς διάβρωσης μπορούν να ταξινομηθούν σε κατηγορίες σύμφωνα με τις μεθόδους εφαρμογής τους, ανάλογα του μηχανισμού προστασίας τους, ή του περιεχομένου τους. [105]

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, αναστολέας διάβρωσης μπορεί να είναι:

Ανοδικοί. Οι ανοδικοί αναστολείς ενεργούν για τη διάλυση των προϊόντων διάβρωσης του χάλυβα και μειώνουν το ρυθμό διάβρωσής του. Χρησιμοποιούνται συχνά ανοδικοί αναστολείς από νιτρώδες ασβέστιο $\text{Ca}(\text{NO})_2$, νιτρώδες νάτριο, βενζοϊκό νάτριο και χρωμικό νάτριο.

Καθοδικοί. Οι καθοδικοί 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 νατρίου 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. [106]

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, χρησιμοποιούνται πολικές ομάδες όπως N, S, OH και ενώσεις πολυμερούς όπως αμίνη και αμινοαλκοόλης (AMA).

Οι αναστολείς διάβρωσης έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε χάλυβα αγωγούς, δεξαμενές, κλπ. για πολλές δεκαετίες. Η χρήση τους στο σκυρόδεμα, ωστόσο, είναι πιο πρόσφατη και πιο περιορισμένη.

Το νιτρώδες νάτριο έχει διερευνηθεί το 1958 στις Σοβιετική Ένωση ως αναστολέας της διάβρωσης του χάλυβα σε αυτόκλειστο προϊόντων ως αντίμετρο για τη μείωση η αλκαλικότητα. Η Σοβιετική Ένωση πρωτοστάτησε στην χρήση του $\text{Ca}(\text{NO})_2$. Στην Ιαπωνία και στις Ηνωμένες Πολιτείες έχει χρησιμοποιηθεί για χρόνια. Η ιαπωνική χρήση οφείλεται κυρίως στην εκτεταμένη χρήση άμμο της θάλασσας σε σκυρόδεμα το 1970. Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας απονεμήθηκε σε μια εταιρεία το 1977 για την εμπορική εφαρμογή των νιτρωδών με βάση αναστολέα. [107]

Οργανικά χημικά προϊόντα που λειτουργούν ως αναστολείς διάβρωσης αναπτύχθηκαν στη βιομηχανία πετρελαίου στη δεκαετία του 1950 και εφαρμόζονται στη βιομηχανία σκυροδέματος στις αρχές του 1990. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, ένας αριθμός οργανικών αναστολέων είχε αναπτυχθεί, συμπεριλαμβανομένων των διαφόρων αμινών, αλκανολαμινών, άλατα με οργανικά και ανόργανα οξέα και μίγματα των αλκοολών με εστέρες και αμίνες.

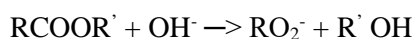
Αμίνες και αλκανολαμίνες (AMA)

Οι οργανικοί αναστολείς που χρησιμοποιούνται για την προστασία του χάλυβα στο σκυρόδεμα είναι συχνά αμίνες, αλκανολαμίνες (AMA), και τα άλατά τους με οργανικά και ανόργανα οξέα. Τα βιολογικά αντιδιαβρωτικά μπορούν να σχηματίσουν πενταμελή ή εξαμελή χημικούς δακτυλίους. Αυτοί οι δακτύλιοι σχηματίζονται ως αποτέλεσμα της συγκόλληση μεταξύ δύο ή περισσότερες λειτουργικών ομάδων από αναστολέα (όπως-NH₂,-OH,-SH,- COOH και - SO₃H) και το μεταλλικό κατιόν. Ορισμένες μελέτες (χρήση δευτερογενών ιόντων φασματοσκοπία μάζας - SIMS) αναφέρουν ότι AMA και οι συνδεδεμένες ρίζες σχηματίζοντας ένα στρώμα πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα, τα οποία καλύπτουν πλήρως όλες τις ανοδικές και καθοδικές πλευρές και επομένως είναι αναστολείς μικτού τύπου. [108]

Από την άλλη πλευρά, ορισμένες μελέτες (με ποτενσιοδυναμικό πόλωση) προτείνουν ότι AMA-βάση με αναστολείς δρουν κυρίως επί ανοδικής δραστηριότητας και προκαλούν αύξηση στο δυναμικό διάβρωσης ακόμη και αν η αύξηση δεν ήταν πολύ έντονη. Εξελιγμένες μέθοδοι όπως αιθανολαμίνη (H₂N-CH₂-CH₂-OH) και διμεθυλαιθανολαμίνη ((CH₃)₂N-CH₂-CH₂-OH) μπορεί να ελέγχει τη διάβρωση από την επιθετική καθοδική δραστηριότητα. [109]

Ωστόσο, υπάρχουν πολλά ευρήματα για δημιουργία σχηματισμού οργανικών αναστολέων: το πάχος και η σύνθεση της προστατευτικής μεμβράνης εξαρτάται από τη συγκέντρωση του αναστολέα. DMEA (διμεθυλαιθανολαμίνη -το κύριο συστατικό του AMA-αναστολέων με βάση) και AMA αναστολέας αναφέρθηκαν να προσροφάται επί μαλακού χάλυβα σε στρώματα πάχους 2-10 nm. Σύμφωνα με δύο μελέτες, οι οποίες χρησιμοποιούνται ηλεκτροχημική φασματοσκοπία σύνθετης αντίστασης (EIS), υπάρχει μια οριακή συγκέντρωση 0,5-1,0% (σε μια λύση που προέρχονται από σκυρόδεμα) για αναστολέα AMA να σχηματίζουν ένα προστατευτικό φιλμ. Υψηλότερες συγκεντρώσεις του αναστολέα (2% και 4%) και τα υψηλότερα επίπεδα χλωριόντων (από 2% έως 4%) δεν έχουν καμία επίδραση στην προστατευτική μεμβράνη. [110]

Οι αμινοεστέρες οργανικών αναστολέων δημιουργούν ένα παθητικοποιημένο στρώμα. Το συστατικό σχηματισμού του στρώματος είναι μία ομάδα αμύνης. Μπορούν προσροφούν για τα μέταλλα και τα οξείδια λόγω ενός μεμονωμένο ζεύγος ηλεκτρονίων του ατόμου αζώτου. Οι εστέρες έχουν αποτέλεσμα στεγανοποίησης. Οι εστέρες υδρολύονται από το αλκαλικό νερό για να σχηματιστεί ένα μείγμα απο καρβοξυλικό οξύ και την αντίστοιχη αλκοόλη του. Ο αντίδραση εξελίσσεται ως εξής :



όπου τα R και ROH αντιπροσωπεύουν διαφορετικά μόρια υδρογονανθράκων.

3.6. Επιφανειακή προστασία

Τα συστήματα πρόσθετης επιφανειακής προστασίας χρησιμοποιούνται για την επιπλέον προστασία του σκυροδέματος από την προσβολή χημικών ουσιών που επιφέρουν απομείωση της φέρουσας ικανότητάς του, για την πρόληψη δημιουργίας κηλίδων στην επιφάνειά του ή για την προστασία υγρών από την επαφή τους με το σκυρόδεμα που ενδέχεται να το προσβάλλει. Σκοπός της επιφανειακή προστασίας του οπλισμένου σκυροδέματος είναι η δημιουργία ενός στρώματος χαμηλής διαπερατότητας έτσι ώστε να απομονώνεται η δομή από επιβλαβείς διαβρωτικούς παράγοντες. Το στρώμα της επικάλυψης δρα σαν φράγμα στην είσοδο των χλωριόντων με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης. Οι περισσότερες επικαλύψεις εμποδίζουν ταυτόχρονα και την είσοδο του νερού αφήνοντας όμως ελεύθερη τη δυνατότητα διαπνοής, δηλαδή την εξάτμιση των ατμών από το εσωτερικό του σκυροδέματος. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε νέες δομές αλλά και σε υφιστάμενες κατασκευές σαν μέθοδος αποκατάστασης με περιορισμένη όμως αποτελεσματικότητα ειδικά αν το επίπεδο των χλωριόντων είναι υψηλό. Η επιφανειακή προστασία του σκυροδέματος μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους και οι συνηθέστερες είναι ο διαποτισμός, η επικάλυψη και η επίστρωση με κονιάματα. [111]

Ένα σύστημα πρόσθετης επιφανειακής προστασίας αποτελείται από ένα υλικό φραγής, την επιφάνεια του υπό προστασία σκυροδέματος, την ίδια την κατασκευή από σκυρόδεμα και τη θεμελίωσή της. Η ποιότητα του σκυροδέματος, κυρίως επάνω και κοντά στην επιφάνειά του, επιδρά στην επίδοση του συστήματος προστασίας, διότι επηρεάζει την ικανότητα του υλικού φραγής να συμπεριφερθεί όπως αναμένεται. Η κατανόηση των συστατικών αυτών είναι ουσιώδης για την εξασφάλιση της βέλτιστης επίδοσης των συστημάτων προστασίας. [112]

Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά διαποτισμού είναι σιλανικής και σιλοξανικής βάσης και είναι και αυτά που επιλέχθηκαν για την παρούσα πειραματική διαδικασία. Τα υλικά αυτής της κατηγορίας έχουν πυριτική βάση και δρουν σαν υδροφοβικοί παράγοντες. Δεν γεμίζουν τους πόρους του σκυροδέματος όπως τα υλικά σφράγισης αλλά αντιδρούν χημικά με το σκυρόδεμα σχηματίζοντας μια υδροφοβική στρώση η οποία αποτρέπει την είσοδο χλωριόντων και νερού αλλά επιτρέπει την εξάτμιση των ατμών. Διαφορετικοί τύποι σκυροδέματος απαιτούν διαφορετικά πάχη επικάλυψης και διαφορετικά υλικά ανάλογα με το πορώδες και τις τριχοειδείς ρωγμές. Πριν από την εφαρμογή απαιτείται κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας ώστε να έχουν απομακρυνθεί σκόνες και έλαια ούτως ώστε να μπορέσει το υλικό διαποτισμού να φτάσει στην επιφάνεια του σκυροδέματος και να αντιδράσουν χημικά. Επαναβαφή συστήνεται κάθε 5 περίπου χρόνια και δεν απαιτείται η απομάκρυνση του προηγούμενου στρώματος. [113] Στα πλεονεκτήματα των υλικών διαποτισμού συγκαταλέγονται η ευκολία εφαρμογής, η δυνατότητα εφαρμογής σε οποιοδήποτε μέρος της δομής κατά τη διάρκεια ή και έπειτα από την κατασκευαστική φάση. Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται το υψηλό κόστος και η σχολαστικότητα καθαρισμού της επιφάνειας που απαιτείται πριν από την εφαρμογή. [114]

3.7. Καθοδική προστασία

Η καθοδική προστασία είναι μια μέθοδος που μπορεί να εφαρμοστεί όπου συμβαίνει ηλεκτροχημική διάβρωση, όπου μπορεί να την εμποδίσει ολοκληρωτικά ή να την διατηρήσει σε γνωστό και αποδεκτό επίπεδο. Αυτό επιτυγχάνεται με μείωση της ταχύτητας της διάβρωσης έως και το μηδενισμό της με την παροχή ηλεκτρονίων στο μέταλλο.

Το δυναμικό του μετάλλου μετατοπίζεται σε πιο αρνητικές τιμές, ώστε να αποτελέσει την κάθοδο ενός ηλεκτρολυτικού κελιού. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι αν το δυναμικό του μετάλλου μετατοπιστεί πολύ αρνητικά, προκαλείται υπερπροστασία με την έννοια των αυξημένων τιμών της ταχύτητας καθοδικής αντίδρασης. Αποτέλεσμα της υπερπροστασίας είναι είτε η αύξηση του pH με δυσμενείς συνέπειες στην αντοχή των χρωμάτων, είτε στην παραγωγή υδρογόνου που προκαλεί ευθραστοποίηση του μετάλλου. [115]

Σκοπός της είναι να επανέλθει η αλκαλικότητα του σκυροδέματος και να αποφευχθεί η ενανθράκωση. Κατά την μέθοδο της καθοδικής προστασίας, φορτίζουμε αρνητικά την εγκατάσταση που θέλουμε να προστατέψουμε. Έτσι ενώ πριν η εγκατάσταση ήταν άνοδος, τώρα γίνεται κάθοδος. Αυτό σημαίνει ότι η εγκατάσταση εξακολουθεί να είναι αρνητικά φορτισμένη, όπως και πριν την εφαρμογή της προστασίας, αλλά η δράση αντιστρέφεται έχει προδιάθεση να πάθει αναγωγή και όχι, όπως αρχικά, οξείδωση. Για να εφαρμοστεί η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθούν, είτε ηλεκτρική τάση από πηγή συνεχούς ρεύματος, είτε θυσιαζόμενοι άνοδοι. Άρα διακρίνονται οι εξής τρόποι:

Σύστημα με εφαρμοζόμενο ρεύμα

Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην σύνδεση του θετικού πόλου μιας πηγής συνεχούς ρεύματος με την επιφάνεια του σκυροδέματος, και του αρνητικού 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.

Στην περίπτωση των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος οι οπλισμοί συνδέονται με τον αρνητικό πόλο μιας εξωτερικής πηγής ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ χρησιμοποιείται μια κατάλληλη άνοδος από αγώγιμο υλικό, καθώς και ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς για τον έλεγχο του συστήματος. Με την εφαρμογή ηλεκτρικού ρεύματος, το ηλεκτρικό δυναμικό του υπό προστασία μετάλλου μετατοπίζεται σε αρνητικές τιμές και έτσι αναστέλλεται ο μηχανισμός-πορεία της διάβρωσης. Το εξωτερικά εφαρμοζόμενο δυναμικό εξαλείφει τόσο την επίδραση των τοπικών γαλβανικών στοιχείων όσο και την επίδραση των μακροστοιχείων. Έτσι οι οξειδωτικές δράσεις δεν πραγματοποιούνται στην επιφάνεια της προς προστασίας κατασκευής αλλά στην άνοδο η οποία υφίσταται την επίδραση των διαβρωτικών παραγόντων. Επομένως η εφαρμογή της καθοδικής προστασίας απαιτεί την ύπαρξη κατάλληλων ανόδων οι οποίες καθορίζουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου [115]. Η διάρκεια εφαρμογής της καθοδικής προστασίας εξαρτάται από τη διάρκεια της ζωής των ανόδων. Εάν είναι δυνατή η ευχερής αλλαγή των ανόδων τότε η διάρκεια της εφαρμογής της καθοδικής προστασίας είναι απεριόριστη και επομένως η διάρκεια της ζωής της μεταλλικής κατασκευής θεωρητικά απεριόριστη. [116]

Σε περίπτωση υπόγειων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος μέσα σε υδατοκορεσμένα εδάφη, τα ρεύματα μειώνονται πολύ γρήγορα και μπορεί να πάρουν τιμές οι οποίες να είναι 1000 φορές μικρότερες από την αρχική τιμή. Σε καλώς αεριζόμενα εδάφη, απαιτούνται μεγάλες τιμές καθοδικού ρεύματος λόγω της μεγάλης διαθεσιμότητας οξυγόνου μέσα στο έδαφος. Σε θαλάσσιες κατασκευές εφαρμόζονται ρεύματα με πυκνότητα από 18 έως 42mA/m². Γρήγορα όμως οι τιμές των ρευμάτων μειώνονται, πιθανώς λόγω των διαφόρων μικροοργανισμών που καταναλώνουν το οξυγόνο.

Η μέθοδος καθοδικής προστασίας με εφαρμοζόμενο ρεύμα παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, όμως δεν λείπουν τα μειονεκτήματα και οι περιορισμοί. Ως μέθοδος προστασίας έχει το πλεονέκτημα ότι μπορούν να δοθούν ποικίλες τιμές ρεύματος ώστε να αναστελούν πλήρως την διάβρωση του χάλυβα. Μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε καινούριες όσο και σε παλιές κατασκευές, ενώ με κατάλληλη επιλογή ανόδων ο χρόνος προστασίας είναι εξαιρετικά μεγάλος (άνω των 100 χρόνων).

Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι το σύστημα είναι δυνατόν να υπόκειται σε διακοπές ρεύματος, έτσι καθίσταται απαραίτητος ο τακτικός έλεγχος και η ρύθμισή του από εξειδικευμένο προσωπικό. Επίσης η καθοδική προστασία με εφαρμοζόμενο ρεύμα δεν μπορεί να εφαρμοσθεί εύκολα στην περίπτωση των προεντεταμένων χαλύβων λόγω του κινδύνου της ψαθυροποίησης.

Τέλος θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ηλεκτρική συνέχεια όλου του οπλισμού και στην σωστή τοποθέτηση των ανόδων ώστε να μην υπάρχει ηλεκτρικά αγώγιμη επαφή μεταξύ οπλισμού και ανόδων. Επίσης θα πρέπει να γίνει προσεκτική και κατάλληλη τοποθέτηση των ηλεκτροδίων αναφοράς για τον έλεγχο της εύρυθμης λειτουργίας του συστήματος. [117]

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

Πλεονεκτήματα

- Μεγάλη διάρκεια ζωής των ανόδων άρα όχι συχνή αντικατάσταση
- Πλήρης αναστολή της διάβρωσης του χάλυβα εφαρμόζοντας ποικίλες τιμές ρεύματος
- 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)

Μειονεκτήματα

- Απαιτεί συχνή ρύθμιση και προσαρμογή (πιθανή διακοπή ρεύματος, διακύμανση ιδιοτήτων διαβρωτικού περιβάλλοντος)
- Ακριβότερη (χρησιμοποίηση δαπανηρότερων δυναμοστατών σε διαβρωτικό περιβάλλον με μεγάλες διακυμάνσεις των ιδιοτήτων του)
- Αλληλεπιδρά με γειτονικές εγκαταστάσεις προκαλώντας τους διάβρωση
- Πρέπει να γίνεται σωστή εκλογή των ορίων τιμών της καθοδικής τάσης με προηγούμενη εργαστηριακή έρευνα
- Δεν μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα στην περίπτωση προεντεταμένων χαλύβων, λόγω του κινδύνου της ψαθυροποίησης από έκλυση υδρογόνου, εκτός αν χρησιμοποιηθούν κατάλληλοι αυτοματισμοί περιορισμού της μεταβλητότητας του εφαρμοζόμενου ρεύματος (κατάλληλα ηλεκτρόδια μη βλαπτικά για τον σπλισμό του σκυροδέματος).
- Για την πραγματοποίηση αυτής της μεθόδου πρέπει να βρεθεί ένα σταθερό υλικό άνοδος, που θα μπορεί να καταναίμει το ρεύμα καθοδικής προστασίας σε μεγάλες επιφάνειες.



Εικόνα 3. 1 Εφαρμογή της καθοδικής προστασίας με εξωτερικά εφαρμοζόμενο ρεύμα σε γέφυρα

Εφαρμόζεται πολύ περισσότερο σε σχέση με την μέθοδο θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων, ιδιαίτερα για την προστασία σωλήνων μέσα στο έδαφος σε γλυκό ή θαλασινό νερό, σε κατασκευές πλωτών και μη , μέσα στη θάλασσα, σε πλοία. [118]

Εφαρμογή καθοδικής προστασίας

Η καθοδική προστασία είναι η μόνη μέθοδος η οποία μπορεί να εγγυηθεί πολύ μεγάλο χρόνο ζωής σε κατασκευές από σκυρόδεμα καθώς είναι η μοναδική που μπορεί να αναστείλει και να αντιστρέψει το δυναμικό διάβρωσης, μηδενίζοντας θεωρητικά την ταχύτητα της διάβρωσης. Άρχισε να εφαρμόζεται το 1900-1910 για την προστασία αγωγών στο έδαφος και μεταλλικών κατασκευών. Συνίσταται στην εφαρμογή δυναμικού αντίθετου με αυτό της διάβρωσης ώστε η μεταλλική κατασκευή να γίνει κάθοδος ενός ηλεκτρολυτικού κελιού. Με αυτόν τον τρόπο δεν είναι πλέον δυνατή η διεξαγωγή αντιδράσεων οξειδωσης των μετάλλων, αλλά αντιθέτως είναι δυνατή η πραγματοποίηση αντιδράσεων αναγωγής. Το δυναμικό του συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο απαιτεί η καθοδική προστασία εφαρμόζεται με δύο τρόπους, με την επιβολή τάσεων από μια πηγή συνεχούς ρεύματος και με τη χρησιμοποίηση ενός μετάλλου ή κράματος υψηλότερου δυναμικού από αυτό που θα προστατευθεί. Στο οπλισμένο σκυρόδεμα η καθοδική προστασία μπορεί να εφαρμοστεί και με τους δύο τρόπους. Για λόγους ευκολίας όμως χρησιμοποιείται η εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση (πρώτη μέθοδος). Σε αυτή ο αρνητικός όλος της πηγής συνδέεται με τον οπλισμό, ενώ ο θετικός με την κατάλληλη άνοδο. Τα εξωτερικά εφαρμοζόμενο δυναμικό μηδενίζει την επίδραση των τοπικών γαλβανικών στοιχείων αλλά και την επίδραση των μακροστοιχείων. Στην επιφάνεια του χάλυβα δεν είναι πλέον δυνατή η διεξαγωγή οξειδωτικών δράσεων παρά μόνο αναγωγικών. Η διάρκεια εφαρμογής της μεθόδου στο οπλισμένο σκυρόδεμα εξαρτάται από τη διάρκεια ζωής της ανόδου, και αυτό γιατί η αντικατάστασή της, όταν αυτή βρίσκεται μέσα στο σκυρόδεμα, είναι δύσκολη. Ο λόγος που συνήθως εγκιβωτίζουμε την άνοδο στο οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ότι έτσι έχουμε καλύτερα αποτελέσματα. Εκτός, τοποθετείται μόνο στα θεμέλια ή σε τμήματα της κατασκευής που βρίσκονται μέσα στη θάλασσα. Αυτό καθορίζεται από παράγοντες όπως το υλικό κατασκευής της ανόδου, τη διαβρωτικότητα του περιβάλλοντος και την τιμή του εφαρμοζόμενου δυναμικού. Η διάρκεια ζωής της καθοδικής προστασίας εξαρτάται από την διάρκεια ζωής των ανόδων. Τα διάφορα είδη ανόδων που υπάρχουν είναι:

- Άνοδοι με μορφή πλέγματος
- Αγωγή χρώματα
- Αγωγή κονιάματα
- Άνοδοι μεταλλικού επιστρώματος
- Μεμονωμένες εσωτερικές άνοδοι

Στην καθολική προστασία χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια αναφοράς για τη ρύθμιση του δυναμικού και τον έλεγχο της καλής λειτουργίας. Αυτά που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι τα εξής : το ηλεκτρόδιο χαλκού / θεικού χαλκού, το ηλεκτρόδιο καλομέλανα και το ηλεκτρόδιο αργύρου / χλωριούχου αργύρου. Στο οπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται το ηλεκτρόδιο αργύρου / χλωριούχου αργύρου. Οι μετασχηματιστές - ανορθωτές της καθοδικής προστασίας του οπλισμένου σκυροδέματος είναι συνήθως μονοφασικοί με πλήρη ανόρθωση.

Το κόστος της καθοδικής μεθόδου σε πρώτη προσέγγιση μπορεί να είναι από 60€/m² με άνοδο από αγωγή χρώματα μέχρι 100€/m² με ανόδους από πλέγμα τιτάνιου. Το κόστος αυτό περιλαμβάνει όλα τα έξοδα για την καθοδική προστασία. Η καθοδική προστασία έχει εφαρμοστεί σε νοσοκομείο της Αθηνάς. Η συνολική προστατευμένη επιφάνεια ανέρχεται σε 1000m². Απαιτήθηκαν 650m² ανόδων πέλματος τιτάνιου, 600m ελάσματος τιτάνιου για τη σύνδεση των ανόδων , τρία ηλεκτρόδια αναφοράς και τρεις μετασχηματιστές ανορθωτές . Το συνολικό κόστος ανήλθε σε 60€/m². Μέχρι τώρα αναφέρθηκαν μέθοδοι οι οποίες εφαρμόζονται στην περίπτωση που η διάβρωση δεν έχει προχωρήσει πολύ. Αν όμως η διάβρωση είναι εκτεταμένη σε βαθμό που να μειώνει την αντοχή του στοιχείου και της κατασκευής, τα παραπάνω μέτρα δεν αρκούν, αλλά χρειάζεται να γίνει ενίσχυση του στοιχείου (μανδύες). [117]

Για να προταθούν μέτρα για την αντιμετώπιση της διάβρωσης θα πρέπει να είναι γνωστή η παρουσία χλωριόντων, το βάθος ενανθράκωσης, η διάβρωση του χάλυβα και την αντίστοιχη απώλειά του λόγω αυτή, τη διαπερατότητα και την υγρασία του σκυροδέματος. Για νέες κατασκευές η αύξηση του πάχους της επικάλυψης των οπλισμών με σκυρόδεμα και η μείωση του πορώδους του τελευταίου μέσω κατάλληλης σύνθεσης, είναι σίγουρα οικονομικότερη και ασφαλέστερη λύση από οποιοδήποτε προϊόν προστασίας από διάβρωση.

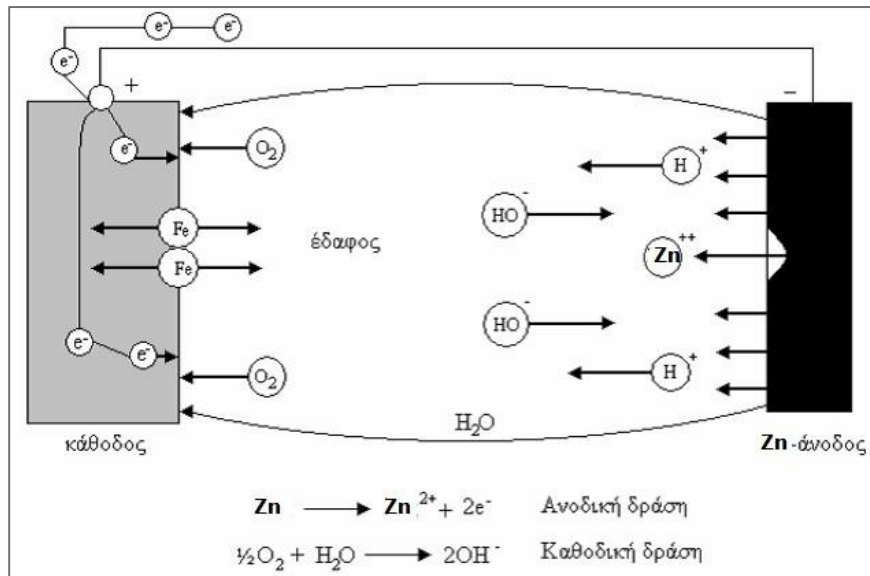
Καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους

Βασίζεται στη δημιουργία γαλβανικού κελιού μεταξύ του μετάλλου που λειτουργεί ως κάθοδος και της θυσιαζόμενης ανόδου που είναι από υλικό πιο ανοδικό σε σχέση με το μέταλλο (Σχ.3.9).

Η μέθοδος καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενες ανόδους παρουσιάζει το πλεονέκτημα της εύκολης εγκατάστασης και την ελάχιστη έως ασήμαντη συντήρηση. Όμως η καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους μειονεκτεί σε σχέση με την καθοδική προστασία με εξωτερικά εφαρμοζόμενο ρεύμα, γεγονός που οφείλεται στην μικρή διάρκεια ζωής των ανόδων, τον μεγάλο αριθμό ανόδων που απαιτείται για να εξασφαλιστεί προστασία στο σύνολο των οπλισμών και στις δυσκολίες που προκύπτουν από την συχνή αντικατάστασή τους. Η αντικατάσταση των ανόδων γίνεται σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, συνήθως 20-25 χρόνια . [119]

Τέλος ως μειονέκτημα αναφέρεται και η περιορισμένη δυνατότητα επιλογής ανόδων καθώς ο χάλυβας που χρησιμοποιείται κατά κόρον στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος έχει μικρό δυναμικό διάβρωσης. Ως θυσιαζόμενες άνοδοι χρησιμοποιούνται συνήθως άνοδοι ψευδαργύρου υπό μορφή πλέγματος ή μεμονωμένων ανόδων.

Κατά αυτόν τον τρόπο καθοδικής προστασίας τοποθετείται στους οπλισμούς σειρά πλακών από μέταλλο ανοδικότερο του χάλυβα, το οποίο λειτουργεί ως θυσιαζόμενη άνοδος. Οι πλάκες αυτές συνδέονται με την κατασκευή χωριστά ή καθεμία με τη βοήθεια εξωτερικά μονωμένων αγωγών και με την παρεμβολή αντίστασης. Τα ανοδικότερα αυτά μέταλλα 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. Όμως, τα μέταλλα αυτά έχουν μεγαλύτερη προδιάθεση να διαβρωθούν (είναι ανοδικότερα) και για το λόγο αυτό φορτίζονται περισσότερο αρνητικά ως προς το περιβάλλον από ότι ο χάλυβας. Έτσι ο χάλυβας φορτίζεται θετικά ως προς τα μέταλλα αυτά. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα γαλβανικό στοιχείο με αρνητικό πόλο το μέταλλο και θετικό το χάλυβα. Επιβάλλεται δηλαδή στο χάλυβα από τα ανοδικότερα αυτά μέταλλα ένα αντίστροφο δυναμικό, από το δυναμικό διάβρωσής του (ηλεκτρόνια ρέουν από την πλάκα του μετάλλου προς το χάλυβα). Ταυτόχρονα, εξ αιτίας του γαλβανικού στοιχείου που δημιουργήθηκε, το ανοδικότερο μέταλλο οξειδώνεται (απώλεια ηλεκτρονίων, σχηματισμός ιόντων) και καταναλίσκεται περισσότερο παρά αν ήταν μόνο του. Θυσιάζεται δηλαδή για την προστασία της κατασκευής. [120]



Σχήμα 3. 6 Καθοδική Προστασία με άνοδο Zn

Πλεονεκτήματα

- Εύκολη εγκατάσταση
- Ασήμαντη συντήρηση
- Χρήση και σε προεντεταμένο σκυρόδεμα
- Δεν απαιτούν την ύπαρξη πηγής για παροχή εξωτερικού ρεύματος
- Χρήσιμα για τοπική προστασία σε μία κατασκευή
- Δύσκολο σχετικά να δημιουργήσουν αλληλεπιδράσεις με γειτονικές κατασκευές

Μειονεκτήματα

- 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).
- Απαιτείται μεγάλος αριθμός ανόδων για την προστασία όλων των οπλισμών
- Μη επαρκής έλεγχος της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος (εξαρτάται από περιβαλλοντικές συνθήκες).

4. Μέθοδοι εκτίμησης της διάβρωσης οπλισμένου σκυροδέματος

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνήθηκαν μέσω διάφορων πρότυπων μεθόδων και τεχνικών οι ιδιότητες και η ανθεκτικότητα των συνθέσεων που δοκιμάστηκαν με νέα σύνθετα υλικά και μεθόδους. Οι αρχές λειτουργίας των μεθόδων καθώς και η διαδικασία που ορίζεται από την κάθε μέθοδο για την πραγματοποίηση των μετρήσεων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

4.1. Ηλεκτροχημικές Μετρήσεις Αποτίμησης της Διάβρωσης

Οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι βασίζονται στην ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης και μετρούν τις ηλεκτρικές ιδιότητες της ηλεκτρισμένης διπλοστοιβάδας (δηλαδή της διεπιφάνειας μετάλλου-διαλύματος) τόσο για τη διερεύνηση του μηχανισμού διάβρωσης όσο και για τη παρακολούθηση και τον έλεγχο του στην πράξη.

Τα πλεονεκτήματα αυτών των μεθόδων είναι τα εξής:

- Επιτρέπουν την μέτρηση της ταχύτητας διάβρωσης με γρήγορο και όχι καταστρεπτικό τρόπο
- Σε ιδανικές συνθήκες εφαρμογής μετρούν με μεγάλη ακρίβεια πολύ χαμηλές ταχύτητες διάβρωσης
- Χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ταχύτητας διάβρωσης κατασκευών που δεν μπορούν να μελετηθούν με πειράματα απώλειας βάρους (π.χ. Θαμμένοι σωλήνες)
- Επιτρέπουν την μελέτη του μηχανισμού της δράσης της διάβρωσης. [121]

Μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι οι μετρήσεις κρατούν λίγο χρόνο γενικά και έτσι δεν λαμβάνουν υπόψη τους τις πιθανές επιδράσεις μακράς διάρκειας (π.χ. σχηματισμός προστατευτικών αποθεμάτων).

Οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι με την μεγαλύτερη εφαρμογή είναι οι παρακάτω:

- Δυναμικό διάβρωσης και η χρονική εξέλιξή του
- Καμπύλες πόλωσης
- Ηλεκτροχημική Φασματοσκοπία Σύνθετης Αντίστασης

4.1.1. Δυναμικό διάβρωσης

Το δυναμικό διάβρωσης ή το δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος προσδιορίζεται από το άθροισμα των συνολικών ηλεκτροχημικών δράσεων οξειδωσης και αναγωγής σαν αποτέλεσμα της διαδικασίας της διάβρωσης. Είναι μια ποιοτική μέθοδος, μη καταστροφική που δείχνει την προδιάθεση για διάβρωση, όχι όμως και την ταχύτητα της. Για τον προσδιορισμό του μετράται η διαφορά δυναμικού του μετάλλου ως προς ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς (κορεσμένου καλομέλανα, Ag/AgCl), με απλό ή ψηφιακό βολτόμετρο. Η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης παρέχει διάφορες πληροφορίες, όπως για το ποιο μέταλλο θα είναι ανοδικό στην περίπτωση γαλβανικής σύνδεσης, ή για την επίδραση μικροσκοπικών ετερογενειών στο μέταλλο (μέτρηση E_{corr} σε ορισμένες περιοχές της μεταλλικής επιφάνειας με μικροηλεκτρόδια), ή για τις πιθανές θέσεις των ανοδικών περιοχών σε ένα θαμμένο σωλήνα [122]. Το δυναμικό διάβρωσης εξαρτάται από τον τύπο του μετάλλου, τις συνθήκες περιβάλλοντος έκθεσης (υγρασία, pH, συγκέντρωση αλάτων), τη διαθεσιμότητα σε οξυγόνο, τα επαγόμενα ρεύματα και από τη

θερμοκρασία. Δίνει πληροφορίες για την σχετική τάση διάβρωσης μεταξύ διαφόρων μετάλλων, ενώ η χρονική εξέλιξη του αποκαλύπτει την προδιάθεση είτε μειωμένης διάβρωσης (π.χ. σχηματισμός προστατευτικού οξειδίου) όταν μετατοπίζεται ηλεκτροθετικά, είτε αυξημένης διάβρωσης όταν μετατοπίζεται ηλεκτροαρνητικά με την πάροδο του χρόνου. [123]

Πίνακας 4. 1 Συσχέτιση μεταξύ των τιμών του δυναμικού χαλύβδινου οπλισμού και της κατάστασης του σκυροδέματος.

Διαφορά δυναμικού χάλυβα Ο.Σ. ως προς $Cu/CuSO_4, sat$ [mV]	Κατάσταση σκυροδέματος
$\Delta V > -1100$	Υγρό σκυρόδεμα χωρίς διαθεσιμότητα σε οξυγόνο
$\Delta V > -600$	Υγρασία, σκυρόδεμα με χλωριόντα
$0 < \Delta V < + 200$	1. Ύπαρξη υγρασίας, σκυρόδεμα χωρίς χλωριόντα
	2. Ύπαρξη υγρασίας, σκυρόδεμα ενανθρακωμένο
	3. Ξηρό και ενανθρακωμένο σκυρόδεμα
	4. Ξηρό σκυρόδεμα

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-15: «Standard test method for Half Cell Potentials of reinforcing Steel in Concrete», οι τιμές του μετρούμενου δυναμικού διάβρωσης, αποτελούν ένδειξη για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο οπλισμός στο σκυρόδεμα (Πίνακα 4.2):

Πίνακας 4. 2 Συσχέτιση μεταξύ των τιμών του δυναμικού χαλύβδινου οπλισμού και της κατάστασης του οπλισμού στο σκυρόδεμα, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-15 [124]

Δυναμικό διάβρωσης χάλυβα ΟΣ ως προς $Cu/CuSO_4, sat$ [mV]	Κατάσταση οπλισμού
$E_{corr} > -200 mV_{CSE}$	Ο οπλισμός βρίσκεται στην παθητική κατάσταση (δεν διαβρώνεται), με 90% πιθανότητα
$-200 mV_{CSE} > E_{corr} > -350 mV_{CSE}$	Κατάσταση οπλισμού αβέβαιη
$E_{corr} < -350 mV_{CSE}$	Ο οπλισμός βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση (διαβρώνεται), με 90% πιθανότητα

Ηλεκτρόδια Αναφοράς

Είναι πάντα απαραίτητο να αναφέρεται το είδος του ηλεκτροδίου αναφοράς που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης. Συνήθως στην πράξη χρησιμοποιούνται τα ηλεκτρόδια που αναφέρονται στον Πίνακα 4.3, όπου δίνεται και η τιμή τους έναντι του πρότυπου ηλεκτροδίου του υδρογόνου (SHE). [125]

Πίνακας 4.3 Συνήθη ηλεκτρόδια αναφοράς για μετρήσεις δυναμικού διάβρωσης

Ηλεκτρόδιο	Ονομασία	Δυναμικό έναντι πρότυπου ηλεκτροδίου υδρογόνου
Κεκορεσμένου χαλκού/θειικού χαλκού	CSE	+ 0,318 vs SHE
Κεκορεσμένου καλομέλανα (Hg/Hg ₂ Cl ₂) KCl	SCE	+ 0,241 vs SHE
Χλωριούχου αργύρου (Ag/AgCl) KCl	SSCE	+ 0,199 vs SHE

Για επί τόπου μετρήσεις χρησιμοποιείται κυρίως το ηλεκτρόδιο κεκορεσμένου χαλκού/θειικού χαλκού εξαιτίας του ότι είναι το πιο ανθεκτικό και λόγω του ότι παρέχει μεγάλη ακρίβεια και επαναληψιμότητα στις μετρήσεις. Αυτό προτιμήθηκε και στη διενέργεια των ελέγχων δυναμικού διάβρωσης των δοκιμίων στην παρούσα διατριβή. Τα υπόλοιπα δύο ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται κυρίως σε εργαστηριακή κλίμακα.

Καμπύλες πόλωσης

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

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

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

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

Και για ένα ενεργό (μη παθητικό) μέταλλο:

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

Για τη μέτρηση των απόλυτων ταχυτήτων διάβρωσης χρησιμοποιούνται δύο συγκεκριμένες τεχνικές λήψης των καμπυλών πόλωσης: η τεχνική της γραμμικής πόλωσης και η τεχνική προεκβολής του Tafel [32]. Παρακάτω περιγράφεται πιο αναλυτικά η τεχνική γραμμικής πόλωσης.

Τεχνική γραμμικής πόλωσης

Οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις βασίζονται στην ηλεκτροχημική φύση της διάβρωσης και μετρούν τις ηλεκτρικές ιδιότητες της ηλεκτρισμένης διπλοστοιβάδας, δηλαδή της διεπιφάνειας μετάλλου / διαλύματος. Επιτρέπουν τη διερεύνηση του μηχανισμού της διάβρωσης, την παρακολούθηση και τον έλεγχό της. Η κινητική των ηλεκτροχημικών δράσεων ενός μετάλλου το οποίο διαβρώνεται μπορεί να προσδιοριστεί από τουλάχιστον τρεις παραμέτρους, όπως πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης i_{corr} , δυναμικό διάβρωσης E_{corr} και σταθερές Tafel. Οπότε η συμπεριφορά του μετάλλου μπορεί να απεικονιστεί από τις καμπύλες πόλωσης ($E - I$). Η εκτίμηση των παραπάνω παραμέτρων οδηγεί στον προσδιορισμό της αντίστασης πόλωσης R_p και του ρυθμού διάβρωσης [126]. Η τεχνική της Γραμμικής Πόλωσης συνίσταται στη σάρωση του δυναμικού σε μια περιοχή πόλωσης ± 20 mV από το δυναμικό διάβρωσης και την καταγραφή του αντίστοιχου ρεύματος. Η ταχύτητα σάρωσης είναι 0,176mV/s

Πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι :

- η ταχύτητά της : είναι επομένως πολύ χρήσιμη ιδιαίτερα για μικρότερης ακρίβειας πειράματα, όπως για παράδειγμα η ποιοτική εκτίμηση διαφόρων αναστολέων
- είναι μη καταστρεπτική μέθοδος : επειδή η πόλωση που εφαρμόζεται είναι μικρή, η επιφάνεια του δοκιμίου δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα
- μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ακριβείς μετρήσεις πολύ μικρών ποσοστών διάβρωσης (corrosion rate) (μικρότερων από 0,1 mpy) που είναι δύσκολο να πραγματοποιηθούν με συμβατικές τεχνικές απώλειας βάρους ή τεχνικές αναλυτικής χημείας. Η μέτρηση χαμηλών ποσοστών διάβρωσης είναι ιδιαίτερα σημαντική σε πυρηνικές, φαρμακευτικές και σε βιομηχανίες τροφίμων όπου ακόμα και ίχνη ακαθαρσιών και μόλυνσης αποτελούν πρόβλημα.
- οι μετρήσεις του ποσοστού διάβρωσης που προκύπτουν από την τεχνική αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές που δεν μπορούν να ελεγχθούν οπτικά ή να υποβληθούν σε δοκιμές απώλειας βάρους, όπως για παράδειγμα υπόγειοι αγωγοί και δεξαμενές ή τμήματα μεγάλων χημικών εγκαταστάσεων (εργοστασίων).
- οι ωμικές πτώσεις τάσης είναι αμελητέες

4.1.2. Διαπερατότητα χλωριόντων κατά ASTM C1202

Η μέθοδος ASTM C1202 [127] είναι μια επιταχυνόμενη μέτρηση διαπερατότητας χλωριόντων στο σκυροδέμα. Σκοπός της μεθόδου είναι η εκτίμηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος, η οποία μπορεί να αποτελέσει μια άμεση ένδειξη της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος στη διείσδυση χλωριόντων. Η πειραματική διαδικασία τη μεθόδου αποτελείται από τρία βήματα:

Βήμα 1^ο: Προετοιμασία δοκιμών διαστάσεων Φ95 x 50mm και τοποθέτησή τους σε θάλαμο κενού. Τα δοκίμια εντός του θαλάμου και ενώ βρίσκονται υπό κενό, πληρώνονται με απαερισμένο νερό. Ακολουθεί διακοπή του κενού και παραμονή των δοκιμών στο νερό για 18 ± 2 ώρες.

Βήμα 2^ο: Τα δοκίμια αφού προετοιμαστούν, τοποθετούνται στη συσκευή μέτρησης. Τα διαλύματα που τοποθετούνται στην άνοδο και την κάθοδο του κελιού είναι 0.3N καυστικό νάτριο (NaOH) και 3% w/v χλωριούχο νάτριο (NaCl) αντίστοιχα. Οι συνθήκες υπό τις οποίες διεξάγεται η μέτρηση είναι:

- 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 διαλυμάτων. [32]

Βήμα 3^ο: Αφού η μέτρηση ολοκληρωθεί, σημειώνεται η τελική τιμή του ρεύματος και της θερμοκρασίας. Έπειτα, εφαρμόζοντας τις τιμές του ρεύματος που έχουν καταγραφεί στην Εξίσωση 4.1, υπολογίζεται το συνολικό φορτίο που πέρασε μέσα από το δοκίμιο.

$$Q = 900 \cdot (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad (4.1)$$

όπου:

Q: Το συνολικό φορτίο που πέρασε μέσα από το δοκίμιο κατά τη διάρκεια της μέτρησης (Coulomb).

I_0 : Η ένταση του ρεύματος που καταγράφηκε τη στιγμή που εφαρμόστηκε τάση 60 Volt στο δοκίμιο (Ampere).

I_t : Η ένταση του ρεύματος που καταγράφηκε σε χρονικό διάστημα t (min) από τη στιγμή που εφαρμόστηκε στο δοκίμιο τάση 60 Volt (Ampere).

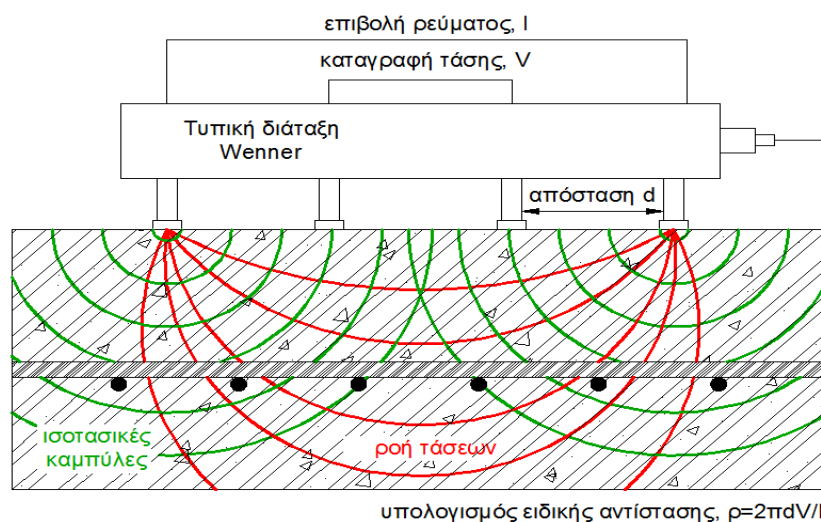
Συγκρίνοντας την τιμή του φορτίου που υπολογίστηκε με αυτές που δίνονται στον Πίνακα 4.4, εκτιμάται το μέγεθος της διαπερατότητας σε χλωριόντα που εμφανίζει το δείγμα. [127]

Πίνακας 4. 4 Ερμηνεία αποτελεσμάτων δοκιμής διαπερατότητας χλωριόντων

Διαπερνών Φορτίο (Coulomb)	Διαπερατότητα Χλωριόντων
>4000	Υψηλή
2000 - 4000	Μέτρια
1000 - 2000	Χαμηλή
100 - 1000	Πολύ Χαμηλή
<100	Αμελητέα

4.1.3. Ηλεκτρική αντίσταση σκυροδέματος

Από τους Ma και Dawalidi έγινε σύγκριση μεταξύ των δύο συνηθέστερων μεθόδων μέτρησης της ειδικής αντίστασης, του Wenner και του Schlumberger [128]. Οι αποστάσεις που τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια αλλάζει προκειμένου να εξαχθούν τα ζεύγη των μετρήσεων. Με την μέθοδο μέτρησης του Schlumberger, τα δύο μεσαία ηλεκτρόδια παραμένουν σταθερά και μετακινούνται μόνο τα δύο ακραία, ενώ με την μέθοδο του Wenner αλλάζουν θέση όλα τα ηλεκτρόδια διατηρώντας πάντα ίση απόσταση μεταξύ τους. Προφανές συμπέρασμα είναι ότι απαιτείται λιγότερη χειρωνακτική εργασία για τις μετρήσεις με τη μέθοδο Schlumberger, όμως στην περισσότερη βιβλιογραφία τα διαθέσιμα πειράματα έχουν γίνει σύμφωνα με την μέθοδο Wenner [129]. Ο κύριος λόγος που οδήγησε τους περισσότερους ερευνητές να χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο είναι ότι επηρεάζεται λιγότερο από τα φαινόμενα αλλοίωσης του σήματος (π.χ. Θόρυβος). Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε η μέθοδο Wenner στην λήψη των μετρήσεων αντίστασης, προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά των δοκιμών [130]. Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7.2.



Σχήμα 4.1 Σύστημα μέτρησης των τεσσάρων ηλεκτροδίων του Wenner

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται το σύστημα μέτρησης τεσσάρων ηλεκτροδίων Wenner [131]. Στο σύστημα τα τέσσερα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα σε μία ευθεία γραμμή σε ίση απόσταση μεταξύ τους που συμβολίζεται με a . Οι ημισφαιρικοί αγωγοί μπορούν να θεωρηθούν ως ηλεκτρόδια που είναι βυθισμένα στο έδαφος και η επίπεδη επιφάνειά τους εφάπτεται στο επίπεδο του εδάφους. Το εξωτερικό ζευγάρι των ηλεκτροδίων είναι αυτά του ρεύματος, στο ένα απ' τα οποία το ρεύμα κατευθύνεται προς τη γη και επιστρέφει, δια μέσου της, στο άλλο. Το εσωτερικό ζευγάρι των ηλεκτροδίων είναι αυτό της τάσης και μετράει την αύξηση του δυναμικού της γης ή την τάση ανάμεσα σ' αυτά τα δύο σημεία. [132]

4.2. Μετρήσεις ιδιοτήτων που σχετίζονται άμεσα με την αποτίμηση της αντιδιαβρωτικής συμπεριφοράς

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνήθηκαν μέσω διάφορων πρότυπων μεθόδων και τεχνικών εκτός από τους προαναφερθέντες ηλεκτροχημικούς ελέγχους και εργαστηριακούς έλεγχοι των ιδιοτήτων των συνθέσεων που σχετίζονται άμεσα με την αντιδιαβρωτική τους συμπεριφορά. Οι αρχές λειτουργίας των μεθόδων καθώς και η διαδικασία που ορίζεται από την κάθε μέθοδο για την πραγματοποίηση των μετρήσεων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

4.2.1. 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. Κατά τη μέθοδο που ορίζει το πρότυπο EN 12390-8, ένα κυβικό δοκίμιο στερεώνεται κατάλληλα σε διάταξη όπου ταυτόχρονα εισέρχεται νερό υπό πίεση από την άνω επιφάνεια του [133]. Στη συνέχεια εφαρμόζεται σταθερή πίεση 5 bars για 72 ώρες όπως ακριβώς ορίζει το πρότυπο. Μετά την εφαρμογή της πίεσης για τον προκαθορισμένο χρόνο, το δοκίμιο αφαιρείται από τη συσκευή. Η περιοχή στην οποία εφαρμόστηκε η πίεση του νερού σκουπίζεται με προσοχή για να απομακρυνθεί η περίσσεια νερού. Το δείγμα στη συνέχεια χωρίζεται στο μέσο, κάθετα στην επιφάνεια στην οποία εφαρμόστηκε η πίεση του νερού. Όταν η επιφάνεια στεγνώσει σε τέτοιο βαθμό ώστε να διακρίνεται το μέτωπο διείσδυσης του νερού, το μέγιστο βάθος που έχει διεισδύσει το νερό στο δοκίμιο καταγράφεται με ακρίβεια χιλιοστού. Το βάθος διείσδυσης καθορίζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$P = \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_n}{n} \quad (4.2)$$

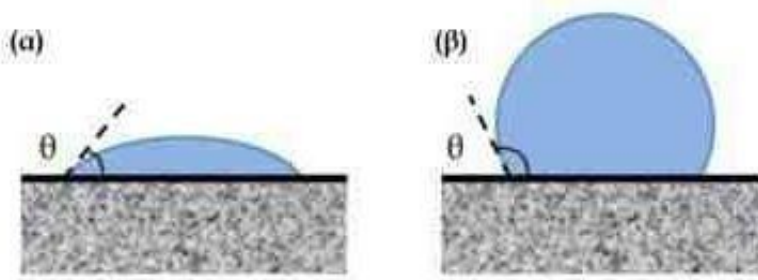
όπου P είναι το μέσο βάθος, το D_n είναι το βάθος των δειγμάτων δοκιμής σε mm και το n είναι ο αριθμός των δειγμάτων. Βασική προϋπόθεση για τις επιτυχημένες μετρήσεις είναι κατά τη διάρκεια της δοκιμής να διατηρείται σταθερή η πίεση αλλά και να γίνεται συστηματικός έλεγχος για διαρροή νερού [134].

4.2.2. Μέτρηση επιφανειακής απορρόφησης

Ως επιφανειακή απορρόφηση ορίζεται ο ρυθμός της ροής ύδατος στο σκυρόδεμα μέσω της επιφάνειάς του ανά μονάδα επιφάνειας για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα από την έναρξη της και για συγκεκριμένη υδροστατική πίεση και θερμοκρασία [135]. Σκοπός της μέτρησης της επιφανειακής απορρόφησης είναι η εκτίμηση της επιφανειακής διαπερατότητας του σκυροδέματος μέσω του υπολογισμού της απορρόφησης ύδατος της επιφάνειας σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Η απορρόφηση ύδατος της επιφάνειας σχετίζεται άμεσα με το επιφανειακό πορώδες, το οποίο επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες της επιφάνειας αλλά και την ανθεκτικότητα ολόκληρης της κατασκευής. Τα χλωριόντα στο εσωτερικό του σκυροδέματος κινούνται μέσω του νερού με τρεις τρόπους: μέσω της διάχυσης, μέσω της τριχοειδούς απορρόφησης και μέσω της διείσδυσης υπό πίεση. Η διάχυση προκαλείται από τη συγκέντρωση ποσότητας νερού στους πόρους του σκυροδέματος. Η τριχοειδής απορρόφηση προκαλείται από την επιφανειακή πίεση. Κατά τη διείσδυση, η μεταφορά του νερού εξαρτάται από παράγοντες όπως η διασύνδεση των πόρων και η κατανομή του μεγέθους τους. Μελέτες δείχνουν ότι ο αναστολέας διμεθυλαιθανολαμίνη (AMA) ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα μπορεί να μειώσει τα ιόντα χλωρίου στην επιφάνεια μιας ράβδου και να σχηματίσει ένα σταθερό προστατευτικό στρώμα [122], [136]. Ωστόσο, η πραγματική συγκέντρωση του AMA που φτάνει στο βάθος των χαλύβδινων ράβδων είναι σχετικά χαμηλή. Σε πολλές περιπτώσεις η μεμβράνη δεν μπορεί να σχηματιστεί. Η πειραματική διαδικασία για τον προσδιορισμό της τριχοειδούς απορρόφησης νερού των συνθέσεων πραγματοποιείται κατά το πρότυπο BS 1881 [137].

4.2.3. Ποροσιμετρία Υδραργύρου

Η ποροσιμετρία υδραργύρου είναι μία μέθοδος ευρέως διαδεδομένη όσον αφορά τον υπολογισμό του πορώδους υλικών όπως το σκυρόδεμα.. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου βασίζεται στην εισαγωγή υδραργύρου υπό υψηλή πίεση στο εσωτερικό του υλικού και αφού πρώτα έχει επιτευχθεί κενό στο περιβάλλον και κυρίως στους πόρους του υλικού [138]. Ο υδράργυρος έχει υψηλή επιφανειακή τάση και ως εκ τούτου χαρακτηρίζεται ως μη διαβρέχον υγρό σε σχέση με στερεά. Σε γενικές γραμμές, η διαβροχή ενός στερεού από ένα υγρό συμβαίνει όταν οι δυνάμεις συνάφειας στερεού– υγρού είναι μεγαλύτερες των δυνάμεων συνοχής. Το νερό σχηματίζει γωνία επαφής μεταξύ 20° και 30° με τα περισσότερα υλικά που διαβρέχει ενώ ο υδράργυρος έχει γωνία επαφής μεγαλύτερη των 90° και επομένως δε θεωρείται ότι διαβρέχει τα στερεά (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4. 2 Γωνία επαφής υγρού και στερεού για (α): Διαβρέχον υγρό και (β): Μη διαβρέχον υγρό.

Τα δεδομένα για την πορώδη δομή του υλικού που μετράται προκύπτουν από την καταγραφή του όγκου του υδραργύρου που εισέρχεται στο υλικό συναρτήσει της πίεσης. Χάρη στην εξίσωση του Washburn είναι δυνατόν να συσχετισθεί η πίεση με το μέγεθος του πόρου. Η Εξίσωση 4.3 δείχνει αυτήν τη συσχέτιση.

$$P = -2K \times \frac{\cos \phi}{r} \quad (4.3)$$

όπου:

P: Η πίεση (kg/cm^2) που θα πρέπει να ασκηθεί σ' έναν κυλινδρικό πόρο ακτίνας r (\AA) προκειμένου να εισέλθει υδράργυρος.

K: Η επιφανειακή τάση του υδραργύρου (0.48 N/m στου $25 \text{ }^\circ\text{C}$).

ϕ : Η γωνία επαφής του υδραργύρου (141°).

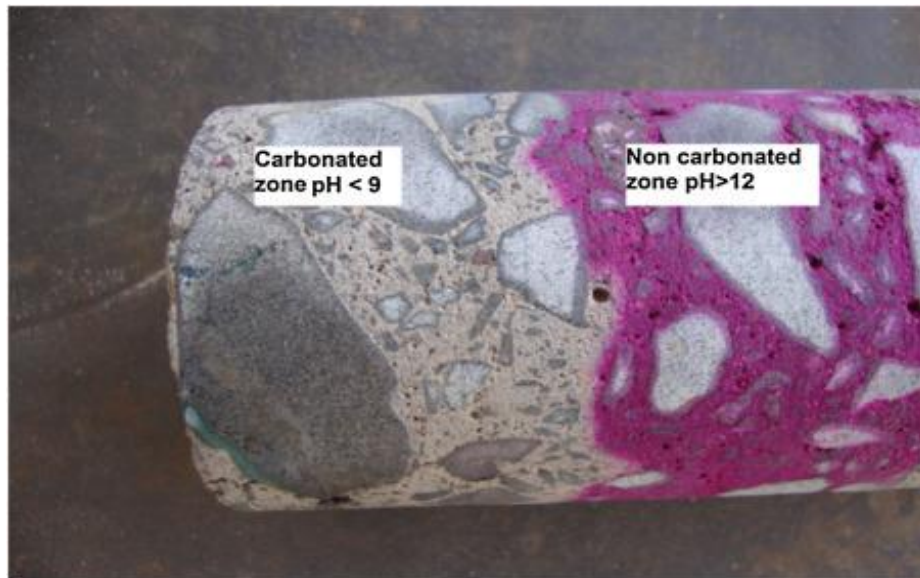
r: Η ακτίνα του κυλινδρικού πόρου (\AA).

Επομένως η πληροφορία που καταγράφει το ποροσίμετρο είναι ουσιαστικά η αθροιστική κατανομή του όγκου του υδραργύρου που εισέρχεται στο δείγμα συναρτήσει της ακτίνας των πόρων. Από την κατανομή αυτή μπορεί ακόλουθως να υπολογιστεί η κατανομή μεγέθους πόρων με διαφόριση. Ακόμη, μέσω διαφόρων εξισώσεων είναι εφικτός ο υπολογισμός της ειδικής επιφάνειας των πόρων, η εκατοστιαία αθροιστική κατανομή, η διαφορική κατανομή μεγέθους πόρων, η λογαριθμική κατανομή μεγέθους πόρων και η κατανομή ειδικής επιφάνειας συναρτήσει του μεγέθους του πόρου. [139]

4.2.4. Δοκιμή επιταχυνόμενης ενανθράκωσης

Το φαινόμενο της ενανθράκωσης οφείλει την ονομασία του στη μετατροπή του περιεχομένου στο σκυροδέμα υδροξειδίου του ασβεστίου Ca(OH)_2 σε ανθρακικό ασβέστιο CaCO_3 . 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 σ' 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. [140]

Η μέτρηση της ενανθράκωσης σε δοκίμια σκυροδέματος αποτελεί μία μέθοδο η οποία βασίζεται στην μεταβολή του PH λόγω της παρουσίας διοξειδίου του άνθρακα. Η μέθοδος πραγματοποιείται με ψεκασμό διαλείμματος φαινολοφθαλεΐνης σε δοκίμια σκυροδέματος. Στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζεται ο υπολογισμός του βάθους ενανθράκωσης κυλινδρικού δοκιμίου το οποίο υποβλήθηκε σε συνθήκες επιταχυνόμενης ενανθράκωσης. Η ροζ περιοχή προκύπτει από τον ψεκασμό με φαινολοφθαλεΐνη της επιφάνειας τομής του δοκιμίου και διαχωρίζει την ενανθρακωμένη ($\text{pH} < 9$) από τη μη ενανθρακωμένη (ροζ) περιοχή του δοκιμίου. [68]



Εικόνα 4. 2 Ενανθρακωμένη και μη περιοχή κυλινδρικού δοκιμίου

Ο έλεγχος του βαθμού ενανθράκωσης, είναι εξαιρετικά σημαντικός αφού η αλκαλικότητα του σκυροδέματος, η οποία χαρακτηρίζεται από τιμή του PH γύρω στο 12.5, προστατεύει τις ράβδους οπλισμού έναντι διάβρωσης η οποία και οδηγεί στην απώλεια της εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα. [56]

ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η υποβάθμιση της αξιοπιστίας μιας κατασκευής από σκυρόδεμα με την πάροδο του χρόνου είναι αποτέλεσμα διαφόρων μηχανικών, φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών, με τη διάβρωση του οπλισμού να αποτελεί το σοβαρότερο πρόβλημα ανθεκτικότητας των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Τα τελευταία 50 χρόνια, η διεθνής επιστημονική κοινότητα κατέβαλε τεράστιες προσπάθειες με εργαστηριακές έρευνες και πειραματικές μελέτες πεδίου με στόχο την αύξηση της αντίστασης του σκυροδέματος στη διάβρωση. Η προσβολή των κατασκευών από τη διείδυση χλωριόντων αποτελεί κείμερο πρόβλημα και στη χώρα μας καθώς αφορά κυρίως παραθαλάσσιες κατασκευές που προσβάλλονται από το θαλασσινό νερό.

Το πρόβλημα το οποίο πραγματεύεται και αποσκοπεί να επιλύσει αυτή η Διδακτορική Διατριβή είναι η διερεύνηση της επιρροής διαφόρων παραγόντων που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα μιας κατασκευής από σκυρόδεμα. Η πραγματοποίηση της έρευνας περιέλαβε την διερεύνηση διαφορετικών συνθέσεων σκυροδέματος, με διαφορετικά επίπεδα φόρτισης καθώς και την εξέταση διαφόρων παραμέτρων που επιδρούν στη διάβρωση του οπλισμού τους. Για τις ανάγκες της έρευνας, κατασκευάστηκαν πέντε ομάδες δειγμάτων. Κάθε μια από αυτές αποτελούταν από 8 δοκούς, 14 κυβικά, και 2 κυλινδρικά δοκίμια. Συνολικά για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις κατασκευάστηκαν 40 δοκοί, 70 κυβικά και 10 κυλινδρικά δοκίμια τα οποία μελετήθηκαν σε βάθος χρόνου 42 μηνών τόσο με δοκιμές πεδίου όσο και με ειδικούς εργαστηριακούς ελέγχους. Αναλυτικά οι παράγοντες που διερευνώνται είναι: η μόνιμη καμπτική φόρτιση που φέρει ένα στοιχείο σκυροδέματος, η σύστασή του (λόγος N/T, περιεκτικότητα τσιμέντου, κοκκομετρική διαβάθμιση) αλλά και η αποτελεσματικότητα διαφόρων μεθόδων προστασίας (πρόσθετος αναστολέας διάβρωσης ή ψεκασμός με υδρόφοβη στρώση). Η παραγωγή των μιγμάτων έγινε σε αναμικτήρα εργοστασίου έτοιμου σκυροδέματος για να προσομοιωθούν κατά το δυνατόν καλύτερα οι πραγματικές συνθήκες χύτευσης σκυροδέματος. Η επιλογή δε των υπό μελέτη δομικών υλικών έλαβε υπόψη την ιδιαιτερότητα της ελληνικής αγοράς και τη δυνατότητα εξαγωγής προϊόντων στο εξωτερικό, ενώ ιδιαίτερη σημασία και μέριμνα δόθηκε στους κυρίαρχους εμπορικούς τύπους τσιμέντου και συνθέσεων σκυροδέματος.

Η πρωτοτυπία της έρευνας έγκειται στην μελέτη της μόνιμης καμπτικής φόρτισης σε δοκούς σκυροδέματος και στο κατά πόσο η φόρτιση αυτή επηρεάζει τη μικροδομή, τις μικρορηγματώσεις και κατ' επέκταση την εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης. Αναλυτικά εκτιμάται ο βαθμός επιρροής της μόνιμης φόρτισης στην εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης για κάθε σύνθεση που εξετάζεται. Έτσι θα μελετηθεί η συμπεριφορά της κάθε σύνθεσης αλλά και το πόσο αποτελεσματικές είναι οι μέθοδοι προστασίας όταν προσομοιώνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια οι εξωτερικοί παράγοντες (φυσική διάβρωση, μόνιμη φόρτιση). Στο σημείο αυτό αναφέρεται πως η βιβλιογραφία για το συγκεκριμένο ζήτημα, έως τη συγγραφή του παρόντος, είναι περιορισμένη. Η περαιτέρω διερεύνηση αυτού του συσχετισμού κρίνεται αναγκαία καθώς η διάβρωση του οπλισμού αποτελεί το βασικότερο πρόβλημα στις κατασκευές Ο.Σ. και η αξιολόγηση όλων των παραγόντων που την επηρεάζουν είναι απαραίτητη στην ολική αντιμετώπιση του φαινομένου. Η προτεινόμενη επιστημονική κατεύθυνση τονίζει την ανάγκη μιας επιπλέον έρευνας, τόσο επιτόπιας ("in-situ") όσο και με εργαστηριακές μεθόδους, προκειμένου να αξιολογηθεί πλήρως η αλληλεπίδραση μόνιμης φόρτισης - διάβρωσης, αποτελώντας ουσιαστικά έναυσμα για μια πιο ολοκληρωμένη ερμηνεία του μηχανισμού της διάβρωσης.

ΜΕΡΟΣ Β' – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Το αντικείμενο της παρούσας Διατριβής είναι η πειραματική μελέτη και διερεύνηση της επιρροής διαφόρων παραγόντων που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα μιας κατασκευής από σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα οι παράγοντες που εξετάζονται είναι: η μόνιμη καμπτική φόρτιση που φέρει ένα στοιχείο σκυροδέματος, η σύστασή του (λόγος N/T, περιεκτικότητα τσιμέντου) αλλά και η αποτελεσματικότητα διαφόρων μεθόδων προστασίας (πρόσθετος αναστολέας διάβρωσης ή ψεκασμός με υδρόφοβη στρώση).

Η πραγματοποίηση της έρευνας περιέλαβε την παρασκευή δοκών προσομοίωσης και την διερεύνηση διαφορετικών συνθέσεων σκυροδέματος, με διαφορετικά επίπεδα φόρτισης καθώς και την εξέταση διαφορών παραμέτρων που επιδρούν στη διάβρωση του οπλισμού όπως είναι η προσομοίωση παραθαλάσσιου περιβάλλοντος και η μακροχρόνια έκθεση σε ατμοσφαιρική διάβρωση. Οι συνθέσεις που κατασκευάστηκαν είναι: Συμβατικό σκυρόδεμα C30/37 (CC1), σκυρόδεμα με αναστολέα διάβρωσης ως πρόσθετο (CC2), σκυρόδεμα με ψεκαζόμενη υδατοαπωθητική στρώση (CC3), αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (SCC) και γαρμπυλόδεμα (FAC). Οι συνθέσεις που μελετήθηκαν μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες με βάση την αναλογία και το είδος των υλικών τους αλλά και των μεθόδων προστασίας που χρησιμοποιήθηκαν.

Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τις τρεις πρώτες συνθέσεις σκυροδέματος (CC1, CC2, CC3) οι οποίες βασίζονται στο σχεδιασμό μιας συμβατικής ποιότητας C30/37 και η διαφοροποίηση εντοπίζεται στη μέθοδο προστασίας που επιλέγεται. Συγκεκριμένα: η σύνθεση CC1 μελετάται ως σύνθεση αναφοράς, η σύνθεση CC2 είναι όμοια με την CC1 με προσθήκη αναστολέα διάβρωσης κατά την ανάδευση του μίγματος σε περιεκτικότητα 4% κατά βάρος του τσιμέντου και η σύνθεση CC3 είναι όμοια με την CC1 με επιπλέον αδιαβροχοποίηση της επιφάνειας μέσω ψεκαζόμενης προστατευτικής στρώσης. Με τη σύγκριση των παραπάνω συνθέσεων θα επιχειρηθεί να αξιολογηθεί η κάθε μέθοδος προστασίας έναντι της διάβρωσης.

Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από τις συνθέσεις με τις λεπτότερες δομές (FAC, SCC) (απουσία χονδρόκοκκου αδρανούς, $D < 16\text{mm}$). Συγκεκριμένα και οι 2 συνθέσεις χαρακτηρίζονται από χαμηλότερο λόγο N/T και υψηλότερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο έναντι των συνθέσεων της πρώτης ομάδας. Με τη σύγκριση τόσο μεταξύ τους όσο και με τη σύνθεση αναφοράς (CC1) θα γίνει εκτίμηση της επιρροής του λόγου N/T αλλά και της περιεκτικότητας του τσιμέντου μιας σύνθεσης στην αντιδιαβρωτική της συμπεριφορά.

Στο πειραματικό μέρος πραγματοποιείται μια συγκριτική αξιολόγηση της συμπεριφοράς των συνθέσεων, μέσω δοκιμών πεδίου αλλά και εργαστηριακών δοκιμών, όπου εξετάζονται αναλυτικά οι επιπτώσεις των εξής παραγόντων στην αντιδιαβρωτική συμπεριφορά των δοκιμών:

Παράγοντας I: Ο πρώτος παράγοντας του οποίου η επίδραση εκτιμήθηκε ήταν οι αναλογίες στο μίγμα των παραγόμενων συνθέσεων. Αυτό περιλαμβάνει την αναλογία και το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (κοκκομετρική ανάλυση), την ποσότητα τσιμέντου αλλά και την ποσότητα του νερού (και κατ' επέκταση τον λόγο N/T). Συγκεκριμένα οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα).

Παράγοντας II: Ο δεύτερος παράγοντας του οποίου η επίδραση εκτιμήθηκε ήταν η επιρροή διαφορετικών μεθόδων προστασίας. Συγκεκριμένα οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.) και CC3 (ψεκασμός με υδρόφοβη στρώση). Έτσι με μια σύγκριση των μεθόδων τόσο μεταξύ τους όσο και με το σκυρόδεμα

αναφοράς εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με το βαθμό προστασίας των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου προστασίας από διάβρωση.

Παράγοντας III: Ο τρίτος παράγοντας που εξετάζεται είναι η επίδραση της μόνιμης καμπτικής φόρτισης που φέρει ένα στοιχείο σκυροδέματος (σε συνδυασμό με διαβρωτικό περιβάλλον) στην διατήρηση των ιδιοτήτων της στο χρόνο. Στα δοκίμια δοκών που εξετάστηκαν επιβλήθηκαν 3 επίπεδα φόρτισης, στο 0%, 7% και 20% της οριακής κατάστασης λειτουργίας τους. Με τον τρόπο αυτό εκτιμάται ο βαθμός που επιδρά η μόνιμη φόρτιση στην εξέλιξη της διάβρωσης.

Για κάθε περίπτωση εξεταζόμενης σύνθεσης κατασκευάστηκαν 8 δοκοί (διαστάσεων: 0,15×0,25×1,5m), 14 κυβικά δοκίμια (διαστάσεων 0,15×0,15 m) και 2 κυλινδρικά δοκίμια (διαστάσεων 0,10×0,20 m). Για το σύνολο των 5 εξεταζόμενων συνθέσεων κατασκευάστηκαν: 40 δοκοί, 70 κυβικά δοκίμια και 10 κυλινδρικά δοκίμια.

Η επιρροή των προαναφερθέντων παραγόντων εκτιμήθηκε πειραματικά με δοκιμές οι οποίες διενεργήθηκαν σε συνολικό βάθος χρόνου 42 μηνών και είναι οι εξής:

- Παρακολούθηση εξέλιξης του δυναμικού διάβρωσης οπλισμού των δοκών
- Μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης σκυροδέματος των δοκών
- Θεωρητικός υπολογισμός του ρυθμού διάβρωσης οπλισμού των δοκών
- Δοκιμή επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων (κατά ASTM 1202)
- Δοκιμή επιταχυνόμενης ενανθράκωσης (κατά EN 13295)
- Δοκιμή Υδατοαπορροφητικότητας
- Δοκιμή Υδατοπερατότητας
- Ποροσιμετρία Υδραργύρου
- Καμπτική Αντοχή Δοκών - Οπτικός έλεγχος ρηγματώσεων

Η επιλογή των υπό μελέτη δομικών υλικών (τσιμέντων και σκυροδεμάτων) έλαβε χώρα λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες και τα δομημένα συμφέροντα της ελληνικής αγοράς και πραγματικότητας, ενώ ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στο να προσομοιωθούν κατά το δυνατό καλύτερα οι πραγματικές συνθήκες σκυροδέτησης αλλά και έκθεσης στο φυσικό περιβάλλον. Γι' αυτό το λόγο η σκυροδέτηση όλων των δοκιμίων έγινε σε εργοστάσιο σκυροδέματος, η επίτευξη των φορτίων στις δοκούς έγινε μέσω «μπλοκ» οπλισμένου σκυροδέματος τα οποία εδράστηκαν στο μέσον τους προκειμένου να επιφέρουν καμπτικά φορτία ίσα με 7% και 20% των φορτίων λειτουργίας των δοκών. Η έκθεση τους σε επιβλαβείς συνθήκες περιβάλλοντος επιτεύχθηκε με τακτικό ψεκασμό των δοκών με διάλυμα NaCl σε περιεκτικότητα 5% και όχι με ηλεκτρικά επιταχυνόμενη διάβρωση.

Σημειώνεται ότι η πρωτοτυπία της έρευνας έγκειται κυρίως στη μόνιμη καμπτική φόρτιση μιας δοκού σκυροδέματος και στο κατά πόσο αυτή επηρεάζει τη μικροδομή, τις μικρορηγματώσεις και κατ' επέκταση την εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης καθώς η βιβλιογραφία για το συγκεκριμένο ζήτημα είναι περιορισμένη. Η περαιτέρω διερεύνηση αυτού του συσχετισμού είναι αναγκαία καθώς η διάβρωση του οπλισμού αποτελεί το βασικότερο πρόβλημα στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος και η αξιολόγηση όλων των παραγόντων που την επηρεάζουν είναι απαραίτητη στην ολική αντιμετώπιση του φαινομένου.

5. ΥΛΙΚΑ

Για τις ανάγκες της έρευνας, κατασκευάστηκαν πέντε ομάδες δειγμάτων, μία για κάθε εξεταζόμενη σύνθεση σκυροδέματος. Κάθε μια από αυτές αποτελούταν από 8 δοκούς προσομοίωσης διαστάσεων 15×25×150cm, από 14 κυβικά δοκίμια με ακμή 10cm και από 2 κυλινδρικά δείγματα με ύψος 10cm και διάμετρο 5cm. Συνολικά για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις κατασκευάστηκαν 40 δοκοί, 70 κυβικά και 10 κυλινδρικά δοκίμια. Τα δοκίμια συντηρήθηκαν κατά τα προβλεπόμενα σε θερμοκρασία $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ και σχετική υγρασία $\text{RH} \geq 90\%$ για 28 ημέρες. Ο λόγος αναλογιών του κάθε μείγματος (τσιμέντο: νερό: άμμος: λεπτά αδρανή: χαλίκια) ήταν οι εξής (κατά βάρος):

- Σκυρόδεμα αναφοράς (CC) = 1: 0,5: 3: 3: 2,8.
- Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα (SCC) = 1: 0,40: 2,1: 2,1: 1,1.
- Γαρμπυλόδεμα (FAC) = 1: 0,48: 2,5: 3,2: 1,2.

Οι αναλογίες υλικών για κάθε μίγμα σκυροδέματος που παρασκευάστηκε δίνονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5. 1 Ανάλυση των επιλεγμένων συνθέσεων

(KG/M ³)	CC1	CC2	CC3	FAC	SCC
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	330	330	330	400	500
ΝΕΡΟ	165	165	165	200	200
ΛΟΓΟΣ Ν/Τ	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΑΔΡΑΝΗ	975	975	975	1260	1050
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΑ ΑΔΡΑΝΗ	930	930	930	495	570
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗΣ	2	2	2	3.5	5.5
ΑΝΑΣΤΟΛΕΑΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	-	13.2	-	-	-
ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΘΙΣΗΣ (CM)	3	4	3	5	60 (εξάπλωση)
ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ 28 ΗΜΕΡΩΝ (MPA)	45.3	43.1	45.1	52.5	56

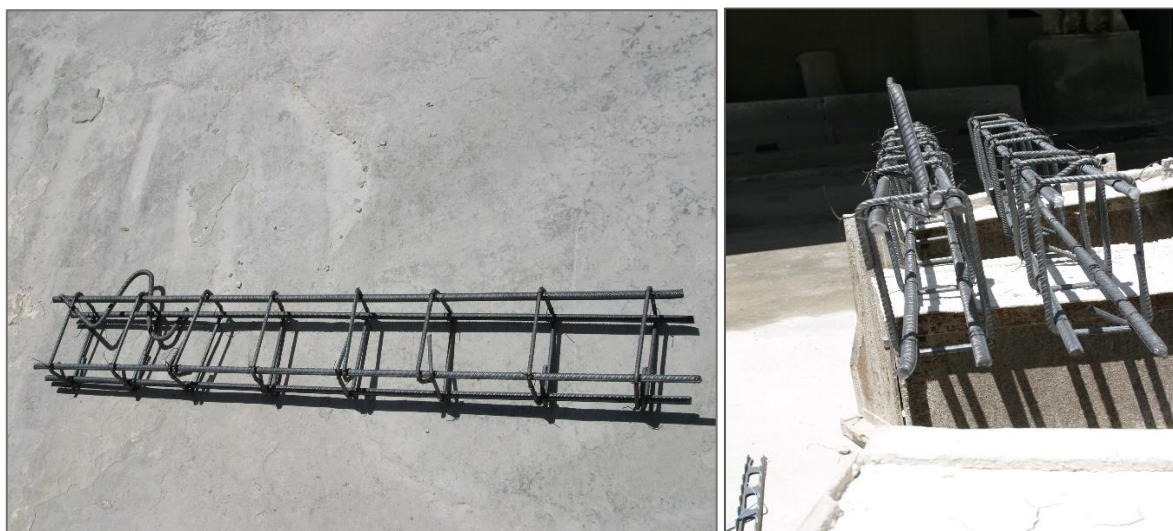
5.1. Οπλισμός

Στις εξεταζόμενες δοκούς χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος S500s, ονομαστικής διαμέτρου 12mm (Φ12) και μήκους 140 cm, ως διαμήκεις οπλισμοί και συνδετήρες διαμέτρου 8mm (Φ8/150) με την ακόλουθη (%) χημική σύσταση (Πίνακας 5.2):

Πίνακας 5. 2 Χημική σύσταση (%) χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος

	C	S	P	N	Cu	Ceq	Agt	Re (MPa)	Rm (MPa)
S500s	0,21	0,028	0,022	0,012	0,39	0,38	9,8	546	639

Οι χάλυβες οπλισμού B500C ήταν νευροχάλυβες με εξέχουσες, ανάγλυφες νευρώσεις. Οι ράβδοι έχουν τάση ορίου 500 MPa (≈ 5000 kp/cm²). Φωτογραφίες των πλεγμάτων οπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν για τον οπλισμό των δοκών παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 5. 1 Πλέγμα χαλύβδινων ράβδων που χρησιμοποιήθηκε για τον οπλισμό των δοκών

Στις παραπάνω εικόνες διακρίνονται και οι καμπυλωτές αγκυρώσεις οι οποίες δημιουργήθηκαν για τη μεταφορά των δοκών αλλά και για την πραγματοποίηση των πειραματικών δοκιμών πεδίου.

5.2. Τσιμέντο

Για την κατασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε τύπος τσιμέντου CEM I 42,5 (κοινό τσιμέντο Portland), η χημική σύσταση του οποίου δίνεται στον Πίνακα 5.3. Τα πιστοποιητικά ποιότητας και λοιπά χαρακτηριστικά του τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε επισυνάπτονται στο Παράρτημα.

Πίνακας 5.3 Χημική ανάλυση (%) τσιμέντων που χρησιμοποιήθηκαν

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	cor LOI	CaO _f	Sb (cm ² /g)
CEM I 42.5	21.64	5.85	4.60	58.10	2.63	0.51	0.30	2.61	3.80	1.11	3315

5.3. Αδρανή

Αδρανή είναι τα διαβαθμισμένα, ορυκτής ή βιομηχανικής προέλευσης, υλικά που χρησιμοποιούνται είτε με συγκολλητικό μέσο (για παρασκευή κονιαμάτων, σκυροδεμάτων, ασφαλτομιγμάτων κλπ.) είτε αυτούσια (έρμα σιδηροδρομικών γραμμών, στραγγιστηριών, φίλτρων διηθήσεως ή καθαρισμού, βράχοι θωράκισης, κλπ.), σε πάσης φύσεως τεχνικά έργα. Τα αδρανή στην Ελλάδα είναι χημικώς αδρανή τεμάχια ασβεστολιθικών κυρίως πετρωμάτων τα οποία χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σκυροδέματος και ως υλικά οδόστρωσης, ενώ τα μεγάλου μεγέθους τεμαχίων ως σκύρα σιδηροδρομικών γραμμών. Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή σκυροδέματος έχουν διάφορα μεγέθη και ακανόνιστο σχήμα. [29]

Τα αδρανή υλικά θα πρέπει να ικανοποιούν ορισμένες απαιτήσεις για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν στο σκυροδέμα. Θα πρέπει να αποτελούνται από κόκκους υγείς, σκληρούς ανθεκτικούς απαλλαγμένους από βλαπτικές αργιλικές προσμίξεις οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τόσο την ενυδάτωση της τσιμέντου όσο και την πρόσφυση των κόκκων των αδρανών με την τσιμεντόπαστα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η φύση των δεσμών που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια αδρανών και τσιμεντόπαστας, οδηγούν στις μηχανικές αντοχές του σκυροδέματος. Η καταλληλότητα των αδρανών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σκυροδέματος προδιαγράφεται από τις απαιτήσεις του ΕΛΟΤ 408 και του ΚΤΣ -2016, ενώ αντίστοιχα η καταλληλότητα των αδρανών σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές Προδιαγραφές καθορίζεται στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN12620. [141]

Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθός τους, ως εξής [26]:

Άμμος: μέσο μέγεθος κόκκων έως 4 mm (λεπτόκοκκη)

Ρύζι: : μέσο μέγεθος κόκκων από 4 έως 8 mm (χρησιμοποιήθηκε μόνο στη σύνθεση ΑΣΣ)

Γαρμπίλι: μέσο μέγεθος κόκκων από 6 έως 16 mm

Σκύρα: μέσο μέγεθος κόκκων από 16 έως 38 mm

Ορισμένες ιδιότητες των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4. Τα πιστοποιητικά ποιότητας βάση προτύπου EN12620 για τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν επισυνάπτονται στο Παράρτημα.

Πίνακας 5. 4 Βασικές ιδιότητες των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν

	Μέσο μέγεθος κόκκων	Κοκκομετρική Διαβάθμιση	Πυκνότητα	Υδαταπορροφητικότητα (EN12620)
Άμμος	0-4 mm	GF85	2,64 Mg/m ³	0,4%
Ρύζι	4-8 mm	GC90/15	2,64 Mg/m ³	-
Γαρμπίλι	6-16 mm	GC90/15	2,64 Mg/m ³	WA ₂₄ 0,8%
Σκύρα (Χαλίκι)	>16 mm	GC90/15	2,68 Mg/m ³	WA ₂₄ 1%

5.4. Νερό

Το νερό που προστίθεται στο τσιμέντο για τη δημιουργία της τσιμεντόπαστας, είναι απαραίτητο για τις 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. Δεν πρέπει να περιέχει ουσίες που μπορούν να βλάψουν ή να επηρεάσουν τις αντιδράσεις ενυδάτωσης ή να προκαλέσουν διάβρωση του εγκιβωτισμένου οπλισμού. Το νερό πρέπει πρώτα να αναλυθεί για ίχνη λιπαρών ουσιών και ελαίων, αφρογόνες ουσίες (απορρυπαντικά), αιωρούμενα συστατικά, οσμές (π.χ. χωρίς οσμή υδροθείου μετά από προσθήκη υδροχλωρικού οξέος), οξύτητα ($\text{pH} \geq 4$) και χουμικές ενώσεις [30]. Το νερό που χρησιμοποιήθηκε στην παρασκευή των δοκιμών της παρούσας έρευνας προερχόταν από το δίκτυο ύδρευσης του Δήμου Μεταμόρφωσης. Το πιστοποιητικό ανάλυσης του νερού που χρησιμοποιήθηκε επισυνάπτεται στο παράρτημα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα.

Πίνακας 5. 5 Ανάλυση νερού που χρησιμοποιήθηκε στην ανάμιξη των συνθέσεων

Χημικές Παράμετροι	Μέθοδοι ανάλυσης	Μονάδες Μέτρησης	Αποτελέσματα	Όρια
Χουμικές ουσίες	EN 1008-02	-	Άχρουν	<κίτρινο,καφέ
Χλωριούχα	ALPHA 4500-Cl ⁻	mgCl/L	54	≤500
Θειικά	ALPHA 4500-SO ₄	mgSO ₄ /L	10	≤2000
Αλκάλια	ALPHA mod 3111	mgNa ₂ O/L	27	≤1500
Σάκχαρα	Mullisch / a-naphtol	mg/L	Απουσία	≤100
Φωσφορικά	ALPHA mod 4500-P	mgP/L	<0,30	≤44
		mgP ₂ O ₅ /L	<0,68	≤100
Νιτρικά	ALPHA 4500-NO ₃	mgNO ₃ /L	28	≤500
Μόλυβδος	ALPHA mod 3113	mgPb/L	<0,01	≤100
Ψευδάργυρος	ALPHA mod 3111	mgZn/L	0,20	≤100

5.5. Χημικά Πρόσθετα

Χρησιμοποιήθηκε ως ρευστοποιητής το προϊόν Chemium 325, το οποίο είναι υδατικό διάλυμα τροποποιημένων πολυμερών, μεγάλης απόδοσης τόσο σε ρευστότητα όσο και σε διάρκεια ρευστότητας και πληροί την προδιαγραφή EN 934-2. Προστέθηκε στον αναμκτήρα της μονάδας παραγωγής σε ποσότητα 2kg/m³ για τις συνθέσεις CC1,CC2,CC3, 3,5kg/m³ για τη σύνθεση FAC και 5,5kg/m³ για τη σύνθεση SCC. Ο συγκεκριμένος ρευστοποιητής έχει διάρκεια ρευστότητας 1-2 ώρες στους 20 °C και χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη εργασιμότητα καθώς και χαμηλότεροι λόγοι N/T.

Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε ρυθμιστής ιξώδους (Viscosity Modifying Admixture - VMA) στη σύνθεση του Αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (SCC) προκειμένου να διατηρήσει την ομοιογένεια του παραγόμενου σκυροδέματος και να καταστήσει το μίγμα λιγότερο ευαίσθητο σε αλλαγές στη ζήτηση νερού (robustness) χωρίς να επιδράσει στη ρευστότητα του μίγματος. Ο ρυθμιστής ιξώδους

χρησιμοποιήθηκε σε περιεκτικότητα $0,5\text{kg}/\text{m}^3$. Τα τεχνικά φυλλάδια των προϊόντων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

5.6. Μέθοδοι Προστασίας

Οι δύο μέθοδοι προστασίας εφαρμόστηκαν στην σύνθεση αναφοράς (C30/37) και είναι: αναστολέας διάβρωσης ο οποίος προστέθηκε κατά την ανάμιξη του σκυροδέματος και ψεκαζόμενη υδατοαπωθητική στρώση στην επιφάνεια των δοκιμίων. Ως πρόσθετος αναστολέας διάβρωσης, χρησιμοποιήθηκε αναστολέας διάβρωσης με βάση την αμινοαλκοόλη. Προστέθηκε στο νερό ανάμιξης πριν την προσθήκη στο ξηρό μείγμα τσιμέντου αδρανών σε ποσότητα 4kg ανά 100kg τσιμέντου, δηλαδή $13,2\text{kg}$ ανά κυβικό (m^3) της παραγόμενης σύνθεσης στην περίπτωση CC2. Ως κύριο συστατικό του αναστολέα, η αμινοαλκοόλη μεταναστεύει γρήγορα στο σκυρόδεμα στη φάση αερίου ή στην υγρή φάση. Όταν φτάσει στην επιφάνεια της ράβδου χάλυβα, σχηματίζει ένα υδρόφοβο μονομοριακό στρώμα με φυσική ή χημική προσρόφηση. Το μόριο απομονώνει τα ιόντα χλωρίου, το οξυγόνο και το νερό και προστατεύει τον οπλισμό. [95]



Εικόνα 5. 2 Εφαρμογή χειροκίνητου ψεκασμού σε δύο στρώσεις σε κυβικά (αριστερά) και κυλινδρικά (δεξιά) δοκίμια

Η αδιαβροχοποίηση των δοκιμίων έγινε με ψεκασμό στην επιφάνειά τους με είναι ένα διάφανο, υδαταπωθητικό υγρό εμποτισμού σιλοξανικής/σιλανικής βάσεως. Ψεκάστηκε σε λεπτή στρώση χρησιμοποιώντας χειροκίνητο ψεκαστήρα σε δύο χέρια και σε όλες τις πλευρές των δειγμάτων (Εικόνα 5.2) σύμφωνα με τη συνιστώμενη δόση του κατασκευαστή ($200\text{g}/\text{m}^2$). Οι επιφάνειες των δοκιμίων ήταν καθαρές, στεγνές και χωρίς ελαττώματα, ελεύθερες από κάθε ακαθαρσία, η οποία μπορεί να επηρεάζε αρνητικά την συγκόλληση της μεμβράνης.

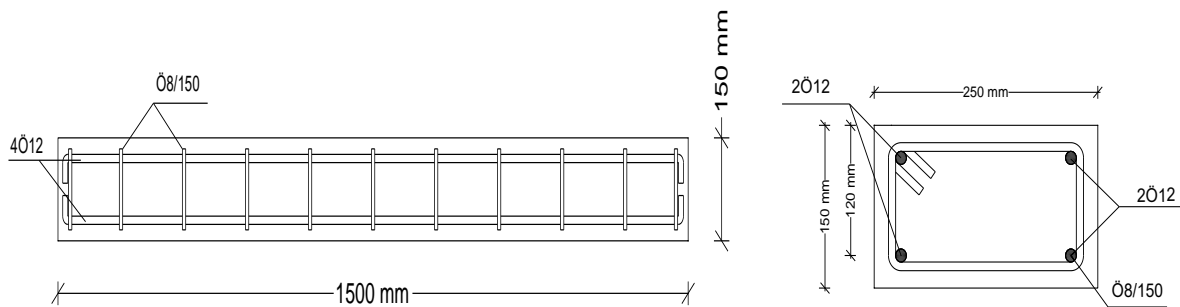
5.7. Κατασκευή και έκθεση δοκιμίων

Κατασκευάστηκαν πέντε ομάδες δειγμάτων και η κάθε μια από αυτές αποτελούταν από 8 δοκούς προσομοίωσης διαστάσεων $15 \times 25 \times 150\text{cm}$, από 14 κυβικά δοκίμια με ακμή 10cm και από 2 κυλινδρικά δείγματα με ύψος 10cm και διάμετρο 5cm . Για τις ανάγκες του βασικού πειραματικού μέρους της έρευνας, κατασκευάστηκαν συνολικά 40 δοκάρια. Η παραγωγή των μιγμάτων έγινε σε αναμκτήρα εργοστασίου έτοιμου σκυροδέματος για να προσομοιωθούν κατά το δυνατόν καλύτερα οι πραγματικές συνθήκες χύτευσης σκυροδέματος. Ο ξυλότυπος κατασκευάστηκε αποκλειστικά για τις ανάγκες της έρευνας χρησιμοποιώντας ξύλο κόντρα πλακέ. Οι εσωτερικές διαστάσεις του καλουπιού είναι ίδιες με τις διαστάσεις του δείγματος, δηλαδή: $1,5\text{m} \times 0,25\text{m} \times 0,15\text{m}$. Η εσωτερική επιφάνεια του ξυλότυπου αλλά και των υπόλοιπων μητρών λαδώθηκε σωστά για να είναι εύκολη η αφαίρεση των δοκιμίων. Τα καλούπια πληρώθηκαν με σκυρόδεμα σε δύο στρώσεις. Μετά την τοποθέτηση κάθε στρώματος, το σκυρόδεμα δονήθηκε για να εξασφαλιστεί η σωστή σταθεροποίηση (Εικόνα 5.3).



Εικόνα 5. 3 Σκυροδέτηση (με δόνηση) δοκών οπλισμένου σκυροδέματος

Το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού σε όλες τις παρειές ήταν 20mm. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, τέσσερις χαλύβδινες ράβδοι με διάμετρο 12mm χρησιμοποιήθηκαν ως διαμήκης ενίσχυση. Ο εγκάρσιος οπλισμός αποτελούταν από ράβδο διαμέτρου 8mm (συνδετήρας) και τοποθετήθηκε στη ζώνη διάτμησης σε απόσταση 150mm (Φ8/150). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η διαμόρφωση του οπλισμού των εξεταζόμενων δοκών παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5. 1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμαστικών δοκών και οπλισμού

Η παρασκευή των 40 δοκών πραγματοποιήθηκε σε 5 παρτίδες για 5 διαφορετικές συνθέσεις. Επίσης κυβικά δοκίμια παρασκευάστηκαν από κάθε παρτίδα σκυροδέματος για να προσδιοριστεί η θλιπτική τους αντοχή και κυλινδρικά δοκίμια για τους προγραμματισμένους ηλεκτροχημικούς ελέγχους.



Εικόνα 5. 4 Κυβικά και κυλινδρικά δοκίμια για εργαστηριακές δοκιμές (αριστερά), θάλαμος συντήρησης (δεξιά)

Τα καλούπια λαδώθηκαν και το χαλύβδινο πλέγμα οπλισμού (προκατασκευασμένο) τοποθετήθηκε με προσοχή στην αντίστοιχη θέση του στα καλούπια. Τα καλούπια πληρώθηκαν με σκυρόδεμα σε δύο στρώσεις. Μετά την τοποθέτηση κάθε στρώματος, το σκυρόδεμα δονήθηκε για να εξασφαλισθεί η

σωστή συμπύκνωση. Τα δείγματα απομακρύνθηκαν από τα καλούπια μετά από 24 ώρες και στη συνέχεια καλύφθηκαν με βρεγμένες σακούλες (λινάτσες) προκειμένου να διατηρηθούν τα επιθυμητά επίπεδα υγρασίας. Μετά από 28 ημέρες από την ημερομηνία σκυροδέτησης τα δοκίμια μεταφερόντουσαν στην στο χώρο της βασικής πειραματικής διάταξης (Εικόνα 5.5). Επιπροσθέτως στις προβλεπόμενες ημερομηνίες ωρίμανσης (7, 14, 28 ημέρες) γινόταν έλεγχος για τη θλιπτική αντοχή των κυβικών δοκιμίων. [47], [50]



Εικόνα 5. 5 Διάταξη δοκών οπλισμένου σκυροδέματος στο πεδίο

Προκειμένου να προσομοιωθεί η φυσική διάβρωση, τα δείγματα υποβλήθηκαν σε επιφανειακό ψεκασμό με διάλυμα NaCl περιεκτικότητας 5% ανά 5 ημέρες. Επιπλέον για κάθε ομάδα, ένα ζευγάρι δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ως δοκίμια αναφοράς και εκτέθηκαν μόνο στις συνθήκες του φυσικού περιβάλλοντος. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Μεταμόρφωσης (Αθήνα) όπου η μέση ετήσια θερμοκρασία καταγράφηκε στους 16.4°C και η σχετική υγρασία κυμαινόταν από 45% έως 83% κατά τη διάρκεια του έτους.

Οι δοκιμές διάβρωσης των δοκών πραγματοποιήθηκαν υπό ταυτόχρονη άσκηση μιας μόνιμης καμπτικής επιπόνησης, το οποίο αποτελεί και την καινοτομία της συγκεκριμένης πειραματικής διερεύνησης. Η φόρτιση εφαρμόστηκε ομοιόμορφα, συμμετρικά σε ζεύγος δοκών χρησιμοποιώντας τη διάταξη φόρτωσης που φαίνεται και στην Εικόνα 5.5. Όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες, τα επιθυμητά φορτία επιτεύχθηκαν με τη χρήση μπλοκ από οπλισμένο σκυρόδεμα (850kg/μονάδα) που τοποθετήθηκαν στο μέσο των δοκών. Υπήρξαν 2 επίπεδα φόρτισης που δοκιμάστηκαν, το πρώτο έγινε με την έδραση ενός μπλοκ σε ένα ζευγάρι δοκών (430 κιλά σε κάθε δοκό) και το δεύτερο με την έδραση τριών μπλοκ (1.290 κιλά σε κάθε δοκό). Το μόνιμο φορτίο υπολογίστηκε ως το 0% (αφόρτιστα), 7% και 20% του φορτίου λειτουργίας των μη διαβρωμένων οπλισμένων δοκών αντίστοιχα. Οι ροπές κάμψης που εφαρμόστηκαν ήταν 0kN×m (αφόρτιστα), 2kN×m και 6kN×m αντίστοιχα. Οι υπολογισμοί των φορτίων των υπό δοκιμή δοκών παρουσιάζονται στο Παράρτημα του παρόντος.

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν σε συνδυασμό με το πλήθος των δοκιμών, μας δίνουν μια ποικιλία από περιπτώσεις. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των δοκών για κάθε σύνθεση (CC1, CC2, CC3, FAC, SCC) ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης και τις συνθήκες έκθεσης (A, B, C, D) όπου: A, τα δοκίμια αναφοράς (καμία φόρτιση, έκθεση σε φυσικό περιβάλλον) και B, C, D δοκίμια σε διαβρωτικές συνθήκες με 0%, 7% και 20% επίπεδα φόρτισης αντίστοιχα. Ο χαρακτηρισμός αυτός παραμένει σταθερός σε όλο το πειραματικό μέρος της παρούσας διατριβής.

Πίνακας 5.6 Κατηγοριοποίηση δοκών ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης και τις συνθήκες έκθεσης

α/α	Δοκός	Σκυρόδεμα			Μέθοδος Προστασίας			Είδος Διάβρωσης			
		C30/37	FAC	SCC	Χωρίς	Πρόσθετος Α.Δ.	Αδιαβροχοποίηση επιφάνειας	Φυσικό Περιβάλλον	Χωρίς Φόρτιση	Φόρτιση (7%)	Φόρτιση (20%)
1	CC1-A	✓			✓			✓			
2	CC1-B	✓			✓				✓		
3	CC1-C	✓			✓					✓	
4	CC1-D	✓			✓						✓
5	CC2-A	✓				✓		✓			
6	CC2-B	✓				✓			✓		
7	CC2-C	✓				✓				✓	
8	CC2-D	✓				✓					✓
9	CC3-A	✓					✓	✓			
10	CC3-B	✓					✓		✓		
11	CC3-C	✓					✓			✓	
12	CC3-D	✓					✓				✓
13	FAC-A		✓		✓			✓			
14	FAC-B		✓		✓				✓		
15	FAC-C		✓		✓					✓	
16	FAC-D		✓		✓						✓
17	SCC-A			✓	✓			✓			
18	SCC-B			✓	✓				✓		
19	SCC-C			✓	✓					✓	
20	SCC-D			✓	✓						✓

6. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

6.1. Είδη δοκιμών διάβρωσης

Οι δοκιμές διάβρωσης ταξινομούνται με βάση την κλίμακα εφαρμογής τους σε:

Εργαστηριακές δοκιμές (laboratory tests), όπου οι συνθήκες είναι αυστηρά καθορισμένες και ελεγχόμενες, αλλά συνήθως διαφορετικές από αυτές της πράξης. Διακρίνονται σε μη επιταχυνόμενες και επιταχυνόμενες.

Δοκιμές πεδίου (field tests), όπου ένας αριθμός πιστών αντιγράφων διαφόρων ειδών δοκιμών εκτίθεται σε όμοιες συνθήκες περιβάλλοντος με αυτές της πράξης.

Δοκιμές εργοστασίου (plant service tests), όπου τα δοκίμια ή οι προστατευτικές διεργασίες ενσωματώνονται στην υπό έλεγχο εγκατάσταση, δίνοντας τη δυνατότητα να αξιολογηθούν τα χρησιμοποιούμενα υλικά και οι μέθοδοι προστασίας στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, με μικρότερη όμως δυνατότητα ελέγχου από τις δοκιμές πεδίου, αφού οι συνθήκες του περιβάλλοντος μπορεί να μεταβληθούν.

Οι εργαστηριακές δοκιμές χρησιμεύουν για τη μελέτη του κινητικού μηχανισμού της διάβρωσης, την επιλογή του μετάλλου ή του υλικού ή της μεθόδου προστασίας ανάλογα με το διαβρωτικό περιβάλλον, τη διερεύνηση της επίδρασης του μετάλλου ή του υλικού στα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, για τον έλεγχο απόκρισης ενός μετάλλου ή υλικού σε συγκεκριμένη προδιαγραφή και ως δοκιμές ελέγχου για το σχεδιασμό ενός ανθεκτικού στη διάβρωση μετάλλου ή συστήματος για τον προσδιορισμό της άριστης σύστασης ή κατεργασίας για τον σκοπό αυτό. Στις μη επιταχυνόμενες δοκιμές οι συνθήκες της πράξης εξομοιώνονται σε μικρές εργαστηριακές διατάξεις. Έχουν το πλεονέκτημα, σε σχέση με τις δοκιμές πεδίου και εργοστασίου, ότι δεν προκαλούν λειτουργικές παρενοχλήσεις στη βιομηχανική διαδικασία και ότι οι συνθήκες της δοκιμής ελέγχονται και διατηρούνται πιο εύκολα. Αντίθετα, έχουν το μειονέκτημα ότι απαιτούν μεγάλους χρόνους έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον. Στις επιταχυνόμενες δοκιμές ενισχύεται ένας ή περισσότεροι διαβρωτικοί παράγοντες, όπως για παράδειγμα αύξηση θερμοκρασίας, εφαρμογή ανοδικού ρεύματος, έντονο διαβρωτικό περιβάλλον, ώστε η διαβρωτική δράση να προχωρήσει γρηγορότερα. Η απόλυτη εκτίμηση των αποτελεσμάτων τους πρέπει να λαμβάνει πάντοτε υπόψη τον παράγοντα της επιτάχυνσης, διότι η προεκβολή τους σε κανονικές συνθήκες δεν είναι πάντοτε απολύτως αληθινή. Αντίθετα για συγκριτικές μετρήσεις οι επιταχυνόμενες μέθοδοι δίνουν απολύτως ικανοποιητικά αποτελέσματα. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να επιλέγεται η δοκιμή που οδηγεί σε προσβολή όμοιου χαρακτήρα με αυτό των φυσικών συνθηκών και να δεν προκαλεί παράπλευρες επιδράσεις.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή δεν χρησιμοποιήθηκε επιταχυνόμενη μέθοδος διάβρωσης μέσω εφαρμογής ηλεκτρικού ρεύματος αλλά προσομοίωση διαβρωτικού περιβάλλοντος στο πεδίο. Συγκεκριμένα μέσω τακτικού ψεκασμού με διάλυμα NaCl (5%) προσομοιώθηκαν συνθήκες παραθαλάσσιων κατασκευών που emπίπτουν στις περιπτώσεις XS1, XS3 του ΚΤΣ-2016. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα μεν τη μεγάλη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας (παρακολούθηση των δοκιμών για 42 μήνες) προκειμένου να παρατηρηθεί έναρξη και εξέλιξη της διάβρωσης με φυσικό τρόπο, με τις συνθήκες ωστόσο να προσομοιώνουν καλύτερα τις πραγματικές.

Η επίδραση στον χάλυβα και το σκυρόδεμα όλων των παραγόντων που μελετήθηκαν σε αυτήν την διατριβή (επίπεδο φόρτισης, περιεκτικότητα τσιμέντου, είδος αντιδιαβρωτικής προστασίας, κοκκομετρία αδρανούς και συνδυασμοί τους) εκτιμήθηκε με τις ακόλουθες μεθόδους:

- Παρακολούθηση εξέλιξης του δυναμικού διάβρωσης οπλισμού των δοκών
- Μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος

- Θεωρητικός υπολογισμός του ρυθμού διάβρωσης οπλισμού των δοκών
- Δοκιμή επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων (κατά ASTM 1202)
- Δοκιμή επιταχυνόμενης ενανθράκωσης (κατά EN 13295)
- Δοκιμή Υδατοαπορροφητικότητας (κατά ASTM C1543)
- Δοκιμή Υδατοπερατότητας (κατά EN 12390-part 8)
- Ποροσιμετρία Υδραργύρου
- Καμπτική Αντοχή Δοκών - Οπτικός έλεγχος ρηγματώσεων

Επιπροσθέτως για κάθε μια από τις δοκιμαζόμενες συνθέσεις σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκαν οι καθιερωμένοι έλεγχοι για την ποιότητα και τις βασικές ιδιότητές του. Οι περιγραφές όλων των επιλεγμένων δοκιμών παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

6.2. Δοκιμές ελέγχου ποιότητας παραγόμενων συνθέσεων

6.2.1. Θλιπτική αντοχή

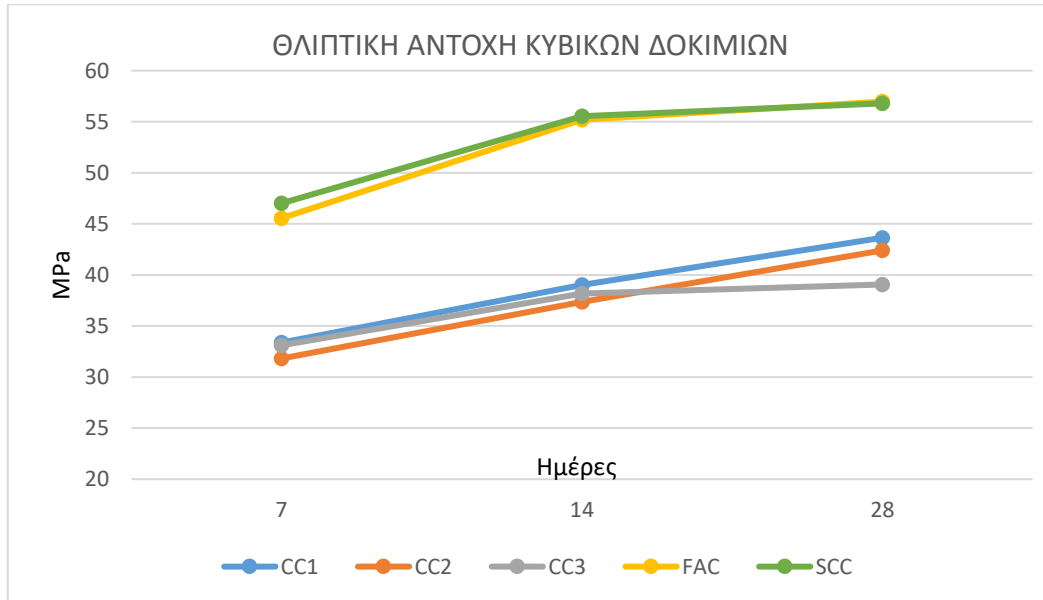
Η θλιπτική αντοχή αποτελεί γενικό δείκτη της ποιότητας του σκυροδέματος, γιατί όλες σχεδόν οι ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος (υδατοστεγανότητα, αντοχή σε επιφανειακή φθορά, ανθεκτικότητα, κλπ), βελτιώνονται με τη μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος η οποία σχετίζεται με το πορώδες του υλικού το οποίο είναι καθοριστικός παράγοντας της θλιπτικής αντοχής του. Ο προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον ΚΤΣ-2016 σε κυβικά δοκίμια και για κάθε σύνθεση από τρεις φορές: στις 7, στις 14 και στις 28 ημέρες ωρίμασης [50], [142]. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

Μετά από την συντήρηση των δοκιμίων στον υγρό θάλαμο (για 7-14-28 μέρες), θερμοκρασίας $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 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. Για την παρασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικές μήτρες οι οποίες πληρώθηκαν σε στρώσεις από τις παραγόμενες συνθήκες σε τράπεζα δόνησης για καλύτερη συμπίκνωση των δοκιμίων (Εικόνα 6.1). 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 (αυτή που ίσωσε το μυστρί) ανάμεσα στις πλάκες θλίψης, κάτι που αποφεύχθηκε. Στη συνέχεια ξεκίνησε η φόρτιση του δοκιμίου έως ότου η συσκευή καταγράψει το ανώτερο φορτίο πριν τη θραύση (δόθηκε 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. [12]



Εικόνα 6. 1 Πλήρωση και δόνηση μεταλλικών μητρών (αριστερά), δοκιμή θλίψης κυβικού δοκιμίου (δεξιά)

Για κάθε δοκιμαζόμενη σύνθεση σκυροδέματος, μετρήθηκαν οι θλιπτικές αντοχές των κυβικών δοκιμίων στις 7, 14 και 28 ημέρες από τη σκυροδέτηση. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τις εξέλιξης των θλιπτικών αντοχών σε αυτό το διάστημα. Παρατηρείται πως δημιουργούνται 2 ομάδες συνθέσεων, οι CC1, CC2, CC3 με αποτελέσματα από 39 έως 44 MPa και οι FAC και SCC με αντοχές πάνω από 55 MPa. Αυτό οφείλετε στη διαφορετική σύσταση των συνθέσεων (λόγος N/T, περιεκτικότητα τσιμέντου κ.ά.) και δείχνει μια πρώτη ομαδοποίηση με βάση την ποιότητα τους.



Σχήμα 6. 1 Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμίων στις 7, 17, 28 ημέρες

6.2.2. Θερμοκρασία σκυροδέματος

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 [143]. Η θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τους +30 °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 °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.



Εικόνα 6. 2 Θερμομέτρηση του νωπού σκυροδέματος πριν την παρασκευή δοκιμίων

Η θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος, κατά τις δοκιμές που υποβάλλεται, πρέπει να είναι μεταξύ 15°C και 22°C. Επίσης πρέπει να αναφερθεί πως 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. Παρακάτω παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες των μιγμάτων που καταγράφηκαν πριν τη σκυροδέτηση των δοκιμίων.

Πίνακας 6. 1 Θερμοκρασία νωπού μίγματος σκυροδέματος για τις δοκιμαζόμενες συνθέσεις

	CC1	CC2	CC3	FAC	SCC
Θερμοκρασία	19,3°C	19,2°C	19°C	19,1°C	19,3°C

Παρατηρείται πως όλες βρίσκονται σε ένα αποδεκτό επίπεδο (19-19,3°C). Αυτό παρατηρήθηκε καθώς η διαδικασία της ανάμιξης ήταν ελεγχόμενη και η σκυροδέτηση έγινε σε πολύ σύντομο διάστημα από το πέρας της ανάμιξης.

6.2.3. Δοκιμές Ελέγχου Εργασιμότητας

Η κάθιση αποτελεί ένα μέτρο εργασιμότητας και 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 [144]. Πιο συγκεκριμένα η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

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 συμπίκνωση 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 συμπίκνωση των 2 στρώσεων καθώς η πρότυπη ράβδος δεν πρέπει να εισέρχεται εντός της προηγούμενης στρώσης. Αφού ολοκληρωθεί η συμπίκνωση της 3ης στρώσης, μορφώνεται και επιπεδώνεται η επιφάνεια της κορυφής του κώνου και ο κώνος αφαιρείται αργά και σταθερά εντός χρόνου 5 δευτερολέπτων το 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. Έπειτα προσδιορίζεται από τον Κ.Τ.Σ.-2016 η κατηγορία κάθισης του σκυροδέματος.



Εικόνα 6. 3 Έλεγχος εργασιμότητας - Δοκιμή κάθισης νωπού σκυροδέματος

Στο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα επιλέγεται η δοκιμή εξάπλωσης. Η δοκιμή αυτή καθορίζει τη συνεκτικότητα του νωπού σκυροδέματος μετρώντας την εξάπλωση του σκυροδέματος σε οριζόντια επίπεδη βάση. Μεταλλικός 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 [8], [9]. Η εξάπλωση του σκυροδέματος μετριέται παράλληλα προς τις πλευρές της βάσης διαμέσου του κέντρου της (Εικόνα 6.4).



Εικόνα 6. 4 Δοκιμή εξάπλωσης αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος

Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών κάθισης – εξάπλωσης για τις εξεταζόμενες συνθέσεις.

Πίνακας 6. 2 Αποτελέσματα κάθισης-εξάπλωσης και κατηγοριοποίηση των συνθέσεων κατά ΚΤΣ 2016

	CC1	CC2	CC3	FAC	SCC
Κάθιση – Εξάπλωση	2 cm	3 cm	2 cm	7 cm	60 cm
(Κατηγορία)	S1	S1	S1	S2	F5

Στις συνθέσεις CC1, CC2, CC3, FAC πραγματοποιήθηκε δοκιμή κάθισης, ενώ στην SCC (ΑΣΣ) δοκιμή εξάπλωσης. Από τις τιμές που προέκυψαν και σύμφωνα με τον ΚΤΣ-2016 (Πίνακας Β2-3 και Πίνακας Β2-6) γίνεται δυνατή η κατηγοριοποίηση των συνθέσεων στις ονομαζόμενες κατηγορίες κάθισης. Συγκεκριμένα οι συνθέσεις CC1, CC2, CC3 συγκαταλέγονται στη S1 κατηγορία (1-4 cm) ενώ η σύνθεση FAC στην κατηγορία S2 (5-9cm).

6.3. Παρακολούθηση του δυναμικού διάβρωσης οπλισμού

Στο βασικό πειραματικό μέρος της διατριβής για μια περίοδο 42 μηνών πραγματοποιήθηκε τακτική παρακολούθηση του δυναμικού διάβρωσης των ράβδων οπλισμού με τη χρήση θεϊκού χαλκού (CSE) ως ηλεκτρόδιο αναφοράς. Σε αυτή τη δοκιμή, η αξιολόγηση της διάβρωσης των δοκών έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM G876-9, όπου τιμές άνω των -350mV δείχνουν πιθανότητα διάβρωσης 90%. Αναλυτικά η διαδικασία περιγράφεται στη συνέχεια.

Το πρότυπο ηλεκτρόδιο αναφοράς ή ημιστοιχείο (half cell) είναι μια απλή συσκευή (Εικόνα 6.5) που αποτελείται από ένα κομμάτι μετάλλου το οποίο βρίσκεται σε διάλυμα προκαθορισμένης συγκέντρωσης των δικών του ιόντων, όπως χαλκός σε κορεσμένο θεϊκό χαλκό (copper in saturated copper sulphate) ή άργυρος σε χλωριούχο άργυρο (silver in silver chloride). Όταν το ηλεκτρόδιο αυτό

ενωθεί με ένα άλλο μέταλλο σε διάλυμα των δικών του ιόντων θα δημιουργηθεί διαφορά δυναμικού. Στην περίπτωση της μέτρησης της διάβρωσης, το δεύτερο μέταλλο είναι ο σίδηρος του χάλυβα που περιβάλλεται από τα οξειδία σιδήρου που έχουν δημιουργηθεί λόγω της διάβρωσης. Με την ένωση των δύο half cell δημιουργείται ένα απλό ηλεκτρικό στοιχείο (simple electrical cell) που παράγει τάση λόγω των διαφορετικών θέσεων των δύο μετάλλων στην ηλεκτροχημική ακολουθία και λόγω της διαφοράς των διαλυμάτων. [145]

6.3.1. Μετρούμενα Μεγέθη

Με τη μετακίνηση του ηλεκτροδίου αναφοράς, το οποίο αποτελεί το ένα ημιστοιχείο, κατά μήκος της επιφάνειας του σκυροδέματος μεταβάλλεται το πλήρες στοιχείο αφού η κατάσταση της επιφάνειας του οπλισμού κάτω από το σκυρόδεμα είναι διαφορετική σε κάθε σημείο. Αν ο χάλυβας διατηρεί την παθητικότητά του, η τάση που μετριέται είναι μικρή (γύρω στα 0 έως -200 mV, ή ακόμα και μικρές θετικές τιμές) ενώ αν η παθητική στρώση είναι σε στάδιο κατάρρευσης και μεγάλες ποσότητες χάλυβα διαλύονται (ή μικρές περιοχές έχουν διαβρωθεί μειώνοντας το μέσο όρο της τάσης), η τάση παίρνει πιο αρνητικές τιμές (γύρω στα -350 mV) [146]. Αν η τάση παίρνει τιμές πιο αρνητικές των -350mV, ο χάλυβας συνήθως βρίσκεται σε κατάσταση ενεργούς διάβρωσης. Οι τιμές της τάσης είναι αρνητικές λόγω του ότι συνδέεται ο θετικός ακροδέκτης του βολτομέτρου στο χάλυβα και ο αρνητικός ακροδέκτης στο ηλεκτρόδιο αναφοράς. [125]



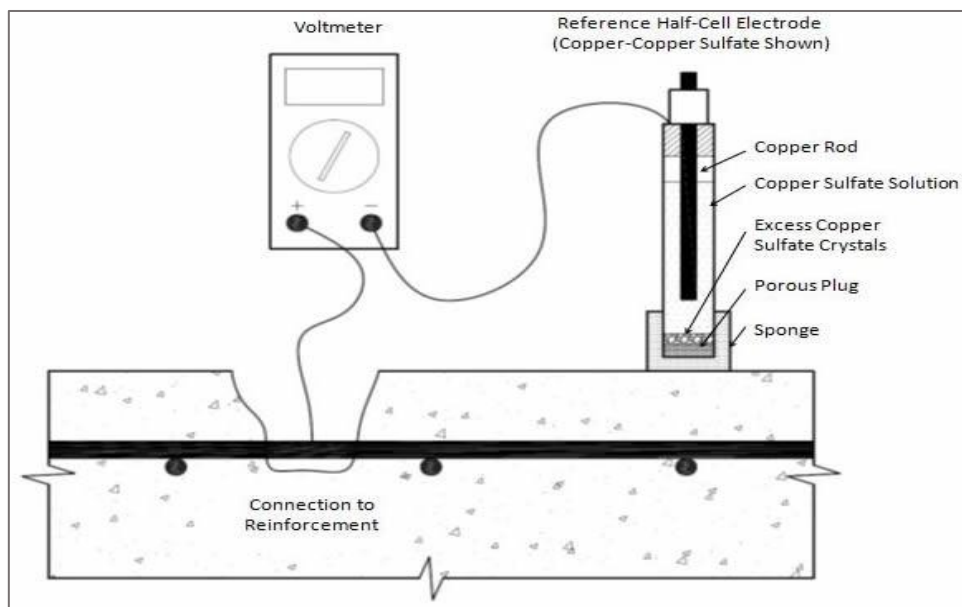
Εικόνα 6. 5 Ηλεκτρόδιο αναφοράς χαλκού σε κορεσμένο χαλκό (αριστερά), δοκιμή στο πεδίο (δεξιά)

Η τεχνική αυτή είναι δυνατόν να δώσει πολύ αρνητικές τάσεις σε κορεσμένες συνθήκες όπου δεν υπάρχει οξυγόνο για να δημιουργηθεί η προστατευτική οξειδική στρώση όμως αφού δεν υπάρχει οξυγόνο δεν μπορεί να υπάρξει ούτε και διάβρωση. Η κατάσταση αυτή φανερώνει την αδυναμία της μεθόδου του half cell potential ότι δηλαδή δεν πρόκειται για μέτρηση του ρυθμού της διάβρωσης αλλά για μέτρηση της θερμοδυναμικής της διάβρωσης. Η τάση της διάβρωσης που μετριέται μπορεί να είναι παραπλανητική και η ερμηνεία της βασίζεται σε εμπειρικές παρατηρήσεις και όχι στην ακριβή επιστημονική θεωρία. Ο λόγος που προκύπτει το πρόβλημα αυτό είναι ότι η τάση δεν αποτελεί συνάρτηση μόνο των συνθηκών διάβρωσης αλλά και άλλων παραγόντων. Επίσης από τις συνθήκες διάβρωσης δεν προκύπτει απαραίτητα ο ρυθμός διάβρωσης. Η μέτρηση του half cell potential δίνει μια ένδειξη του κινδύνου διάβρωσης του σκυροδέματος ενώ συνδέεται εμπειρικά, μέσω συγκρίσεων, με την πιθανότητα διάβρωσης. Σύμφωνα με τον Broomfield (2007), οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη δραστηριότητα του σιδήρου στο διάλυμα, άρα και τις τάσεις που μετρούνται, είναι η έκταση της αποαθητικοποίησης του χάλυβα, ο βαθμός ενανθράκωσης γύρω από το χάλυβα ή η παρουσία ικανής

ποσότητας χλωριόντων για να καταστραφεί το προστατευτικό στρώμα και η παρουσία οξυγόνου για να διατηρηθεί το στρώμα αυτό. [74]

6.3.2. Εξοπλισμός και χρήση του

Ο εξοπλισμός που απαιτείται για τη λήψη μετρήσεων του half cell potential είναι ένα ψηφιακό βολτόμετρο υψηλής αντίστασης που συνδέεται με το χάλυβα οπλισμού και με το ηλεκτρόδιο αναφοράς μέσω καλωδίων. Μια από τις πιο συνηθισμένες συσκευές μέτρησης του half cell φαίνεται στο Σχήμα 6.2. [129]



Σχήμα 6. 2 Παραστατική απεικόνιση του εξοπλισμού μέτρησης του half cell potential του χάλυβα στο σκυρόδεμα

Η διαδικασία μέτρησης με τη συγκεκριμένη τεχνική δεν παρουσιάζει συνήθως ιδιαίτερες δυσκολίες και σύμφωνα με τον Broomfield [74] περιλαμβάνει, τα ακόλουθα βήματα:

1. Έλεγχος και βαθμονόμηση του ηλεκτροδίου αναφοράς.
2. Έλεγχος του ψηφιακού βολτομέτρου και των σχετικών καλωδίων και συνδέσεων.
3. Επιλογή της επιφάνειας μέτρησης που μπορεί να είναι ολόκληρο στοιχείο ή μια αντιπροσωπευτική περιοχή ενός στοιχείου.
4. Προσδιορισμός της θέσης του χάλυβα και της απόστασης των ράβδων με τη χρήση cover meter.
5. Σύνδεση του καλωδίου με ήδη εκτεθειμένο χάλυβα ή με χάλυβα που εκτίθεται ειδικά για αυτό τον σκοπό. Η σύνδεση πρέπει να είναι μεταξύ μετάλλων και μπορεί να γίνει και με τη χρήση των ειδικών βιδών (self-tapping screws).
6. Έλεγχος της συνέχειας του χάλυβα με τη χρήση ενός μετρητή αντίστασης συνεχούς ρεύματος μεταξύ δύο απομακρυσμένων σημείων.
7. Σχεδιασμός του πλέγματος (grid) με τα σημεία στα οποία θα ληφθούν μετρήσεις. Το μέγεθος και το σχήμα του καθορίζονται κυρίως από τις αποστάσεις των ράβδων και τη γεωμετρία του μετρούμενου στοιχείου.

8. Διαβροχή της επιφάνειας μέτρησης για να εξασφαλιστεί καλή επαφή μεταξύ του ηλεκτροδίου και του σκυροδέματος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί νερό της βρύσης, διάλυμα σαπουνιού ή ακόμα και διάλυμα αλατόνευρο.

9. Καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών, των στοιχείων του ηλεκτροδίου αναφοράς, του υγρού επαφής, της ηλεκτρικής σύνδεσης, του βάθους της επικάλυψης του οπλισμού, της κατάστασης τους σκυροδέματος και της ακριβούς τοποθεσίας της μέτρησης. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσεις και την ερμηνεία τους.

10. Λήψη και καταγραφή των μετρήσεων.

11. Εξέταση για ανωμαλίες και έλεγχος για αιτίες διάβρωσης στις περιοχές που έδωσαν τις πιο αρνητικές τιμές.

6.3.3. Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Το ηλεκτρόδιο αναφοράς, όπως προαναφέρθηκε, είναι ένα μέταλλο το οποίο βρίσκεται σε διάλυμα των δικών του ιόντων και μπορεί να είναι άργυρος σε χλωριούχο άργυρο, μαγγάνιο σε διοξειδίο του μαγγανίου, χαλκός σε κορεσμένο θεικό χαλκό ή άλλο μέταλλο. Είναι πολύ σημαντικό να καταγράφεται ποιο είδος ηλεκτροδίου χρησιμοποιείται αφού από κάθε ένα από αυτά προκύπτουν διαφορετικές τιμές εξόδου. Για παράδειγμα το ηλεκτρόδιο αργυρού δίνει τιμές που εξαρτώνται από τη συγκέντρωση του χλωριούχου καλίου στο διάλυμα του και που είναι περίπου 110 mV πιο θετικές από αυτές που δίνει το ηλεκτρόδιο χαλκού. Στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται τα κριτήρια του ASTM C876 που καθορίζουν τις συνθήκες διάβρωσης για τα ηλεκτρόδια χαλκού και αργύρου.

Πίνακας 6. 3 Κριτήρια του προτύπου ASTM C876 για τη διάβρωση του οπλισμού σκυροδέματος για ηλεκτρόδια χαλκού και αργυρού [124]

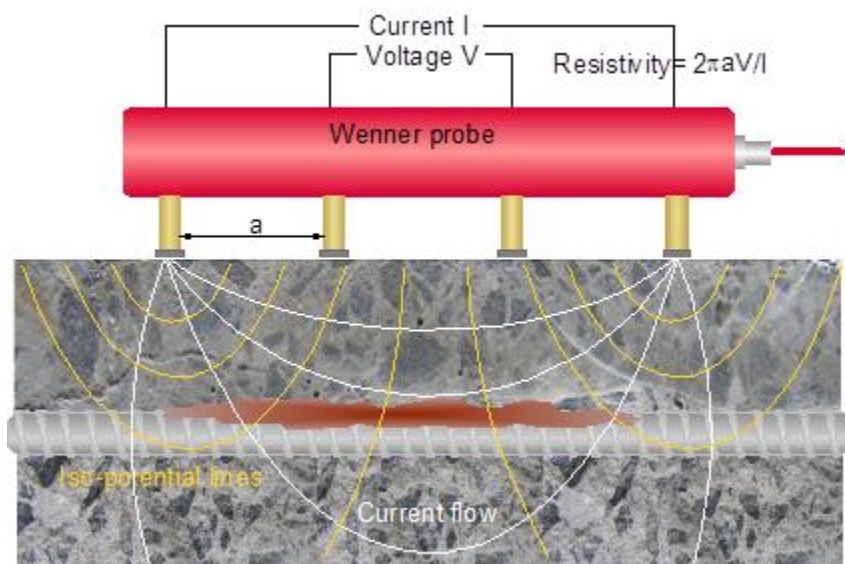
Κλάση διάβρωσης	Είδος ηλεκτροδίου αναφοράς		Συνθήκες διάβρωσης
	Χαλκός σε κορεσμένο θεικό χαλκό	Άργυρος σε χλωριούχο άργυρο	
1	> -200mV	> -100mV	Μικρός (10%) κίνδυνος διάβρωσης
2	-200 μέχρι -350 mV	-100 μέχρι -250 mV	Μεσαίος κίνδυνος διάβρωσης
3	-350 μέχρι -500 mV	-250 μέχρι -400 mV	Μεγάλος (>90%) κίνδυνος διάβρωσης
4	< -500 mV	< -400 mV	Σίγουρη διάβρωση

Στην παρούσα πειραματική διαδικασία επιλέχθηκε το ηλεκτρόδιο θεικού χαλκού καθότι δίνει μεγαλύτερη επαναληψιμότητα στις μετρήσεις και είναι πιο ανθεκτικό για τις δοκιμές πεδίου που πραγματοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα της εξέλιξης του δυναμικού διάβρωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 7.1, όπου γίνεται μια συγκριτική μελέτη της συμπεριφοράς των εξεταζόμενων συνθέσεων προκειμένου να διαπιστωθεί ποια από αυτές και για ποιο λόγο προστατεύει καλύτερα τον οπλισμό της από τη διάβρωση. Επίσης μέσω του ελέγχου του δυναμικού παρακολουθείται η επιρροή της μόνιμης φόρτισης στο φαινόμενο της διάβρωσης, συγκρίνοντας πως συμπεριφέρονται τα δοκίμια της κάθε σύνθεσης για κάθε περίπτωση φόρτισης.

6.4. Ηλεκτρική αντίσταση σκυροδέματος

Λόγω του ότι η διάβρωση είναι ηλεκτροχημικό φαινόμενο, η ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος σχετίζεται με το ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα. Αυτό συμβαίνει επειδή το ιοντικό ρεύμα (ionic current), δηλαδή το ηλεκτρικό ρεύμα με τη μορφή ροής φορτισμένων ιόντων στο νερό των πόρων, πρέπει να περάσει από τις ανόδους στις καθόδους για να προκληθεί διάβρωση. Στο βασικό πειραματικό μέρος της διατριβής για μια περίοδο 42 μηνών πραγματοποιήθηκε τακτική παρακολούθηση της ηλεκτρικής αντίστασης των συνθέσεων. Αναλυτικά η διαδικασία περιγράφεται στη συνέχεια.

Η αξιολόγηση της ηλεκτρικής αντίστασης των δοκών σκυροδέματος έγινε με τον μετρητή αντίστασης τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων (four probe resistivity meter) ή Wenner Probe. Ο συγκεκριμένος μετρητής δημιουργήθηκε αρχικά για τη μέτρηση της αντίστασης του εδάφους όμως με κάποιες εξειδικευμένες τροποποιήσεις χρησιμοποιείται συχνά για τη μέτρηση της αντίστασης του σκυροδέματος η οποία υποδηλώνει την πιθανότητα διάβρωσης αν ο χάλυβας αποπαθητικοποιηθεί [132]. Τα περισσότερα συστήματα μέτρησης της αντίστασης χρησιμοποιούν τέσσερα βοηθητικά ηλεκτρόδια. Ένα συνηθισμένο τέτοιο σύστημα φαίνεται στην Εικόνα 6.6. Τα εξωτερικά ηλεκτρόδια περνούν το ρεύμα διαμέσου του σκυροδέματος ενώ τα εσωτερικά ανιχνεύουν τη διαφορά της τάσης. Ο τρόπος λειτουργίας του μετρητή αντίστασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6. 3 Μέθοδος λειτουργίας του Wenner probe



Εικόνα 6. 6 Μετρητής αντίστασης τεσσάρων ηλεκτροδίων (Wenner probe) – δοκιμή πεδίου

Η αντίσταση ρ που μετράται, για ένα ομογενές υλικό, δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (6.1)$$

όπου a είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, I είναι το εφαρμοζόμενο ρεύμα διαμέσου των εξωτερικών ηλεκτροδίων και V είναι η τάση που μετρείται μεταξύ των εσωτερικών ηλεκτροδίων. [74]

6.4.1. Εξοπλισμός και χρήση του

Στο παρελθόν θεωρούνταν αναγκαία η διάνοιξη τρυπών στο σκυρόδεμα στις οποίες εισάγονταν τα ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια όμως στις σύγχρονες συσκευές μέτρησης είναι εφοδιασμένα με ελατήρια επαναφοράς οπότε πρέπει απλά να πιέζονται πάνω στην επιφάνεια μέτρησης. Για να εξασφαλιστεί η παρουσία υγρασίας στην περιοχή μέτρησης μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί διαβρεκτικό τζελ είτε να διαβρεχτούν τα ξύλινα βύσματα που βρίσκονται στην άκρη των ηλεκτροδίων. Υπάρχουν και συστήματα δύο ηλεκτροδίων τα οποία είναι φτηνότερα και λιγότερο ακριβή και συνήθως χρησιμοποιούνται αφού ανοιχτούν τρύπες στο σκυρόδεμα. Σύμφωνα με τους Polder et al (2000), και στα δύο πιο πάνω συστήματα (τεσσάρων ή δύο ηλεκτροδίων) είναι κοινώς αποδεκτό ότι η απόσταση a μεταξύ των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μέγεθος του μεγαλύτερου αδρανούς. Αυτό συμβαίνει για να αποφευχθεί η μέτρηση της αντίστασης ενός μόνο αδρανούς. [147]

6.4.2. Μετρούμενα Μεγέθη

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ποσότητα που μετράται με την τεχνική αυτή είναι η ηλεκτρική αντίσταση. Το μέγεθος αυτό αποτελεί ένδειξη της ποσότητας υγρασίας στους πόρους και του μεγέθους και της στρεβλότητας του συστήματος των πόρων. Επίσης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του σκυροδέματος που με τη σειρά της επηρεάζεται από την περιεκτικότητα σε τσιμέντο, την αναλογία νερού/τσιμέντου, τη σκλήρυνση και τα πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν. Το επίπεδο συγκέντρωσης των χλωριόντων δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αντίσταση αφού υπάρχουν ήδη πολλά ιόντα διαλυμένα στο νερό των πόρων και η παρουσία λίγων ιόντων παραπάνω δεν διαφοροποιεί σημαντικά την κατάσταση. Ωστόσο τα χλωριόντα στο σκυρόδεμα μπορεί να είναι υγροσκοπικά, δηλαδή να προκαλούν περισσότερη συγκράτηση νερού στο σκυρόδεμα, και για το λόγο αυτό αποδίδεται συχνά στα χλωριόντα η συμβολή στη μείωση της αντίστασης του σκυροδέματος. [74]

6.4.3. Ερμηνεία μετρήσεων

Για τους πιο πάνω λόγους, η ερμηνεία των μετρήσεων που λαμβάνονται με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι κυρίως εμπειρική. Η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος σχετίζεται συνήθως με το ρυθμό διάβρωσης (Polder et al 2000). Στον Πίνακα 6.4 παρουσιάζεται ο επικρατέστερος τρόπος ερμηνείας των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης που λαμβάνεται με το σύστημα των τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων. [147]

Πίνακας 6. 4 Εμπειρικός συσχετισμός της αντίστασης του σκυροδέματος που λαμβάνεται με το σύστημα Wenner Probe και του ρυθμού διάβρωσης

Κλάση διάβρωσης	Αντίσταση (Concrete resistivity)	Ρυθμός διάβρωσης (Corrosion rate)
1	>20 kΩcm	Χαμηλός
2	10 μέχρι 20 kΩcm	Χαμηλός μέχρι μέτριος
3	5 μέχρι 10 kΩcm	Ψηλός
4	< 5 kΩcm	Πολύ ψηλός

Τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής αντίστασης παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 7.2, όπου γίνεται μια συγκριτική μελέτη της συμπεριφοράς των εξεταζόμενων συνθέσεων προκειμένου να διαπιστωθεί ποια από αυτές και για ποιο λόγο προστατεύει καλύτερα τον οπλισμό της από τη διάβρωση.

6.5. Θεωρητικός υπολογισμός του ρυθμού διάβρωσης

Ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από περιβαλλοντικούς παράγοντες (π.χ. αύξηση ρυθμού σε συνθήκες υγρασίας, ζέστης, ρύπανσης, αλμυρότητας, οξύτητας, υπέρυθρης ακτινοβολίας και έκθεσης σε βακτηρίδια), ενώ επιπρόσθετοι παράγοντες αύξησης του ρυθμού οξείδωσης είναι οι μεγάλες μηχανικές τάσεις (π.χ. κοχλιωτοί κόμβοι), οι ανωμαλίες στην επιφάνεια του μετάλλου (π.χ. επικολλημένα ελάσματα) και η ύπαρξη διαφυγόντων ρευμάτων (π.χ. στο υπέδαφος). Σύμφωνα με το EN ISO 12944-2, καθορίζονται 6 κατηγορίες διάβρωσης (Πίνακας 6.5), οι οποίες όμως είναι γενικές και δεν αφορούν συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας, μηχανικής καταπόνησης ή άλλων ειδικών περιπτώσεων. [148]

Πίνακας 6. 5 Κατηγορίες διάβρωσης σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 12944-2

Κατηγορία έκθεσης	Κατάσταση διάβρωσης	Ρυθμός διάβρωσης (ανά έτος)	Εξωτερικό περιβάλλον	Εσωτερικό περιβάλλον	Πάχος ξηρού υμένα ¹⁾ (μm)
C1, C2	Ασήμαντη	<10-200g/m ² 1.3-25 μm	Αγροτικό περιβάλλον, χαμηλή ρύπανση, ξηροί χώροι	Θερμαινόμενα κτίρια, Μη θερμαινόμενα κτίρια/ πιθανότητα συμπύκνωσης, Ποσοστό υγρασίας <60%	75-200
C3	Μέτρια	200-400 g/m ² 25-50 μm	Αστικές και βιομηχανικές περιοχές, Ατμόσφαιρα με μεσαία περιεκτικότητα σε SO ₂	Χώροι παραγωγής με υψηλή υγρασία και ρύπανση του αέρα	200
C4	Μεγάλη	400-650 g/m ² 50-80 μm	Βιομηχανικές περιοχές, παραθαλάσσιες περιοχές, Κολυμβητήρια	Χημικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας	240 ² 280 ³
C5-1	Πολύ μεγάλη – Βιομηχανική	650-1500g/m ²	Βιομηχανικό περιβάλλον με διαρκή υγρασία και επιθετικό περιβάλλον		320
C5-M	Πολύ μεγάλη - Θαλάσσια	650-1500g/m ²	Θαλάσσιο περιβάλλον, πλατφόρμες στην θάλασσα, υψηλή περιεκτικότητα σε χλωρίδια		320

1) Το πάχος του ξηρού υμένα στον πίνακα αναφέρεται σε πολυστρωματικά συστήματα βαφών (multi-coat systems). Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται σύστημα βαφής ενός στρώματος (single coat system) είναι αναγκαίο να εφαρμόζονται μεγαλύτερα πάχη ξηρού υμένα. 2) Βαφή ψευδαργύρου (zinc) 3) Βαφή χωρίς ψευδάργυρο (non zinc)

Οι τιμές που εξήχθησαν από την παρακολούθηση του δυναμικού διάβρωσης και της ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκαν στην Εξίσωση (6.2) για να προκύψει η τιμή R. Στη συνέχεια, με τη χρήση του νόμου του Ohm, με τις τιμές τάσης (V) και αντίστασης (R), εξάγεται η πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης I (A) για κάθε περίπτωση. [149], [150]

$$R(\Omega) = \frac{\rho}{2\pi l} \times \ln\left(\frac{l^2}{td}\right) \quad (6.2)$$

Η σχέση της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης (I) και της απώλειας βάρους (Δm) του οπλισμού λόγω της διάβρωσης, καθορίζεται χρησιμοποιώντας τον Νόμο του Faraday, ως εξής:

$$\Delta m = \frac{AIt}{ZF} \quad (6.3)$$

Οπου,

Δm = απώλεια μάζας οπλισμού λόγω διάβρωσης,

A = ατομικό βάρος σιδήρου (56g)

I = ρεύμα διάβρωσης (σε A)

t = χρόνος που πέρασε (σε δευτερόλεπτα)

Z = σθένος του ηλεκτροδίου σιδήρου που αντιδρά (2)

F = Σταθερά του Faraday (96.500amp×s).

Η απώλεια βάρους μετάλλων λόγω διάβρωσης μπορεί επίσης να εκφραστεί ως:

$$\Delta m = \delta \gamma \cdot \alpha \delta \gamma \quad (6.4)$$

Οπου,

α = το εμβαδόν της ράβδου πριν από τη διάβρωση (cm^2),

δ = απώλεια υλικού (cm),

γ = πυκνότητα υλικού (g/cm^3).

Το ρεύμα διάβρωσης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$I = i \cdot \alpha \quad (6.5)$$

Οπου,

i = πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης (amp/cm^2).

Με αντικατάσταση από την Εξίσωση (6.4) και (6.5) στην (6.3) προκύπτει:

$$\delta = \frac{AIt}{\gamma It} \quad (6.6)$$

Η παραπάνω Εξίσωση (6.6) μπορεί να αναλυθεί λαμβάνοντας υπόψη γνωστούς παράγοντες όπως, την πυκνότητα του σιδήρου $\gamma = 7,86 \text{ g}/\text{cm}^3$ και τις τιμές για τα A, Z και F (όπως υπολογίζονται από τις παραπάνω εξισώσεις).

Εάν το R οριστεί ως η απώλεια μάζας ανά έτος ($\text{cm}/\text{έτος}$), η τιμή του μπορεί να προσδιοριστεί από την Εξίσωση (6.7) αντικαθιστώντας:

$t = 1$ έτος (σε κατάλληλες μονάδες) για να δώσει:

$$R = 1156i \text{ (cm / έτος)} \quad (6.7)$$

Για παράδειγμα, για πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης $i = 1 \text{ mA / cm}^2$ ο ρυθμός διάβρωσης R ισούται με $1,156 \text{ cm/έτος}$ [από την Εξίσωση (6.7)].

Εάν σε ένα στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος, η περίοδος διάβρωσης μετά την σκυροδέτηση είναι T έτη, τότε η απώλεια μετάλλου μετά από T έτη ισούται με $RT \text{ (cm)}$. Επομένως, η μείωση στη διάμετρο του οπλισμού σε T έτη, μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\% \text{ μείωση διαμέτρου της ράβδου} = (2RT / DR) \times 100 \quad (6.8)$$

Η έκφραση $2RT / D$ τοις εκατό, που αντιπροσωπεύει μείωση στη διάμετρο της ράβδου ενίσχυσης λόγω διάβρωσης για T χρόνια, ορίζεται επίσης ως ο βαθμός διάβρωσης οπλισμού που μελετάται. Με αντικατάσταση του R από την Εξίσωση (6.7) στην Εξίσωση (6.8) προκύπτει:

$$\% \text{ μείωση διαμέτρου της ράβδου} = (2312 i T) / D \quad (6.9)$$

Στην περίπτωσή μας, ο συνολικός χρόνος έκθεσης είναι 42 μήνες. Ωστόσο, το διάστημα που έχει οριστεί ως T στους υπολογισμούς των παραπάνω εξισώσεων είναι 2 (έτη) καθώς η έναρξη της διάβρωσης πραγματοποιήθηκε περίπου 1,5 χρόνια μετά την έναρξη των πειραμάτων όπως μπορούμε να δούμε από της ηλεκτροχημικές μετρήσεις (δυναμικό διάβρωσης $< -350\text{mV}$). Λαμβάνοντας αυτά υπόψη η περίοδος μελέτης για τη τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης του οπλισμού υπολογίζεται από τον 18^ο μήνα έως τον 24^ο μήνα (τελευταία δοκιμή). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 7.3 και αποτελούν υψηλής σημασίας δεδομένα για την παρούσα έρευνα καθότι βοηθούν στο να διαπιστωθεί ποια από τις συνθέσεις και για ποιο λόγο προστατεύει καλύτερα τον οπλισμό της από τη διάβρωση. Επίσης μέσω των υπολογισθέντων ρυθμών διάβρωσης θα διαπιστωθεί πως επηρεάζει η μόνιμη φόρτιση το φαινόμενο της διάβρωσης, συγκρίνοντας πως συμπεριφέρεται σε κάθε περίπτωση η ίδια σύνθεση.

6.6. Δοκιμή διαπερατότητας χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

Η μέθοδος ASTM C1202 [127] είναι μια επιταχυνόμενη μέτρηση διαπερατότητας χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Σκοπός της μεθόδου είναι η εκτίμηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος, η οποία μπορεί να αποτελέσει μια άμεση ένδειξη της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος στη διείσδυση χλωριόντων. Η πειραματική διαδικασία τη μεθόδου αποτελείται από τρία βήματα:

Στο πρώτο στάδιο, γίνεται προετοιμασία των δοκιμίων διαστάσεων $\Phi 95 \times 50\text{mm}$ (Εικόνα 6.7) και τοποθέτησή τους σε θάλαμο κενού. Τα δοκίμια εντός του θαλάμου και ενώ βρίσκονται υπό κενό, πληρώνονται με απαερισμένο νερό. Ακολουθεί διακοπή του κενού και παραμονή των δοκιμίων στο νερό για 18 ± 2 ώρες.

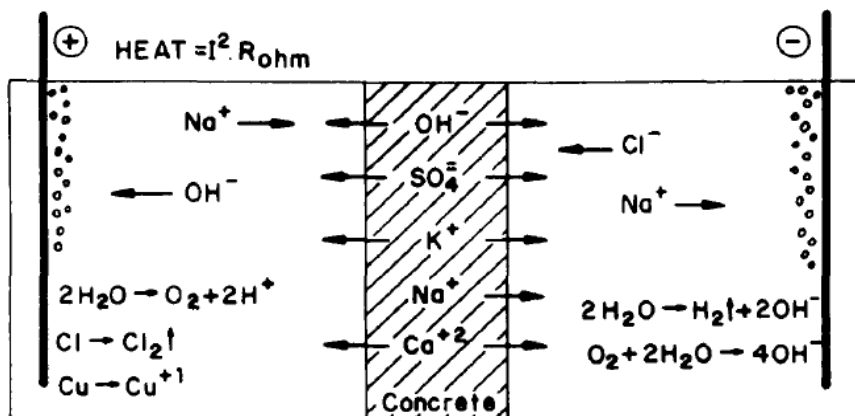


Εικόνα 6. 7 Τομή δοκμίου (αριστερά) – Κυλινδρικό δοκίμιο διαστάσεων $\Phi 95 \times 50\text{mm}$ (δεξιά)

Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της μεθόδου ASTM C 1202. Τα δοκίμια αφού προετοιμαστούν, τοποθετούνται στη συσκευή μέτρησης (Εικόνα 6.8). Τα διαλύματα που τοποθετούνται στην άνοδο και την κάθοδο του κελιού είναι (0.3N) καυστικό νάτριο (NaOH) και 3% w/v χλωριούχο νάτριο (NaCl) αντίστοιχα. Οι συνθήκες υπό τις οποίες διεξάγεται η μέτρηση είναι:

- 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 διαλυμάτων. [32]



Σχήμα 6. 4 Αρχή λειτουργίας της μεθόδου ASTM C 1202



Εικόνα 6. 8 Συσκευή μέτρησης διαπερατότητας χλωριόντων κατά ASTM C 1202

Αφότου η μέτρηση ολοκληρωθεί, σημειώνεται η τελική τιμή του ρεύματος και της θερμοκρασίας. Έπειτα, εφαρμόζοντας τις τιμές του ρεύματος που έχουν καταγραφεί στην εξίσωση 6.10, μπορεί να υπολογισθεί το συνολικό φορτίο που πέρασε μέσα από το δοκίμιο.

$$Q = 900 \cdot (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad (6.10)$$

όπου:

Q: Το συνολικό φορτίο που πέρασε μέσα από το δοκίμιο κατά τη διάρκεια της μέτρησης (Coulomb).

I₀: Η ένταση του ρεύματος που καταγράφηκε τη στιγμή που εφαρμόστηκε τάση 60 Volt στο δοκίμιο (Ampere).

I_t: Η ένταση του ρεύματος (Ampere) που καταγράφηκε σε χρονικό διάστημα t (min) από τη στιγμή που εφαρμόστηκε στο δοκίμιο τάση 60 Volt.

Συγκρίνοντας την τιμή του φορτίου που υπολογίστηκε με αυτές που δίνονται στον πίνακα 6.6, γίνεται εκτίμηση του μεγέθους της διαπερατότητας σε χλωριόντα που εμφανίζει το δείγμα. [127]

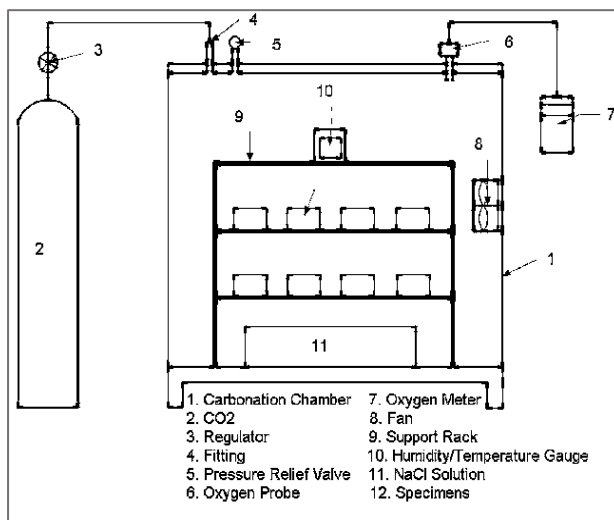
Πίνακας 6. 6 Συσχέτιση του ηλεκτρικού φορτίου με την διαπερατότητα χλωριόντων

Διαπερνόν Φορτίο (Coulomb)	Διαπερατότητα Χλωριόντων
>4000	Υψηλή
2000 - 4000	Μέτρια
1000 - 2000	Χαμηλή
100 - 1000	Πολύ Χαμηλή
<100	Αμελητέα

Τα αποτελέσματα της δοκιμής ASTM 1202 παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 7.4, όπου γίνεται μια συγκριτική μελέτη της συμπεριφοράς των εξεταζόμενων συνθέσεων προκειμένου να διαπιστωθεί ποια από αυτές προστατεύει καλύτερα τον οπλισμό της από τη διάβρωση.

6.7. Δοκιμή επιταχυνόμενης ενανθράκωσης

Η ενανθράκωση είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που προκαλούν επιδείνωση της δομικής ακεραιότητας μιας κατασκευής. Ενανθράκωση είναι η αντίδραση των προϊόντων ενυδάτωσης που διαλύονται στο νερό των πόρων με το διοξείδιο του άνθρακα στον αέρα, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του pH του διαλύματος των πόρων στο σκυρόδεμα από 12,6 σε τιμές μικρότερες από 9 με αποτέλεσμα το παθητικό στρώμα του χάλυβα να καταστραφεί και να επιταχυνθεί η διάβρωση [68]. Η διαδικασία αυτή μπορεί να αυξήσει το ρυθμό ανάπτυξης ρωγμών και να μειώσει την αντοχή του σκυροδέματος [151]. Για τη δοκιμή επιταχυνόμενης ενανθράκωσης κατά EN 13295 τα κυβικά δοκίμια (150mm) προετοιμάστηκαν με ξήρανση σε φούρνο (60 °C) για 48 ώρες για να φύγει η υγρασία. Τοποθετήθηκαν στη συνέχεια στο θάλαμο ενανθράκωσης για 60 (1η παρτίδα) και 120 ημέρες (2η παρτίδα). Η συγκέντρωση του CO₂ διατηρήθηκε στο $1 \pm 0,1\%$. Οι υπόλοιπες συνθήκες ήταν $55 \pm 5\%$ σχετική υγρασία και 20 ± 1 °C θερμοκρασία σύμφωνα με το πρότυπο EN 13295 [140]. Στις 60 και 120 ημέρες, στα δείγματα έγινε μια εγκάρσια τομή και η διατομή εμποτίστηκε με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης. [152]



Σχήμα 6. 5 Σκαρίφημα του θαλάμου ενανθράκωσης (αριστερά), μέτρηση βάθους ενανθράκωσης μετά από εμποτισμό με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης (δεξιά)

Το βάθος της ενανθράκωσης σε κάθε ηλικία εκτιμήθηκε ως η μέση απόσταση, μετρούμενη σε χιλιοστά, από την επιφάνεια του σκυροδέματος ή κονιάματος, όπου το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) έχει μειώσει την αλκαλικότητα του ενυδατωμένου τσιμέντου σε βαθμό τέτοιο ώστε το διάλυμα δείκτη φαινολοφθαλεΐνης που ψεκάζεται στην επιφάνεια να παραμένει άχρωμο. Το μη ενανθρακωμένο κονίαμα χρωματίζεται ιώδες-ερυθρό όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5. Οι μη χρωματισμένες επιφάνειες στην περίμετρο υποδηλώνουν την εμφάνιση ενανθράκωσης. Το τελικό αποτέλεσμα προκύπτει από την ανάλυση των επιμέρους μετρήσεων σύμφωνα με την Εξίσωση 6.11.

$$X_p = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n} \quad (6.11)$$

όπου το X_p είναι το μέσο βάθος ενανθράκωσης, A_i είναι το βάθος στα σημεία δοκιμής και το n είναι ο αριθμός των σημείων [153]. Τα αποτελέσματα του βάθους ενανθράκωσης των δοκιμίων μετά από παραμονή στο θάλαμο για διάστημα 60 και 120 ημερών παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 7.5, όπου γίνεται μια συγκριτική μελέτη της συμπεριφοράς των εξεταζόμενων συνθέσεων προκειμένου να διαπιστωθεί ποια από αυτές προστατεύεται καλύτερα από τη διείδυση CO_2 στο εσωτερικό τους.

6.8. Δοκιμή τριχοειδούς απορρόφησης

Τα χλωριόντα στο εσωτερικό του σκυροδέματος κινούνται μέσω του νερού με τρεις τρόπους: μέσω της διάχυσης, μέσω της τριχοειδούς απορρόφησης και μέσω της διείδυσης υπο πίεση. Η διάχυση προκαλείται από τη συγκέντρωση ποσότητας νερού στους πόρους του σκυροδέματος. Η τριχοειδής απορρόφηση προκαλείται από την επιφανειακή πίεση. Κατά τη διείδυση, η μεταφορά του νερού εξαρτάται από παράγοντες όπως η διασύνδεση των πόρων και η κατανομή του μεγέθους τους [135]. Μελέτες δείχνουν ότι ο αναστολέας διμεθυλαιθανολαμίνη (AMA) ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα μπορεί να μειώσει τα ιόντα χλωρίου στην επιφάνεια μιας ράβδου και να σχηματίσει ένα σταθερό προστατευτικό στρώμα [122], [136]. Ωστόσο, η πραγματική συγκέντρωση του AMA που φτάνει στο βάθος των χαλύβδινων ράβδων είναι σχετικά χαμηλή. Σε πολλές περιπτώσεις η μεμβράνη δεν μπορεί να σχηματιστεί. Η πειραματική διαδικασία για τον προσδιορισμό της τριχοειδούς απορρόφησης νερού των συνθέσεων πραγματοποιήθηκε κατά το πρότυπο BS 1881 [154]. Μετά από ωρίμανση 28 ημερών, 3 κυβικά δοκίμια από κάθε ομάδα με ύψος 150 mm τοποθετήθηκαν σε φούρνο για 72 ώρες. Μετά την αφαίρεσή τους, κάθε δοκίμιο ψύχθηκε για 24 ώρες σε ξηραντήρα. Η μάζα από κάθε δείγμα καταγράφηκε αμέσως μετά τη διαδικασία αυτή. Όλα τα δείγματα βυθίστηκαν σε δεξαμενή για χρονικό διάστημα 30 λεπτών, σε βάθος τέτοιο ώστε η άνω στάθμη του ύδατος να είναι τουλάχιστον 25mm πάνω από την κορυφή του κάθε δείγματος. Κατά την απομάκρυνση, κάθε δείγμα καθαρίστηκε με ένα πανί όσο το δυνατόν γρηγορότερα, έως να αφαιρεθεί όλο το περίσσιο νερό από την επιφάνεια. Στη συνέχεια, η μάζα προσδιορίστηκε με ηλεκτρονικό ζυγό για τον προσδιορισμό της ποσότητας του νερού που απορροφήθηκε. Τα στάδια της διαδικασίας που περιγράφονται παραπάνω παρουσιάζονται και στην Εικόνα 6.9.



Εικόνα 6. 9 Στάδια διαδικασίας προσδιορισμού της υδατοαπορροφητικότητας κυβικών δοκιμίων κατά BS1881

Η ικανότητα απορρόφησης κάθε δοκιμίου υπολογίστηκε ως η αύξηση της μάζας του μετά από τη βύθιση και εκφράζεται ως το ποσοστό της μάζας του ξηρού δείγματος. Λαμβάνεται ένας διορθωτικός συντελεστής σύμφωνα με την επιφάνεια προς όγκο του δοκιμίου χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο (Εξίσωση 6.12):

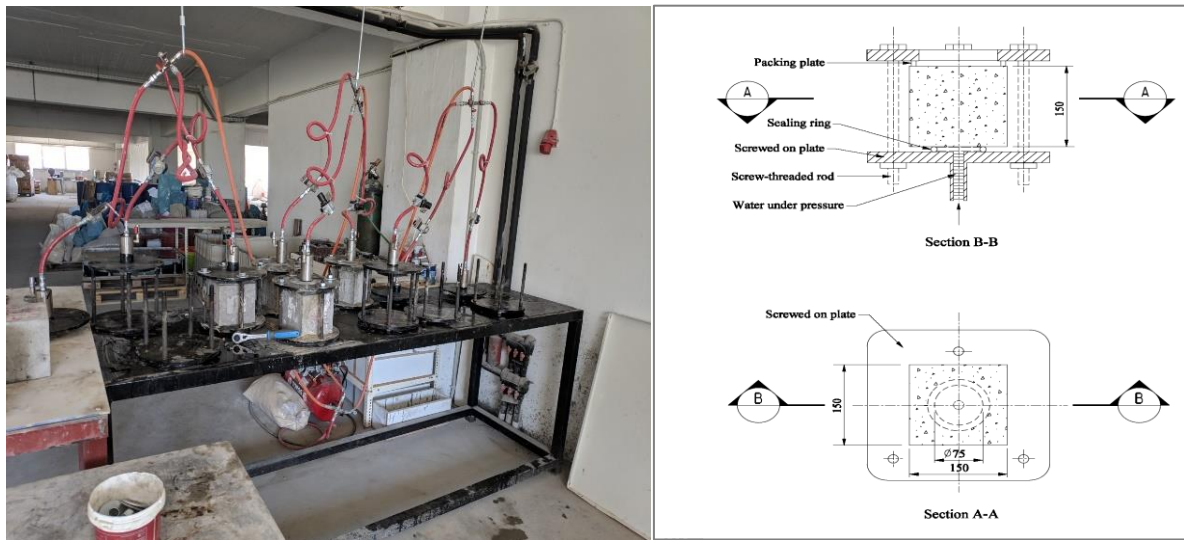
$$\text{διορθωτικός συντελεστής} = \frac{\text{volume (mm}^3\text{)}}{\text{surface area (mm}^2\text{)} \times 12.5} \quad (6.12)$$

Τα αποτελέσματα του βάθους απορρόφησης των δοκιμίων παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 7.6, όπου γίνεται μια συγκριτική μελέτη της συμπεριφοράς των εξεταζόμενων συνθέσεων προκειμένου να διαπιστωθεί ποια από αυτές προστατεύει καλύτερα τον σπλισμό της από τη διείσδυση βλαβερών ουσιών και κατ' επέκταση από τη διάβρωση.

6.9. Δοκιμή Υδατοπερατότητας

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 [133]. Η υδατοπερατότητα αποτελεί μια αξιόπιστη μέθοδο σύγκρισης του πορώδους διαφορετικών συνθέσεων σκυροδέματος. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της υδατοπερατότητας των δοκιμασμένων συνθέσεων διεξήχθη σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-8 και πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου της εταιρίας DOMYLCO. Κατά τη μέθοδο

αυτή, το κυβικό δοκίμιο στερεώθηκε κατάλληλα σε διάταξη όπου ταυτόχρονα εισέρχονταν νερό από την άνω επιφάνεια του. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε σταθερή πίεση 5 bars για 72 ώρες όπως ακριβώς ορίζει το πρότυπο.



Εικόνα 6. 10 Διάταξη ελέγχου υδατοπερατότητας (αριστερά) και σκαρίφημα δοκιμής (δεξιά)

Μετά την εφαρμογή της πίεσης για τον προκαθορισμένο χρόνο, το δοκίμιο αφαιρέθηκε από τη συσκευή. Η περιοχή στην οποία εφαρμόστηκε η πίεση του νερού σκουπίστηκε για να απομακρυνθεί η περίσσεια νερού. Το δείγμα στη συνέχεια χωρίστηκε στο μέσο, κάθετα στην επιφάνεια στην οποία εφαρμόστηκε η πίεση του νερού μέσω της διάταξης, που παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.11. Μόλις η επιφάνεια στεγνώσει σε τέτοιο βαθμό ώστε να διακρίνεται το μέτωπο διείσδυσης του νερού, το μέγιστο βάθος που έχει διεισδύσει το νερό στο δοκίμιο καταγράφεται με ακρίβεια χιλιοστού. [134]



Εικόνα 6. 11 Θραύση στο μέσο του δοκιμίου (αριστερά) και μέτρηση βάθους διείσδυσης νερού (δεξιά)

Το βάθος διείσδυσης καθορίστηκε με την ακόλουθη εξίσωση:

$$P = \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_n}{n} \quad (6.13)$$

όπου P είναι το μέσο βάθος, το D_n είναι το βάθος των δειγμάτων δοκιμής σε mm και το n είναι ο αριθμός των δειγμάτων. Βασική προϋπόθεση για τις επιτυχημένες μετρήσεις, αποτέλεσε το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της δοκιμής διατηρούνταν σταθερή η πίεση αλλά και ελέγχονταν συστηματικά τυχούσα διαρροή νερού. Τα αποτελέσματα του βάθους διείσδυσης του νερού στα δοκίμια παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 7.6, όπου γίνεται μια συγκριτική μελέτη της συμπεριφοράς των εξεταζόμενων συνθέσεων προκειμένου να διαπιστωθεί ποια από αυτές προστατεύει καλύτερα τον οπλισμό της από τη διείσδυση βλαβερών ουσιών και κατ' επέκταση από τη διάβρωση.

6.10. Ποροσιμετρία υδραργύρου

Η ποροσιμετρία υδραργύρου αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μεθόδους εκτίμησης και ανάλυσης της μικροδομής των πορώδων υλικών και προσδιορισμού του πορώδους τους. Η πειραματική τεχνική βασίζεται στη βαθμιαία διείσδυση υδραργύρου (μη διαβρέχον υγρό) σε ένα πορώδες υλικό εκκενωμένο από αέρα, με αύξηση της εξωτερικής πίεσης και στην απομάκρυνση του υδραργύρου, καθώς η πίεση ελαττώνεται. Συγκεκριμένα, επειδή ο υδράργυρος αποτελεί μη διαβρέχον υγρό για το σύνολο σχεδόν των υλικών, απαιτεί την επιβολή πίεσης για να διεισδύσει στους πόρους ενός εκκενωμένου από αέρα πορώδους υλικού. Καθώς η εξωτερική πίεση αυξάνεται, ο υδράργυρος διεισδύει πρώτα στους πόρους μεγαλύτερου μεγέθους και προοδευτικά διεισδύει και στους μικρότερους πόρους [138]. Τα τριχοειδή φαινόμενα και οι σχετιζόμενες δυνάμεις είναι σημαντικά στην ποροσιμετρία υδραργύρου. Αν σε ένα κυλινδρικό αγωγό λεπτής διατομής υπήρχε διαβρέχον νερό τότε οι τριχοειδείς δυνάμεις θα ωθούσαν το νερό στο εσωτερικό του έως ότου επιτευχθεί ισορροπία με τις βαρυτικές δυνάμεις. Όταν όμως υπάρχει μη διαβρέχον υγρό, όπως ο υδράργυρος, τότε οι τριχοειδείς δυνάμεις δρουν κατά την αντίθετη κατεύθυνση, έτσι ώστε να κρατήσουν το υγρό έξω από τον σωλήνα [155]. Τότε για κάθε τριχοειδή σωλήνα, η δύναμη F που ασκείται στον υδράργυρο δίνεται από τον τύπο:

$$F = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \gamma \cdot \cos\theta \quad (6.14)$$

Όπου:

R: ακτίνα σωλήνα (cm)

π : σταθερά ίση με 3,14

γ : η επιφανειακή τάση του υδραργύρου (480 dyn/cm)

θ : η γωνία επαφής του υδραργύρου με τα τοιχώματα του σωλήνα (135° - 145°).

Για να εισέλθει ο υδράργυρος στον σωλήνα, πρέπει να εφαρμοστεί εξωτερική δύναμη F_2 που δίνεται από τον τύπο:

$$F_2 = \pi \times R^2 \cdot \quad (6.15)$$

Όπου: P η πίεση που ασκείται κάθετα στη διατομή του σωλήνα (dyn).

Ο συνδυασμός των δύο αυτών εξισώσεων δίνει την εξίσωση Washburn:

$$P = - (2 \times \gamma \times \cos\theta) / R \quad (6.16)$$

Η εξίσωση αυτή συσχετίζει την ακτίνα του τριχοειδούς σωλήνα με την πίεση που πρέπει να ασκηθεί προκειμένου να εισέλθει ο υδράργυρος μέσα στο σωλήνα. Θεωρώντας κυλινδρικό μοντέλο, δηλαδή ότι ο σωλήνας αντιπροσωπεύει κυλινδρικό πόρο με διατομή $\pi \cdot R^2$, από τις ανωτέρω εξισώσεις

υπολογίζονται οι ακτίνες των πόρων [139]. Η κατανομή των πόρων ως προς το μέγεθος των ακτινών τους παράγεται από την καμπύλη διείσδυσης ορίζοντας τον όγκο $dV(r)$ σε πόρους με ακτίνες μεταξύ r και $r+dr$. Έτσι με απλή διαφορίση της καμπύλης διείσδυσης λαμβάνεται μια ογκομετρική κατανομή των πόρων ως προς τις ακτίνες τους. [156]

Το ποροσίμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο Poremaster της Quantachrome και τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος» (ΕΚΕΦΕ «Δ»). Η συσκευή αποτελείται από δύο τμήματα, το πρώτο τμήμα (Low pressure station) χρησιμεύει για τη μέτρηση μεγάλων πόρων ακτίνας $4,26 \div 950 \mu\text{m}$, ενώ το δεύτερο (High pressure station) για τη μέτρηση μικρότερων πόρων ακτίνας $0,0036 \div 10,66 \mu\text{m}$. Τα δύο τμήματα είναι συνδεδεμένα με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω μιας μονάδας ελέγχου, στον οποίο γίνεται απευθείας η αποθήκευση και η επεξεργασία των δεδομένων.

Σε τμήμα του δείγματος, που έχει προηγουμένως κοπεί κατάλληλα για να χωράει στην κυψελίδα του ποροσίμετρου, γίνεται ξήρανση στους 105°C . Ακολούθως αφήνεται να ψυχθεί μέσα σε ξηραντήρα. Το δείγμα ζυγίζεται με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου του γραμμαρίου, η μάζα του εισάγεται στον υπολογιστή και τοποθετείται στην κυψελίδα του ποροσίμετρου προς μέτρηση.



Εικόνα 6. 12 Στάδια προετοιμασίας δείγματος για δοκιμή ποροσιμετρίας

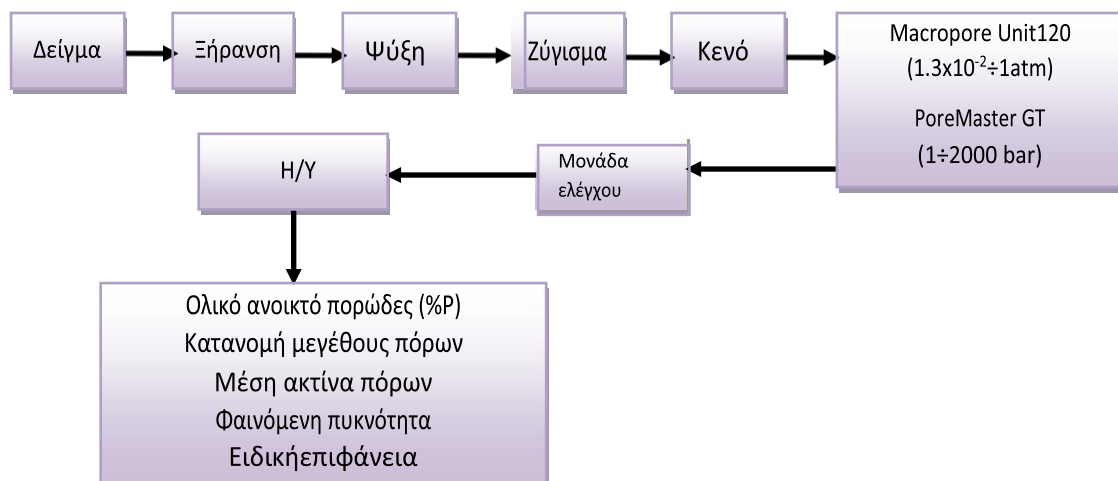
Ακολουθεί η εξαέρωση της κυψελίδας και του δείγματος με την περιστροφική αντλία κενού της συσκευής με πίεση έως $1.3 \cdot 10^{-5} \text{ atm}$. Η κυψελίδα πληρώνεται με υδράργυρο υπό κενό και διαμέσου μιας βαλβίδας εισάγεται στο κύκλωμα αέρας. Έτσι ασκείται πίεση μέχρι την ατμοσφαιρική στον

υδράργυρο, ο οποίος διεισδύει στους μεγάλους πόρους του υλικού. Η κυψελίδα με το δείγμα ζυγίζεται πάλι και η μάζα εισάγεται στον υπολογιστή.



Εικόνα 6. 13 Ποροσίμετρο υδραργύρου (Poremaster, Model: PM 20 Porowin™ Version: 8.1)

Κατόπιν τοποθετείται η κυψελίδα στο τμήμα της συσκευής όπου ο υδράργυρος εισχωρεί σε μικρότερου εύρους πόρους με την άσκηση πίεσης 4135 bar. Ο όγκος του υδραργύρου που διεισδύει σε μια δεδομένη πίεση στους πόρους προσδιορίζεται από το ποροσίμετρο και αποθηκεύεται αυτόματα στον υπολογιστή [157]. Η διαδικασία που ακολουθείται δίνεται συνοπτικά στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 6. 6 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας μέτρησης με το ποροσίμετρο υδραργύρου

Τέλος, ακολουθεί η διαδικασία αποσυμπίεσης, όπου ο υδράργυρος εξέρχεται από τους πόρους.

Η συσκευή μετράει όγκο εισερχομένου υδράργυρου σε σχέση με την εφαρμοζόμενη πίεση και το ενσωματωμένο λογισμικό πρόγραμμα:

- Υπολογίζει ολικό όγκο εισερχομένου υδράργυρου, ειδική επιφάνεια πόρων, μέση ακτίνα πόρων, φαινόμενη και πραγματική πυκνότητα δείγματος και ολικό ανοικτό πορώδες
- Κατασκευάζει διάγραμμα ειδικού όγκου εισερχομένου υδράργυρου – πίεσης και το ιστόγραμμα που παρουσιάζει την κατανομή του όγκου των ανοικτών πόρων με τις ακτίνες του υλικού. [158]

Το πρότυπο EN 1936:2006 περιγράφει τον προσδιορισμό της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους. Η φαινόμενη πυκνότητα εκφράζεται σε kg/m^3 και είναι ο λόγος της μάζας του δοκιμίου προς τον φαινόμενο όγκο του (όγκος υλικού + όγκος πόρων). Το ανοικτό πορώδες εκφράζεται σε ποσοστό % κατ' όγκο. και είναι ο όγκος των ανοικτών πόρων του δοκιμίου, ως ποσοστό % του φαινόμενου όγκου του. Στα εξαγόμενα αποτελέσματα ξεχωρίζει το διάγραμμα κατανομής μεγέθους πόρων $Dv(r)$. Η κατανομή μεγέθους πόρων παρουσιάζει το κλάσμα του όγκου των πόρων στον οποίο οι πόροι βρίσκονται ανάμεσα στο ορισμένο εύρος των πόρων. Η κατανομή μεγέθους πόρων ως συνάρτηση της ακτίνας των πόρων αντιπροσωπεύεται από την διαφορική εξίσωση:

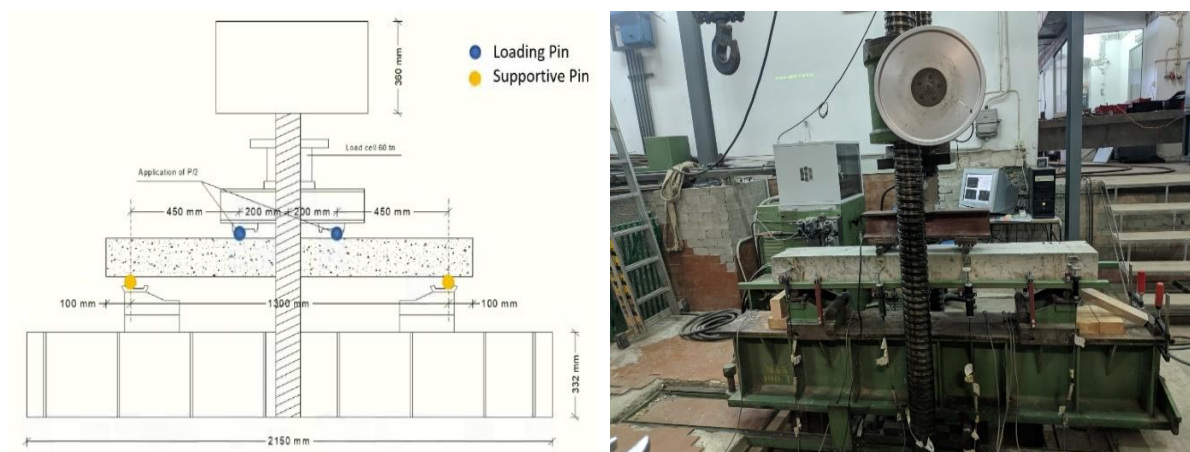
$$Dv(r) = \frac{dV}{dr} \quad (6.17)$$

Όπου $DV(r)$ είναι η συνάρτηση της κατανομής μεγέθους πόρων, dV είναι η αλλαγή στον όγκο των πόρων (mm^3), dr είναι η αλλαγή στην ακτίνα των πόρων (mm). Εάν υπάρχουν διαφορετικοί όγκοι πόρων με διάφορα μεγέθη, υπάρχουν δύο τρόποι που αναπαριστούν την κατανομή μεγέθους πόρων. Ένα διάγραμμα του όγκου των πόρων που είναι μικρότερος (ή μεγαλύτερων) από ένα δεδομένο μέγεθος ως προς το μέγεθος των πόρων που είναι η συνολική (ή ολοκληρωτική) κατανομή μεγέθους πόρων. Η κλίση της ακτίνας της προηγούμενης καμπύλης, σχεδιασμένη ως προς το μέγεθος των πόρων, είναι η διαφορική κατανομή μεγέθους πόρων [159]. Τα αποτελέσματα από τη δοκιμή ποροσιμετρίας και τα εξαγόμενα διαγράμματα για τις συνθέσεις που δοκιμάστηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 7.8.

6.11. Καμπτική Αντοχή Δοκών

6.11.1. Χαρακτηριστικά Δειγμάτων, Πειραματική Διάταξη

Ο τρίτος νόμος του Νεύτωνα προβλέπει ότι για να υπάρχει ισορροπία σε ένα σώμα πρέπει οι δυνάμεις που του ασκούνται να εξουδετερώνουν η μία την άλλη. Πρέπει συνεπώς, σε κάθε σημείο του καμπτόμενου σώματος, οι εξωτερικές δυνάμεις να εξουδετερώνονται από άλλες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του. Σε ένα σώμα σε κάμψη λοιπόν εμφανίζονται εσωτερικές τάσεις. Οι τάσεις που είναι κάθετες στη διατομή του στοιχείου ονομάζονται ορθές. Οι εφελκυστικές θεωρούνται θετικές ενώ οι θλιπτικές αρνητικές. Η γραμμή όπου μηδενίζονται οι ορθές τάσεις ονομάζεται ουδέτερη γραμμή και χωρίζει τη διατομή στην εφελκυσόμενη και τη θλιβόμενη περιοχή [12]. Προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση της διάβρωσης του οπλισμού στη συνολική συμπεριφορά μιας δοκού ΟΣ, εξετάστηκε ένα σύνολο 15 δοκιμίων από τις δοκούς που χρησιμοποιήθηκαν στο πεδίο υπό μονοτονική δοκιμή κάμψης 4 σημείων. Οι δοκοί είχαν καθαρό άνοιγμα $L = 1300\text{mm}$ και διατομή $b \times h = 250 \times 150\text{mm}^2$. Η διαμόρφωση του οπλισμού όπως περιεγράφηκε και προηγουμένως αποτελείται από 4 διαμήκεις ράβδους στις 4 γωνίες της διατομής, διαμέτρου $D = 12\text{mm}$, ενώ ταυτόχρονα υπάρχουν συνδετήρες (οπλισμός διάτμησης) διαμέτρου $D = 8\text{mm}$ κάθε 150mm . Η επικάλυψη του οπλισμού με σκυρόδεμα σχεδιάστηκε να είναι 20mm οδηγώντας σε αποτελεσματικό βάθος διατομής ίσο με $d = 130\text{mm}$. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 6.14.



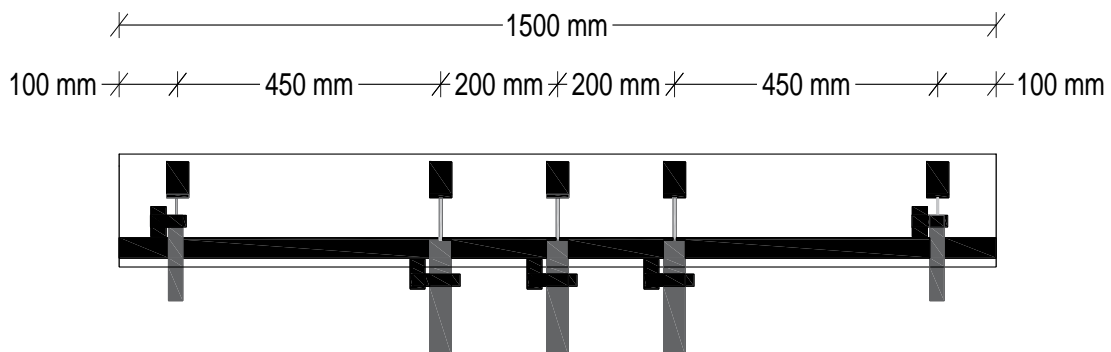
Εικόνα 6. 14 Σκαρίφημα της διάταξης (αριστερά) και φωτογραφία της διάταξης (δεξιά)

Οι οπλισμένες δοκοί εξετάστηκαν σε μονοτονική φόρτιση κάμψης 4 σημείων. Η στήριξη των δοκών ήταν αμφιέριστη, με καθαρό άνοιγμα μεταξύ των στηρίξεων ίσο με 130cm . Το συγκεντρωμένο φορτίο ασκήθηκε με σταθερό ρυθμό επιβολής σε δύο σημεία σε απόσταση 20cm εκατέρωθεν του μέσου του ανοίγματος των δοκών μέσω μιας μεταλλικής δοκού μήκους 60cm και δύο μεταλλικών πλακών $42 \times 16 \times 2,5\text{cm}$ στο κάτω μέρος της όπως διαφαίνεται στην Εικόνα 6.14. Οι πλάκες με τη σειρά τους μέσω δύο μεταλλικών πλακιδίων διαστάσεων $22,0 \times 5,0 \times 1,5\text{cm}$ έρχονταν σε επαφή με τη δοκό. [160]



Εικόνα 6. 15 Θραύση δοκίμιου (αριστερά) και λεπτομέρεια δοκού μετά την αστοχία (δεξιά)

Το βέλος κάμψης των δοκών μετρήθηκε μέσω δέκα μηχανισιόμετρων DCDT τα οποία τοποθετήθηκαν σε 5 χαρακτηριστικά σημεία εκατέρωθεν της δοκού (Σχήμα 6.7). Οι θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν είναι: στις θέσεις των δύο στηριγμάτων, στις θέσεις των δύο φορτίων P/2 και στο μέσο της δοκού. Τα μηχανισιόμετρα στηρίχθηκαν σε δύο αμφιέριστες δοκούς αλουμινίου διαστάσεων 160x1,5x3cm, οι οποίες στηρίχθηκαν σε μεταλλικές ράβδους Φ8 εγκάρσια τοποθετημένες σε ειδικές οπές στη θέση στηρίξεων των δοκών, στο μέσο του ύψους της διατομής (Εικόνα 6.16). Το επιβαλλόμενο φορτίο P, η μετατόπιση του εμβόλου και το βέλος κάμψης καταγράφονταν καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος στο αυτόματο σύστημα καταγραφής.



Σχήμα 6. 7 Σκαρίφημα δοκού με τα μηχανισιόμετρα DCDT σε 5 χαρακτηριστικά σημεία



Εικόνα 6. 16 Διάταξη μηχανισιόμετρων DCDT στη δοκιμή κάμψης 4 σημείων

6.11.2. Υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας

Η αντοχή σε κάμψη ενός στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να επηρεαστεί λόγω διάβρωσης από δύο παράγοντες (α) τη μείωση της μάζας της ράβδου οπλισμού και (β) την απώλεια συνεκτικότητας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος. Η απώλεια μάζας, Δm , του χάλυβα οπλισμού λόγω διάβρωσης εκφράζεται βάσει του νόμου του Faraday. Ο πραγματικός λόγος διάβρωσης, ρ_c , μπορεί να προσδιοριστεί υπολογίζοντας τη μάζα της ράβδου πριν και μετά τη διάβρωση με την παρακάτω σχέση:

$$\rho_c(\%) = \frac{\Delta m}{m_0 \frac{l_1}{l_0}} \times 100 \quad (6.18)$$

όπου m_0 και l_0 είναι η αρχική μάζα και το μήκος της ράβδου, και l_1 είναι το μήκος της ράβδου μετά τη διάβρωση. Με βάση την Εξίσωση Mangat και Elgarf [2] εκφράζεται η απώλεια μάζας του οπλισμού ως το ποσοστό μείωσης της διαμέτρου ράβδου D , όπως φαίνεται στην Εξίσωση 6.19.

$$\frac{D' - D}{D}(\%) = 2312i \frac{T}{D} \times 100 \quad (6.19)$$

όπου D είναι η αρχική διάμετρος της ράβδου, D' είναι η διάμετρος μετά τη διάβρωση, i είναι η πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης (A/cm^2) και T είναι ο χρόνος που έχει παρέλθει (έτη). Δεδομένου ότι η Εξίσωση 6.19 έχει εφαρμογή για σταθερή πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης, i , υιοθετήθηκε μια μέση τιμή για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης. Σημειώνεται ότι ο κύριος σκοπός της δοκιμής κάμψης 4 σημείων ήταν η αξιολόγηση της επίδρασης της διαβρωμένης ράβδου οπλισμού στην καμπτική συμπεριφορά των δοκών [161]. Έτσι, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός της διάταξης οπλισμού διάτμησης (D8 / 150) και το μήκος διάτμησης, $av = 450mm$, προκειμένου να εξασφαλιστεί αστοχία σε κάμψη σε όλες τις δοκούς. Τα αποτελέσματα από τη δοκιμή κάμψης 4 σημείων καθώς και τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για τις δοκούς που δοκιμάστηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 7.9.

7. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η πραγματοποίηση της έρευνας περιέλαβε την παρασκευή δοκών και την διερεύνηση διαφορετικών συνθέσεων σκυροδέματος, με διαφορετικά επίπεδα φόρτισης καθώς και την εξέταση διαφορών παραμέτρων που επιδρούν στη διάβρωση του οπλισμού όπως είναι η έκθεση σε παραθαλάσσιο περιβάλλον και σε ατμοσφαιρική διάβρωση (έκθεση σε φυσικό περιβάλλον). Οι συνθέσεις που κατασκευάστηκαν είναι: Συμβατικό σκυρόδεμα C30/37 (CC1), σκυρόδεμα με αναστολέα διάβρωσης ως πρόσθετο (CC2), σκυρόδεμα με ψεκασμό επιφάνειας με υδρόφοβη στρώση (CC3), αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (SCC) και γαρμπυλόδεμα (FAC). Οι συνθέσεις που μελετήθηκαν μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες με βάση (1) τη σύστασή τους και (2) τις μεθόδους προστασίας που χρησιμοποιήθηκαν.

Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τις τρεις πρώτες συνθέσεις σκυροδέματος (CC1, CC2, CC3) οι οποίες βασίζονται στο σχεδιασμό μιας συμβατικής ποιότητας C30/37 και η διαφοροποίηση εντοπίζεται στη μέθοδο προστασίας που επιλέγεται. Συγκεκριμένα: η σύνθεση CC1 μελετάται ως σύνθεση αναφοράς, η σύνθεση CC2 είναι όμοια με την CC1 με προσθήκη αναστολέα διάβρωσης κατά την ανάδευση του μίγματος σε περιεκτικότητα 4% κατά βάρος του τσιμέντου και η σύνθεση CC3 είναι όμοια με την CC1 με επιπλέον αδιαβροχοποίηση της επιφάνειας μέσω ψεκαζόμενης προστατευτικής στρώσης. Με τη σύγκριση των παραπάνω συνθέσεων θα επιχειρηθεί να αξιολογηθεί η κάθε μέθοδος προστασίας έναντι της διάβρωσης. Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από τις συνθέσεις με τις λεπτότερες δομές (FAC, SCC) (απουσία χονδρόκοκκου αδρανούς, $D < 16\text{mm}$). Οι 2 αυτές συνθέσεις χαρακτηρίζονται από χαμηλότερο λόγο N/T και υψηλότερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο έναντι των συνθέσεων της πρώτης ομάδας. Με τη σύγκριση τόσο μεταξύ τους όσο και με τη σύνθεση αναφοράς (CC1) γίνεται εκτίμηση της επιρροής του λόγου N/T αλλά και της περιεκτικότητας σε τσιμέντο στην αντιδιαβρωτική της συμπεριφορά μιας σύνθεσης.

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των δοκών για κάθε σύνθεση (CC1, CC2, CC3, FAC, SCC) ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης και τις συνθήκες έκθεσης (A, B, C, D) όπου: A, τα δοκίμια αναφοράς (καμία φόρτιση, έκθεση σε φυσικό περιβάλλον) και B, C, D δοκίμια σε διαβρωτικές συνθήκες με 0%, 7% και 20% επίπεδα φόρτισης αντίστοιχα.

Πίνακας 7. 1 Κατηγοριοποίηση των δοκιμών για κάθε σύνθεση ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης και τις συνθήκες έκθεσης

α/α	Δοκός	Σκυρόδεμα			Μέθοδοι Προστασίας			Είδος Διάβρωσης-φόρτισης			
		C30/37	FAC	SCC	Χωρίς	Πρόσθετος Α.Δ.	Επιφανειακή Προστασία	Φυσικό Περιβάλλον	Χωρίς Φόρτιση	Φόρτιση (7%)	Φόρτιση (20%)
1	CC1-A	✓			✓			✓			
2	CC1-B	✓			✓				✓		
3	CC1-C	✓			✓					✓	
4	CC1-D	✓			✓						✓
5	CC2-A	✓				✓		✓			
6	CC2-B	✓				✓			✓		
7	CC2-C	✓				✓				✓	
8	CC2-D	✓				✓					✓
9	CC3-A	✓					✓	✓			
10	CC3-B	✓					✓		✓		
11	CC3-C	✓					✓			✓	
12	CC3-D	✓					✓				✓
13	FAC-A		✓		✓			✓			
14	FAC-B		✓		✓				✓		
15	FAC-C		✓		✓					✓	
16	FAC-D		✓		✓						✓
17	SCC-A			✓	✓			✓			
18	SCC-B			✓	✓				✓		
19	SCC-C			✓	✓					✓	
20	SCC-D			✓	✓						✓

Η συμπεριφορά των παραγόμενων δοκιμών εκτιμήθηκε πειραματικά με τις ακόλουθες δοκιμές:

- Παρακολούθηση εξέλιξης του δυναμικού διάβρωσης σπλισμού των δοκών
- Μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης σκυροδέματος των δοκών
- Θεωρητικός υπολογισμός του ρυθμού διάβρωσης σπλισμού των δοκών
- Δοκιμή επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων
- Δοκιμή επιταχυνόμενης ενανθράκωσης
- Δοκιμή Υδατοαπορροφητικότητας
- Δοκιμή Υδατοπερατότητας

- Ποροσιμετρία Υδραργύρου
- Καμπτική Αντοχή Δοκών - Οπτικός έλεγχος ρηγματώσεων

Σε όλες τις μεθόδους ακολουθήθηκαν οι προβλεπόμενες διαδικασίες μέτρησης κατά τα αντίστοιχα πρότυπα πειραματικών διαδικασιών έτσι ώστε να αποφευχθούν σφάλματα και τα αποτελέσματα να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβή. Οι μετρήσεις έγιναν για όλα τα δοκίμια συνθέσεων στις ίδιες ηλικίες έτσι ώστε να μην υπάρχουν διαφορές στις συνθήκες μέτρησης. Στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε κάθε δοκιμή που πραγματοποιείται, γίνεται ξεχωριστή ανάλυση των εξής παραγόντων που επιδρούν στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος:

Ο πρώτος παράγοντας που εξετάστηκε ήταν οι αναλογίες στο μίγμα των παραγόμενων συνθέσεων. Αυτό περιλαμβάνει την αναλογία και το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (κοκκομετρική ανάλυση), την ποσότητα τσιμέντου αλλά και την ποσότητα του νερού (κατ' επέκταση τον λόγο N/T). Οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα).

Ο δεύτερος παράγοντας του οποίου η επίδραση εκτιμήθηκε ήταν η επιρροή διαφορετικών μεθόδων προστασίας. Συγκεκριμένα οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.) και CC3 (ψεκασμός με υδρόφοβη στρώση). Έτσι με μια σύγκριση των μεθόδων τόσο μεταξύ τους όσο και με το σκυρόδεμα αναφοράς εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με το βαθμό προστασίας των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου προστασίας από διάβρωση.

Ο τρίτος παράγοντας που εξετάζεται είναι η επίδραση της μόνιμης καμπτικής φόρτισης που φέρει ένα στοιχείο σκυροδέματος (σε συνδυασμό με διαβρωτικό περιβάλλον) στην διατήρηση της ανθεκτικότητάς του στο χρόνο. Στα δοκίμια δοκών που εξετάστηκαν επιβλήθηκαν 3 επίπεδα φόρτισης, στο 0%, 7% και 20% της οριακής κατάστασης λειτουργίας τους. Με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων θα γίνει μια εκτίμηση για τον βαθμό που επιδρά η μόνιμη φόρτιση στην εξέλιξη της διάβρωσης.

7.1. Εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης

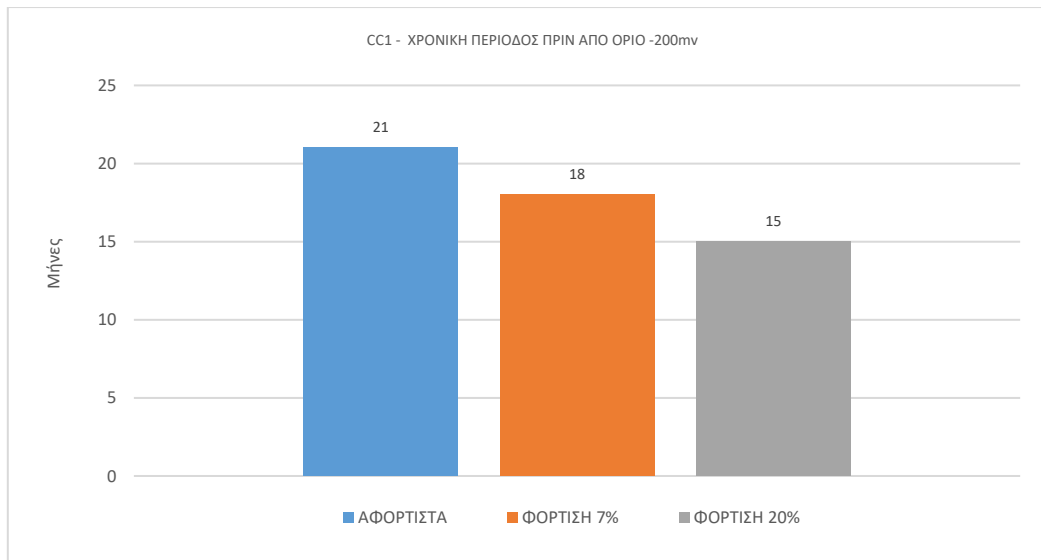
Για μια περίοδο 42 μηνών πραγματοποιήθηκε τακτική παρακολούθηση του δυναμικού διάβρωσης των ράβδων οπλισμού με τη χρήση θετικού χαλκού (CSE) ως ηλεκτρόδιο αναφοράς. Σε αυτή τη δοκιμή, η αξιολόγηση της διάβρωσης των δοκών έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM G876-9, όπου τιμές άνω των -350mV δείχνουν πιθανότητα διάβρωσης 90%. Αναλυτικά η αξιολόγηση της κατάστασης του οπλισμού με βάση τις πραγματοποιούμενες μετρήσεις έγινε με βάση τον Πίνακα 7.2. [125]

Πίνακας 7. 2 Κριτήρια του προτύπου ASTM C876 για τη διάβρωση του οπλισμού σκυροδέματος για ηλεκτρόδιο θεικού χαλκού

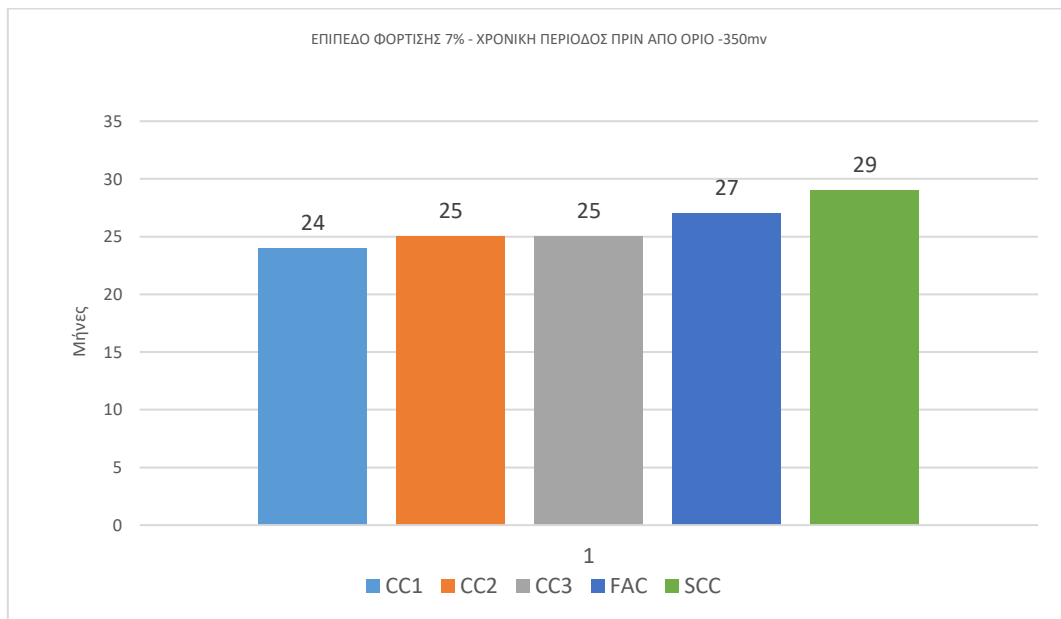
Copper/Copper sulphate	Corrosion condition
$> -200\text{ mV}$	Low (10% risk of corrosion)
$-200\text{ to }-350\text{ mV}$	Intermediate corrosion risk
$< -350\text{ mV}$	High (>90% risk of corrosion)
$< -500\text{ mV}$	Severe corrosion

Οι μετρήσεις έγιναν σε συνολικό διάστημα 42 μηνών και για την ορθή πραγματοποίησή τους ακολουθήθηκε η προβλεπόμενη διαδικασία. Στη διαδικασία αυτή συμπεριλαμβανόταν η εξασφάλιση άμεσης ηλεκτρικής σύνδεσης μεταξύ του οπλισμού και του μεταλλικού σφιγκτήρα του καλωδίου που τον συνδέει με το θετικό ακροδέκτη του βολτομέτρου. Για να εξασφαλιστεί η άμεση σύνδεση στο τμήμα της ράβδου χρησιμοποιήθηκαν οι αγκυρώσεις μεταφοράς οι οποίες είχαν άμεση επαφή με τον οπλισμό και καθαριζόταν προσεκτικά πριν από κάθε μέτρηση με μεταλλική βούρτσα. Για να διασφαλιστεί η καλή επαφή μεταξύ του ηλεκτροδίου αναφοράς και του σκυροδέματος, ο φελλός του ηλεκτροδίου βυθιζόταν σε νερό για ένα διάστημα περίπου μίας ώρας πριν την έναρξη των μετρήσεων [162]. Επίσης γινόταν διαβροχή της επιφάνειας μέτρησης μισή ώρα πριν τη λήψη των μετρήσεων και οι μετρήσεις ξεκινούσαν μόνο αν διαπιστωνόταν ότι η συσκευή έδινε τιμή δυναμικού που ήταν σταθερή και δεν είχε μεγάλη διακύμανση, σύμφωνα και με το πρότυπο C876 του ASTM (1999) που αφορά την πρότυπη δοκιμή μέτρησης του half cell potential. Το ηλεκτρόδιο συνδεόταν μέσω καλωδίου με τον αρνητικό ακροδέκτη του βολτομέτρου [163]. Σε κάθε δοκίμιο λαμβάνονταν συνολικά, κάθε φορά, μετρήσεις σε διάφορα σημεία κατά μήκος της επιφάνειας του και πάνω ακριβώς από τις ράβδους οπλισμού.

Στα Σχήματα 7.1 και 7.2 παρουσιάζονται τα χρονικά διαστήματα (σε μήνες) στα οποία οι τιμές δυναμικού διατηρήθηκαν κάτω από τα όρια που μας θέτει το πρότυπο, δηλαδή -200mV για ενδιάμεση πιθανότητα διάβρωσης και -350mV για σχεδόν βέβαιη έναρξη της διάβρωσης (πιθανότητα >90%).



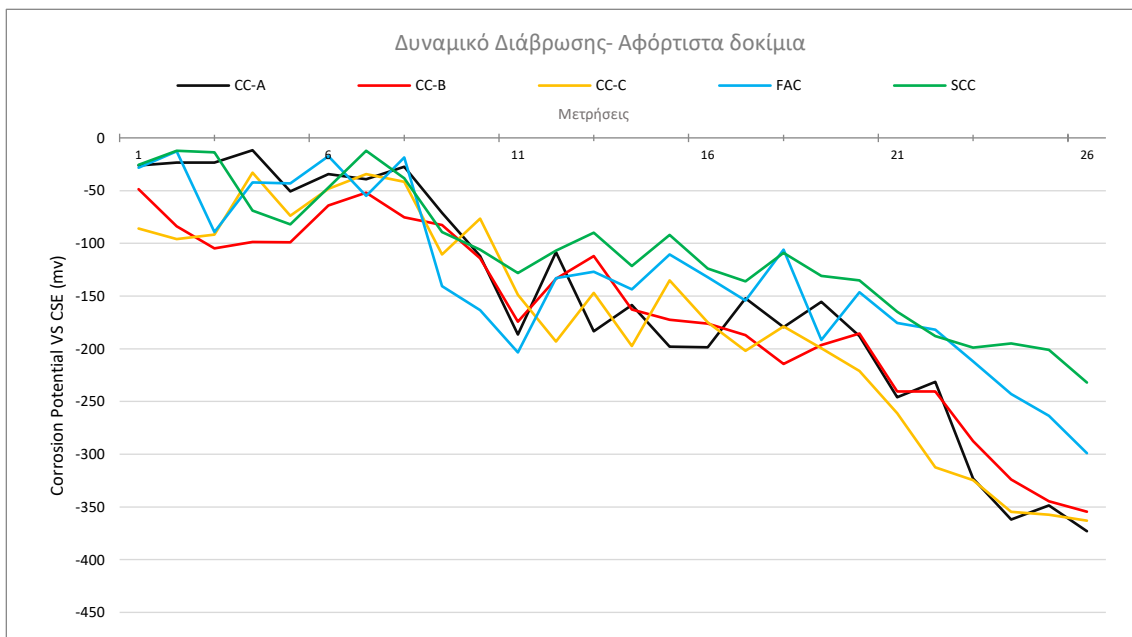
Σχήμα 7. 1 Χρονική περίοδος προτού οι τιμές δυναμικού διάβρωσης φτάσουν το όριο των -200mV για τη σύνθεση CC1



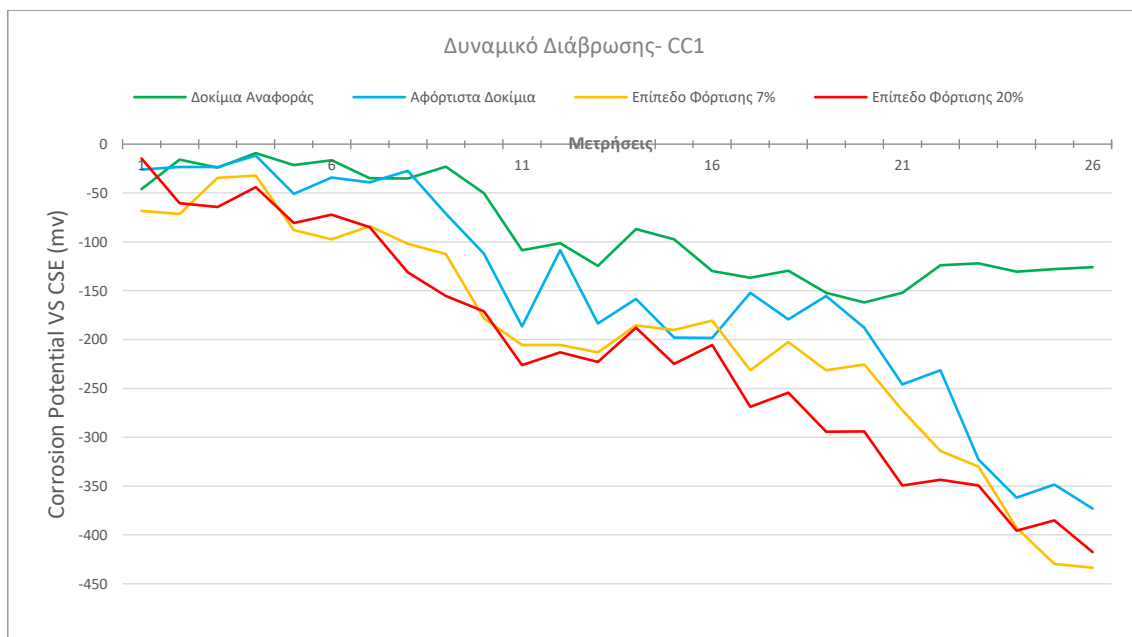
Σχήμα 7. 2 Χρονική περίοδος προτού οι τιμές δυναμικού διάβρωσης φτάσουν το όριο των -350mV για όλες τις συνθέσεις

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1, η έναρξη διάβρωσης (πιθανές τιμές κάτω των -200mV) χρειάστηκε 15 έως 18 μήνες για τις δοκούς υπό φόρτιση και 21 μήνες για τις αφόρτιστες δοκούς της σύνθεσης CC1. Αυτό δείχνει πως η μόνιμη φόρτωση επηρέασε την έναρξη της διάβρωσης και συγκεκριμένα την επιτάχυνε κατά 3 και 6 μήνες αντίστοιχα. Επίσης, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 7.2, τιμές που υποδηλώνουν σχεδόν βέβαιη έναρξη της διάβρωσης (δυναμικό <-350mV) χρειάστηκαν 23 έως 25 μήνες για τις συνθέσεις με βάση το C30/37 (CC1, CC2, CC3) και 27 έως 29 μήνες για τις «λεπτότερες» συνθέσεις (FAC, SCC) πράγμα το οποίο υποδηλώνει πως χαμηλότεροι λόγοι N/T καθώς και περισσότερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο (kg/m³) σε μια σύνθεση βελτιώνει την αντιδιαβρωτική συμπεριφορά της. Τα αναλυτικά αποτελέσματα του δυναμικού διάβρωσης για κάθε οπλισμό παρατίθενται σε Πίνακες στο Παράρτημα.

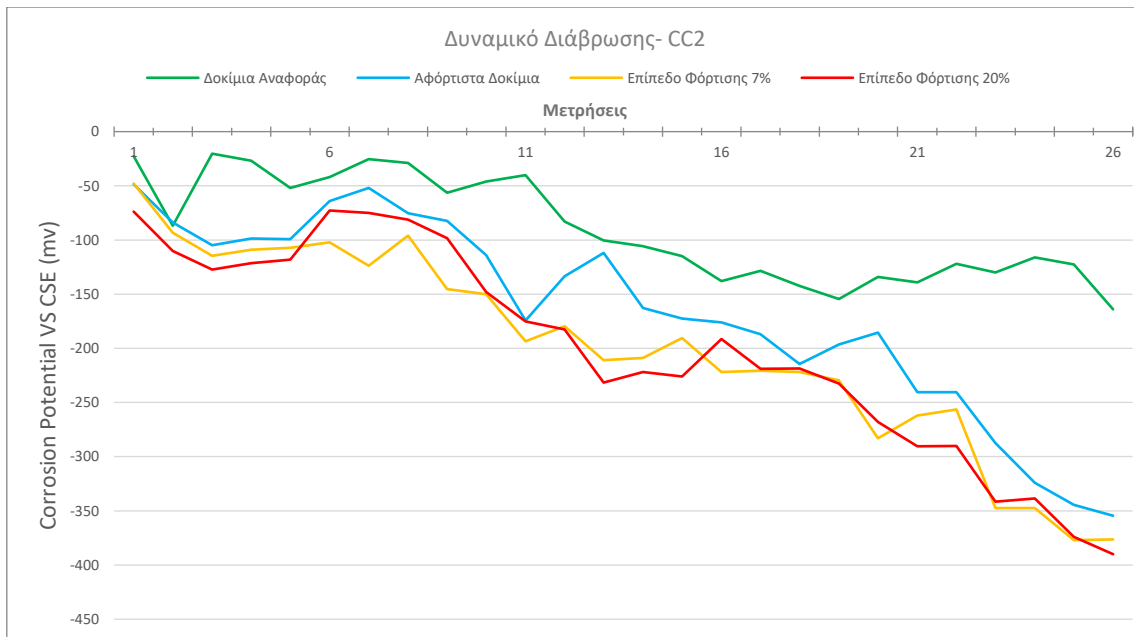
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου για τα δοκίμια και των πέντε κατηγοριών που εξετάστηκαν χωρίς φόρτιση (Σχήμα 7.3) και για την κάθε περίπτωση έκθεσης σε όλες τις συνθέσεις (Σχήματα 7.4-7.8).



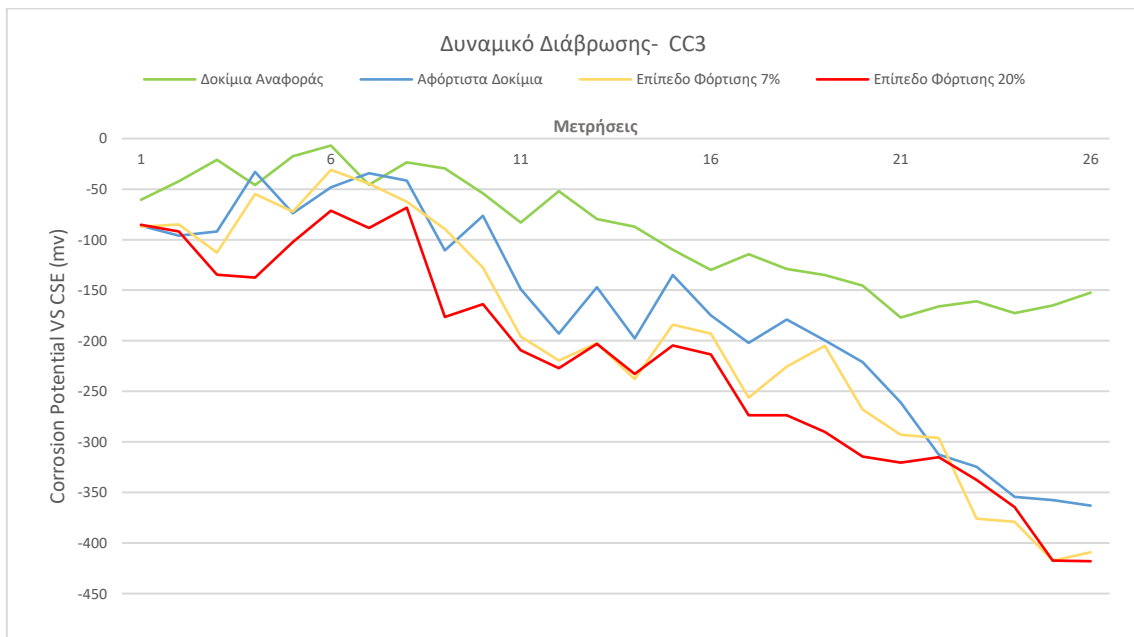
Σχήμα 7. 3 Εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης στις δοκούς όλων των εξεταζόμενων συνθέσεων



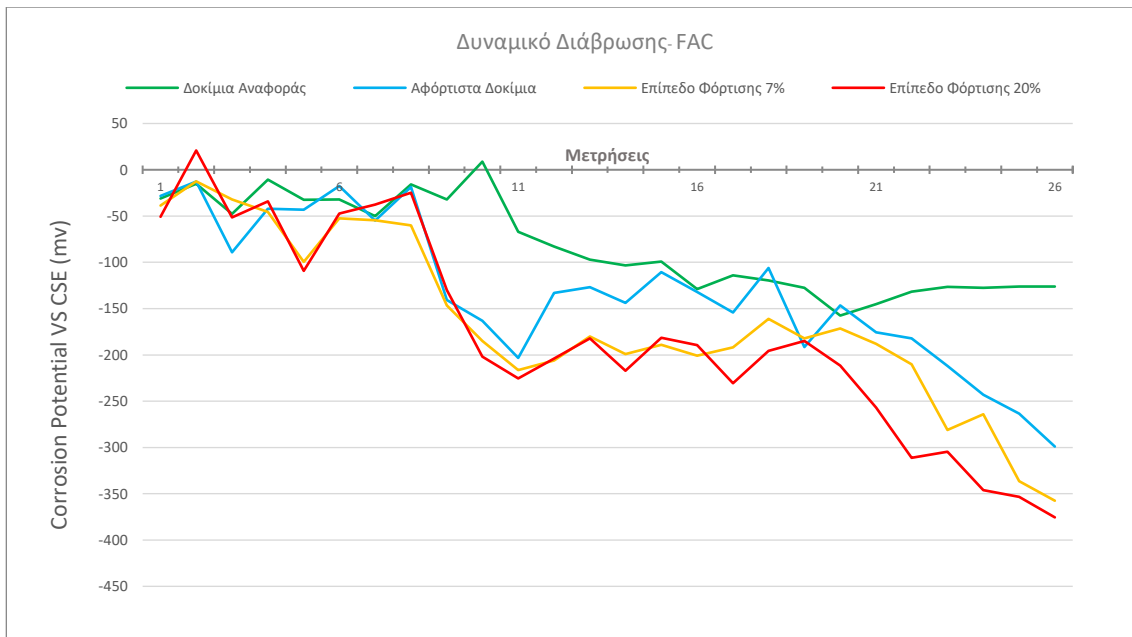
Σχήμα 7. 4 Εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης στις δοκούς της σύνθεσης CC1 για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις



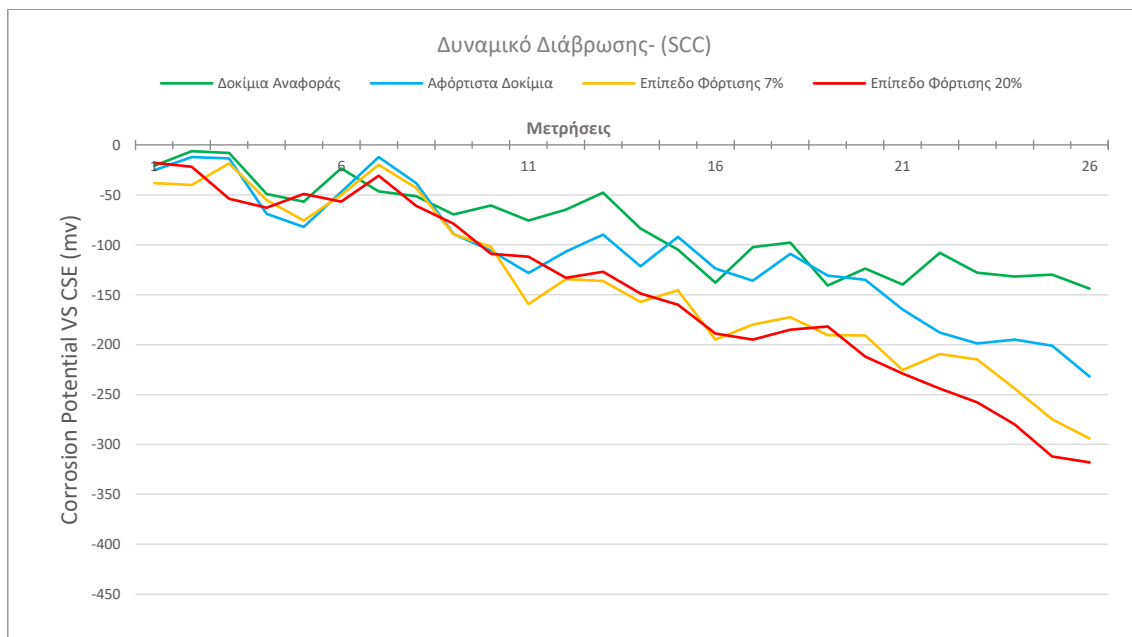
Σχήμα 7. 5 Εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης στις δοκούς της σύνθεσης CC2 για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις



Σχήμα 7. 6 Εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης στις δοκούς της σύνθεσης CC3 για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις



Σχήμα 7. 7 Εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης στις δοκούς της σύνθεσης FAC για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις



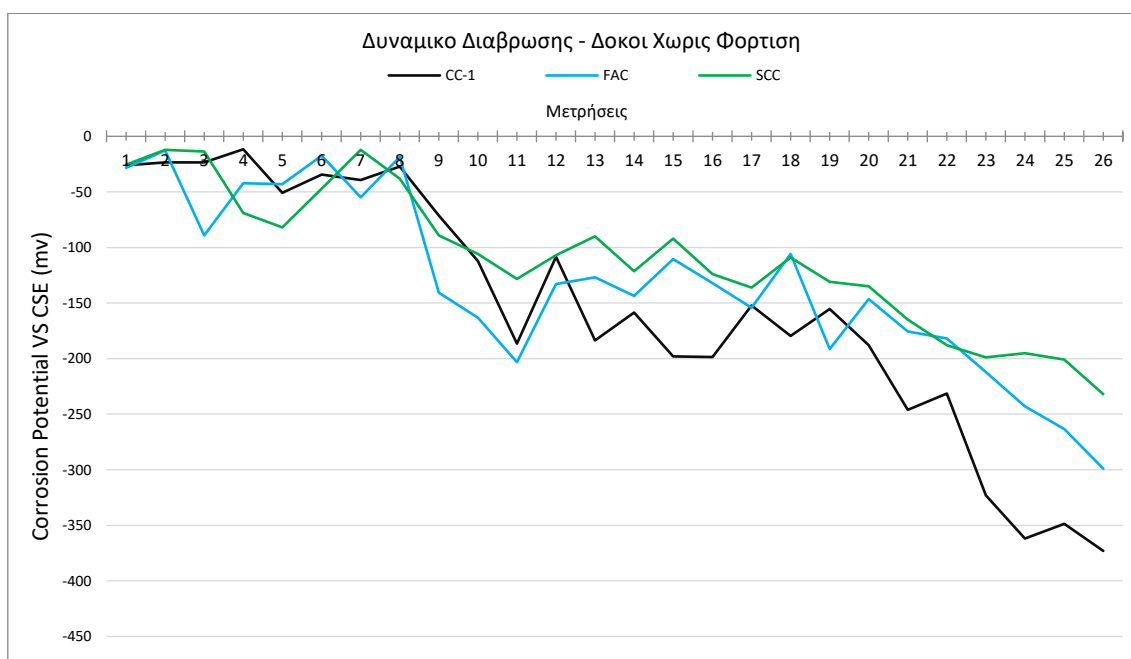
Σχήμα 7. 8 Εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης στις δοκούς της σύνθεσης SCC για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα το δυναμικό διάβρωσης όλων των χαλύβων για όλο το χρονικό διάστημα έκθεσης παραμένει σχετικά σταθερό για το διάστημα των πρώτων μετρήσεων και μεταξύ των -150mV και -250mV. Η σταθερότητα τού δυναμικού διάβρωσης δείχνει ανθεκτικότητα στη διάβρωση, αλλά σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-91 θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι υπάρχει μέτρια προς υψηλή πιθανότητα διάβρωσης των οπλισμών. Μετά το διάστημα αυτό το δυναμικό διάβρωσης όλων των χαλύβων παρουσιάζει πτώση προς ηλεκτραρνητικότερα δυναμικά με την εξέλιξη του χρόνου έκθεσης και οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ των -300mV και -400mV. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87 στις περιπτώσεις αυτές υπάρχει υψηλή (σχεδόν βέβαιη) πιθανότητα διάβρωσης των οπλισμών. Είναι επίσης ξεκάθαρο όπως φαίνεται σε όλα τα παραπάνω διαγράμματα πως τα δοκίμια αναφοράς, δηλαδή αυτά που δεν εκτέθηκαν σε διαβρωτικό περιβάλλον ή σε κάποια φόρτιση, διατήρησαν τιμές

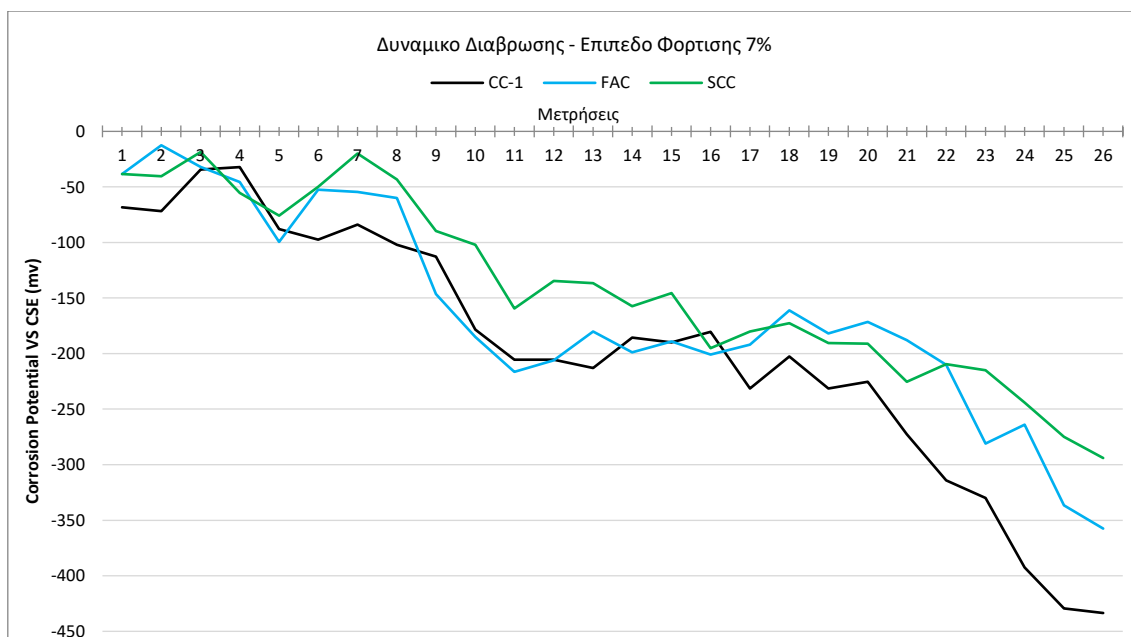
δυναμικού μικρότερες των -200mV δηλαδή δεν παρουσίασαν διάβρωση του οπλισμού τους όπως ήταν και το αναμενόμενο.

7.1.1. Επίδραση σύστασης (ποσότητα τσιμέντου, μέγεθος κόκκων αδρανών, λόγος ν/τ)

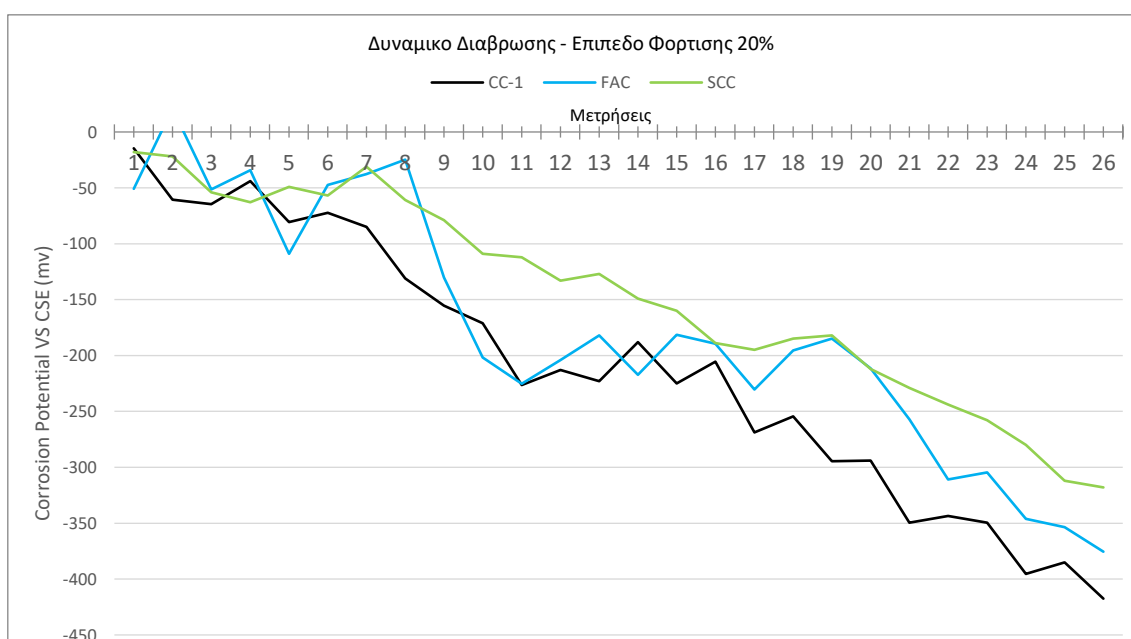
Στην ενότητα αυτή θα επιχειρηθεί να διαπιστωθεί πως επηρεάζει η σύσταση μιας σύνθεσης την εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης. Με τον όρο σύσταση εννοείται η αναλογία και το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (κοκκομετρική διαβάθμιση), η περιεκτικότητα σε τσιμέντο, η ποσότητα του νερού και κατ' επέκταση ο λόγος Ν/Τ. Οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται και εξετάζονται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνόμενο σκυρόδεμα). Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα δυναμικού διάβρωσης – χρόνου έκθεσης για τις τρεις προαναφερθείσες συνθέσεις για τις 3 εξεταζόμενες καταστάσεις, αφόρτιστα (Σχήμα 7.9), 1^ο επίπεδο φόρτισης (Σχήμα 7.10) και 2^ο επίπεδο φόρτισης (Σχήμα 7.11).



Σχήμα 7.9 Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης – χρόνου για τις συνθέσεις CC1, FAC, SCC σε δοκούς χωρίς φόρτιση



Σχήμα 7. 10 Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης – χρόνου για τις συνθέσεις CC1, FAC, SCC στο επίπεδο φόρτισης 7%



Σχήμα 7. 11 Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης – χρόνου για τις συνθέσεις CC1, FAC, στο επίπεδο φόρτισης 20%

Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα δυναμικού διάβρωσης-χρόνου έκθεσης τα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος με τις λεπτότερες συνθέσεις (FAC, SCC) παρουσιάζουν μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση από το σκυρόδεμα αναφοράς (CC1). Σε όλες τις περιπτώσεις φόρτισης οι ηλεκτραρνητικότερες τιμές παρουσιάζονται στη σύνθεση CC1. Στη συνέχεια έρχονται οι τιμές δυναμικού της σύνθεσης FAC και τέλος με σημαντική διαφορά, τη μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση παρουσιάζει η σύνθεση SCC. Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι:

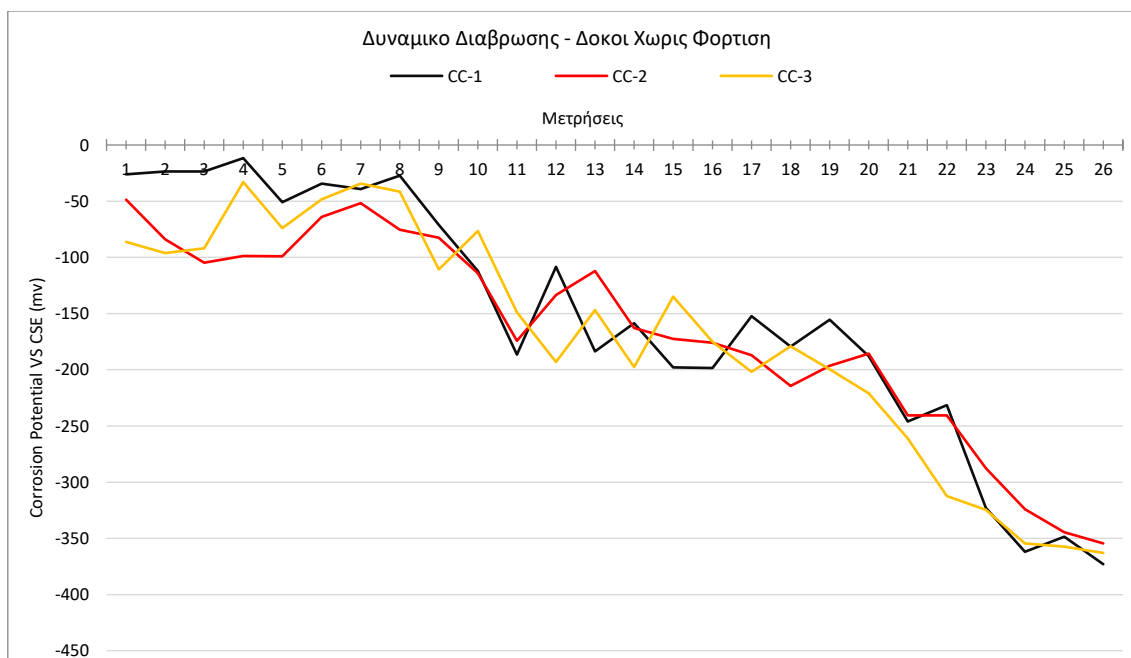
Αύξηση στην περιεκτικότητα τσιμέντου σε μια σύνθεση σκυροδέματος οδηγεί σε μικρότερη προδιάθεση διάβρωσης του οπλισμού. Συγκεκριμένα αύξηση από 330kg/m^3 (σύνθεση CC1) σε 400kg/m^3 (σύνθεση FAC) οδήγησε σε 19% ηλεκτροθετικότερες τιμές το δυναμικό διάβρωσης κατά

μέσο όρο. Αντίστοιχα αύξηση από 400kg/m³ (σύνθεση FAC) σε 500kg/m³ (σύνθεση SCC) οδήγησε σε 22% ηλεκτροθετικότερες τιμές του δυναμικού διάβρωσης και σε σύγκριση με τα 300 kg/m³ οδήγησε σε 35% ηλεκτροθετικότερες τιμές του δυναμικού διάβρωσης κατά μέσο όρο.

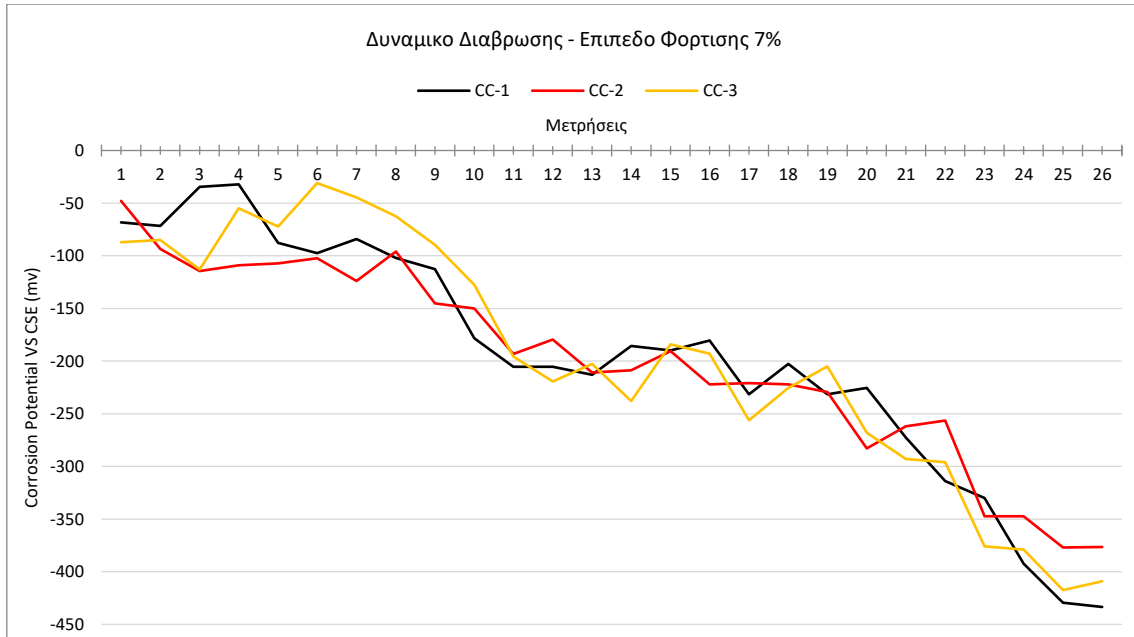
Αύξηση του λόγου N/T σε μια σύνθεση σκυροδέματος οδηγεί σε μεγαλύτερη προδιάθεση διάβρωσης του οπλισμού. Συγκεκριμένα αύξηση από 0,4 (σύνθεση SCC) σε 0,5 (σύνθεση CC1 και FAC) οδήγησε σε 30% ηλεκτροθετικότερες τιμές του δυναμικού διάβρωσης κατά μέσο όρο. Όπως προκύπτει, τις χαμηλότερες τιμές δυναμικού διάβρωσης και κατ' επέκταση την συγκριτικά καλύτερη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά είχε το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (SCC). Αυτό οφείλεται στην ιδιαίτερη δομή του (αυξημένα λεπτόκοκκα αδρανή, αυξημένη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, χαμηλός λόγος N/T) και δείχνει πως μια καλή ποιότητα σκυροδέματος μπορεί πέρα από ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες να προσφέρει και ικανοποιητική αντιδιαβρωτική προστασία.

7.1.2. Επίδραση μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας

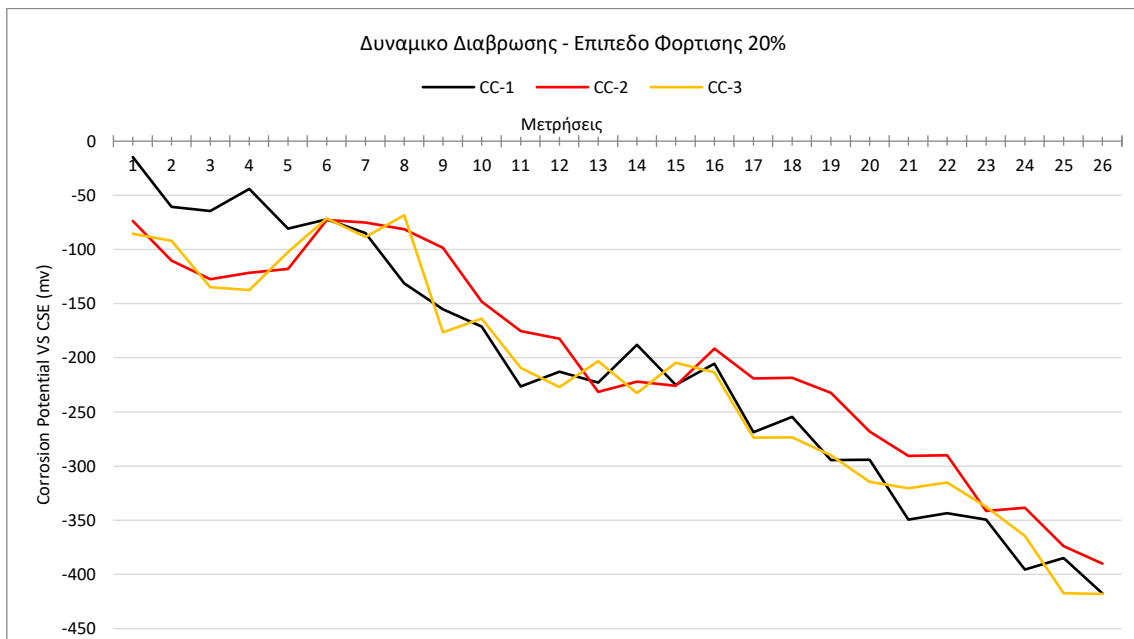
Στην ενότητα αυτή θα επιχειρηθεί να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα των διαφορετικών μεθόδων προστασίας που χρησιμοποιήθηκαν από τις μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού των δοκών. Συγκεκριμένα οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.) και CC3 (ψεκασμός με υδρόφοβη στρώση). Έτσι με μια σύγκριση των μεθόδων τόσο μεταξύ τους όσο και με το σκυρόδεμα αναφοράς εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με το βαθμό προστασίας των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου προστασίας από διάβρωση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα δυναμικού διάβρωσης – χρόνου για τις προαναφερθείσες συνθέσεις για τις 3 εξεταζόμενες καταστάσεις, αφόρτιστα (Σχήμα 7.12), 1^ο επίπεδο φόρτισης (Σχήμα 7.13) και 2^ο επίπεδο φόρτισης (Σχήμα 7.14).



Σχήμα 7. 12 Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης – χρόνου για τις συνθέσεις CC1, CC2, CC3 σε δοκούς χωρίς φόρτιση



Σχήμα 7. 13 Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης – χρόνου για τις συνθέσεις CC1, CC2, CC3 στο επίπεδο φόρτισης 7%



Σχήμα 7. 14 Διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης – χρόνου για τις συνθέσεις CC1, CC2, CC3, στο επίπεδο φόρτισης 20%

Από τα παραπάνω ενδεικτικά διαγράμματα εξέλιξης του δυναμικού προκύπτουν τα εξής: Σε όλες τις περιπτώσεις φόρτισης οι ηλεκτραρνητικότερες τιμές παρουσιάζονται στη σύνθεση CC1 (σκυρόδεμα αναφοράς). Στη συνέχεια και πολύ κοντά με την CC1 έρχονται οι τιμές δυναμικού της σύνθεσης CC3 (ψεκαζόμενος Α.Δ) και τέλος με μικρή διαφορά, τη μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση παρουσιάζει η σύνθεση CC2 (πρόσθετος Α.Δ.).

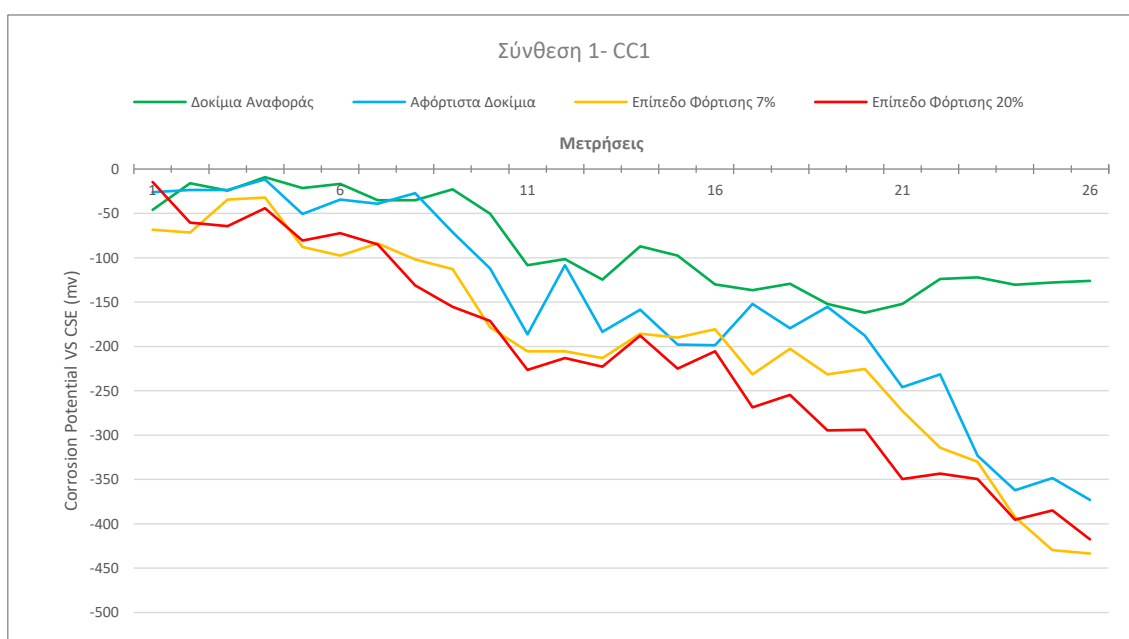
Πιο αναλυτικά προκύπτει πως:

Ο αναστολέας διάβρωσης ως πρόσθετο (CC2) έδειξε συγκριτικά την καλύτερη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά καθότι διατήρησε τις υψηλότερες τιμές δυναμικού διάβρωσης σε σχεδόν όλη τη διάρκεια των 42 μηνών και άρα παρουσιάζει μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση από το σκυρόδεμα αναφοράς (CC1). Από τις μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης προκύπτει πως χρήση αναστολέα διάβρωσης στο μίγμα του σκυροδέματος σε ποσότητα 4% κ.β. τσιμέντου οδηγεί σε μικρότερη προδιάθεση διάβρωσης του οπλισμού. Συγκεκριμένα οδήγησε το δυναμικό διάβρωσης σε 12% ηλεκτροθετικότερες τιμές από την σύνθεση αναφοράς και 7% ηλεκτροθετικότερες τιμές από την σύνθεση CC3 κατά μέσο όρο στο σύνολο των μετρήσεων.

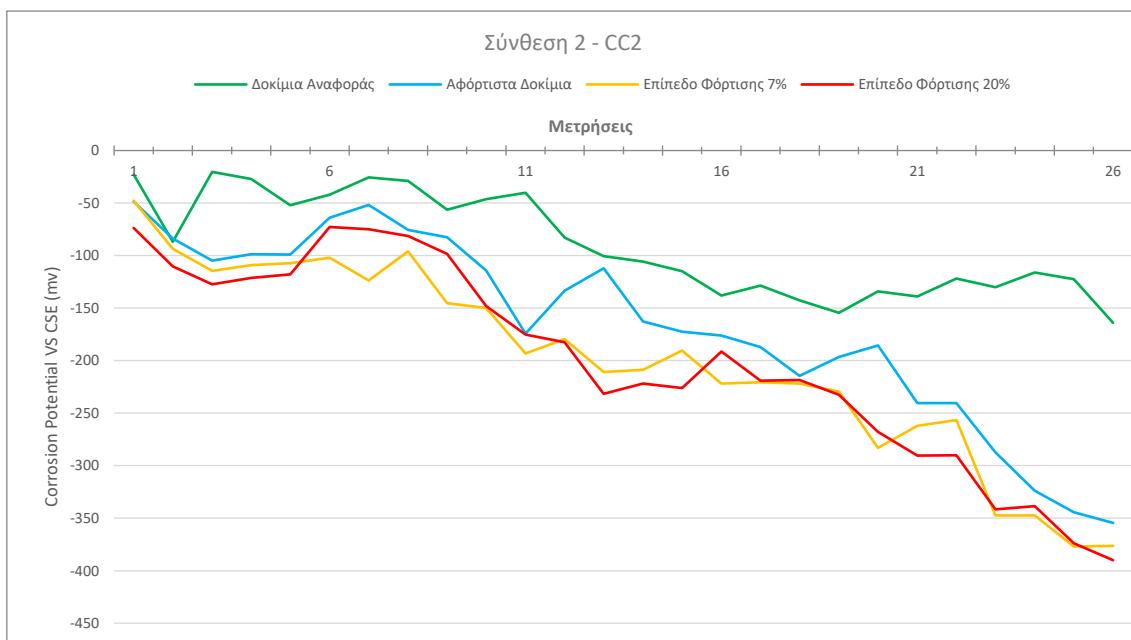
Η υδατοαπωθητική στρώση η οποία εφαρμόστηκε με ψεκασμό στην επιφάνεια των δοκών (CC3), ανέπτυξε καλύτερη συμπεριφορά από το σκυρόδεμα αναφοράς (CC1), ωστόσο όχι σε αξιοσημείωτο βαθμό. Συγκεκριμένα οδήγησε το δυναμικό διάβρωσης σε 5% ηλεκτροθετικότερες τιμές από την σύνθεση αναφοράς κατά μέσο όρο στο σύνολο των μετρήσεων. Ωστόσο όπως παρατηρείται στο Σχήμα 7.14, στο 2^ο επίπεδο φόρτισης τα δοκίμια με επιφανειακή προστασία παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές με τα δοκίμια αναφοράς. Αυτό ίσως να οφείλεται στην αστοχία του προστατευτικού «φιλμ» ως αποτέλεσμα της φόρτισης. Προκύπτει λοιπόν πως η εφαρμογή επιφανειακής προστασίας είναι αποτελεσματική ωστόσο πρέπει να γίνεται με προσοχή και ιδιαιτέρως σε στοιχεία σκυροδέματος που παρουσιάζουν παραμορφώσεις (βέλη κάμψης) καθότι μια μικρή αστοχία στο προστατευτικό στρώμα μπορεί να οδηγήσει σε καθολική αποτυχία της μεθόδου.

7.1.3. Επίδραση μόνιμης φόρτισης

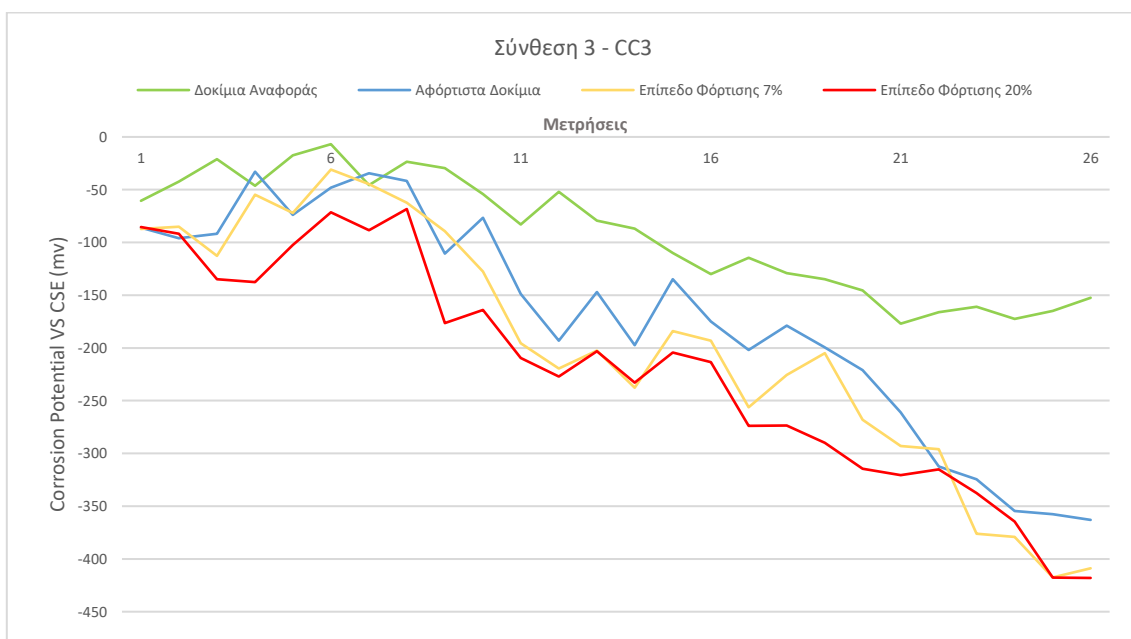
Στην ενότητα αυτή θα επιχειρηθεί να διαπιστωθεί πως επηρεάζει η μόνιμη φόρτιση που φέρει μια δοκός την εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης. Οι διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται και εξετάζονται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.), CC3 (ψεκαζόμενος Α.Δ.), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα). Για όλες τις συνθέσεις παρουσιάζεται ένα διάγραμμα απεικόνισης της εξέλιξης του δυναμικού και για τις 4 εξεταζόμενες καταστάσεις, δηλαδή: δοκίμια αναφοράς (κωδικός Α) αφόρτιστα (κωδικός Β), επίπεδο φόρτισης 7% (κωδικός C) και επίπεδο φόρτισης 20% (κωδικός D).



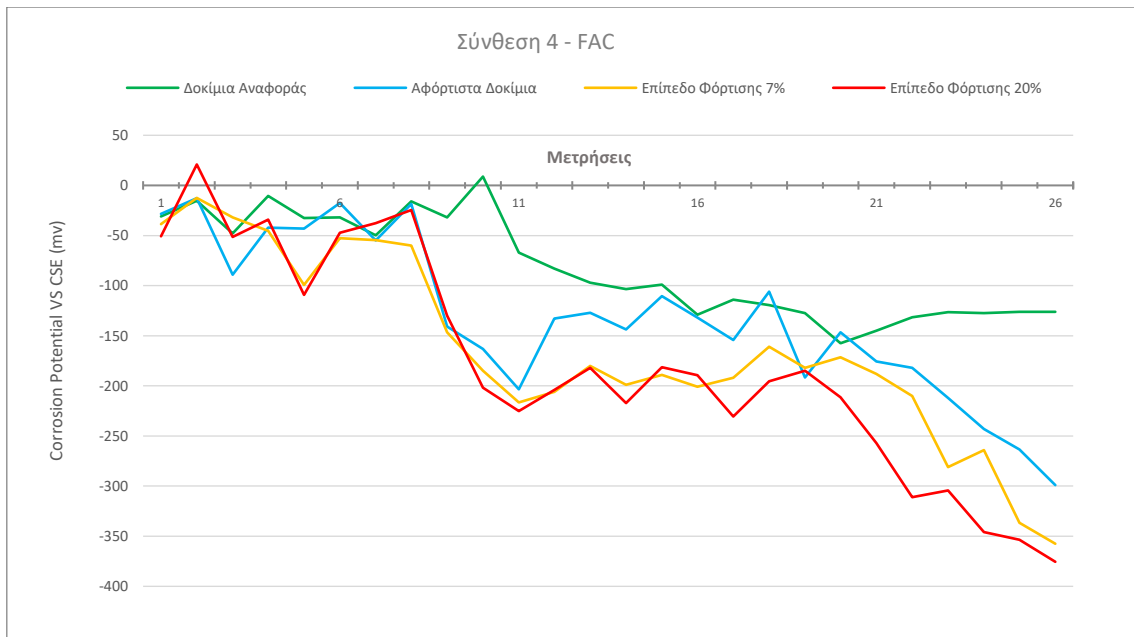
Σχήμα 7. 15 Εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις της σύνθεσης CC1



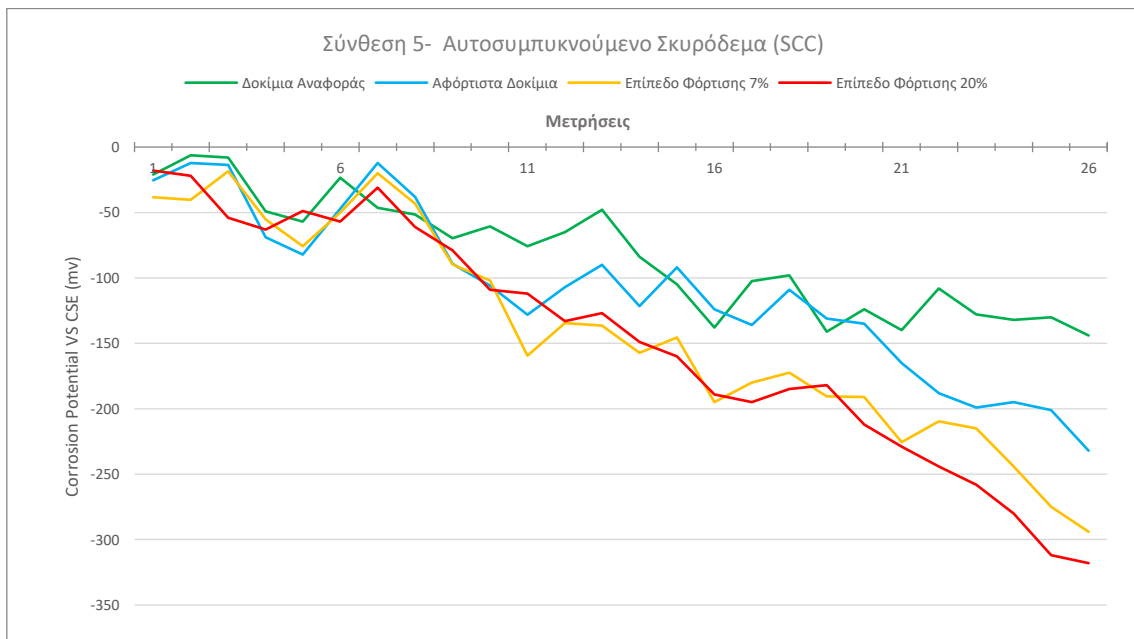
Σχήμα 7. 16 Εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις της σύνθεσης CC2



Σχήμα 7. 17 Εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις της σύνθεσης CC3



Σχήμα 7. 18 Εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις της σύνθεσης FAC



Σχήμα 7. 19 Εξέλιξη του δυναμικού διάβρωσης για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις της σύνθεσης SCC

Από τα παραπάνω διαγράμματα εξέλιξης του δυναμικού (Σχήματα 7.15-7.19) παρατηρούνται τα εξής: Όλες οι δοκοί αναφοράς δηλαδή αυτές που εκτέθηκαν σε φυσικό περιβάλλον (περίπτωση Α) διατήρησαν σταθερές τιμές δυναμικού καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Οι τιμές αυτές δεν ξεπέρασαν το όριο των -200mV πράγμα το οποίο δείχνει πως είναι σχεδόν βέβαιο (90% κατά ASTM) ότι δεν υπήρξε διάβρωση του οπλισμού τους. Αυτό υπήρξε τόσο αναμενόμενο όσο και επιθυμητό καθότι οι δοκοί αυτοί χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία ως δείγματα αναφοράς έναντι των υπολοίπων διαβρωμένων δειγμάτων. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις (B,C,D) τα αφόρτιστα δοκίμια (περίπτωση Β) έδειξαν συγκριτικά την καλύτερη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά καθότι διατήρησαν τις υψηλότερες τιμές δυναμικού διάβρωσης σε σχεδόν όλη τη διάρκεια των 42 μηνών και άρα παρουσιάζουν μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση από τις περιπτώσεις των δοκιμίων υπό φόρτιση.

Σε όλες τις συνθέσεις οι ηλεκτραρνητικότερες τιμές παρουσιάζονται στο δεύτερο επίπεδο φόρτισης (περίπτωση D). Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση CC1 (Σχήμα 7.15) στην οποία το επίπεδο φόρτισης 7% παρουσιάζει ελαφρώς ηλεκτραρνητικότερες τιμές συγκριτικά με το 2^ο επίπεδο (-435mV έναντι -420mV). Αρκετά κοντά με τις τιμές του επιπέδου φόρτισης 20% έρχονται οι τιμές δυναμικού των δοκών με το επίπεδο φόρτισης 7% (περίπτωση C) και τέλος με σημαντική διαφορά, τη μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση παρουσιάζουν οι αφόρτιστοι δοκοί (περίπτωση B).

Αναλυτικά από τις μετρήσεις του δυναμικού διάβρωσης προκύπτει πως μια μόνιμη καμπτική φόρτιση σε μια δοκό οπλισμένου σκυροδέματος σε μέγεθος 20% της οριακής της φόρτισης, οδηγεί σε μεγαλύτερη προδιάθεση του οπλισμού σε διάβρωση. Συγκεκριμένα το 2^ο επίπεδο φόρτισης οδήγησε το δυναμικό διάβρωσης σε 15% ηλεκτραρνητικότερες τιμές σε σχέση με τις αφόρτιστες δοκούς και το 1^ο επίπεδο φόρτισης οδήγησε το δυναμικό διάβρωσης σε 8% ηλεκτραρνητικότερες τιμές κατά μέσο όρο στο σύνολο των μετρήσεων. Προκύπτει λοιπόν μια αλληλεπίδραση της μόνιμης φόρτισης που φέρει ένα στοιχείο σκυροδέματος με την προδιάθεσή του για διάβρωση και κατ' επέκταση με την ανθεκτικότητά του. Ο συσχετισμός αυτός αποτελεί το βασικό σημείο εστίασης της παρούσας μελέτης καθότι τα βιβλιογραφικά δεδομένα μέχρι στιγμής δεν είναι επαρκή για την ολοκληρωμένη αξιολόγησή του.

7.1.4. Μερικά Συμπεράσματα I

Από τη συνολική επεξεργασία των αποτελεσμάτων της παρακολούθησης του δυναμικού διάβρωσης του οπλισμού των εξεταζόμενων δοκών, μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- I. Αύξηση στην περιεκτικότητα τσιμέντου σε μια σύνθεση σκυροδέματος οδηγεί σε μικρότερη προδιάθεση διάβρωσης του οπλισμού. Συγκεκριμένα αύξηση 70 kg/m³ στο τσιμέντο οδήγησε σε 19% ηλεκτροθετικότερες τιμές το δυναμικό διάβρωσης. Αντίστοιχα αύξηση από 100kg/m³ του τσιμέντου οδήγησε σε 22% ηλεκτροθετικότερες τιμές του δυναμικού διάβρωσης κατά μέσο όρο.
- II. Αύξηση του λόγου N/T σε μια σύνθεση σκυροδέματος οδηγεί σε μεγαλύτερη προδιάθεση διάβρωσης του οπλισμού της. Συγκεκριμένα αύξηση από 0,4 σε 0,5 οδήγησε σε 30% ηλεκτροθετικότερες τιμές το δυναμικό διάβρωσης κατά μέσο όρο. Την συγκριτικά καλύτερη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά από όλες τις συνθέσεις παρουσίασε το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (SCC). Αυτό οφείλεται στην ιδιαίτερη δομή του (αυξημένα λεπτόκοκκα αδρανή, αυξημένη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, χαμηλός λόγος N/T) και δείχνει πως μια καλή ποιότητα σκυροδέματος μπορεί πέρα από ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες να προσφέρει και ικανοποιητική αντιδιαβρωτική προστασία.
- III. Η χρήση αναστολέα διάβρωσης στο μίγμα του σκυροδέματος σε ποσότητα 4% κ.β. τσιμέντου οδηγεί σε μικρότερη προδιάθεση διάβρωσης του οπλισμού. Συγκεκριμένα ο πρόσθετος αναστολέας διάβρωσης οδήγησε το δυναμικό διάβρωσης σε 12% ηλεκτροθετικότερες τιμές από την σύνθεση αναφοράς και 7% ηλεκτροθετικότερες τιμές από την σύνθεση με την επιφανειακή προστασία.
- IV. Η σύνθεση με την υδατοαπωθητική επιφανειακή στρώση έδειξε καλύτερη συμπεριφορά από το σκυρόδεμα αναφοράς ωστόσο όχι σε αξιοσημείωτο βαθμό. Συγκεκριμένα οδήγησε το δυναμικό διάβρωσης σε 5% ηλεκτροθετικότερες τιμές από την σύνθεση αναφοράς κατά μέσο όρο στο σύνολο των μετρήσεων. Ωστόσο όπως παρατηρείται στο Σχήμα 7.10, στο 2^ο επίπεδο φόρτισης τα δοκίμια με επιφανειακή προστασία παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές με τα δοκίμια αναφοράς. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην αστοχία του προστατευτικού «φιλμ» ως αποτέλεσμα των μικρορηγματώσεων που επέφερε η φόρτιση. Προκύπτει λοιπόν πως η εφαρμογή επιφανειακής προστασίας είναι αποτελεσματική ωστόσο πρέπει να γίνεται με προσοχή και

ιδιαίτερος σε στοιχεία σκυροδέματος που παρουσιάζουν παραμορφώσεις (βέλη κάμψης) καθότι μια μικρή αστοχία στο προστατευτικό στρώμα μπορεί να οδηγήσει σε καθολική αποτυχία της μεθόδου.

- V. Η μόνιμη καμπτική φόρτιση σε μια δοκό οπλισμένου σκυροδέματος σε μέγεθος 20% της οριακής της φόρτισης, οδηγεί σε μεγαλύτερη προδιάθεση του οπλισμού της σε διάβρωση. Συγκεκριμένα στα πειραματικά αποτελέσματα το 2^ο επίπεδο φόρτισης οδήγησε το δυναμικό διάβρωσης σε 15% ηλεκτραρνητικότερες τιμές σε σχέση με τις αφόρτιστες δοκούς και το 1^ο επίπεδο φόρτισης οδήγησε το δυναμικό διάβρωσης σε 8% ηλεκτραρνητικότερες τιμές κατά μέσο όρο στο σύνολο των μετρήσεων. Προκύπτει λοιπόν μια αλληλεπίδραση της μόνιμης φόρτισης ενός στοιχείου σκυροδέματος με την προδιάθεσή του για διάβρωση και κατ' επέκταση την ανθεκτικότητά του. Ο συσχετισμός αυτός αποτελεί το βασικό σημείο εστίασης της παρούσας μελέτης καθότι τα βιβλιογραφικά δεδομένα μέχρι στιγμής δεν είναι επαρκή για την ολοκληρωμένη αξιολόγησή του. Για το λόγο αυτό δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν γι' αυτήν τη αλληλεπίδραση από αυτή τη μελέτη.

7.2. Μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης σκυροδέματος

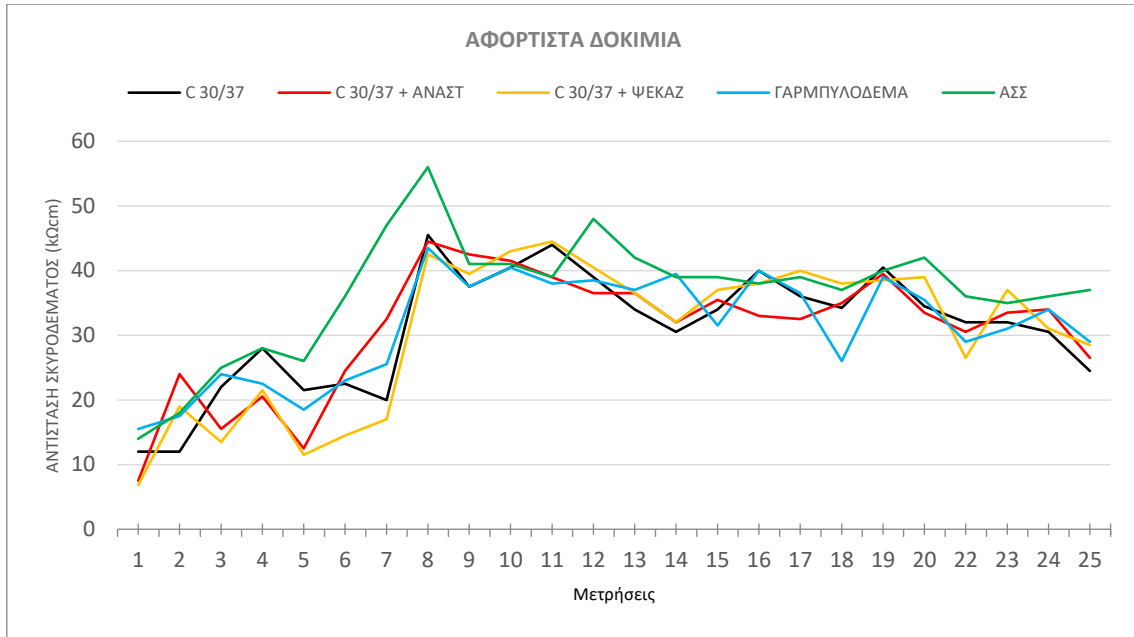
Η αξιολόγηση της ηλεκτρικής αντίστασης των δοκών σκυροδέματος έγινε με τον μετρητή αντίστασης τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων (four probe resistivity meter) ή Wenner Probe. Ο συγκεκριμένος μετρητής δημιουργήθηκε αρχικά για τη μέτρηση της αντίστασης του εδάφους όμως με κάποιες εξειδικευμένες τροποποιήσεις χρησιμοποιείται συχνά για τη μέτρηση της αντίστασης του σκυροδέματος η οποία υποδηλώνει την πιθανότητα διάβρωσης αν ο χάλυβας αποπαθητικοποιηθεί [132]. Το μετρούμενο μέγεθος αποτελεί ένδειξη της ποσότητας υγρασίας στους πόρους και του μεγέθους και της στρεβλότητας του συστήματος των πόρων. Επίσης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του σκυροδέματος που με τη σειρά της επηρεάζεται από την περιεκτικότητα σε τσιμέντο, την αναλογία νερού/τσιμέντου, τη σκλήρυνση και τα πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν. Το επίπεδο συγκέντρωσης των χλωριόντων δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αντίσταση αφού υπάρχουν ήδη πολλά ιόντα διαλυμένα στο νερό των πόρων και η παρουσία λίγων ιόντων παραπάνω δεν διαφοροποιεί σημαντικά την κατάσταση. Ωστόσο τα χλωριόντα στο σκυρόδεμα μπορεί να είναι υδροσκοπικά, δηλαδή να προκαλούν περισσότερη συγκράτηση νερού στο σκυρόδεμα, και για το λόγο αυτό χρεώνεται συχνά στα χλωριόντα η συμβολή στη μείωση της αντίστασης του σκυροδέματος. [147]

Οι μετρήσεις με τη μέθοδο αυτή ήταν συνολικά 25, έγιναν σε συνολικό διάστημα 42 μηνών και για την ορθή πραγματοποίησή τους ακολουθήθηκε η διαδικασία μέτρησης που αναφέρουν οι Polder et al (2000). Σε αυτή συμπεριλαμβανόταν η ελαφριά διαβροχή της επιφάνειας μέτρησης των δοκιμίων με τη γρήγορη μετακίνηση ενός βρεγμένου σφουγγαριού πάνω σε αυτήν έτσι ώστε να βελτιωθεί η επαφή. Η διαβροχή δεν ήταν εκτεταμένη έτσι ώστε να μην επηρεαστεί η αντίσταση του σκυροδέματος από την αυξημένη παρουσία υγρασίας [132]. Επίσης, για να διασφαλιστεί η ικανοποιητική επαφή μεταξύ του σκυροδέματος και του Wenner probe, τα σφουγγάρια των ηλεκτροδίων διαβρέχονταν πριν την έναρξη της διαδικασίας μέτρησης αλλά και σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκειά της καθώς το νερό απορροφούνταν από το σκυρόδεμα. Σε κάθε δοκίμιο λαμβάνονταν μετρήσεις σε τουλάχιστον δύο περιοχές της επιφάνειάς του [164]. Σε καμία περίπτωση δεν λαμβάνονταν μετρήσεις ακριβώς πάνω από τη ράβδο οπλισμού ενώ για τη λήψη μετρήσεων εντός της ίδιας περιοχής το Wenner probe μετακινούνταν κατά μερικά mm. Στον Πίνακα 7.3 παρουσιάζονται οι συνολικοί μέσοι όροι της ηλεκτρικής αντίστασης (concrete resistivity) σε $k\Omega cm$ για την κάθε δοκό καθώς και οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές που καταγράφηκαν για τις 4 εξεταζόμενες καταστάσεις, δηλαδή: δοκίμια αναφοράς (κωδικός A) αφόρτιστα (κωδικός B), επίπεδο φόρτισης 7% (κωδικός C) και επίπεδο φόρτισης 20% (κωδικός D).

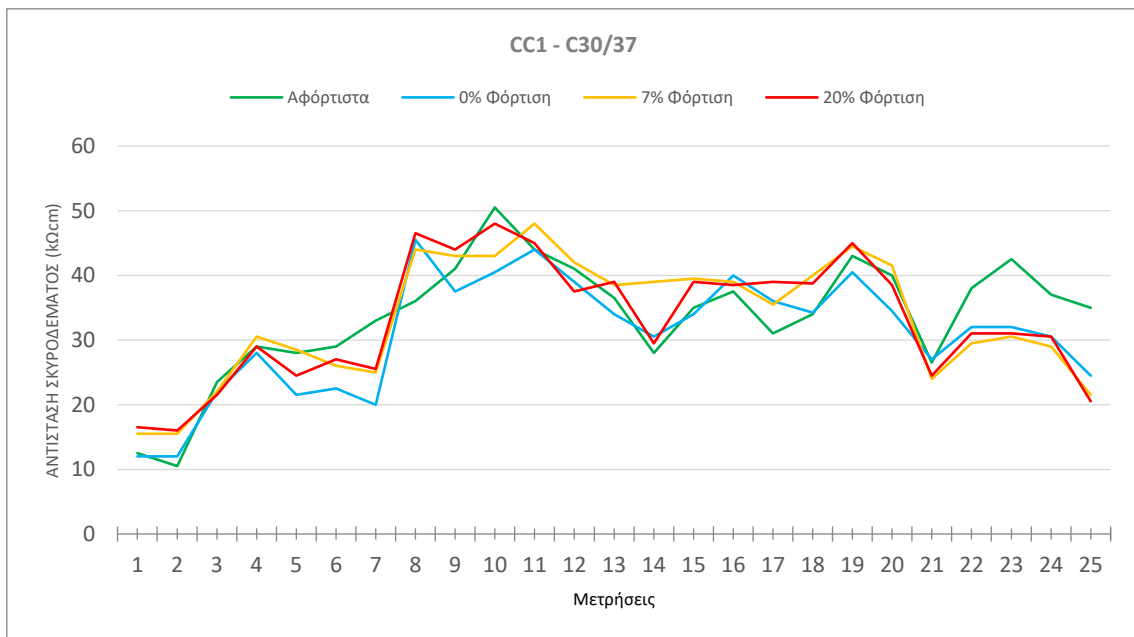
Πίνακας 7. 3 Ηλεκτρική αντίσταση: ελάχιστο, μέγιστο και μέσος όρο κάθε δοκού σε χρονική περίοδο 42 μηνών

Δοκός	Concrete resistivity (kΩcm)		
	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Μέσος Όρος
CC1-A	23.5	50.5	35.6
CC1-B	20	45.5	32.6
CC1-C	21.5	48	35
CC1-D	20.5	48	34.5
CC2-A	13	42.5	33.8
CC2-B	12.5	44.5	32.3
CC2-C	17	46	34.9
CC2-D	14.5	45.5	35.7
CC3-A	14	43.5	34
CC3-B	11.5	44.5	32.1
CC3-C	14.5	49	35
CC3-D	14	50.5	35.9
FAC-A	18.5	45	33.2
FAC-B	18.5	43.5	32.5
FAC-C	16	47	35.1
FAC-D	13	49.5	35.7
SCC-A	27	52	38.6
SCC-B	25	56	38.6
SCC-C	27	49.5	39.2
SCC-D	19	45	36.3

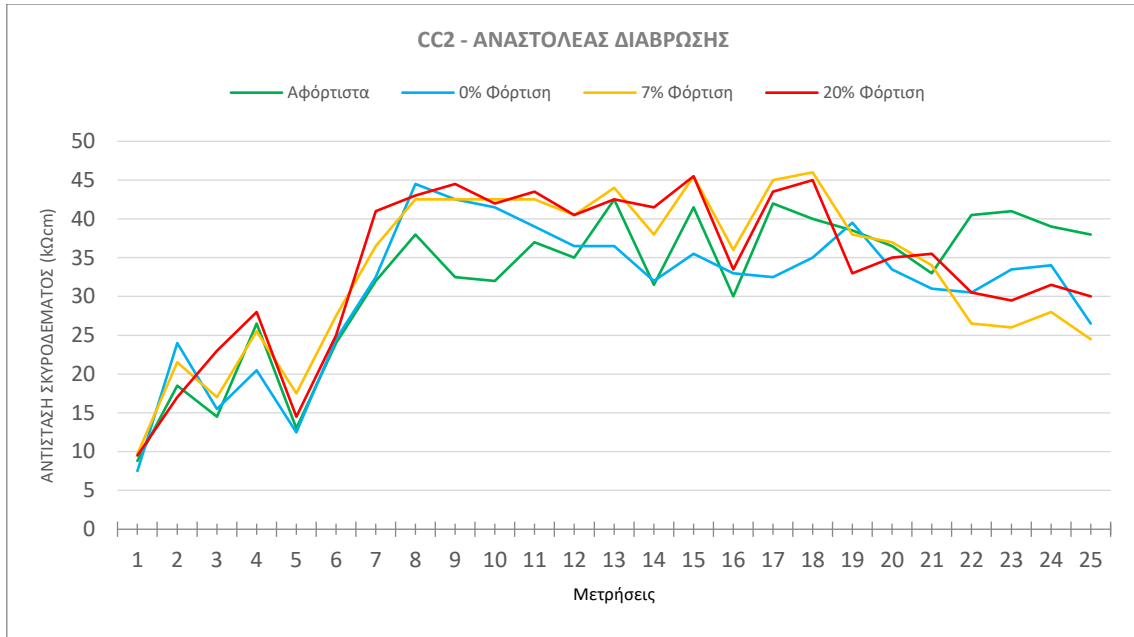
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου για τα δοκίμια και των πέντε συνθέσεων που εξετάστηκαν χωρίς φόρτιση (Σχήμα 7.20) και για κάθε μια σε κάθε περίπτωση έκθεσης (Σχήματα 7.21-7.25).



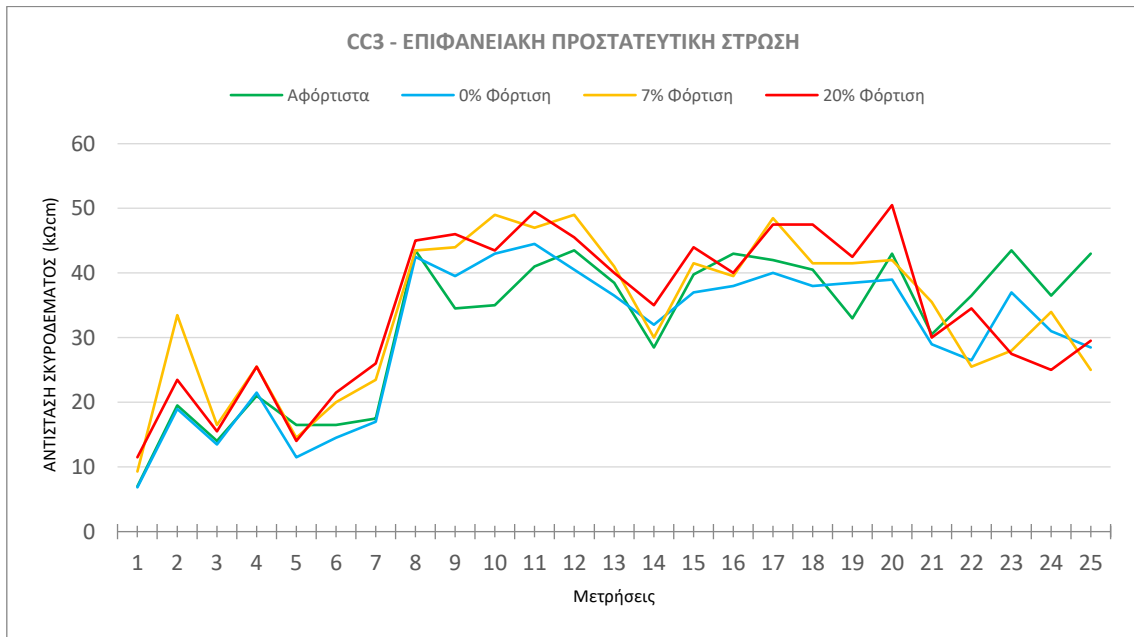
Σχήμα 7. 20 Εξέλιξη της ηλεκτρικής αντίστασης για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις



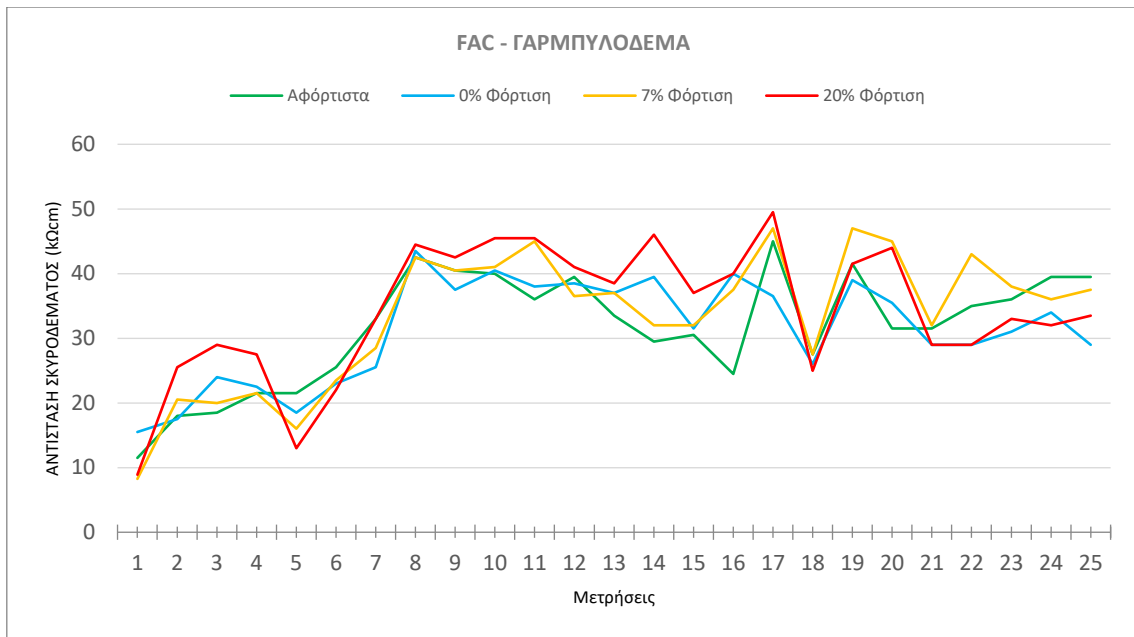
Σχήμα 7. 21 Εξέλιξη της ηλεκτρικής αντίστασης για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις της σύνθεσης CC1



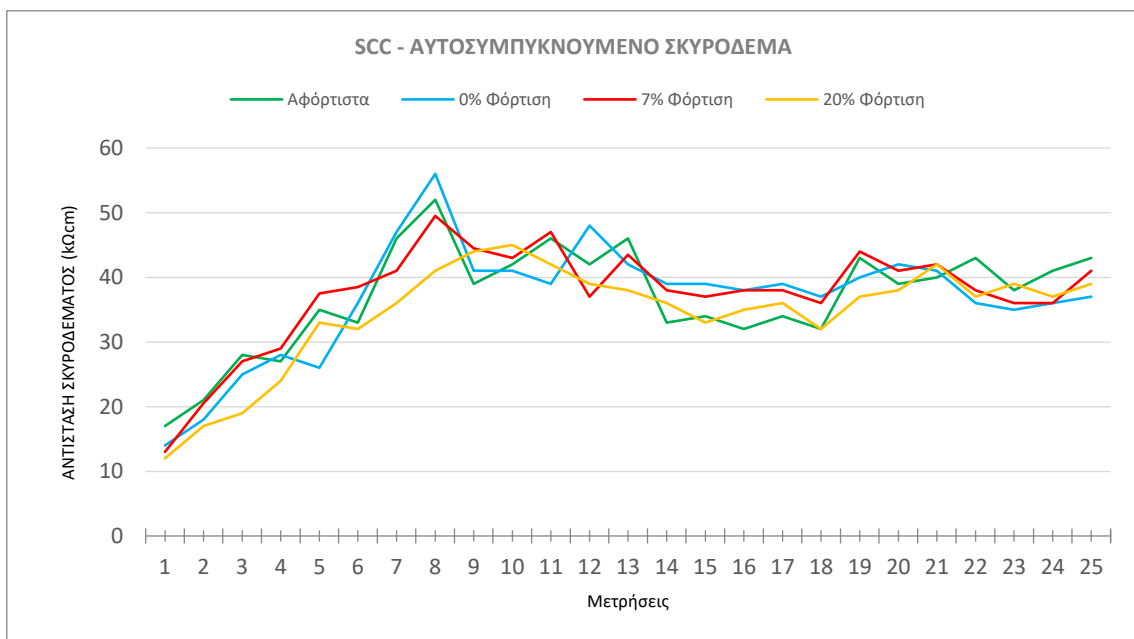
Σχήμα 7. 22 Εξέλιξη της ηλεκτρικής αντίστασης για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις της σύνθεσης CC2



Σχήμα 7. 23 Εξέλιξη της ηλεκτρικής αντίστασης για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις της σύνθεσης CC3



Σχήμα 7. 24 Εξέλιξη της ηλεκτρικής αντίστασης για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις της σύνθεσης FAC



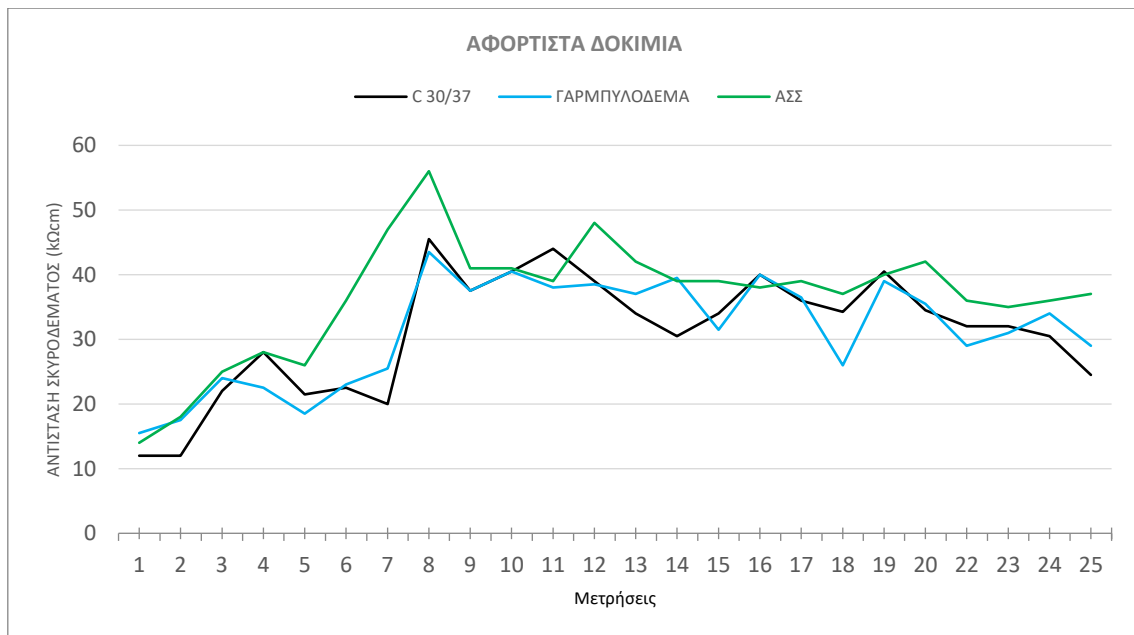
Σχήμα 7. 25 Εξέλιξη της ηλεκτρικής αντίστασης για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις της σύνθεσης SCC

Από τα παραπάνω ενδεικτικά διαγράμματα εξέλιξης της ηλεκτρικής αντίστασης αλλά και από τον συγκεντρωτικό Πίνακα 7.3 προκύπτουν τα εξής: Με μια πρώτη ανάγνωση παρατηρείται πως όλες οι συνθέσεις παρουσιάζουν τιμές παρόμοιας τάξης μεγέθους. Αυτό οφείλεται στην παρόμοια σύσταση των δοκιμαζόμενων συνθέσεων αλλά και στις πανομοιότυπες συνθήκες έκθεσης καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Με μια πιο αναλυτική ματιά παρατηρείται πως σε όλες τις περιπτώσεις φόρτισης οι μικρότερες τιμές αντίστασης παρουσιάζονται στη σύνθεση CC1. Στη συνέχεια και με παρόμοιες τιμές αντίστασης εμφανίζονται σε μία ομάδα οι συνθέσεις: CC2, CC3 και FAC. Τέλος τις υψηλότερες τιμές και κατ' επέκταση τη μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση παρουσιάζει η σύνθεση SCC.

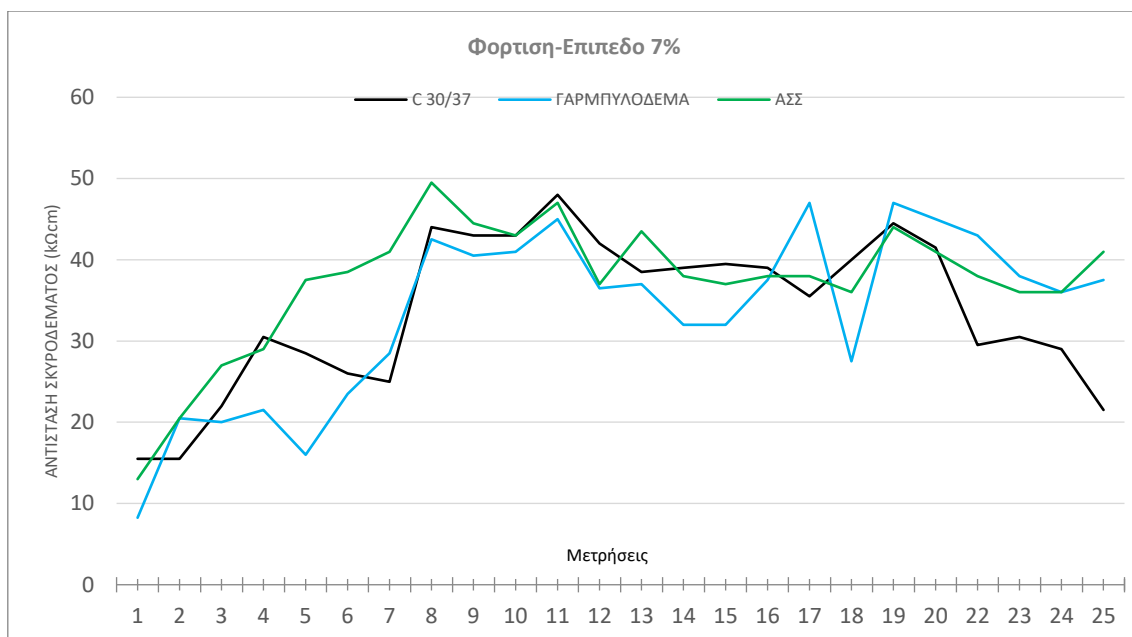
Όπως συμπεραίνεται από τα Σχήματα 7.20-7.25, η ηλεκτρική αντίσταση αυξήθηκε με την ηλικία έκθεσης για την πρώτη περίοδο των 8-10 μηνών, ειδικά για τα δείγματα του ΑΣΣ (SCC). Στη συνέχεια, η ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος μειώθηκε με την ανάπτυξη διάβρωσης, για όλα τα δείγματα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.20, τα δοκίμια έφτασαν τις μέγιστες τιμές αντίστασης σχεδόν ταυτόχρονα μετά από 8-10 μήνες δοκιμής. Οι τιμές σε αυτήν την περίοδο κυμαίνονταν μεταξύ 45 kΩ×cm και 55 kΩ×cm. Μετά από αυτό το διάστημα παρατηρήθηκε μείωση, κυρίως ως αποτέλεσμα της διάβρωσης και οι τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης, κυμαίνονταν μεταξύ 14 kΩ×cm και 40 kΩ×cm. Αυτή η συμπεριφορά ήταν συνεπής με τα αποτελέσματα που ανέφεραν οι Berrocal et al. η οποία έδειξε ότι η ηλεκτρική αντίσταση αυξήθηκε στο χρονικό διάστημα πριν από τη διάβρωση και στη συνέχεια μειώθηκε με την ανάπτυξη της διάβρωσης, για δείγματα οπλισμένου σκυροδέματος [22, 23]. Άλλη μια παρατήρηση που μπορεί να γίνει με βάση τα παραπάνω διαγράμματα είναι πως σε όλες τις περιπτώσεις σκυροδεμάτων τις υψηλότερες (τελικές) τιμές ηλεκτρικής αντίστασης παρουσίασαν τα δοκίμια αναφοράς. Η παρατήρηση αυτή συμφωνεί με τη βιβλιογραφία καθότι αναμενόταν στα δοκίμια που δεν εκτίθενται σε διαβρωτικό περιβάλλον και σε φόρτιση, μια αυξημένη τιμή αντίστασης η οποία υποδηλώνει μειωμένη πιθανότητα διάβρωσης.

7.2.1. Επίδραση σύστασης

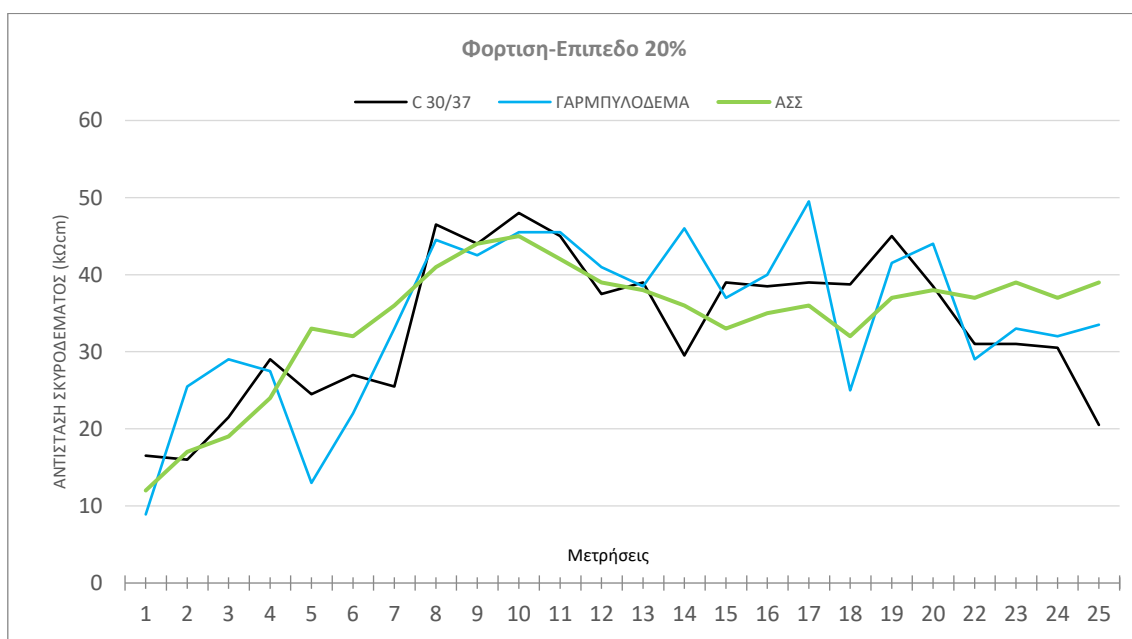
Στην ενότητα αυτή θα επιχειρηθεί να διαπιστωθεί πως επηρεάζει η σύσταση μιας σύνθεσης τις μετρούμενες τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης. Με τον όρο σύσταση μιας σύνθεσης εννοείται η αναλογία και το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (κοκκομετρική ανάλυση), η ποσότητα τσιμέντου αλλά και η ποσότητα του νερού και κατ' επέκταση ο λόγος N/T. Οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται και εξετάζονται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), FAC (γαρμπυλόδεμα) και SCC (αυτοσυμπκνούμενο σκυρόδεμα). Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα ηλεκτρικής αντίστασης – χρόνου έκθεσης για τις τρεις προαναφερθείσες συνθέσεις για τις 3 εξεταζόμενες καταστάσεις, αφόρτιστα (Σχήμα 7.26), 1^ο επίπεδο φόρτισης (Σχήμα 7.27) και 2^ο επίπεδο φόρτισης (Σχήμα 7.28).



Σχήμα 7. 26 Διάγραμμα ηλεκτρικής αντίστασης – χρόνου για τις συνθέσεις CC1, FAC, SCC σε δοκούς χωρίς φόρτιση



Σχήμα 7. 27 Διάγραμμα ηλεκτρικής αντίστασης – χρόνου για τις συνθέσεις CC1, FAC, SCC στο επίπεδο φόρτισης 7%



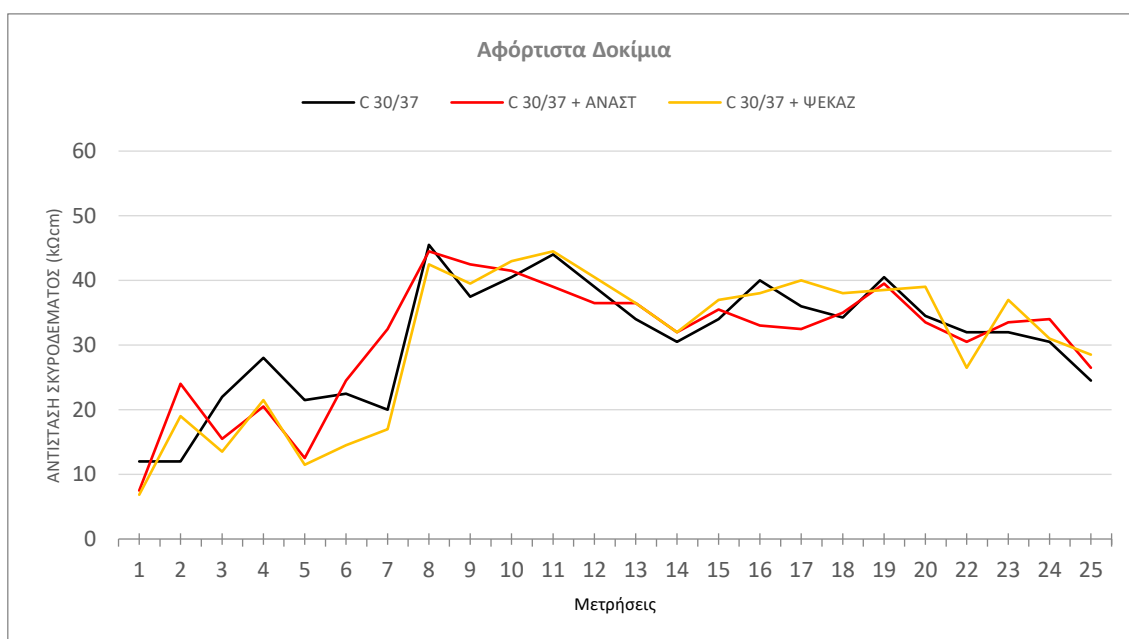
Σχήμα 7. 28 Διάγραμμα ηλεκτρικής αντίστασης – χρόνου για τις συνθέσεις CC1, FAC, SCC στο επίπεδο φόρτισης 20%

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα (Σχήματα 7.26-28) τα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος με τις λεπτότερες συνθέσεις (FAC, SCC) δηλαδή με τα μεγαλύτερα κλάσματα λεπτών αδρανών, παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης και άρα μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση από το σκυρόδεμα αναφοράς (CC1). Σε όλες τις περιπτώσεις φόρτισης οι ηλεκτραρνητικότερες τιμές παρουσιάζονται στη σύνθεση CC1 η οποία μάλιστα παρουσιάζει μια πτωτική τάση στο τελευταίο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια έρχονται σε παρόμοια τάξη μεγέθους οι τιμές των συνθέσεων FAC και SCC. Με μικρή διαφορά, τη μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση στις 2 από τις 3 περιπτώσεις παρουσιάζει η σύνθεση SCC. Ωστόσο στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως όλες τις τιμές της αντίστασης βρίσκονται σε παρόμοια τάξη μεγέθους. Δηλαδή ενώ ορισμένες συνθέσεις έδειξαν μικρές διαφοροποιήσεις όλες οι συνθέσεις παρουσίασαν το ίδιο μοτίβο εξέλιξης και

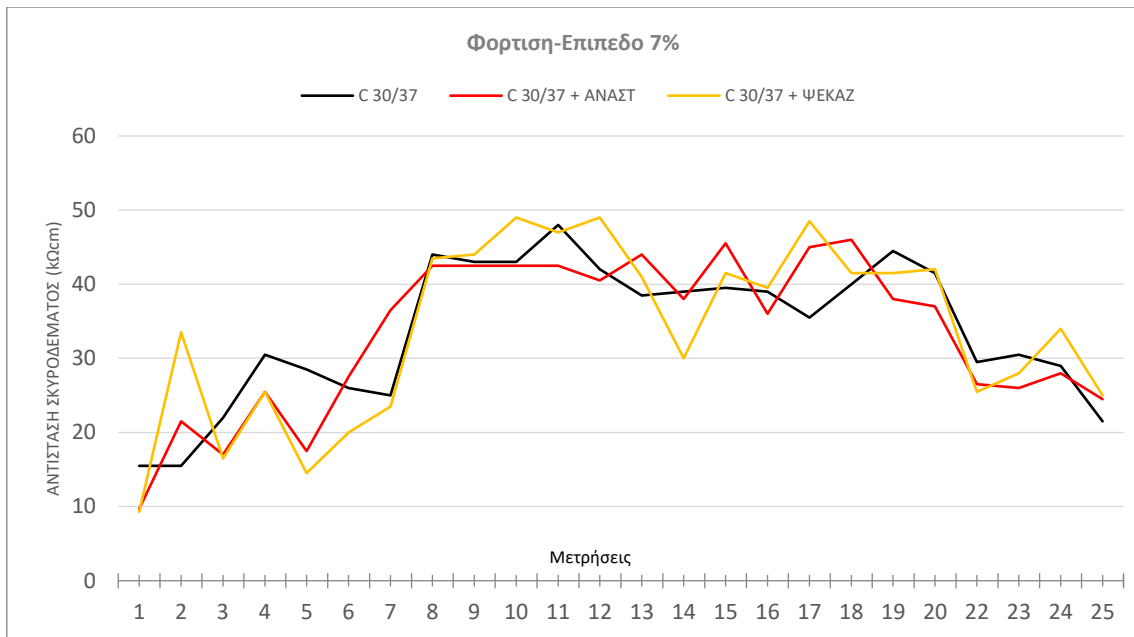
καμία σύνθεση δεν ξεχώρισε με διαφορά. Σε μια πιο διεξοδική ανάλυση μπορούν να εξαχθούν τα εξής: Αύξηση του λόγου N/T και μείωση της περιεκτικότητας του τσιμέντου σε μια σύνθεση σκυροδέματος οδηγεί σε μεγαλύτερη προδιάθεση διάβρωσης του οπλισμού. Συγκεκριμένα αύξηση από 0,4 (σύνθεση SCC) σε 0,5 (σύνθεση CC1 και FAC) του λόγου N/T οδήγησε σε μικρότερες τιμές αντίστασης κατά μέσο όρο. Όπως προκύπτει, τις υψηλότερες τιμές αντίστασης και κατ' επέκταση την συγκριτικά μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση κατά μέσο όρο είχε το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (39.2 kΩ×cm). Αντίστοιχα αύξηση από 330kg/m³ (σύνθεση CC1) σε 400kg/m³ (σύνθεση FAC) οδήγησε σε υψηλότερες τιμές κατά μέσο όρο. Η αύξησεις αυτές οφείλονται στην δομή και τη σύσταση των συνθέσεων FAC και SCC (αυξημένα λεπτόκοκκα αδρανή, αυξημένη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, χαμηλός λόγος N/T) και δείχνει πως μια καλή ποιότητα σκυροδέματος μπορεί πέρα από ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες να προσφέρει και ικανοποιητική αντιδιαβρωτική προστασία.

7.2.2. Επίδραση μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας

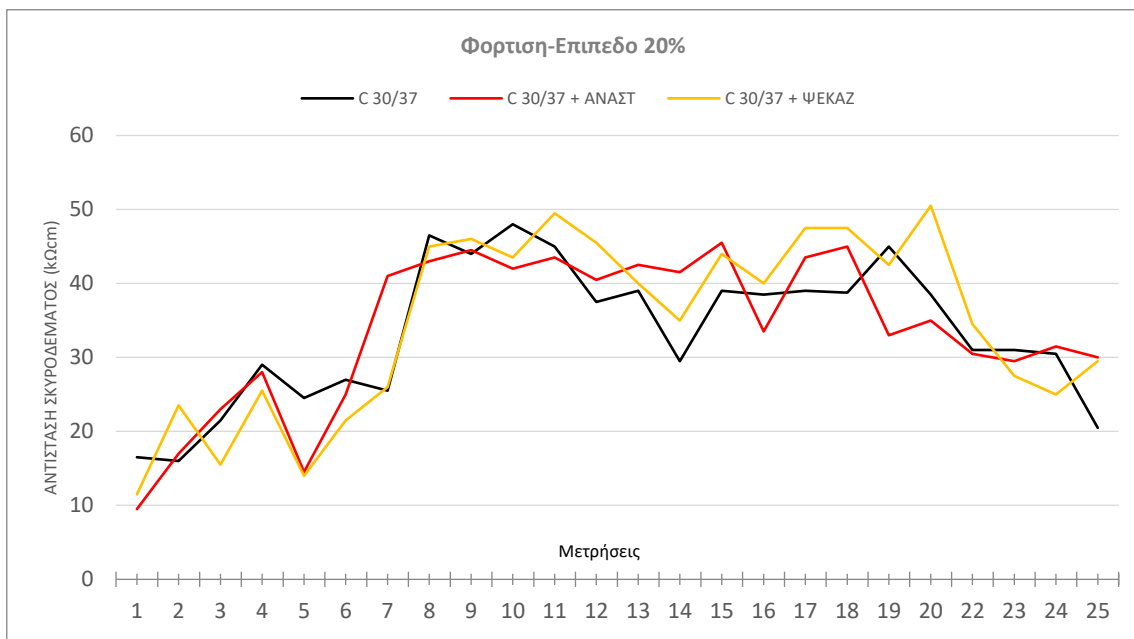
Στην ενότητα αυτή θα επιχειρηθεί να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα των διαφορετικών μεθόδων προστασίας που χρησιμοποιήθηκαν από τις μετρήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης σκυροδέματος των δοκών. Συγκεκριμένα οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.) και CC3 (ψεκασμός με υδρόφοβη στρώση). Έτσι με μια σύγκριση των μεθόδων τόσο μεταξύ τους όσο και με το σκυρόδεμα αναφοράς εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με το βαθμό προστασίας των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου προστασίας από διάβρωση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα ηλεκτρικής αντίστασης (concrete resistivity) – χρόνου έκθεσης για τις προαναφερθείσες συνθέσεις για τις 3 εξεταζόμενες καταστάσεις, αφόρτιστα (Σχήμα 7.29), 1^ο επίπεδο φόρτισης (Σχήμα 7.30) και 2^ο επίπεδο φόρτισης (Σχήμα 7.31).αφόρτιστα, 1^ο επίπεδο φόρτισης και 2^ο επίπεδο φόρτισης.



Σχήμα 7. 29 Διάγραμμα ηλεκτρικής αντίστασης – χρόνου για τις συνθέσεις CC1, CC2, CC3 σε δοκούς χωρίς φόρτιση



Σχήμα 7. 30 Διάγραμμα ηλεκτρικής αντίστασης – χρόνου για τις συνθέσεις CC1, CC2, CC3 στο επίπεδο φόρτισης 7%



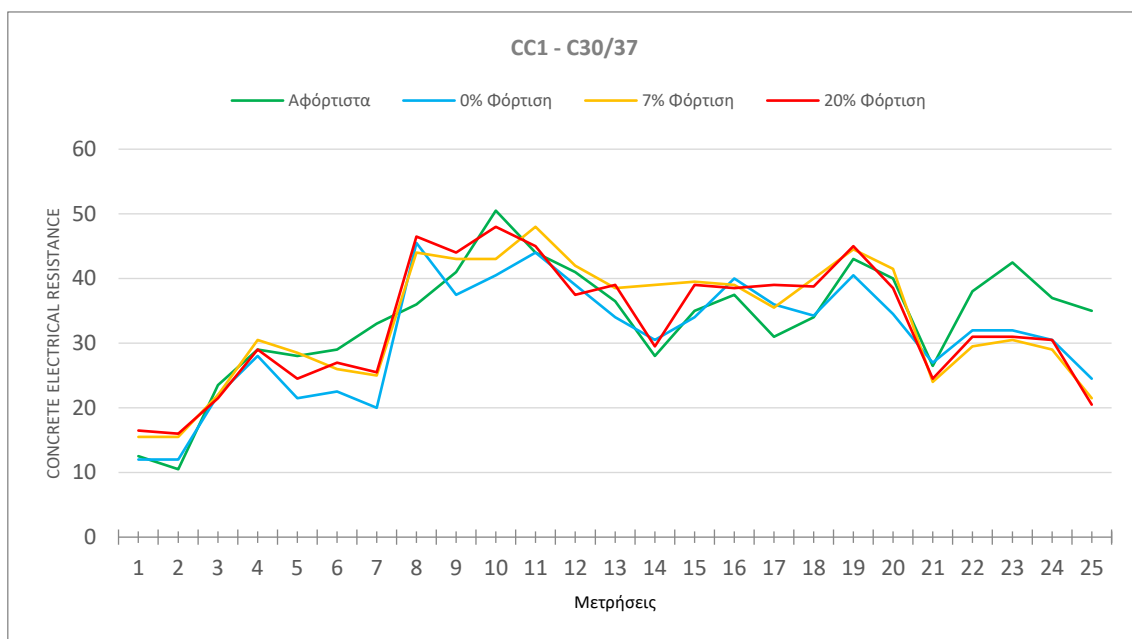
Σχήμα 7. 31 Διάγραμμα ηλεκτρικής αντίστασης – χρόνου για τις συνθέσεις CC1, CC2, CC3, στο επίπεδο φόρτισης 20%

Από τα παραπάνω διαγράμματα (Σχήματα 7.29-31) εξέλιξης της ηλεκτρικής αντίστασης των δοκιμίων προκύπτουν τα εξής: Σε όλες τις περιπτώσεις φόρτισης οι χαμηλότερες τιμές παρουσιάζονται στη σύνθεση CC1 (σκυρόδεμα αναφοράς) ωστόσο η διαφορά είναι πολύ μικρή. Οι τιμές της αντίστασης των υπόλοιπων συνθέσεων (CC2, CC3) βρίσκονται σε παρόμοια τάξη μεγέθους. Δηλαδή ενώ η σύνθεση CC1 έδειξε μικρές διαφοροποιήσεις στα τελικά αποτελέσματα, όλες οι συνθέσεις παρουσίασαν το ίδιο μοτίβο εξέλιξης και καμία σύνθεση δεν ξεχώρισε με διαφορά. Ωστόσο επισημαίνεται πως η μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης αποτελεί περισσότερο έναν ποιοτικό χαρακτηρισμό των εξεταζόμενων δοκιμίων. Δεν αποτελεί βασική μέθοδο χαρακτηρισμού της αντιδιαβρωτικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος και άρα οι μικρές διαφοροποιήσεις που υπήρξαν στα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν παρέχει το περιθώριο για την εξαγωγή κάποιου βέβαιου

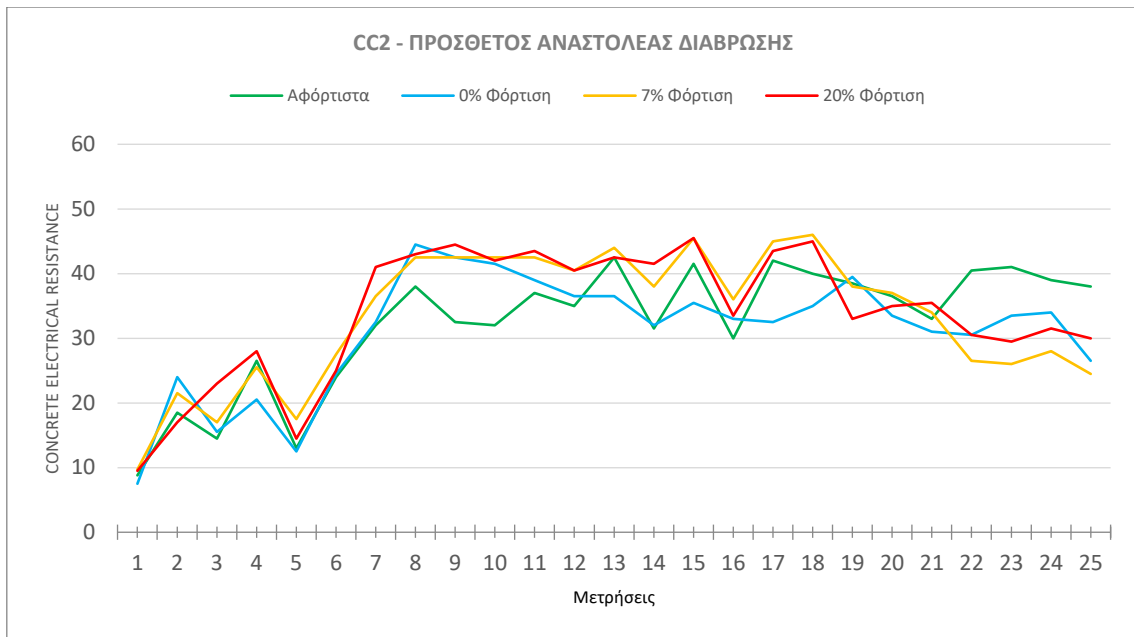
συμπεράσματος. Ωστόσο μπορεί να γίνει μια εκτίμηση καθότι το μετρούμενο μέγεθος αποτελεί ένδειξη της ποσότητας υγρασίας στους πόρους, του μεγέθους και της στρεβλότητας του συστήματος των πόρων και άρα κατ' επέκταση της προδιάθεσής του για διάβρωση. Σε μια πιο διεξοδική ανάλυση ο αναστολέας διάβρωσης ως πρόσθετο (CC2) αλλά και τα δοκίμια με επιφανειακό ψεκάσμο (CC3) έδειξαν συγκριτικά τη μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προκύπτει πως χρήση αναστολέα διάβρωσης στο μίγμα του σκυροδέματος σε ποσότητα 4% κ.β. τσιμέντου αλλά και εφαρμογή επιφανειακής προστασίας οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές αντίστασης, όχι ωστόσο σε ιδιαίτερα υψηλό βαθμό.

7.2.3. Επίδραση μόνιμης φόρτισης

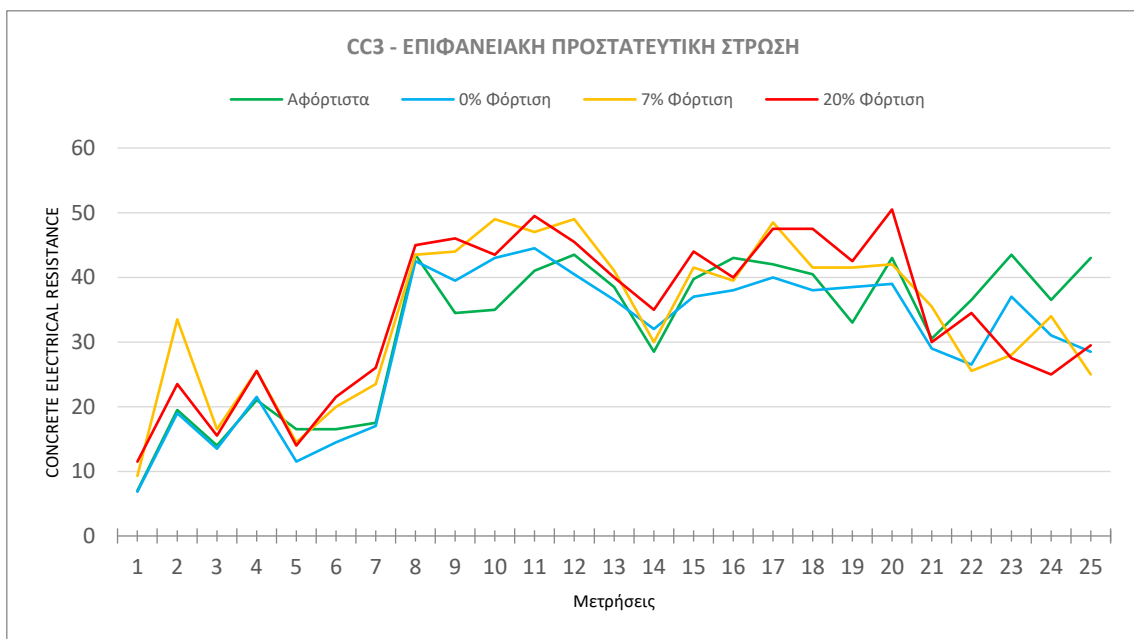
Στην ενότητα αυτή θα επιχειρηθεί να διαπιστωθεί πως και κατά πόσο επηρεάζει η μόνιμη φόρτιση που φέρει μια δοκός την ηλεκτρική αντίσταση του σκυροδέματος των δοκιμίων. Οι διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται και εξετάζονται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.), CC3 (ψεκαζόμενος Α.Δ.), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα). Για όλες τις συνθέσεις παρουσιάζεται ένα διάγραμμα απεικόνισης της εξέλιξης των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης για τις 4 εξεταζόμενες καταστάσεις, δηλαδή: δοκίμια αναφοράς (κωδικός Α) αφόρτιστα (κωδικός Β), επίπεδο φόρτισης 7% (κωδικός C) και επίπεδο φόρτισης 20% (κωδικός D). Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των τιμών ηλεκτρικής αντίστασης συναρτήσει του χρόνου για την κάθε περίπτωση έκθεσης σε όλες τις συνθέσεις (Σχήματα 7.32-7.36).



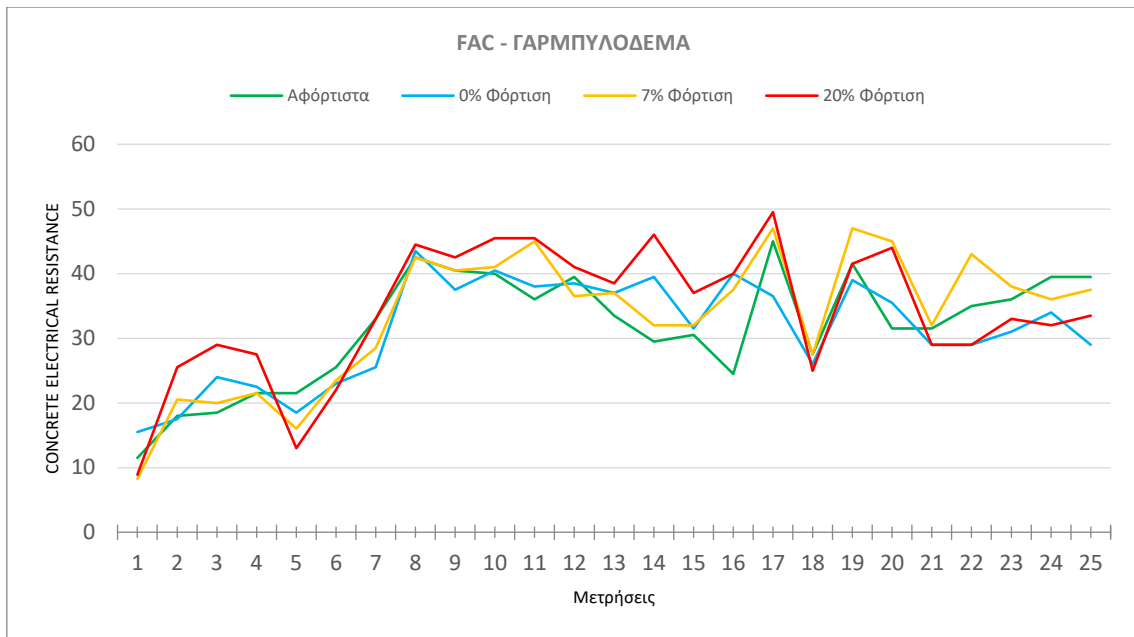
Σχήμα 7. 32 Εξέλιξη της ηλεκτρικής αντίστασης για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις της σύνθεσης CC1



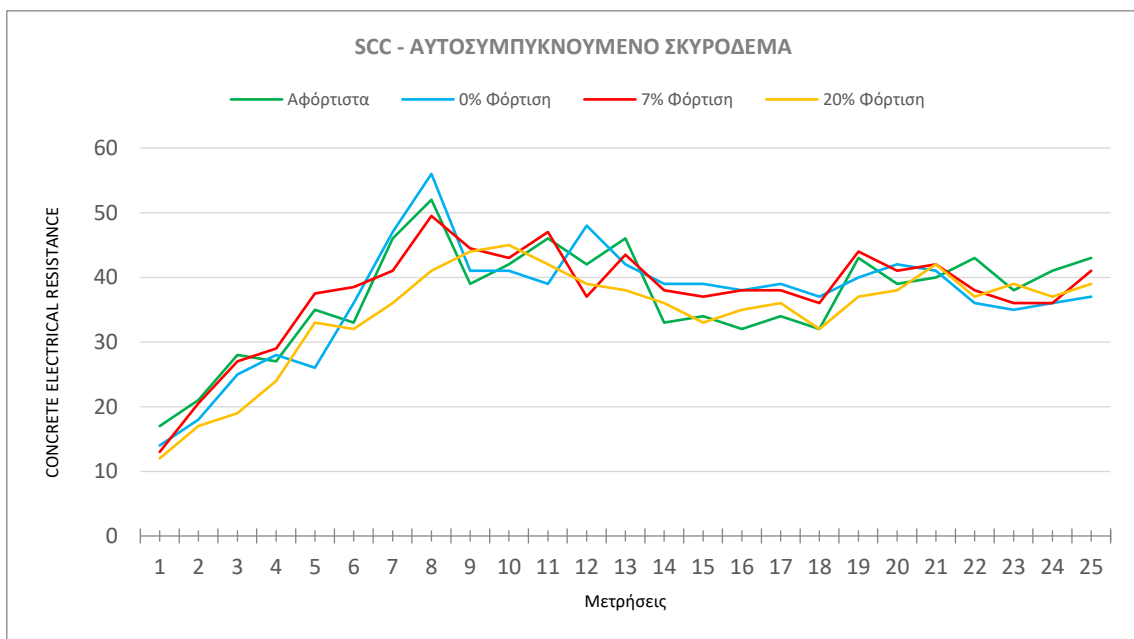
Σχήμα 7. 33 Εξέλιξη της ηλεκτρικής αντίστασης για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις της σύνθεσης CC2



Σχήμα 7. 34 Εξέλιξη της ηλεκτρικής αντίστασης για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις της σύνθεσης CC3



Σχήμα 7. 35 Εξέλιξη της ηλεκτρικής αντίστασης για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις της σύνθεσης FAC



Σχήμα 7. 36 Εξέλιξη της ηλεκτρικής αντίστασης για όλες τις εξεταζόμενες καταστάσεις της σύνθεσης SCC

Από τα παραπάνω διαγράμματα εξέλιξης της ηλεκτρικής αντίστασης (Σχήματα 7.32-7.36) παρατηρείται πως οι δοκοί αναφοράς, δηλαδή αυτές που εκτέθηκαν σε φυσικό περιβάλλον (περίπτωση Α), είχαν τις υψηλότερες τιμές στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας. Αυτό υπήρξε αναμενόμενο καθότι οι δοκοί αυτοί χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία ως δείγματα αναφοράς έναντι των υπολοίπων δειγμάτων και δεν ήταν εκτεθειμένα σε διαβρωτικό περιβάλλον ή σε φόρτιση. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις (Β, C, D) τα αφόρτιστα δοκίμια (περίπτωση Β) έδειξαν συγκριτικά την καλύτερη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά καθότι διατήρησαν τις υψηλότερες τιμές αντίστασης και άρα παρουσιάζουν θεωρητικά μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση από τις περιπτώσεις των δοκιμίων υπό φόρτιση. Ωστόσο στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως όλες οι τιμές της αντίστασης, τόσο τελικές όσο και ο μέσος όρος, βρίσκονται σε παρόμοια τάξη μεγέθους. Ενώ ορισμένες συνθέσεις έδειξαν

μικρές διαφοροποιήσεις όλες οι συνθέσεις παρουσίασαν το ίδιο μοτίβο εξέλιξης και καμία δεν ξεχώρισε με διαφορά. Επιπροσθέτως παρατηρώντας τις τελικές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης σε όλες τις περιπτώσεις, φαίνεται μια αρκετά μικρή διαφοροποίηση σε αυτές (29-40 kΩ×cm), δείχνοντας πως η κατάσταση του κάθε δοκιμίου (A,B,C,D) δεν επηρεάζει τόσο τις τιμές της αντίστασης όσο η σύστασή του. Η παρατήρηση αυτή ίσως οφείλεται στο ότι το επίπεδο συγκέντρωσης των χλωριόντων δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αντίσταση αφού υπάρχουν ήδη πολλά ιόντα διαλυμένα στο νερό των πόρων και η παρουσία λίγων ιόντων παραπάνω δεν διαφοροποιεί σημαντικά την κατάσταση.

7.2.4. Μερικά Συμπεράσματα II

Από τη συνολική επεξεργασία των αποτελεσμάτων της παρακολούθησης της ηλεκτρικής αντίστασης των εξεταζόμενων συνθέσεων, μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- I. Τα δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος με τις λεπτότερες συνθέσεις (FAC, SCC) δηλαδή με τα μεγαλύτερα κλάσματα λεπτών αδρανών, παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης και άρα μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση από το σκυρόδεμα αναφοράς (CC1) όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 7.20-7.25. Σε όλες τις περιπτώσεις φόρτισης οι μικρότερες τιμές παρουσιάζονται στη σύνθεση CC1 η οποία μάλιστα παρουσιάζει μια πρωτική τάση στο τελευταίο χρονικό διάστημα. Αύξηση στην περιεκτικότητα τσιμέντου οδηγεί σε μικρότερη προδιάθεση διάβρωσης του οπλισμού. Αύξηση 70 kg/m³ (από 330 σε 400) στο τσιμέντο οδήγησε σε υψηλότερες τιμές αντίστασης. Επίσης αύξηση του λόγου N/T σε μια σύνθεση σκυροδέματος οδηγεί σε μεγαλύτερη προδιάθεση διάβρωσης του οπλισμού της. Συγκεκριμένα αύξηση του λόγου N/T από 0,4 σε 0,5 οδήγησε το σκυρόδεμα σε 12% μειωμένες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης. Την συγκριτικά καλύτερη συμπεριφορά από όλες τις συνθέσεις παρουσίασε το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (SCC) καθότι παρουσίασε τις υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης (Σχήμα 7.20). Σε μια δεύτερη ομάδα και με παρόμοιες τελικές τιμές αντίστασης εμφανίζονται οι υπόλοιπες εξεταζόμενες συνθέσεις (CC1,CC2,CC3,FAC) με την FAC να παρουσιάζει ελαφρώς υψηλότερες τιμές από τις υπόλοιπες.
- II. Η χρήση αναστολέα διάβρωσης στο μίγμα του σκυροδέματος σε ποσότητα 4% κ.β. τσιμέντου οδηγεί σε μικρή μεταβολή των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης. Ο πρόσθετος αναστολέας διάβρωσης (σύνθεση CC1) οδήγησε τις τιμές της αντίστασης σε αύξηση 6% σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς (CC2) και αύξηση 2% σε σχέση με την σύνθεση με το ψεκαζόμενο υδαταπωθητικό στρώμα (CC3). Οι διαφοροποιήσεις αυτές δεν είναι σημαντικές και συμπεραίνεται πως οι αναστολείς διάβρωσης ως πρόσθετα στο σκυρόδεμα αλλά και η μέθοδος προστασίας με αδιαβροχοποίηση της επιφάνειας, δεν μεταβάλλουν σημαντικά την ηλεκτρική αντίσταση. Επισημαίνεται πως η μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης αποτελεί περισσότερο έναν ποιοτικό χαρακτηρισμό των εξεταζόμενων δοκιμίων και άρα οι μικρές διαφοροποιήσεις που υπήρξαν στα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν παρέχουν το περιθώριο για την εξαγωγή κάποιου απόλυτου συμπεράσματος.
- III. Η μόνιμη καμπτική φόρτιση σε μια δοκό οπλισμένου σκυροδέματος σε μέγεθος 20% της οριακής της φόρτισης, οδηγεί σε ελαφρώς μεγαλύτερη προδιάθεση του οπλισμού της σε διάβρωση. Συγκεκριμένα στα πειραματικά αποτελέσματα στα επίπεδα φόρτισης 7% και 20% παρουσίασε μειωμένες τιμές ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με τις αφόρτιστες δοκούς. Προκύπτει λοιπόν μια αλληλεπίδραση της μόνιμης φόρτισης ενός στοιχείου σκυροδέματος με την προδιάθεσή του για διάβρωση και κατ' επέκταση την ανθεκτικότητά του. Ωστόσο στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως όλες οι τιμές της αντίστασης, τόσο τελικές όσο και ο μέσος όρος, βρίσκονται σε παρόμοια τάξη μεγέθους. Επισημαίνεται πως η μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης δεν αποτελεί άμεση μέθοδο χαρακτηρισμού της αντιδιαβρωτικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος και άρα οι μικρές διαφοροποιήσεις που υπήρξαν στα

αποτελέσματα των μετρήσεων δεν παρέχει το περιθώριο για την εξαγωγή κάποιου συμπεράσματος σχετικά με την επιρροή της φόρτισης στο φαινόμενο της διάβρωσης.

- IV. Από τις τελικές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης σε όλες τις περιπτώσεις (Σχήματα 7.32-35), φαίνεται μια αρκετά μικρή διαφοροποίηση (της τάξης των $10 \text{ k}\Omega \times \text{cm}$), δείχνοντας πως η κατάσταση του κάθε δοκιμίου δεν επηρεάζει τόσο τις τιμές της αντίστασης όσο η σύστασή του. Η παρατήρηση αυτή οφείλεται στο ότι το επίπεδο συγκέντρωσης των χλωριόντων δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αντίσταση αφού υπάρχουν ήδη πολλά ιόντα διαλυμένα στο νερό των πόρων και η παρουσία λίγων ιόντων παραπάνω δεν διαφοροποιεί σημαντικά την κατάσταση. Τα χλωριόντα στο σκυρόδεμα μπορεί να είναι υγροσκοπικά, να βρίσκονται δηλαδή μέσα σε αυτό υπό υγροσκοπική μορφή διατηρώντας υψηλά επίπεδα υγρασίας και αυξάνοντας την ιοντική αγωγιμότητα, για το λόγο αυτό χρεώνεται συχνά στα χλωριόντα η συμβολή στη μείωση της αντίστασης του σκυροδέματος.

7.3. Θεωρητικός υπολογισμός του ρυθμού διάβρωσης

Ο ρυθμός διάβρωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από περιβαλλοντικούς παράγοντες (π.χ. αύξηση ρυθμού σε συνθήκες υγρασίας, ζέστης, ρύπανσης, αλμυρότητας, οξύτητας, υπέρυθρης ακτινοβολίας και έκθεσης σε βακτηρίδια), ενώ επιπρόσθετοι παράγοντες αύξησης του ρυθμού οξείδωσης είναι οι μεγάλες μηχανικές τάσεις, οι ανωμαλίες στην επιφάνεια του μετάλλου και η ύπαρξη διαφυγόντων ρευμάτων. Σύμφωνα με το EN ISO 12944-2, καθορίζονται κάποιες κατηγορίες διάβρωσης, οι οποίες όμως είναι γενικές και δεν αφορούν συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας, μηχανικής καταπόνησης ή άλλων ειδικών περιπτώσεων.

Οι τιμές που εξήχθησαν από την παρακολούθηση του δυναμικού διάβρωσης και της ηλεκτρικής αντίστασης που παρουσιάστηκαν προηγουμένως (Κεφάλαια 7.1, 7.2) χρησιμοποιήθηκαν στην Εξίσωση 7.1 για να προκύψει η τιμή R. Στη συνέχεια, με τη χρήση του νόμου του Ohm, με τις τιμές τάσης (V) και αντίστασης (R), εξάγεται η πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης I (A) για κάθε περίπτωση.

$$R(\Omega) = \frac{\rho}{2\pi l} \times \ln\left(\frac{l^2}{td}\right) \quad (7.1)$$

Η σχέση της πυκνότητας του ρεύματος διάβρωσης (I) και της απώλειας βάρους (Δm) του οπλισμού λόγω της διάβρωσης, καθορίζεται χρησιμοποιώντας τον Νόμο του Faraday, ως εξής:

$$\Delta m = \frac{AIt}{ZF} \quad (7.2)$$

Όπου,

Δm = απώλεια μάζας οπλισμού λόγω διάβρωσης,

A = ατομικό βάρος σιδήρου (56gr),

I = ρεύμα διάβρωσης (σε amp),

t = χρόνος που πέρασε (σε δευτερόλεπτα),

Z = σθένος του ηλεκτροδίου σιδήρου που αντιδρά (δηλ. 2)

F = Σταθερά του Faraday (96.500amp × sec).

Η απώλεια βάρους μετάλλων λόγω διάβρωσης μπορεί επίσης να εκφραστεί ως:

$$\Delta m = \delta \gamma \cdot \alpha \delta \gamma \quad (7.3)$$

Όπου,

α = το εμβαδόν της ράβδου πριν από τη διάβρωση (cm^2),

δ = απώλεια υλικού (cm),

γ = πυκνότητα υλικού (g/cm^3).

Το ρεύμα διάβρωσης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$I = i \cdot \alpha \quad (7.4)$$

Όπου,

i = πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης (amp/cm^2).

Με αντικατάσταση από την Εξίσωση (7.3) και (7.4) στην (7.2) προκύπτει:

$$\delta (AIt / \gamma It) \quad (7.5)$$

Η παραπάνω Εξίσωση (7.5) μπορεί να αναλυθεί λαμβάνοντας υπόψη γνωστούς παράγοντες όπως, την πυκνότητα του σιδήρου $\gamma = 7,86 \text{ g}/\text{cm}^3$ και τις τιμές για τα A , Z και F (όπως υπολογίζονται από τις παραπάνω εξισώσεις).

Εάν το R οριστεί ως η απώλεια μάζας ανά έτος ($\text{cm}/\text{έτος}$), η τιμή του μπορεί να προσδιοριστεί από την Εξίσωση (7.6) αντικαθιστώντας:

$t = 1$ έτος (σε κατάλληλες μονάδες) για να δώσει:

$$R = 1156i (\text{cm} / \text{έτος}) \quad (7.6)$$

Για παράδειγμα, για πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης $i = 1 \text{ mA} / \text{cm}^2$ ο ρυθμός διάβρωσης R ισούται με $1,156 \text{ cm}/\text{έτος}$ [από την Εξίσωση (7.6)].

Εάν σε ένα στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος, η περίοδος διάβρωσης μετά την σκυροδέτηση είναι T έτη, τότε η απώλεια μετάλλου μετά από T έτη ισούται με RT (cm). Επομένως, η μείωση στη διάμετρο του οπλισμού σε T έτη, μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\% \text{ μείωση διαμέτρου της ράβδου} = (2RT / DR) \times 100 \quad (7.7)$$

Η έκφραση $2RT / D$ τοις εκατό, που αντιπροσωπεύει μείωση στη διάμετρο της ράβδου ενίσχυσης λόγω διάβρωσης για T χρόνια, ορίζεται επίσης ως ο βαθμός διάβρωσης οπλισμού που μελετάται. Με αντικατάσταση του R από την Εξίσωση (7.6) στην (7.7) προκύπτει:

$$\% \text{ μείωση διαμέτρου της ράβδου} = (2312 i T) / D \quad (7.8)$$

Στην περίπτωση μας, ο συνολικός χρόνος έκθεσης είναι 42 μήνες. Ωστόσο, το διάστημα που έχει οριστεί ως T στους υπολογισμούς των παραπάνω εξισώσεων είναι τα 2 έτη καθώς η έναρξη της διάβρωσης πραγματοποιήθηκε περίπου 1,5 χρόνια μετά την έναρξη των πειραμάτων όπως μπορούμε να δούμε από της ηλεκτροχημικές μετρήσεις (δυναμικό διάβρωσης $< -350\text{mV}$). Λαμβάνοντας αυτά υπόψη η περίοδος μελέτης για τη τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης του οπλισμού υπολογίζεται από τον 18^ο μήνα έως τον 42^ο μήνα (τελευταία δοκιμή). Τα αποτελέσματα αποτελούν υψίστης σημασίας δεδομένα για την παρούσα έρευνα καθότι βοηθούν στο να διαπιστωθεί ποια από τις συνθέσεις και για ποιο λόγο προστατεύει καλύτερα τον οπλισμό της από τη διάβρωση. Επίσης μέσω των υπολογισθέντων ρυθμών διάβρωσης ερευνάται το πως επηρεάζει η μόνιμη φόρτιση το φαινόμενο της διάβρωσης, συγκρίνοντας πως συμπεριφέρεται σε κάθε περίπτωση η ίδια σύνθεση. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7.4) παρουσιάζονται αναλυτικά οι ρυθμοί διάβρωσης των εξεταζόμενων συνθέσεων όπως υπολογίστηκαν με βάση την διαδικασία που αναλύθηκε προηγουμένως. Στον Πίνακα 7.4 δεν παρουσιάζεται η περίπτωση A (δοκίμια αναφοράς) για την κάθε σύνθεση διότι καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας δεν παρουσιάστηκε διάβρωση του οπλισμού (τιμές δυναμικού διάβρωσης $< 200\text{mV}$).

Πίνακας 7. 4 Αποτελέσματα Υπολογισμού Ρυθμού Διάβρωσης (m%/έτος) των συνθέσεων για κάθε περίπτωση φόρτισης

Συνθέσεις	Αφόρτιστα Δοκίμια (Περίπτωση Β)	Επίπεδο Φόρτισης 7% (Περίπτωση C)	Επίπεδο Φόρτισης 20% (Περίπτωση C)
CC1	2.76	3.26	3.38
CC2	2.65	3.09	2.97
CC3	2.59	3.06	3.13
FAC	2.11	2.38	2.84
SCC	1.37	1.88	2.02

Μια γενική παρατήρηση με βάση τον Πίνακα 7.4 είναι πως η μικρότερη απώλεια μάζας οπλισμού παρατηρείται στη σύνθεση SCC. Επίσης διαφαίνεται ένας συσχετισμός της αύξησης του ρυθμού διάβρωσης του οπλισμού με την αύξηση της φόρτισης που δέχεται μια δοκός. Οι παρατηρήσεις αυτές, αναλύονται διεξοδικά στις ακόλουθες ενότητες (7.3.1, 7.3.2, 7.3.3) όπου εξετάζονται αναλυτικά οι επιπτώσεις των εξής παραγόντων στην αντιδιαβρωτική συμπεριφορά των δοκιμίων:

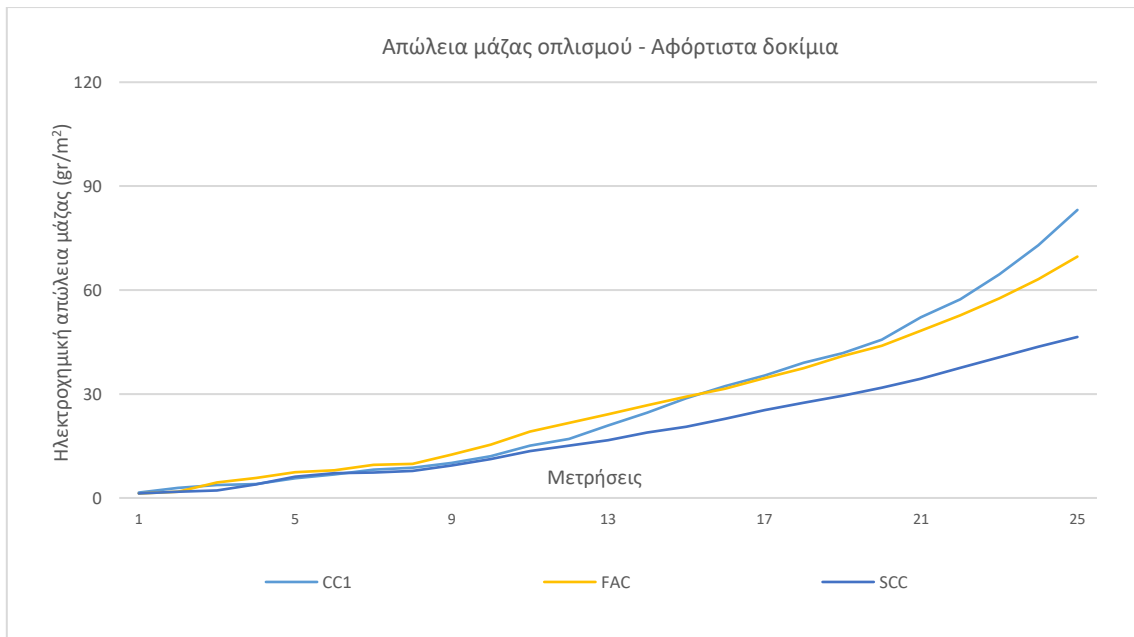
Ο πρώτος παράγοντας είναι οι αναλογίες στο μίγμα των παραγόμενων συνθέσεων δηλαδή η σύστασή τους. Αυτό περιλαμβάνει την αναλογία και το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (κοκκομετρική ανάλυση), την ποσότητα τσιμέντου αλλά και την ποσότητα του νερού (κατ' επέκταση τον λόγο N/T). Οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα)

Ο δεύτερος παράγοντας του οποίου η επίδραση εκτιμήθηκε ήταν η επιρροή διαφορετικών μεθόδων προστασίας. Συγκεκριμένα οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.) και CC3 (ψεκασμός με υδρόφοβη στρώση).

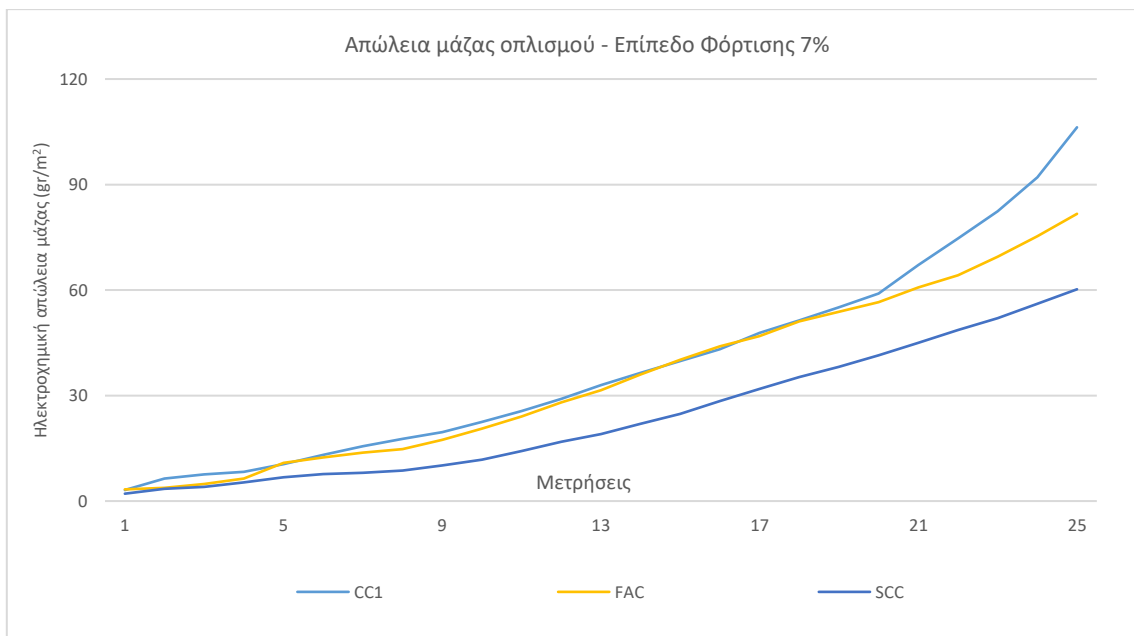
Ο τρίτος παράγοντας που εξετάζεται είναι η επίδραση της μόνιμης καμπτικής φόρτισης που φέρει ένα στοιχείο σκυροδέματος (σε συνδυασμό με διαβρωτικό περιβάλλον) στην διατήρηση της ανθεκτικότητάς του στο χρόνο. Στα δοκίμια δοκών που εξετάστηκαν επιβλήθηκαν 3 επίπεδα φόρτισης, στο 0%, 7% και 20% της οριακής κατάστασης λειτουργίας τους. Με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων θα γίνει μια εκτίμηση για τον βαθμό που επιδρά η μόνιμη φόρτιση στην εξέλιξη της διάβρωσης.

7.3.1. Επίδραση σύστασης

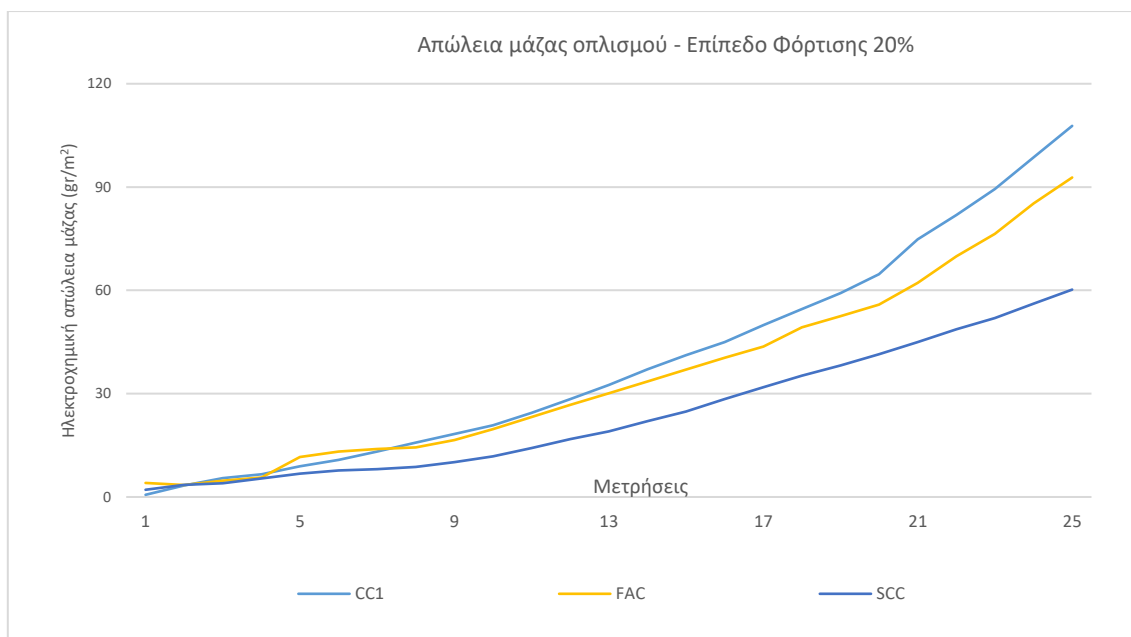
Στην ενότητα αυτή θα επιχειρηθεί να διαπιστωθεί πως επηρεάζει η σύσταση μιας σύνθεσης τον ρυθμό απώλειας μάζας του οπλισμού της και άρα τον ρυθμό διάβρωσης. Με τον όρο σύσταση μιας σύνθεσης εννοείται η αναλογία και το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (κοκκομετρική ανάλυση), η ποσότητα τσιμέντου αλλά και η ποσότητα του νερού και κατ' επέκταση ο λόγος N/T. Οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται και εξετάζονται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα). Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα που απεικονίζουν την εξέλιξη της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας (gr/m^2) του οπλισμού για τις παραπάνω συνθέσεις σε κάθε περίπτωση φόρτισης.



Σχήμα 7. 37 Αθροιστική απώλεια μάζας του οπλισμού των συνθέσεων για τα αφόρτιστα δοκίμια



Σχήμα 7. 38 Αθροιστική απώλεια μάζας του οπλισμού των συνθέσεων για τα δοκίμια με φόρτιση 7%



Σχήμα 7. 39 Αθροιστική απώλεια μάζας του οπλισμού των συνθέσεων για τα δοκίμια με φόρτιση 20%

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται μια πανομοιότυπη συμπεριφορά στις διαφορές που παρουσίασαν οι συνθέσεις και στις τρεις περιπτώσεις φόρτισης. Στον Πίνακα 7.5 παρουσιάζονται οι ρυθμοί διάβρωσης υπολογισμένοι σε ποσοστό του οπλισμού που οξειδώνεται (m% / έτος) ανά έτος.

Πίνακας 7. 5 Αποτελέσματα Υπολογισμού Ρυθμού Διάβρωσης (m% / έτος) των συνθέσεων CC1, FAC, SCC

Συνθέσεις	Αφόρτιστα Δοκίμια (Περίπτωση Β)	Επίπεδο Φόρτισης 7% (Περίπτωση Β)	Επίπεδο Φόρτισης 20% (Περίπτωση C)
CC1	2.76	3.26	3.38
FAC	2.11	2.38	2.84
SCC	1.37	1.88	2.02

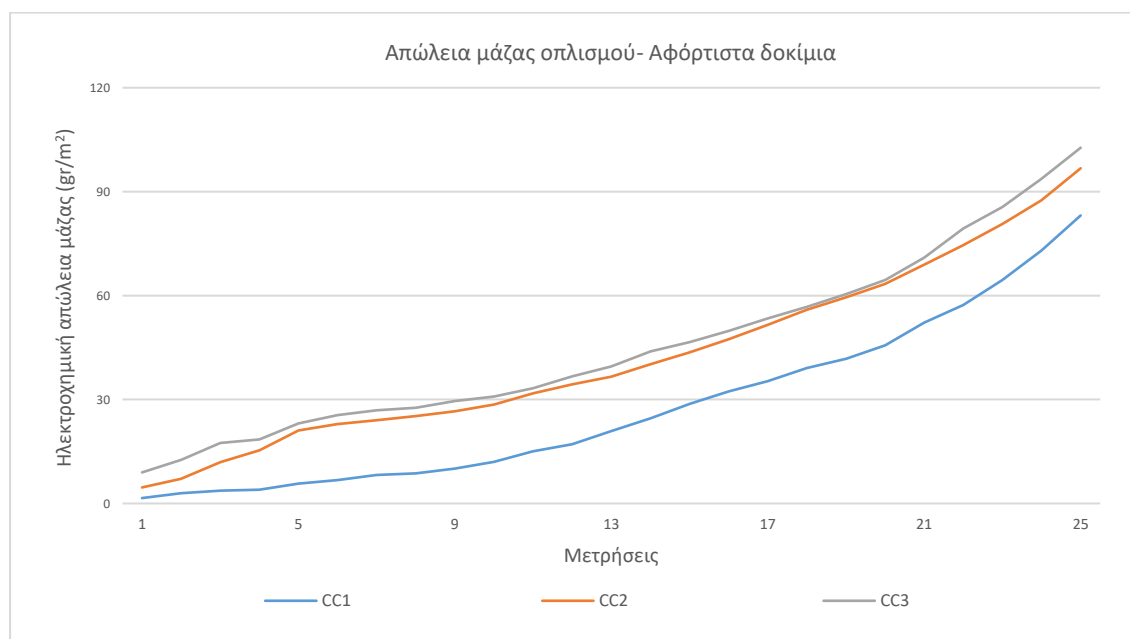
Την μικρότερη απώλεια οπλισμού με μεγάλη διαφορά έχει με βάση τα αποτελέσματα των υπολογισμών το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (σύνθεση SCC). Ακολούθως είναι το γαρμπυλόδεμα (σύνθεση FAC) και τέλος με μια αύξουσα τάση απώλειας μάζας στο τελευταίο διάστημα (μετά την 19^η μέτρηση) έρχεται η σύνθεση αναφοράς (CC1). Πιο αναλυτικά με βάση τα Σχήματα 7.37-7.39 και τον Πίνακα 7.5 προκύπτει πώς:

Αύξηση στην περιεκτικότητα τσιμέντου σε μια σύνθεση σκυροδέματος οδηγεί σε μικρότερο ρυθμό διάβρωσης του οπλισμού. Αύξηση από 330kg/m³ (σύνθεση CC1) σε 400kg/m³ (σύνθεση FAC) οδήγησε σε 23% μικρότερο ρυθμό διάβρωσης του οπλισμού κατά μέσο όρο. Αντίστοιχα αύξηση από 400kg/m³ (σύνθεση FAC) σε 500kg/m³ (σύνθεση SCC) οδήγησε σε 35% μειωμένο βαθμό διάβρωσης και σε σύγκριση με τα 300 kg/m³ σε 50% μειωμένο βαθμό διάβρωσης κατά μέσο όρο. Τα αποτελέσματα μας δηλώνουν πως μια αύξηση 15-35% της περιεκτικότητας του τσιμέντου σε μια σύνθεση σκυροδέματος αποδίδει κατά 20-50% μειωμένο ρυθμό διάβρωσης και άρα παράταση του χρόνου ζωής μιας κατασκευής.

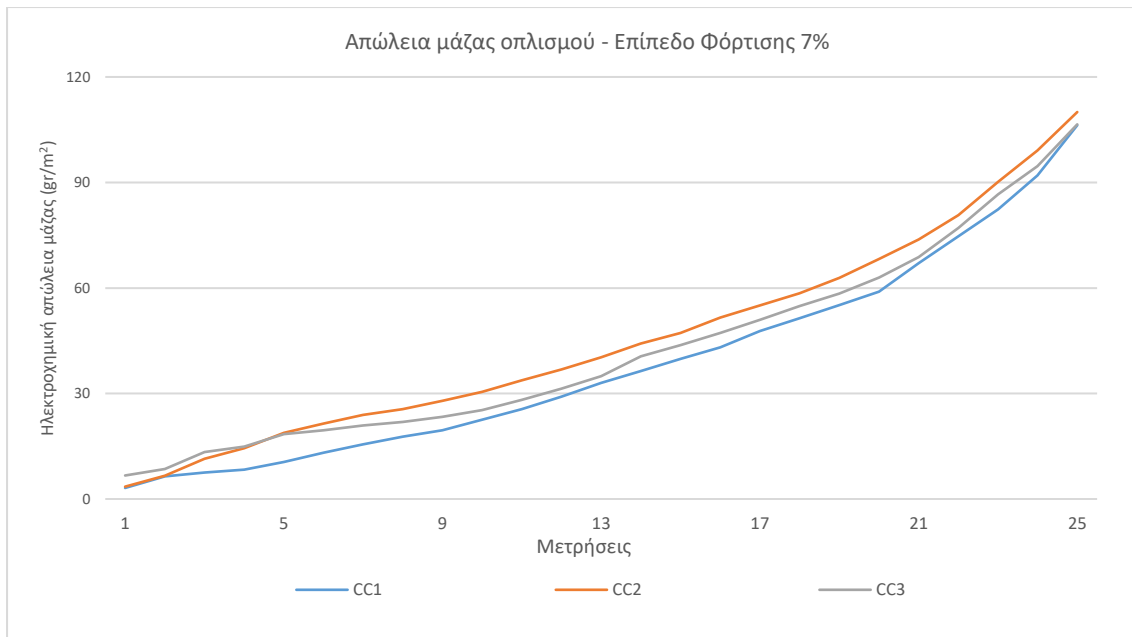
Αύξηση του λόγου N/T σε μια σύνθεση σκυροδέματος οδηγεί σε μεγαλύτερη προδιάθεση διάβρωσης του οπλισμού με βάση και τα αποτελέσματα. Πιο αναλυτικά αύξηση από 0,4 (σύνθεση SCC) σε 0,5 (σύνθεση CC1 και FAC) οδήγησε σε αύξηση κατά 35% του ρυθμού διάβρωσης κατά μέσο όρο. Όπως προκύπτει τόσο από τα Σχήματα 7.37-7.39 αλλά και από τον Πίνακα 7.5, τις χαμηλότερες τιμές ρυθμού διάβρωσης και κατ' επέκταση την συγκριτικά καλύτερη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά είχε το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (σύνθεση SCC).

7.3.2. Επίδραση μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας

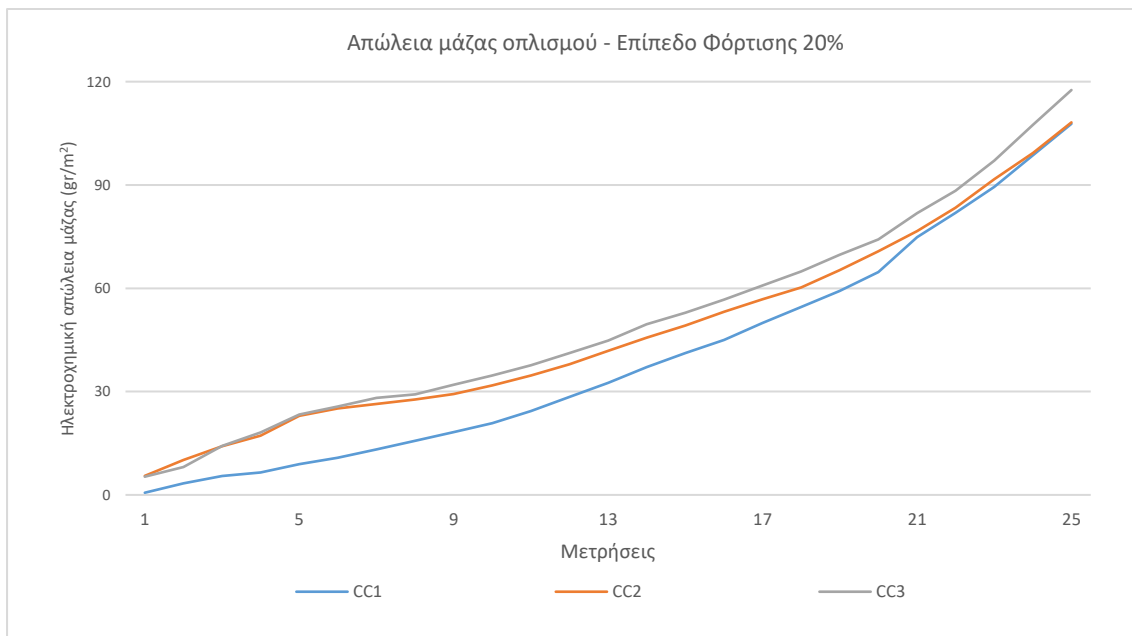
Στην ενότητα αυτή θα επιχειρηθεί να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα των διαφορετικών μεθόδων προστασίας (αναστολέων διάβρωσης) που χρησιμοποιήθηκαν μέσω της σύγκρισης των υπολογισθέντων ρυθμών διάβρωσης για την κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.) και CC3 (ψεκάσμος με υδρόφοβη στρώση). Έτσι με μια σύγκριση των μεθόδων τόσο μεταξύ τους όσο και με το σκυρόδεμα αναφοράς εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με το βαθμό προστασίας των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου προστασίας από διάβρωση.



Σχήμα 7. 40 Αθροιστική απώλεια μάζας του οπλισμού των συνθέσεων για τα αφόρτιστα δοκίμια CC1, CC2, CC3



Σχήμα 7. 41 Αθροιστική απώλεια μάζας του οπλισμού των συνθέσεων για τα δοκίμια CC1, CC2, CC3 με φόρτιση 7%



Σχήμα 7. 42 Αθροιστική απώλεια μάζας του οπλισμού των συνθέσεων για τα δοκίμια CC1, CC2, CC3 με φόρτιση 20%

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται μια διαφοροποίηση στη συμπεριφορά που παρουσίασαν οι συνθέσεις στις τρεις περιπτώσεις φόρτισης. Η σειρά που παρατηρήθηκε στην απώλεια μάζας των αφόρτιστων δοκιμίων (Σχήμα 7.40) δεν παρατηρείται και στα δοκίμια υπό φόρτιση (Σχήματα 7.41-7.42). Στον Πίνακα 7.6 παρουσιάζονται οι ρυθμοί διάβρωσης υπολογισμένοι σε ποσοστό του οπλισμού που οξειδώνεται (m%/έτος) ανά έτος για τις τρεις συνθέσεις που εξετάζονται σε αυτή την ενότητα.

Πίνακας 7. 6 Αποτελέσματα Υπολογισμού Ρυθμού Διάβρωσης (m% / έτος) των συνθέσεων CC1, CC2, CC3

Συνθέσεις	Αφόρτιστα Δοκίμια (Περίπτωση Β)	Επίπεδο Φόρτισης 7% (Περίπτωση C)	Επίπεδο Φόρτισης 20% (Περίπτωση C)
CC1	2.76	3.26	3.38
CC2	2.65	3.09	2.97
CC3	2.59	3.16	3.23

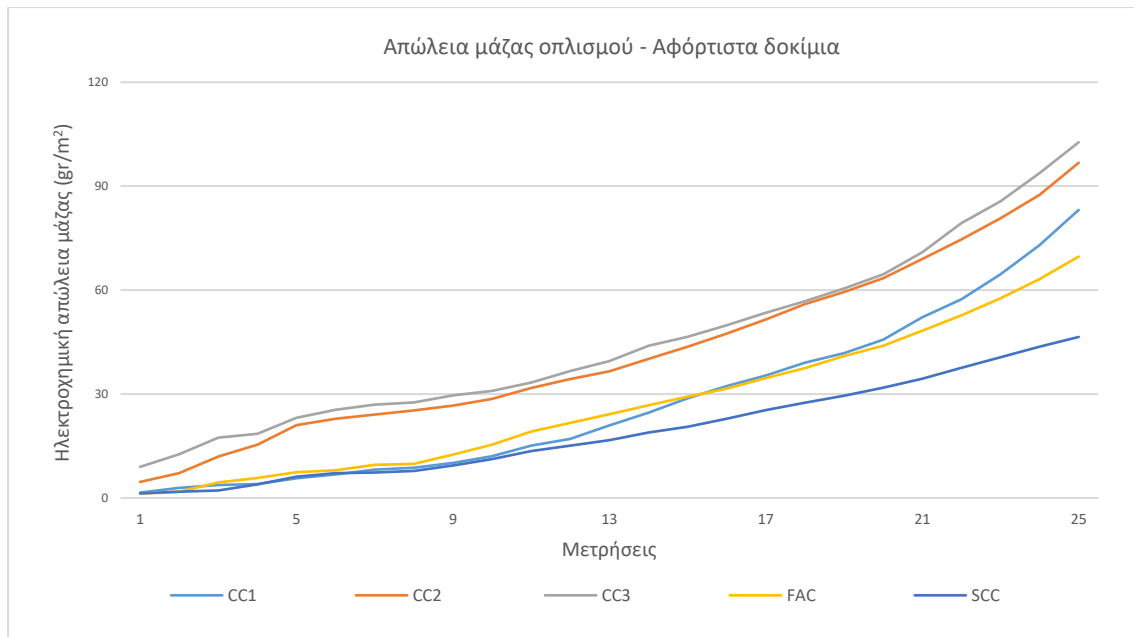
Η μικρότερη απώλεια οπλισμού με βάση τα αποτελέσματα των υπολογισμών εντοπίζεται στη σύνθεση CC3 (προστασία με ψεκάσμο επιφάνειας) για τα αφόρτιστα δοκίμια και στη σύνθεση CC2 (πρόσθετος αναστολέας διάβρωσης) για τα δοκίμια υπό φόρτιση. Ακολούθως και με τον υψηλότερο ρυθμό διάβρωσης είναι το σκυρόδεμα αναφοράς (σύνθεση CC1). Με βάση τα Σχήματα 7.40-7.42 και τον Πίνακα 7.6 προκύπτουν τα εξής:

Ο αναστολέας διάβρωσης ως πρόσθετο (CC2) έδειξε συγκριτικά την καλύτερη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά καθότι διατήρησε τις χαμηλότερες τιμές απώλειας μάζας μηνών και άρα παρουσιάζει μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση από το σκυρόδεμα αναφοράς (CC1). Χρήση αναστολέα διάβρωσης στο μίγμα του σκυροδέματος σε ποσότητα 4% κ.β. τσιμέντου οδήγησε σε μείωση του ρυθμού διάβρωσης κατά 4 % από την σύνθεση αναφοράς και 7% από την σύνθεση CC3 κατά μέσο όρο στο σύνολο των μετρήσεων.

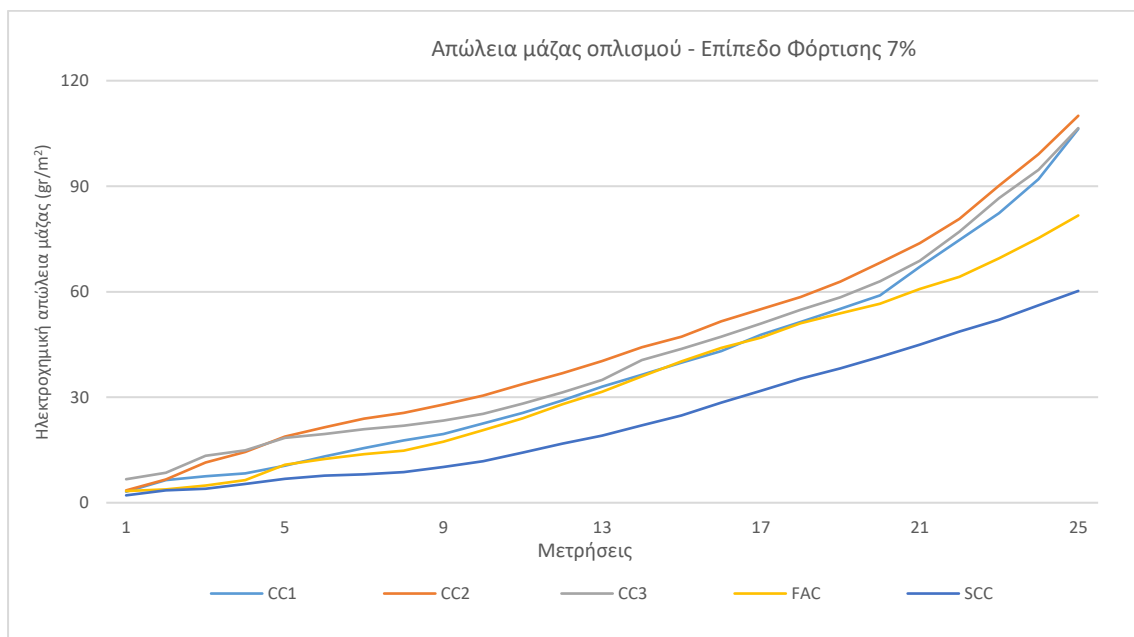
Η υδατοαπωθητική στρώση η οποία εφαρμόστηκε με ψεκάσμο στην επιφάνεια των δοκών (CC3), ανέπτυξε αρχικά μικρότερο βαθμό διάβρωσης από το σκυρόδεμα αναφοράς (CC1), ωστόσο όχι σε αξιοσημείωτο βαθμό. Επιπροσθέτως, από ένα σημείο και μετά (17^η μέτρηση) παρατηρείται μια αυξητική τάση του ρυθμού διάβρωσης της σύνθεσης CC3. Αυτό ίσως φανερώνει μια αστοχία στην προστατευτική επιφάνεια κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Η οποιαδήποτε αστοχία ήταν ανέφικτο να παρατηρηθεί οπτικά καθότι το προστατευτικό στρώμα ήταν σε διάφανη απόχρωση και το προστατευτικό «φιλμ» δεν ήταν διακριτό. Προκύπτει λοιπόν πως η επιφανειακή προστασία είναι αποτελεσματική στο να εμποδίζουν ζημιόγones ουσίες να διεισδύσουν στο εσωτερικό του σκυροδέματος, ωστόσο η εφαρμογή πρέπει να γίνεται με προσοχή και ιδιαίτερος σε στοιχεία σκυροδέματος που παρουσιάζουν παραμορφώσεις (βέλη κάμψης) καθότι μια μικρή αστοχία στο προστατευτικό στρώμα μπορεί να οδηγήσει σε καθολική αποτυχία της μεθόδου.

7.3.3. Επίδραση μόνιμης φόρτισης

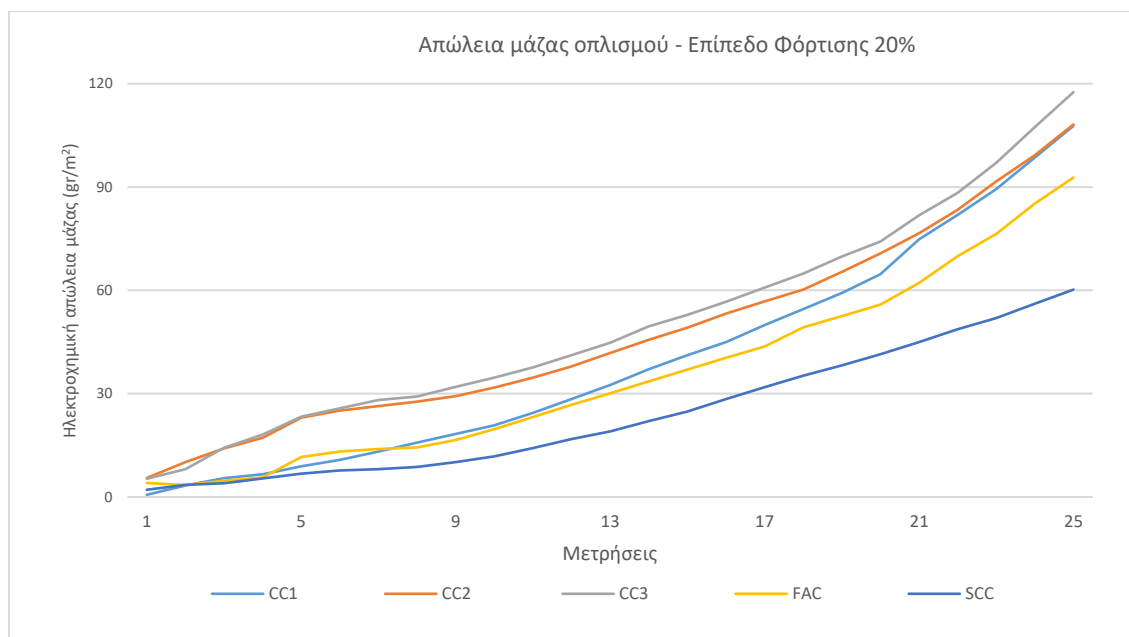
Στην ενότητα αυτή θα επιχειρηθεί να διαπιστωθεί πως και κατά πόσο επηρεάζει η μόνιμη φόρτιση που φέρει μια δοκός την απώλεια μάζας του οπλισμού της λόγω διάβρωσης. Οι συνθέσεις που μελετώνται και εξετάζονται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.), CC3 (ψεκαζόμενος Α.Δ.), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα) δηλαδή όλες οι συνθέσεις που παράχθηκαν για την πειραματική διαδικασία. Για όλες τις συνθέσεις παρουσιάζεται ένα διάγραμμα απεικόνισης της εξέλιξης του βαθμού διάβρωσης για τις 4 εξεταζόμενες καταστάσεις: δοκίμια αναφοράς (κωδικός Α) αφόρτιστα (κωδικός Β), 1^ο επίπεδο φόρτισης (κωδικός C) και 2^ο επίπεδο φόρτισης (κωδικός D). Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήματα 7.43-7.345) παρουσιάζονται οι αθροιστικές απώλειες της μάζας του οπλισμού συναρτήσει του χρόνου για την κάθε περίπτωση έκθεσης σε όλες τις συνθέσεις.



Σχήμα 7. 43 Αθροιστική απώλεια μάζας του οπλισμού των συνθέσεων για τα αφόρτιστα δοκίμια



Σχήμα 7. 44 Αθροιστική απώλεια μάζας του οπλισμού των συνθέσεων για τα δοκίμια με φόρτιση 7%



Σχήμα 7. 45 Αθροιστική απώλεια μάζας του οπλισμού των συνθέσεων για τα δοκίμια με φόρτιση 20%

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται μια πανομοιότυπη συμπεριφορά στις διαφορές που παρουσίασαν όλες οι συνθέσεις και στις τρεις περιπτώσεις φόρτισης. Την μικρότερη απώλεια οπλισμού με μεγάλη διαφορά έχει με βάση τους υπολογισμούς το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (σύνθεση SCC), ακολούθως είναι το γαρμπυλόδεμα (σύνθεση FAC), στη συνέχεια σε μια ομάδα οι συνθέσεις CC2 και CC3 και τελευταία η σύνθεση αναφοράς (CC1). Στον Πίνακα 7.7 παρουσιάζονται οι ρυθμοί διάβρωσης, εκφρασμένοι σε ποσοστιαία απώλεια μάζας ανά έτος (m%/έτος), για κάθε περίπτωση σε κάθε εξεταζόμενη σύνθεση.

Πίνακας 7. 7 Ρυθμοί Διάβρωσης (m%/έτος) των συνθέσεων για κάθε περίπτωση φόρτισης

Συνθέσεις	Αφόρτιστα Δοκίμια (Περίπτωση Β)	1 ^ο Επίπεδο Φόρτισης (Περίπτωση C)	2 ^ο Επίπεδο Φόρτισης (Περίπτωση C)
CC1	2.76	3.26	3.38
CC2	2.65	3.09	2.97
CC3	2.79	3.16	3.23
FAC	2.11	2.38	2.84
SCC	1.37	1.88	2.02

Αξιοσημείωτος είναι ο μειωμένος βαθμός απώλειας μάζας οπλισμού της σύνθεσης SCC όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα όπου παρουσιάζονται οι ρυθμοί διάβρωσης εκφρασμένοι ως το ποσοστό του οπλισμού που διαβρώνεται ανά έτος (m%/έτος). Με μία πρώτη παρατήρηση φαίνεται καθαρά ένας συσχετισμός της αύξησης του ρυθμού διάβρωσης του οπλισμού με την αύξηση της φόρτισης που δέχεται μια δοκός.

Συνολικά από τα διαγράμματα εξέλιξης του δυναμικού (Σχήματα 7.15-7.19) παρατηρούνται τα εξής: Στις εξεταζόμενες περιπτώσεις (B,C,D) τα αφόρτιστα δοκίμια (περίπτωση B) έδειξαν συγκριτικά την καλύτερη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά καθότι διατήρησαν τις υψηλότερες τιμές δυναμικού διάβρωσης σε σχεδόν όλη τη διάρκεια των 42 μηνών και άρα παρουσιάζουν μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση από τις περιπτώσεις των δοκιμών υπό φόρτιση. Σε όλες τις συνθέσεις οι μεγαλύτεροι ρυθμοί διάβρωσης παρουσιάζονται στο δεύτερο επίπεδο φόρτισης (περίπτωση D). Αρκετά κοντά με το 2ο επίπεδο φόρτισης έρχονται οι τιμές των δοκών με το 1ο επίπεδο φόρτισης (περίπτωση C) και τέλος τη μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση παρουσιάζουν οι αφόρτιστοι δοκοί (περίπτωση B).

Σε ανάλυση των μετρήσεων του ρυθμού διάβρωσης προκύπτει πως μια μόνιμη καμπτική φόρτιση σε μια δοκό οπλισμένου σκυροδέματος σε μέγεθος από 7 έως 20% της οριακής της κατάστασης, οδηγεί σε μεγαλύτερη προδιάθεση του οπλισμού σε διάβρωση. Συγκεκριμένα το 2ο επίπεδο φόρτισης οδήγησε σε αύξηση του ρυθμού απώλειας μάζας κατά 24% σε σχέση με τις αφόρτιστες δοκούς και το 1ο επίπεδο φόρτισης οδήγησε σε αύξηση του ρυθμού απώλειας μάζας κατά 18% κατά μέσο όρο στο σύνολο των μετρήσεων. Προκύπτει λοιπόν ένας καθαρός συσχετισμός της μόνιμης φόρτισης που φέρει ένα στοιχείο σκυροδέματος με την προδιάθεσή του για διάβρωση.

7.3.4. Μερικά Συμπεράσματα III

Παρατηρώντας τα διαγράμματα της ποσοστιαίας απώλειας μάζας του οπλισμού που παρουσιάζονται παραπάνω αλλά και από τη συνολική επεξεργασία των υπολογισθέντων ρυθμών διάβρωσης που υπολογίστηκαν για κάθε περίπτωση, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- I. Αύξηση στην περιεκτικότητα τσιμέντου σε μια σύνθεση σκυροδέματος οδηγεί σε μικρότερο ρυθμό διάβρωσης του οπλισμού. Αύξηση από 330kg/m³ (σύνθεση CC1) σε 400kg/m³ (σύνθεση FAC) οδήγησε σε 23% μικρότερο ρυθμό διάβρωσης του οπλισμού κατά μέσο όρο. Αντίστοιχα αύξηση από 400kg/m³ (σύνθεση FAC) σε 500kg/m³ (σύνθεση SCC) οδήγησε σε 35% μειωμένο βαθμό διάβρωσης και σε σύγκριση με τα 300 kg/m³ σε 50% μειωμένο βαθμό διάβρωσης κατά μέσο όρο. Τα αποτελέσματα μας δηλώνουν πως μια αύξηση κατά 35% της περιεκτικότητας του τσιμέντου σε μια σύνθεση σκυροδέματος αποδίδει έως και 50% μειωμένο ρυθμό διάβρωσης και άρα παρατείνει σε μεγάλο βαθμό τον χρόνο ζωής μιας κατασκευής.
- II. Αύξηση του λόγου N/T σε μια σύνθεση σκυροδέματος οδηγεί σε μεγαλύτερη προδιάθεση διάβρωσης του οπλισμού με βάση και τα αποτελέσματα. Πιο αναλυτικά αύξηση από 0,4 (σύνθεση SCC) σε 0,5 (σύνθεση CC1 και FAC) οδήγησε σε αύξηση κατά 35% του ρυθμού διάβρωσης κατά μέσο όρο. Όπως προκύπτει τόσο από τα Σχήματα 7.37-7.39 αλλά και από τον Πίνακα 7.5, τις χαμηλότερες τιμές ρυθμού διάβρωσης και κατ' επέκταση την συγκριτικά καλύτερη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά είχε το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (σύνθεση SCC).
- III. Χρήση αναστολέα διάβρωσης στο μίγμα του σκυροδέματος σε ποσότητα 4% κ.β. τσιμέντου (σύνθεση CC2) οδήγησε σε μείωση του ρυθμού διάβρωσης σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς (σύνθεση CC1) όχι ωστόσο σε αξιοσημείωτο βαθμό. Η υδατοαπωθητική στρώση η οποία εφαρμόστηκε με ψεκάσμο στην επιφάνεια των δοκών (CC3), ανέπτυξε αρχικά μικρότερο βαθμό διάβρωσης από το σκυρόδεμα αναφοράς (CC1). Ωστόσο, μετά την 17^η μέτρηση παρατηρείται μια αυξητική τάση του ρυθμού διάβρωσης στην σύνθεση CC3. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην τοπική αστοχία της προστατευτικής επιφάνειας ως αποτέλεσμα των μικρορηγματώσεων που επέφερε η φόρτιση. Προκύπτει λοιπόν πως η επιφανειακή προστασία είναι αποτελεσματική στο να παρεμποδίζει βλαβερές ουσίες να διεισδύσουν στο εσωτερικό του σκυροδέματος, ωστόσο η εφαρμογή πρέπει να γίνεται με προσοχή και ιδιαιτέρως σε στοιχεία σκυροδέματος που παρουσιάζουν παραμορφώσεις (μεγάλα βέλη κάμψης) καθότι μια μικρή αστοχία στο προστατευτικό στρώμα μπορεί να οδηγήσει σε καθολική αποτυχία της μεθόδου.

- IV. Προκύπτει ένας συσχετισμός της μόνιμης φόρτισης που φέρει ένα στοιχείο σκυροδέματος με την προδιάθεσή του για διάβρωση. Σε όλες τις συνθέσεις οι μεγαλύτεροι ρυθμοί διάβρωσης παρουσιάζονται στο υψηλό επίπεδο φόρτισης (20%). Αρκετά κοντά με το 2^ο επίπεδο φόρτισης έρχονται οι τιμές των δοκών με το χαμηλό επίπεδο φόρτισης (7%) και τέλος τη μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση παρουσιάζουν οι αφόρτιστες δοκοί (περίπτωση Β). Προκύπτει πως μια μόνιμη καμπτική φόρτιση σε μια δοκό οπλισμένου σκυροδέματος σε μέγεθος από 7 έως 20% της οριακής της κατάστασης, οδηγεί σε μεγαλύτερη προδιάθεση του οπλισμού σε διάβρωση. Συγκεκριμένα το υψηλό επίπεδο φόρτισης οδήγησε σε αύξηση του ρυθμού απώλειας μάζας κατά 24% σε σχέση με τις αφόρτιστες δοκούς και το χαμηλό επίπεδο φόρτισης οδήγησε σε αύξηση του ρυθμού απώλειας μάζας κατά 18% κατά μέσο όρο στο σύνολο των μετρήσεων. Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ξανά η περιορισμένη βιβλιογραφία σχετικά με τον συγκεκριμένο συσχετισμό και τονίζεται η ανάγκη επιπλέον ερευνητικών έργων που στοχεύουν στη διερεύνησή του

7.4. Δοκιμή επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων

Η μέθοδος ASTM C1202 είναι μια επιταχυνόμενη μέτρηση διαπερατότητας χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Σκοπός είναι η εκτίμηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος, η οποία μπορεί να αποτελέσει μια άμεση ένδειξη της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος στη διείσδυση χλωριόντων [127]. Συγκρίνοντας την τιμή του φορτίου που υπολογίστηκε σε κάθε περίπτωση με αυτές που δίνονται στον Πίνακα 7.8, μπορούμε να εκτιμήσουμε το μέγεθος της διαπερατότητας σε χλωριόντα που εμφανίζουν τα δείγματά μας [165]. Αναλυτική περιγραφή όλων των σταδίων της μεθόδου αλλά και του τρόπου αξιολόγησης των αποτελεσμάτων περιγράφονται στο Κεφάλαιο 6.6.

Πίνακας 7. 8 Κατάσταση δοκιμών σύμφωνα με τα αποτελέσματα της δοκιμής ASTM 1202

Διαπερνών Φορτίο (Coulomb)	Διαπερατότητα Χλωριόντων
>4000	Υψηλή
2000 - 4000	Μέτρια
1000 - 2000	Χαμηλή
100 - 1000	Πολύ Χαμηλή
<100	Αμελητέα

Στον Πίνακα 7.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις διαπερατότητας χλωριόντων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου στο εργοστάσιο Καμαρίου της εταιρείας TITAN. Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός Proove it και η διαδικασία αλλά και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 1202.

Πίνακας 7. 9 Αποτελέσματα μετρήσεων φορτίου (σε Coulomb) για κάθε εξεταζόμενη σύνθεση – ASTM 1202

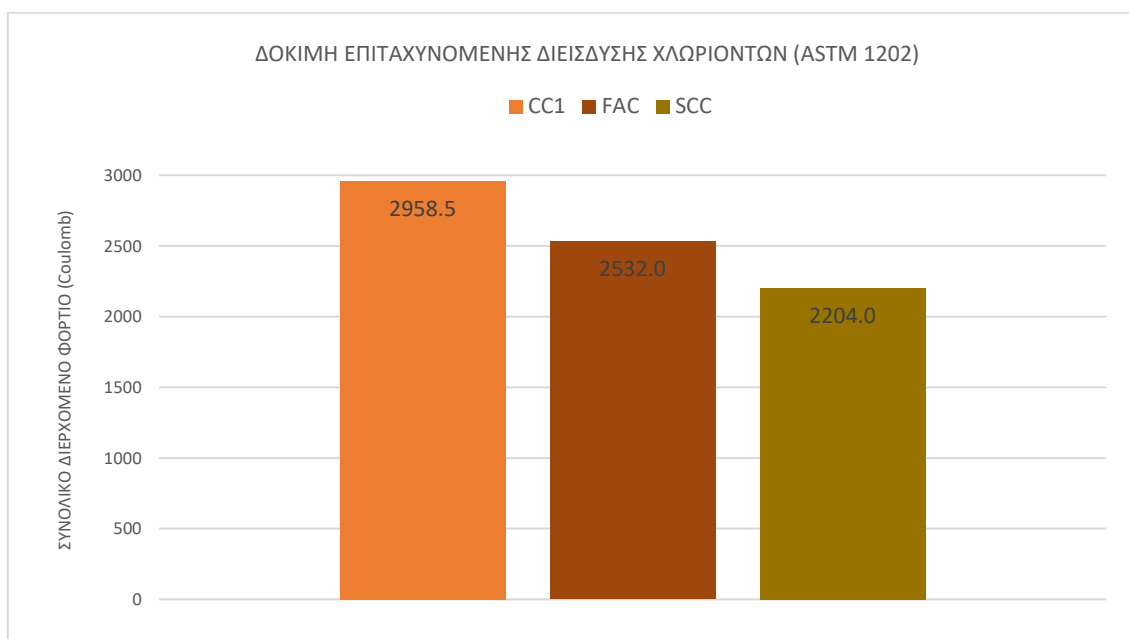
ΣΥΝΘΕΣΗ	CC1	CC2	CC3	FAC	SCC
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ (Coulomb) - Μέτρηση 1	3140	2703	2403	2491	2179
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ (Coulomb) - Μέτρηση 2	2777	2774	2117	2573	2229
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ (Coulomb) - Μέσος Όρος	2958.5	2738.5	2260.0	2532.0	2204.0

Μια γενική παρατήρηση με βάση τον Πίνακα 7.9 σε συνδυασμό με τον Πίνακα 7.8 είναι πως όλα τα αποτελέσματα του διερχόμενου φορτίου είναι από 2204 έως 2958 Coulomb και άρα είναι στην ίδια κατηγορία, αυτή της «Μέτριας» διαπερατότητας χλωριόντων (2000-4000 Coulomb). Ωστόσο από τις διαφορές που υπάρχουν στις μετρήσεις μεταξύ των συνθέσεων θα επιχειρηθεί να γίνει μια συγκριτική αξιολόγηση της διαπερατότητάς τους στις παρακάτω ενότητες (7.4.1, 7.4.2) όπου εξετάζονται αναλυτικά οι επιπτώσεις των εξής δύο παραγόντων στην αντιδιαβρωτική συμπεριφορά των δοκιμών: Ο πρώτος παράγοντας είναι οι αναλογίες στο μίγμα των παραγόμενων συνθέσεων δηλαδή η σύστασή τους. Αυτό περιλαμβάνει την αναλογία και το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (κοκκομετρική ανάλυση), την ποσότητα τσιμέντου αλλά και την ποσότητα του νερού (κατ' επέκταση

τον λόγο N/T). Οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα). Ο δεύτερος παράγοντας του οποίου η επίδραση εκτιμήθηκε ήταν η επιρροή διαφορετικών μεθόδων προστασίας. Συγκεκριμένα οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.) και CC3 (ψεκασμός με υδρόφοβη στρώση).

7.4.1. Επίδραση σύστασης

Στην ενότητα αυτή θα επιχειρηθεί να διαπιστωθεί πως επηρεάζει η σύσταση μιας σύνθεσης τη διαπερατότητά της σε βλαβερές ουσίες και συγκεκριμένα από χλωριόντα. Με τον όρο σύσταση μιας σύνθεσης εννοείται η αναλογία και το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (κοκκομετρική ανάλυση), η ποσότητα τσιμέντου αλλά και η ποσότητα του νερού και κατ' επέκταση ο λόγος N/T. Οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται και εξετάζονται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα). Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα που απεικονίζει το διερχόμενο φορτίο (σε Coulomb) για τις προαναφερθείσες συνθέσεις. Επισημαίνεται πως η πειραματική δοκιμή έγινε βάσει του προτύπου ASTM C1202 και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε σύμφωνα με τον Πίνακα 7.8.



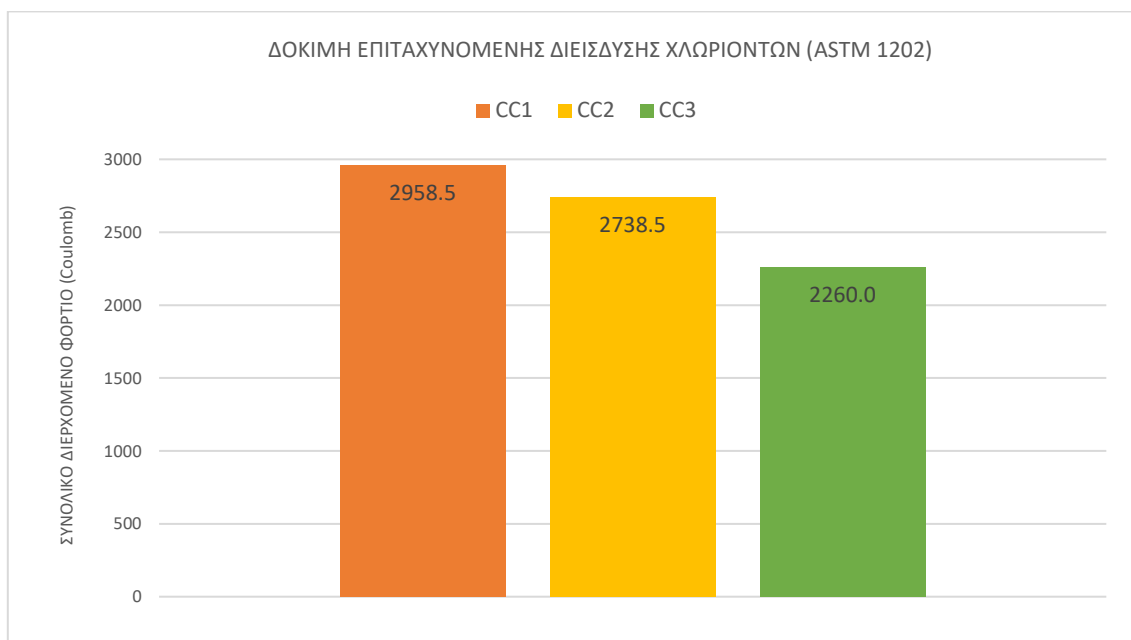
Σχήμα 7. 46 Αποτελέσματα διαπερατότητας χλωριόντων για τις συνθέσεις CC1, FAC, SCC

Από το Σχήμα 7.46 προκύπτει, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως πως τα αποτελέσματα του διερχόμενου φορτίου και για τις τρεις συνθέσεις (CC1, FAC, SCC) είναι στην κατηγορία της «Μέτριας» διαπερατότητας χλωριόντων σύμφωνα με τον Πίνακα 7.8. (2000-4000 Coulomb). Την μεγαλύτερη διαπερατότητα και κατ' επέκταση τη μεγαλύτερη προδιάθεση για διάβρωση παρουσιάζει η σύνθεση αναφοράς (CC1) με διερχόμενο φορτίο 2958.5 Coulomb. Στη συνέχεια βρίσκεται η σύνθεση FAC με διερχόμενο φορτίο 2532 Coulomb και τέλος τη μικρότερη διαπερατότητα σε χλωριόντα παρουσιάζει η σύνθεση SCC με διερχόμενο φορτίο 2204 Coulomb. Από τα προηγούμενα συμπεραίνεται πως αύξηση του λόγου N/T και μείωση της περιεκτικότητας του τσιμέντου σε μια σύνθεση σκυροδέματος οδηγεί σε μεγαλύτερη προδιάθεση διάβρωσης του οπλισμού. Συγκεκριμένα αύξηση από 0,4 (σύνθεση SCC) σε 0,5 (σύνθεση CC1 και FAC) του λόγου N/T οδήγησε σε μικρότερες τιμές διερχόμενου ρεύματος κατά μέσο όρο. Όπως προκύπτει, τις χαμηλότερες τιμές διερχόμενου

ρεύματος και κατ' επέκταση την συγκριτικά μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση κατά μέσο όρο είχε το αυτοσυμπυκνυόμενο σκυρόδεμα (2204 Coulomb). Αντίστοιχα αύξηση από 330kg/m³ (σύνθεση CC1) σε 400kg/m³ (σύνθεση FAC) οδήγησε σε μείωση του διερχόμενου ρεύματος. Ωστόσο πέρα των διαφοροποιήσεων αυτών που παρουσιάζονται στις τιμές του διερχόμενου ρεύματος, επισημαίνεται ξανά πως όλες οι συνθέσεις εμπίπτουν στην κατηγορία "Μέτριας διαπερατότητας" σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1202 καθότι όλες οι τιμές είναι μεταξύ 2000 και 4000 Coulomb.

7.4.2. Επίδραση μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας

Στην ενότητα αυτή θα επιχειρηθεί να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα των διαφορετικών μεθόδων προστασίας που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.) και CC3 (ψεκασμός με υδρόφοβη στρώση). Έτσι με μια σύγκριση των μεθόδων τόσο μεταξύ τους όσο και με το σκυρόδεμα αναφοράς εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με το βαθμό προστασίας των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου προστασίας από διάβρωση. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα που απεικονίζει το διερχόμενο φορτίο (σε Coulomb) για τις προαναφερθείσες συνθέσεις. Επισημαίνεται πως η πειραματική δοκιμή έγινε βάσει του προτύπου ASTM C1202 και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε σύμφωνα με τον Πίνακα 7.8.



Σχήμα 7. 47 Αποτελέσματα διαπερατότητας χλωριόντων για τις συνθέσεις CC1, CC2, CC3

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα αποτελέσματα του διερχόμενου φορτίου και για τις τρεις εξεταζόμενες συνθέσεις (CC1, CC2, CC3) είναι στην κατηγορία της «Μέτριας» διαπερατότητας σύμφωνα με τον Πίνακα 7.8. (2000-4000 Coulomb). Από το Σχήμα 7.47 προκύπτει πως την μεγαλύτερη διαπερατότητα και κατ' επέκταση τη μεγαλύτερη προδιάθεση για διάβρωση παρουσιάζει η σύνθεση αναφοράς (CC1) με διερχόμενο φορτίο 2958.5 Coulomb. Στη συνέχεια με μικρή διαφορά βρίσκεται η σύνθεση CC2 με διερχόμενο φορτίο 2738 Coulomb και τέλος τη μικρότερη διαπερατότητα σε χλωριόντα παρουσιάζει η σύνθεση CC3 με αρκετά χαμηλότερο διερχόμενο φορτίο στα 2260 Coulomb. Από τα παραπάνω προκύπτει πως χρήση αναστολέα διάβρωσης ως πρόσθετο στο σκυρόδεμα σε ποσότητα 4% κ.β. τσιμέντου (σύνθεση CC2) οδηγεί σε μείωση του διερχόμενου φορτίου σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς (σύνθεση CC1) όχι ωστόσο σε αξιοσημείωτο βαθμό. Τις χαμηλότερες τιμές διερχόμενου ρεύματος και κατ' επέκταση την συγκριτικά μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση κατά μέσο όρο είχε η σύνθεση CC3 (2260 Coulomb). Η προστατευτική στρώση η οποία εφαρμόστηκε με

ψεκασμό στην επιφάνεια των δοκών (CC3), ανέπτυξε τη καλύτερη προστασία έναντι διείσδυσης χλωριόντων και άρα αποτελεί αποτελεσματική λύση στο σχεδιασμό παραθαλάσσιων κατασκευών. Ωστόσο επισημαίνεται ξανά πως όλες οι συνθέσεις εμπίπτουν στην ίδια κατηγορία "Μέτριας διαπερατότητας" σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1202 καθότι όλες οι τιμές είναι μεταξύ 2000 και 4000 Coulomb (Πίνακας 7.8). Στην ακόλουθη παράγραφο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της δοκιμής διαπερατότητας χλωριόντων.

7.4.3. Μερικά Συμπεράσματα IV

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του διερχόμενου ρεύματος που παρουσιάζονται παραπάνω σε συνδυασμό με την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προτείνει το πρότυπο ASTM C1202, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της δοκιμής διαπερατότητας χλωριόντων.

- I. Όλες οι δοκιμαζόμενες συνθέσεις παρουσίασαν τιμές διερχόμενου ρεύματος της ίδιας τάξης μεγέθους. Με βάση την κατηγοριοποίηση που γίνεται στο πρότυπο ASTM C1202, και οι πέντε συνθέσεις ανήκουν στην ίδια κατηγορία διαπερατότητας (Μέτρια διαπερατότητα) καθότι όλες οι τιμές των δοκιμών είναι μεταξύ 2000 και 4000 Coulomb.
- II. Αύξηση του λόγου N/T και μείωση της περιεκτικότητας του τσιμέντου σε μια σύνθεση σκυροδέματος οδηγεί σε μεγαλύτερη προδιάθεση διάβρωσης του οπλισμού. Συγκεκριμένα αύξηση από 0,4 (σύνθεση SCC) σε 0,5 (σύνθεση CC1 και FAC) του λόγου N/T οδήγησε σε μικρότερες τιμές διερχόμενου ρεύματος κατά μέσο όρο. Αντίστοιχα αύξηση από 330kg/m^3 (σύνθεση CC1) σε 400kg/m^3 (σύνθεση FAC) οδήγησε σε μείωση του διερχόμενου ρεύματος. Όπως προκύπτει, τις χαμηλότερες τιμές διερχόμενου ρεύματος και κατ' επέκταση την συγκριτικά μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση κατά μέσο όρο είχε το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Στη συνέχεια ακολουθούν κατά σειρά: η σύνθεση CC3, η σύνθεση FAC, η σύνθεση CC2 και τέλος βρίσκεται η σύνθεση CC1 (σύνθεση αναφοράς).
- III. Η χρήση αναστολέα διάβρωσης ως πρόσθετο στο σκυρόδεμα σε ποσότητα 4% κ.β. τσιμέντου (σύνθεση CC2) οδηγεί σε μείωση του διερχόμενου φορτίου σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς (σύνθεση CC1) όχι ωστόσο σε αξιοσημείωτο βαθμό. Τις χαμηλότερες τιμές διερχόμενου ρεύματος και κατ' επέκταση την συγκριτικά μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση κατά μέσο όρο είχε η σύνθεση CC3. Ο ψεκασμός με υδρόφοβη στρώση στην επιφάνεια των δοκιμών (CC3), ανέπτυξε τη καλύτερη προστασία έναντι διείσδυσης χλωριόντων και άρα αποτελεί αποτελεσματική λύση στο σχεδιασμό παραθαλάσσιων κατασκευών.

7.5. Δοκιμή επιταχυνόμενης ενανθράκωσης

Ενανθράκωση είναι η αντίδραση των προϊόντων ενυδάτωσης που διαλύονται στο νερό των πόρων με το διοξείδιο του άνθρακα στον αέρα, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του pH του διαλύματος των πόρων στο σκυρόδεμα από 12,6 σε τιμές μικρότερες από 9. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το παθητικό στρώμα του χάλυβα να καταστραφεί και να επιταχυνθεί η διάβρωση [140]. Η διαδικασία αυτή μπορεί να αυξήσει το ρυθμό ανάπτυξης ρωγμών και να μειώσει την αντοχή του σκυροδέματος [68]. Για τη δοκιμή επιταχυνόμενης ενανθράκωσης (κατά EN 13295) τα κυβικά δοκίμια (ακμής 150mm) μετά την ωρίμανσή τους σε ειδικό θάλαμο, προετοιμάστηκαν με ξήρανση σε φούρνο (60 °C) για 48 ώρες για να φύγει η υγρασία. Τοποθετήθηκαν στη συνέχεια στο θάλαμο ενανθράκωσης για 60 (1η παρτίδα) και 120 ημέρες (2η παρτίδα). Η συγκέντρωση του CO₂ διατηρήθηκε στο 1 ± 0,1%. Οι υπόλοιπες συνθήκες ήταν 55 ± 5% σχετική υγρασία και 20 ± 1 °C θερμοκρασία σύμφωνα με το πρότυπο EN 13295 [152]. Στις 60 και 120 ημέρες, στα δείγματα έγινε μια εγκάρσια τομή και η διατομή εμποτίστηκε με διάλυμα φαινόλοφθαλεΐνης. Στον Πίνακα 7.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του βάθους διείδυσης όπως προέκυψαν από τη δοκιμή ενανθράκωσης. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των επιμέρους μετρήσεων παρατίθενται στο Παράρτημα του παρόντος.

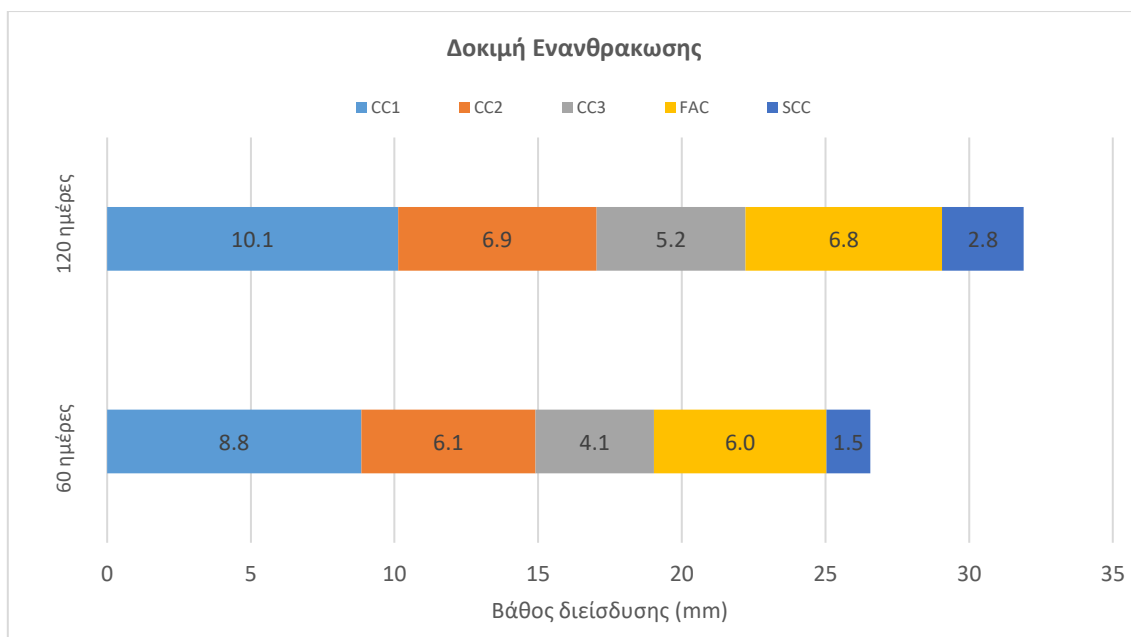
Πίνακας 7. 10 Βάθος διείδυσης CO₂ στις δοκιμαζόμενες συνθέσεις για 60, 120 ημέρες παραμονή στο θάλαμο

ΣΥΝΘΕΣΗ	CC1	CC2	CC3	FAC	SCC
Βάθος ενανθράκωσης (mm) – 60 ημέρες στο θάλαμο	8.8	6.1	4.1	6.0	1.5
Βάθος ενανθράκωσης (mm) – 120 ημέρες στο θάλαμο	10.1	6.9	5.2	6.8	2.8
Βάθος ενανθράκωσης (mm) – Μέσος Όρος	9.5	6.5	4.7	6.4	2.2

Το βάθος της ενανθράκωσης σε κάθε ηλικία εκτιμήθηκε ως η μέση απόσταση, μετρούμενη σε χιλιοστά, από την επιφάνεια του σκυροδέματος ή κονιάματος, όπου το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) έχει μειώσει την αλκαλικότητα του ενυδατωμένου τσιμέντου σε βαθμό τέτοιο ώστε το διάλυμα δείκτη φαινόλοφθαλεΐνης που ψεκάζεται στην επιφάνεια να παραμένει άχρωμο (Εξίσωση 7.9). Το μη ενανθρακωμένο κονίαμα χρωματίζεται ιώδες-ερυθρό. Οι μη χρωματισμένες επιφάνειες στην περίμετρο υποδηλώνουν την εμφάνιση ενανθράκωσης.

$$X_p = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n} \quad (7.9)$$

όπου το X_p είναι το μέσο βάθος ενανθράκωσης, A_n είναι το βάθος στα σημεία δοκιμής και το n είναι ο αριθμός των σημείων.



Σχήμα 7. 48 Γραφική απεικόνιση του βάθους ενανθράκωσης για όλες τις συνθέσεις (CC1, CC2, CC3, FAC, SCC)

Μια γενική παρατήρηση με βάση τον Πίνακα 7.10 και το σχήμα 7.48 είναι πως τα αποτελέσματα του βάθους ενανθράκωσης παρουσιάζονται αυξημένα στη μέτρηση των 120 ημερών, αυξάνονται δηλαδή με το χρόνο παραμονής τους στο θάλαμο. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς μεγαλύτερος χρόνος παραμονής στο θάλαμο ισοδυναμεί με μεγαλύτερη έκθεση σε βλαβερούς παράγοντες και συγκεκριμένα στο CO₂ όχι ωστόσο σε αναλογικό βαθμό. Δηλαδή διπλάσιος χρόνος έκθεσης στο θάλαμο ενανθράκωσης δεν ισοδυναμεί με διπλάσιο βάθος διείσδυσης. Επίσης παρατηρείται μια διαφοροποίηση στα αποτελέσματα των συνθέσεων μεταξύ τους η οποία μαρτυρεί και την συμπεριφορά τους στην αντίσταση έναντι της ενανθράκωσης. Από τις διαφορές που παρατηρήθηκαν στις μετρήσεις θα γίνει μια συγκριτική αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους στις παρακάτω ενότητες (7.5.1, 7.5.2) όπου εξετάζονται αναλυτικά οι επιπτώσεις των εξής δύο παραγόντων στην αντιδιαβρωτική συμπεριφορά των δοκιμών:

Ο πρώτος παράγοντας είναι οι αναλογίες στο μίγμα των παραγόμενων συνθέσεων δηλαδή η σύστασή τους. Αυτό περιλαμβάνει την αναλογία και το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (κοκκομετρική ανάλυση), την ποσότητα τσιμέντου αλλά και την ποσότητα του νερού (κατ' επέκταση τον λόγο N/T). Οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα)

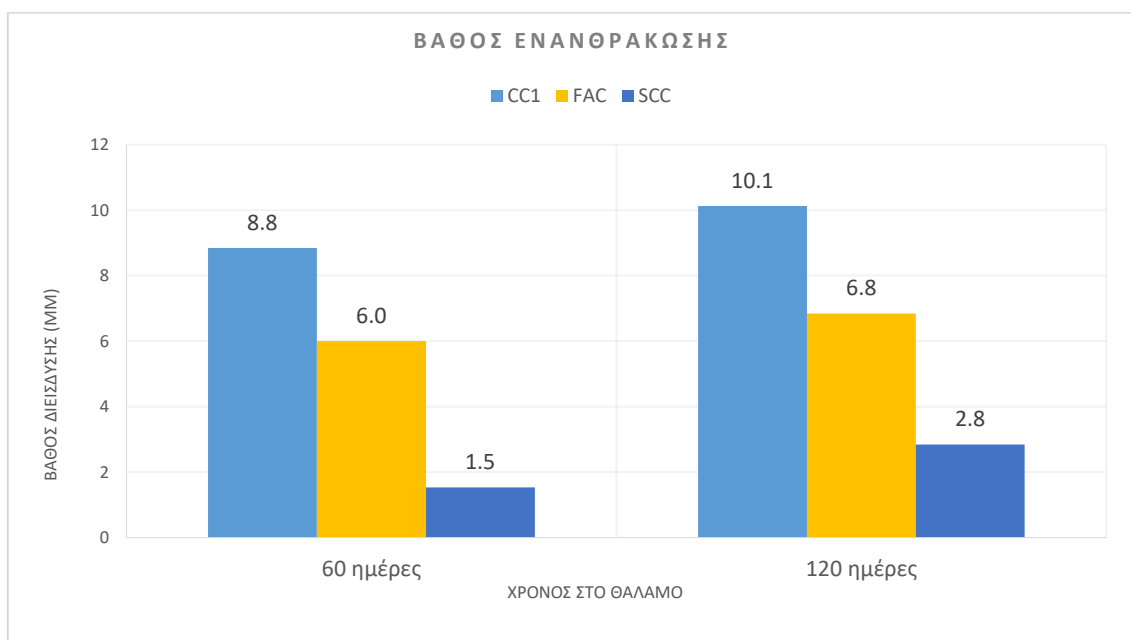
Ο δεύτερος παράγοντας του οποίου η επίδραση εκτιμήθηκε ήταν η επιρροή διαφορετικών μεθόδων προστασίας. Συγκεκριμένα οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.) και CC3 (ψεκασμός με υδρόφοβη στρώση). Έτσι με μια σύγκριση των μεθόδων τόσο μεταξύ τους όσο και με το σκυρόδεμα αναφοράς εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με το βαθμό προστασίας των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου προστασίας από διάβρωση.

7.5.1. Επίδραση σύστασης

Το φαινόμενο της ενανθράκωσης οφείλει την ονομασία του στη μετατροπή του περιεχομένου στο σκυρόδεμα υδροξειδίου του ασβεστίου Ca(OH)₂ σε ανθρακικό ασβέστιο CaCO₃. Στην ενότητα αυτή θα επιχειρηθεί να διαπιστωθεί πως επηρεάζει η σύσταση μιας σύνθεσης τη διαπερατότητά της σε βλαβερές ουσίες και συγκεκριμένα σε διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Με τον όρο σύσταση μιας

σύνθεσης εννοείται η αναλογία και το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (κοκκομετρική ανάλυση), η ποσότητα τσιμέντου αλλά και η ποσότητα του νερού και κατ' επέκταση ο λόγος Ν/Τ. Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων λαμβάνεται υπόψιν πως: Το τσιμέντο δεσμεύει χημικά και φυσικά, περίπου 0,4 του βάρους του σε νερό. Το πλεονάζον και μη δυνάμενο να δεσμευθεί νερό εξατμίζεται αφήνοντας τριχοειδείς πόρους, από όπου γίνεται η διείσδυση της υγρασίας και η διάχυση των αερίων. Το ποσοστό του υδροξειδίου του ασβεστίου στο σκυρόδεμα είναι ανάλογο προς την περιεκτικότητα του τσιμέντου σε C₃S και C₂S. Επίσης η αλκαλικότητα στο σκυρόδεμα από σύνθετα τσιμέντα είναι χαμηλότερη από αυτή του καθαρού τσιμέντου Πόρτλαντ.

Οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται και εξετάζονται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα). Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα που απεικονίζει το βάθος της ενανθράκωσης (mm) για 60 και 120 ημέρες παραμονής στο θάλαμο για τις προαναφερθείσες συνθέσεις. Επισημαίνεται πως η πειραματική δοκιμή έγινε βάσει του προτύπου EN 13295 και ο υπολογισμός της τελικής τιμής προέκυψε από την Εξίσωση 7.9. Τα αποτελέσματα του βάθους ενανθράκωσης των κυβικών δοκιμίων παρουσιάζονται με μορφή ιστογράμματος για παραμονή στο θάλαμο 60 και 120 ημέρες στο Σχήμα 7.49.



Σχήμα 7. 49 Γραφική απεικόνιση του βάθους ενανθράκωσης σε 60 και 120 ημέρες παραμονής στο θάλαμο για τις συνθέσεις CC1, FAC και SCC

Από το Σχήμα 7.49 προκύπτει, πως τα αποτελέσματα των τριών συνθέσεων (CC1, FAC, SCC) παρουσιάζουν σχετικά μεγάλες διαφοροποιήσεις τόσο στα αποτελέσματα των 60 όσο και των 120 ημερών παραμονής στο θάλαμο.

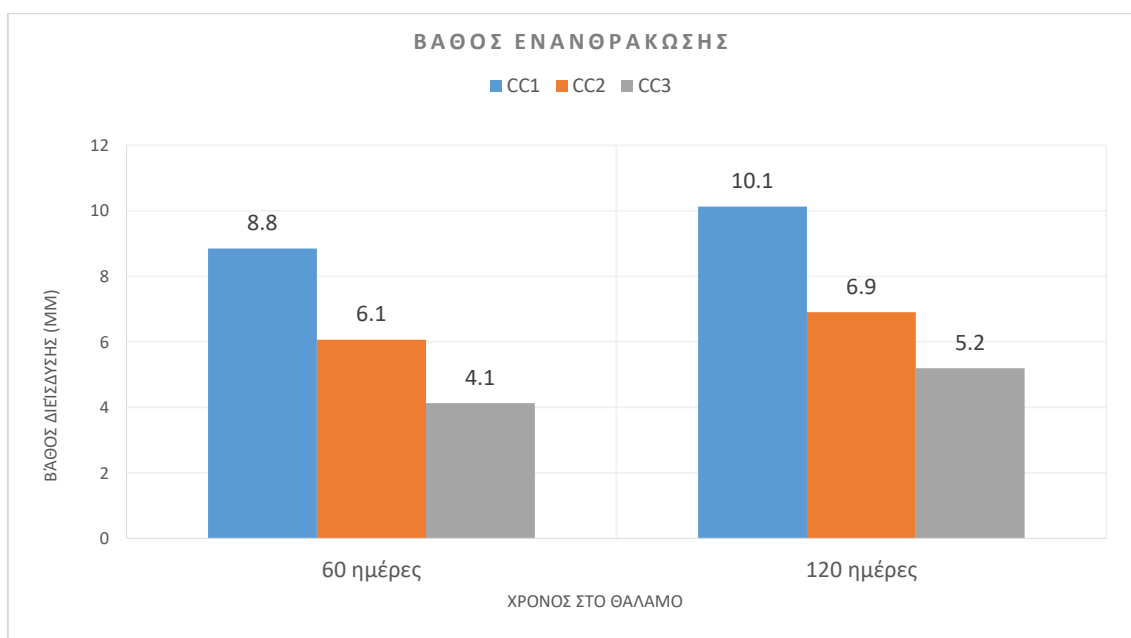
Το μεγαλύτερο βάθος ενανθράκωσης και κατ' επέκταση τη μεγαλύτερη προδιάθεση για διάβρωση παρουσιάζει η σύνθεση αναφοράς (CC1) με 8.8mm και 10.1mm στις 60 και 120 ημέρες αντίστοιχα. Στη συνέχεια βρίσκεται η σύνθεση FAC με βάθος ενανθράκωσης 6mm και 6.8mm και τέλος τη μικρότερη διαπερατότητα σε χλωριόντα παρουσιάζει με αρκετά μεγάλη διαφορά η σύνθεση SCC με τιμές μόλις 1.5mm και 2.8 mm αντίστοιχα. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, εξάγεται το συμπέρασμα πως αύξηση του λόγου Ν/Τ και μείωση της περιεκτικότητας του τσιμέντου σε μια σύνθεση σκυροδέματος οδηγεί σε μεγαλύτερη προδιάθεση διάβρωσης του οπλισμού. Συγκεκριμένα αύξηση από 0,4 (σύνθεση SCC) σε 0,5 (σύνθεση CC1 και FAC) του λόγου Ν/Τ οδήγησε σε 7,3mm αύξηση του βάθους ενανθράκωσης κατά μέσο όρο. Αυτό συμβαίνει καθότι το τσιμέντο δεσμεύει χημικά και φυσικά, περίπου 0,4 του βάρους του σε νερό. Το πλεονάζον και μη δυνάμενο να δεσμευθεί

νερό εξατμίζεται αφήνοντας τριχοειδείς πόρους, από όπου γίνεται η διείσδυση της υγρασίας και η διάχυση των αερίων.

Η αυξημένη περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης λόγω αύξησης της περιεκτικότητας σε $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Στα αποτελέσματα παρατηρείται πως αύξηση από 330kg/m^3 (σύνθεση CC1) σε 400kg/m^3 (σύνθεση FAC) οδήγησε σε αύξηση κατά 48% το βάθους διείσδυσης και από 400kg/m^3 σε 500kg/m^3 οδήγησε σε αύξηση κατά 194%, δηλαδή σχεδόν διπλασιασμό του βάθους διείσδυσης. Οι μετρήσεις συμφωνούν με τα αποτελέσματα που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία και δείχνουν πως αυξημένη περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης. Όπως προκύπτει από το σύνολο των μετρήσεων, τα μικρότερα βάθη διείσδυσης από όλες τις συνθέσεις και κατ' επέκταση την συγκριτικά μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση, είχε το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (σύνθεση SCC).

7.5.2. Επίδραση μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας

Στην ενότητα αυτή θα επιχειρηθεί να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα των διαφορετικών μεθόδων προστασίας που χρησιμοποιήθηκαν. Οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.) και CC3 (ψεκασμός με υδρόφοβη στρώση). Έτσι με μια σύγκριση των μεθόδων τόσο μεταξύ τους όσο και με το σκυρόδεμα αναφοράς εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με το βαθμό προστασίας των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου προστασίας από διάβρωση. Με μια σύγκριση των μεθόδων τόσο μεταξύ τους όσο και με το σκυρόδεμα αναφοράς εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με το βαθμό προστασίας των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου προστασίας από διάβρωση. Τα αποτελέσματα του βάθους ενανθράκωσης των κυβικών δοκιμίων για τις συνθέσεις CC1, CC2, CC3 για παραμονή στο θάλαμο 60 και 120 ημέρες παρουσιάζονται σε μορφή ιστογράμματος στο Σχήμα 7.50.



Σχήμα 7. 50 Γραφική απεικόνιση του βάθους ενανθράκωσης σε 60 και 120 ημέρες παραμονής στο θάλαμο για τις συνθέσεις CC1, CC2 και CC3

Από το Σχήμα 7.50 προκύπτει πως την μεγαλύτερη διαπερατότητα και κατ' επέκταση τη μεγαλύτερη προδιάθεση για διάβρωση παρουσιάζει η σύνθεση αναφοράς (CC1) με βάθος διείσδυσης 8.8mm και

10.1mm στις 60 και 120 ημέρες αντίστοιχα. Στη συνέχεια εντοπίζεται η σύνθεση CC2 με βάθος διείσδυσης 6.1mm και 6.9mm και τέλος τη μικρότερη διαπερατότητα σε CO₂ παρουσιάζει η σύνθεση CC3 με 4.1mm και 5.2mm στις 60 και 120 ημέρες αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα δείχνουν πως χρήση αναστολέα διάβρωσης ως πρόσθετο στο σκυρόδεμα σε ποσότητα 4% κ.β. τσιμέντου (σύνθεση CC2) οδηγεί σε μείωση του βάθους ενανθράκωσης σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς (σύνθεση CC1) κατά 30%. Τις χαμηλότερες τιμές βάθους ενανθράκωσης και κατ' επέκταση την μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση κατά μέσο όρο είχε η σύνθεση CC3 (4.7mm). Η προστατευτική στρώση η οποία εφαρμόστηκε με ψεκάσμο στην επιφάνεια των δοκιμίων (CC3), ανέπτυξε τη καλύτερη προστασία έναντι διείσδυσης CO₂ και άρα αποτελεί αποτελεσματική λύση στο σχεδιασμό κατασκευών εκτεθειμένων σε ρυπογόνο περιβάλλον (αυξημένα ποσοστά CO₂ στην ατμόσφαιρα). Στην ακόλουθη παράγραφο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της δοκιμής επιταχυνόμενης ενανθράκωσης.

7.5.3. Μερικά Συμπεράσματα V

Παρατηρώντας τα ιστογράμματα που προκύπτουν από τη δοκιμή ενανθράκωσης που υποβλήθηκαν οι δοκιμαζόμενες συνθέσεις, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

- I. Η αυξημένη περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο μειώνει το βάθος ενανθράκωσης λόγω αύξησης της περιεκτικότητας σε Ca(OH)₂. Στα αποτελέσματα παρατηρείται πως αύξηση από 330kg/m³ (σύνθεση CC1) σε 400kg/m³ (σύνθεση FAC) οδήγησε σε αύξηση κατά 48% το βάθος διείσδυσης και από 400kg/m³ σε 500kg/m³ οδήγησε σε αύξηση κατά 194%, δηλαδή σχεδόν διπλασιασμό του βάθους διείσδυσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως αυξημένη περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο μειώνει το βάθος ενανθράκωσης λόγω αύξησης της περιεκτικότητας σε Ca(OH)₂. Όπως προκύπτει από το σύνολο των μετρήσεων, τα μικρότερα βάθη διείσδυσης από όλες τις συνθέσεις και κατ' επέκταση την συγκριτικά μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση, είχε το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (σύνθεση SCC).
- II. Αύξηση από 0,4 (σύνθεση SCC) σε 0,5 (σύνθεση CC1 και FAC) του λόγου N/T οδήγησε σε 7,3mm αύξηση του βάθους ενανθράκωσης κατά μέσο όρο. Αυτό συμβαίνει καθότι το τσιμέντο δεσμεύει χημικά και φυσικά, περίπου 40% του βάρους του σε νερό. Το πλεονάζον και μη δυνάμενο να δεσμευθεί νερό εξατμίζεται αφήνοντας τριχοειδείς πόρους, από όπου γίνεται η διείσδυση της υγρασίας και η διάχυση των αερίων.
- III. Η χρήση αναστολέα διάβρωσης ως πρόσθετο στο σκυρόδεμα σε ποσότητα 4% κ.β. τσιμέντου (σύνθεση CC2) οδηγεί σε μείωση του βάθους ενανθράκωσης σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς (σύνθεση CC1) κατά 30%. Τις χαμηλότερες τιμές βάθους ενανθράκωσης και κατ' επέκταση την μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση κατά μέσο όρο είχε η σύνθεση CC3 (4.7mm). Η προστατευτική στρώση η οποία εφαρμόστηκε με ψεκάσμο στην επιφάνεια των δοκιμίων (CC3), ανέπτυξε τη καλύτερη προστασία έναντι διείσδυσης CO₂ και άρα αποτελεί αποτελεσματική λύση στο σχεδιασμό κατασκευών εκτεθειμένων σε ρυπογόνο περιβάλλον (αυξημένα ποσοστά CO₂ στην ατμόσφαιρα). Τα υψηλότερα ποσοστά CO₂ στην ατμόσφαιρα εκτός από τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις βρίσκονται μέσα στα κτίρια και ποικίλει από ένα ελάχιστο στα παράκτια περιβάλλοντα σε ένα μέγιστο στα αστικά περιβάλλοντα.

7.6. Δοκιμή τριχοειδούς απορρόφησης

Σκοπός της μέτρησης της επιφανειακής απορρόφησης είναι η εκτίμηση της επιφανειακής διαπερατότητας του σκυροδέματος μέσω του υπολογισμού της επιφανειακής απορρόφησης ύδατος. Η υδατοαπορροφητικότητα σχετίζεται άμεσα με το επιφανειακό πορώδες, το οποίο επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες της επιφάνειας αλλά και την ανθεκτικότητα ολόκληρης της κατασκευής.

Η πειραματική διαδικασία για τον προσδιορισμό της τριχοειδούς απορρόφησης νερού των συνθέσεων πραγματοποιήθηκε κατά το πρότυπο BS 1881 [137]. Μετά από ωρίμανση 28 ημερών, 3 κυβικά δοκίμια από κάθε σύνθεση τοποθετήθηκαν σε φούρνο για 72 ώρες. Μετά την αφαίρεσή τους, κάθε δοκίμιο ψύχθηκε για 24 ώρες σε ξηραντήρα. Η μάζα από κάθε δείγμα καταγράφηκε αμέσως μετά τη διαδικασία αυτή. Όλα τα δείγματα βυθίστηκαν σε δεξαμενή για χρονικό διάστημα 30 λεπτών, σε βάθος τέτοιο ώστε η άνω στάθμη του ύδατος να είναι τουλάχιστον 25mm πάνω από την κορυφή του κάθε δείγματος. Κατά την απομάκρυνση, κάθε δείγμα καθαρίστηκε με ένα πανί όσο το δυνατόν γρηγορότερα, έως να αφαιρεθεί όλο το περίσσιο νερό από την επιφάνεια. Στη συνέχεια, η μάζα προσδιορίστηκε με ηλεκτρονικό ζυγό για τον προσδιορισμό της ποσότητας του νερού που απορροφήθηκε συγκρίνοντας τις δυο μετρούμενες τιμές. Στον Πίνακα 7.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ποσοστιαίας αλλαγής μάζας των δοκιμίων (συντελεστής υδατοαπορροφητικότητας) για κάθε σύνθεση, όπως προέκυψαν από τη δοκιμή τριχοειδούς απορρόφησης που περιεγράφηκε παραπάνω.

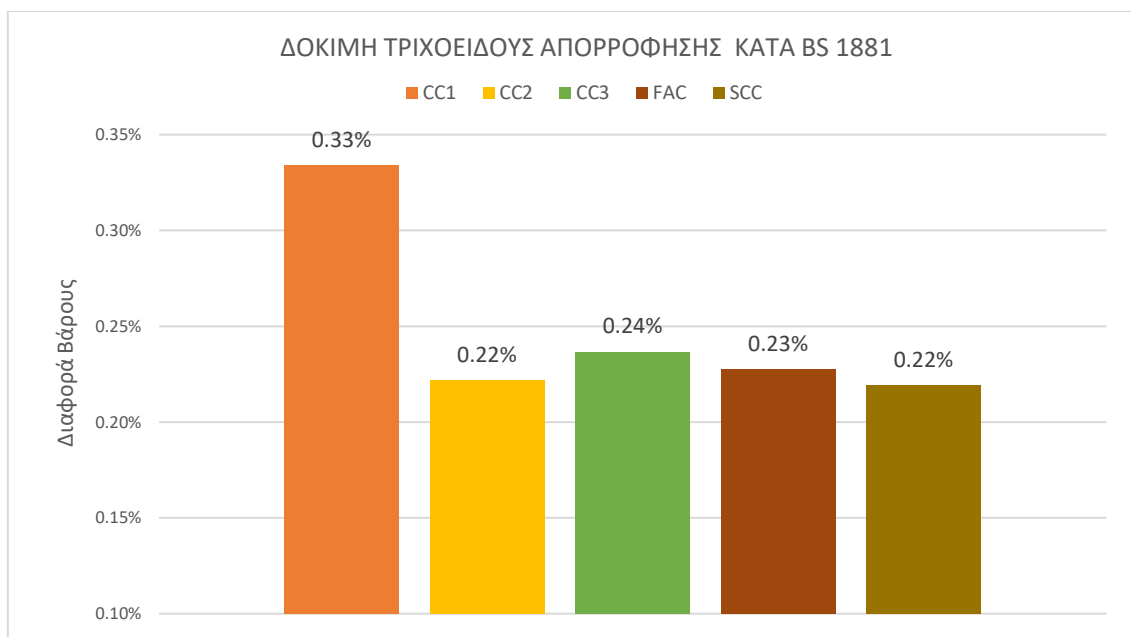
Πίνακας 7. 11 Αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης των δοκιμαζόμενων συνθέσεων

ΣΥΝΘΕΣΗ	CC1	CC2	CC3	FAC	SCC
Συντελεστής υδτοαπορ. (%) – Μέτρηση 1 ^η	0.321%	0.270%	0.277%	0.229%	0.239%
Συντελεστής υδτοαπορ. (%) – Μέτρηση 2 ^η	0.347%	0.173%	0.197%	0.226%	0.200%
Συντελεστής υδτοαπορ. (%) – Μέσος Όρος	0.33%	0.22%	0.24%	0.23%	0.22%

Η ικανότητα απορρόφησης κάθε δοκιμίου υπολογίστηκε ως η αύξηση της μάζας του μετά από τη βύθιση και εκφράζεται ως το ποσοστό της μάζας του ξηρού δείγματος [122]. Λαμβάνεται ένας διορθωτικός συντελεστής σύμφωνα με την επιφάνεια προς όγκο του δοκιμίου χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο (Εξίσωση 7.10):

$$\text{διορθωτικός συντελεστής} = \frac{\text{volume (mm}^3\text{)}}{\text{surface area (mm}^2\text{)} \times 12.5} \quad (7.10)$$

Τα αποτελέσματα της ποσοστιαίας αλλαγής μάζας των δοκιμίων παρουσιάζονται με τη μορφή ιστογράμματος στο Σχήμα 7.51.

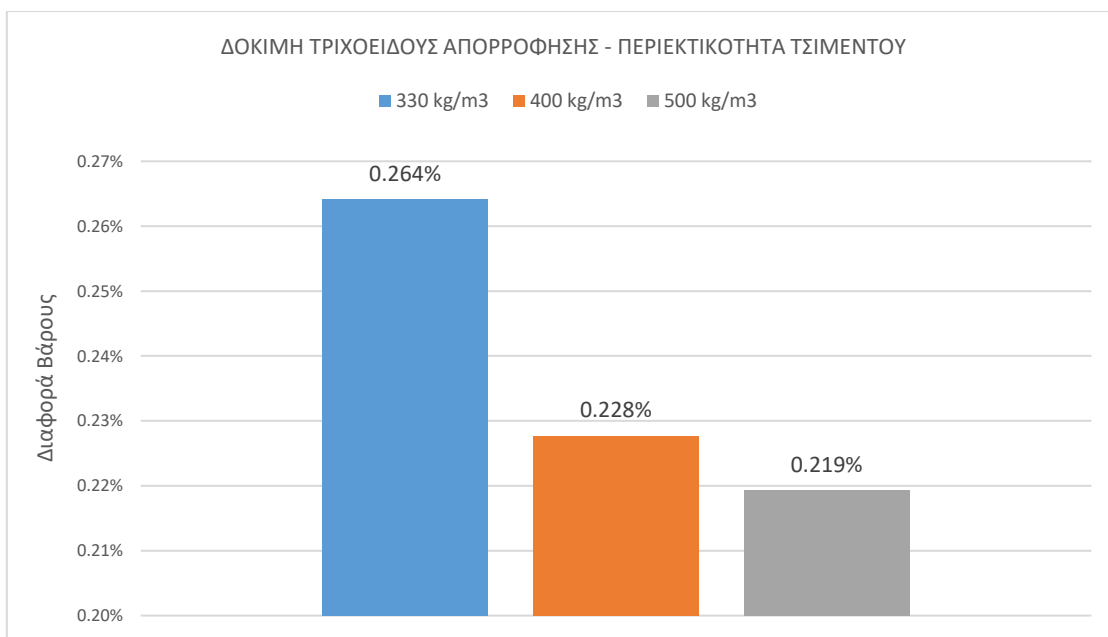


Σχήμα 7. 51 Συντελεστές υδατοαπορροφητικότητας για την κάθε σύνθεση όπως υπολογίστηκαν με τη δοκιμή τριχοειδούς απορρόφησης

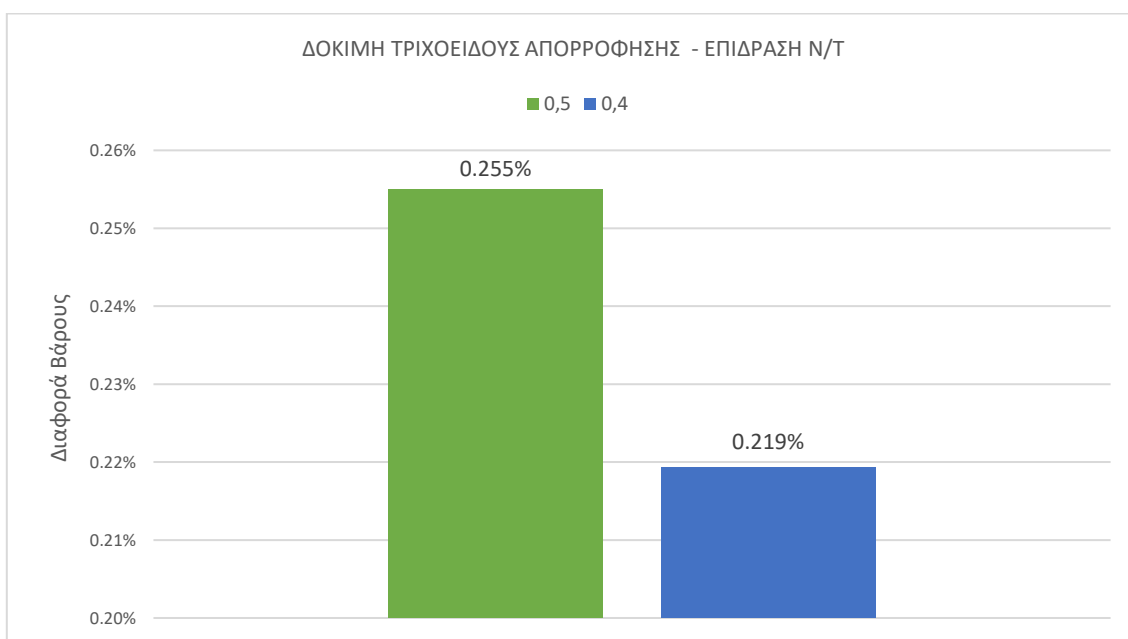
Η απορρόφηση ύδατος της επιφάνειας σχετίζεται άμεσα με το επιφανειακό πορώδες, το οποίο επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες της επιφάνειας αλλά και την ανθεκτικότητα ολόκληρης της κατασκευής. Κατά τη διείδυση, η μεταφορά του νερού εξαρτάται από παράγοντες όπως η διασύνδεση των πόρων και η κατανομή του μεγέθους τους. Για το λόγο αυτό, θα επιχειρηθεί να γίνει μια συγκριτική αξιολόγηση της υδατοαπορροφητικότητας των συνθέσεων στις παρακάτω ενότητες (7.6.1, 7.6.2) όπου εξετάζονται αναλυτικά οι επιπτώσεις των εξής δύο παραγόντων στην αντιδιαβρωτική συμπεριφορά των δοκιμών: Ο πρώτος παράγοντας είναι οι αναλογίες στο μίγμα των παραγόμενων συνθέσεων δηλαδή η σύστασή τους. Αυτό περιλαμβάνει την αναλογία και το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (κοκκομετρική ανάλυση), την ποσότητα τσιμέντου αλλά και την ποσότητα του νερού (λόγο N/T). Οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα). Ο δεύτερος παράγοντας που μελετήθηκε ήταν η επιρροή διαφορετικών μεθόδων προστασίας. Συγκεκριμένα οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.) και CC3 (ψεκασμός με υδρόφοβη στρώση).

7.6.1. Επίδραση σύστασης

Στην παράγραφο αυτή θα επιχειρηθεί να διαπιστωθεί πως επηρεάζει η σύσταση μιας σύνθεσης την επιφανειακή υδατοαπορροφητικότητά της. Με τον όρο σύσταση μιας σύνθεσης εννοείται η αναλογία και το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (κοκκομετρική ανάλυση), η ποσότητα τσιμέντου αλλά και η ποσότητα του νερού και κατ' επέκταση ο λόγος N/T. Οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται και εξετάζονται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα). Τα αποτελέσματα των υπολογισθέντων συντελεστών υδατοαπορροφητικότητας για την κάθε σύνθεση παρουσιάζονται στα παρακάτω ιστογράμματα. Συγκεκριμένα έχει γίνει ένας διαχωρισμός των δοκιμών με βάση την περιεκτικότητα σε τσιμέντο σε κάθε σύνθεση δηλαδή για τις τιμές 330kg/m^3 (συνθέσεις CC1, CC2, CC3), 400kg/m^3 (σύνθεση FAC) και 500kg/m^3 (σύνθεση SCC) αλλά και με βάση το λόγο N/T δηλαδή για τις τιμές 0,4 (σύνθεση SCC) και 0,5 (συνθέσεις CC1, CC2, CC3, FAC). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με μορφή ιστογράμματος στα Σχήματα 7.52 και 7.53.



Σχήμα 7. 52 Συντελεστές υδατοαπορροφητικότητας για κάθε εξεταζόμενη περιεκτικότητα τσιμέντου



Σχήμα 7. 53 Συντελεστές υδατοαπορροφητικότητας για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση λόγου N/T

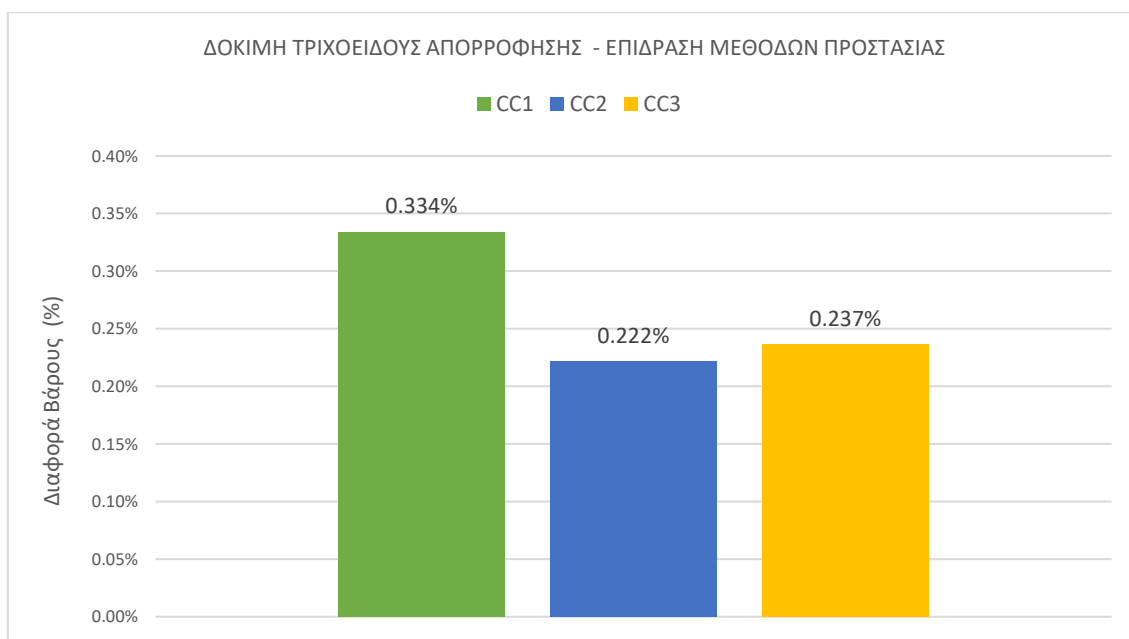
Από το Σχήμα 7.51 προκύπτει πως το μεγαλύτερο συντελεστή υδατοαπορροφητικότητας και κατ' επέκταση τη μεγαλύτερη προδιάθεση για διάβρωση παρουσιάζουν τα δοκίμια της σύνθεσης CC1 με μεταβολή του βάρους κατά 0.33%. Στην συνέχεια και με σχετικά μεγάλη διαφορά από την σύνθεση CC1 παρατηρούμε τις συνθέσεις FAC και SCC με συντελεστές υδατοαπορροφητικότητας της ίδιας τάξης μεγέθους (0.23% και 0.22% αντίστοιχα).

Μια παρατήρηση που προκύπτει από τα Σχήματα 7.52 και 7.53 είναι πως η μεγαλύτερη διαφοροποίηση στον συντελεστή υδατοαπορροφητικότητας παρατηρείται στην αλλαγή του λόγου N/T. Αυτό οφείλεται στο ότι διαφοροποίηση στον λόγο νερού/τσιμέντο επηρεάζει άμεσα το πορώδες του σκυροδέματος και κατ' επέκταση την υδατοαπορροφητικότητα της επιφάνειας των δοκιμίων. Αναλυτικά στα αποτελέσματα φαίνεται πως αύξηση του λόγου N/T από 0.4 σε 0.5 οδήγησε σε αντίστοιχη αύξηση κατά 17% του συντελεστή υδατοαπορροφητικότητας (Σχήμα 7.53) Αντίστοιχα αλλαγές στην περιεκτικότητα

σε τσιμέντο (από 330 σε 400 και 500kg/m³) όπως παρατηρείται στο σχήμα 7.52 δεν οδηγούν σε μεγάλες μεταβολές της υδατοαπορροφητικότητας του σκυροδέματος. Αναλυτικά από τα αποτελέσματα φαίνεται πως αύξηση από 330kg/m³ (σύνθεση CC1) σε 400kg/m³ (σύνθεση FAC) οδήγησε σε μείωση κατά 14% του συντελεστή υδατοαπορροφητικότητας και από 400kg/m³ σε 500kg/m³ οδήγησε σε μείωση κατά 4% η οποία είναι σχεδόν αμελητέα. Προκύπτει άρα πως αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο στο σκυρόδεμα οδηγεί σε μείωση της υδατοαπορροφητικότητάς του, ωστόσο από ένα σημείο και μετά οι ιδιότητες του παραμένουν σταθερές. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης ενότητας, ο σχεδιασμός μιας ανθεκτικής κατασκευής οφείλει να περιλαμβάνει την επιλογή της βέλτιστης ποσότητας τσιμέντου σε συνδυασμό με έναν χαμηλό λόγο νερού/τσιμέντο.

7.6.2. Επίδραση μεθόδων αντιδιαβρωτικής προστασίας

Στην παράγραφο αυτή θα επιχειρηθεί να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα των διαφορετικών μεθόδων προστασίας που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.) και CC3 (ψεκασμός με υδρόφοβη στρώση). Με μια σύγκριση των μεθόδων προστασίας τόσο μεταξύ τους όσο και με το σκυρόδεμα αναφοράς εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με το βαθμό προστασίας των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και για την αξιολόγηση της βέλτιστης μεθόδου προστασίας. Παρακάτω παρουσιάζεται το ιστόγραμμα με τους συντελεστές υδατοαπορροφητικότητας όπως υπολογίστηκαν για τις προαναφερθείσες συνθέσεις.



Σχήμα 7. 54 Συντελεστές υδατοαπορροφητικότητας για τις συνθέσεις CC1, CC2, CC3 όπως υπολογίστηκαν με τη δοκιμή τριχοειδούς απορρόφησης

Από το Σχήμα 7.54 προκύπτει πως την μεγαλύτερη διαπερατότητα και κατ' επέκταση τη μεγαλύτερη προδιάθεση για διάβρωση παρουσιάζει η σύνθεση αναφοράς (CC1) με συντελεστή υδατοαπορροφητικότητας 0.33%. Στην συνέχεια και με σχετικά μεγάλη διαφορά από την σύνθεση CC1 παρατηρούμε τις συνθέσεις CC2 και CC3 με συντελεστές υδατοαπορροφητικότητας της ίδιας τάξης μεγέθους (0.22% και 0.24% αντίστοιχα).

Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η εφαρμογή προστατευτικής υδατοαπωθητικής στρώσης στην επιφάνεια των δοκιμίων (CC3), οδηγεί σε μείωση του συντελεστή υδατοαπορροφητικότητας σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς (σύνθεση CC1) κατά 34%. Ο αναστολέας διάβρωσης ως πρόσθετο στο

σκυρόδεμα σε ποσότητα 4% κ.β. τσιμέντου (σύνθεση CC2), ανέπτυξε την καλύτερη προστασία έναντι διείσδυσης νερού καθώς παρουσίασε τον μικρότερο συντελεστή υδατοαπορροφητικότητας (0.222%). Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγούμενος, η διαφορά στους συντελεστές υδατοαπορροφητικότητας που παρουσίασαν τα δοκίμια στα οποία εφαρμόστηκε προστασία (CC2, CC3) είναι αρκετά μικρή και μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως είναι εξίσου αποτελεσματικοί. Στην ακόλουθη παράγραφο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της επιταχυνόμενης ενανθράκωσης.

7.6.3. Μερικά Συμπεράσματα VI

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης που πραγματοποιήθηκε κατά το πρότυπο BS1881 καθώς και τους εξαγόμενους συντελεστές υδατοαπορροφητικότητας για την κάθε εξεταζόμενη σύνθεση σκυροδέματος, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- I. Οι δυο μέθοδοι προστασίας που ελέγχθηκαν έδωσαν εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα στη δοκιμή τριχοειδούς απορρόφησης. Συγκεκριμένα η εφαρμογή προστατευτικής υδατοαπωθητικής στρώσης στην επιφάνεια των δοκιμίων, οδήγησε σε μειωμένο συντελεστή υδατοαπορροφητικότητας σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς κατά 34%. Ο αναστολέας διάβρωσης ως πρόσθετο στο σκυρόδεμα σε ποσότητα 4% κ.β. τσιμέντου, ανέπτυξε την καλύτερη προστασία έναντι διείσδυσης νερού καθώς παρουσίασε τον μικρότερο συντελεστή υδατοαπορροφητικότητας (0.222%). Ωστόσο, η διάφορες που παρουσίασαν τα δοκίμια στα οποία εφαρμόστηκε προστασία (CC2, CC3) είναι αρκετά μικρές και οδηγούν στο συμπέρασμα πως και οι δύο μέθοδοι προστασίας είναι εξίσου αποτελεσματικές.
- II. Ο λόγος νερό/τσιμέντο που έχει μια σύνθεση σκυροδέματος δείχνει να επηρεάζει το πορώδες της και κατ' επέκταση την υδατοαπορροφητικότητά της. Πιο συγκεκριμένα αύξηση του λόγου N/T από 0,4 σε 0,5 οδήγησε σε αντίστοιχη αύξηση 17% του συντελεστή υδατοαπορροφητικότητας. Αυτό συμβαίνει καθότι το τσιμέντο δεσμεύει χημικά και φυσικά, περίπου 0,4 του βάρους του σε νερό. Το πλεονάζον και μη δυνάμενο να δεσμευθεί νερό εξατμίζεται αφήνοντας τριχοειδείς πόρους, από όπου γίνεται η διείσδυση της υγρασίας και η διάχυση των αερίων.
- III. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο μιας σύνθεσης σκυροδέματος δείχνει να επηρεάζει και συγκεκριμένα να μειώνει την υδατοαπορροφητικότητά της. Αναλυτικά στα αποτελέσματα παρατηρείται πως αύξηση από 330kg/m³ (σύνθεση CC1) σε 400kg/m³ (σύνθεση FAC) οδήγησε σε μείωση κατά 14% τον συντελεστή υδατοαπορροφητικότητας. Αντίστοιχα αύξηση από 400kg/m³ σε 500kg/m³ οδήγησε σε μείωση κατά 4% η οποία είναι σχεδόν αμελητέα. Προκύπτει άρα πως αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο στο σκυρόδεμα οδηγεί σε μείωση της υδατοαπορροφητικότητάς του, ωστόσο από ένα σημείο και μετά οι ιδιότητές του παραμένουν σταθερές. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης ενότητας, ο σχεδιασμός μιας ανθεκτικής κατασκευής οφείλει να περιλαμβάνει την επιλογή της βέλτιστης ποσότητας τσιμέντου σε συνδυασμό με έναν χαμηλό λόγο νερού/τσιμέντο χωρίς αυτό να επηρεάζει την εργασιμότητά του.

7.7. Δοκιμή Υδατοπερατότητας

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 μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της υδατοπερατότητας των δοκιμασμένων συνθέσεων διεξήχθη σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-8 [133] και πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου της εταιρίας δομικών υλικών DOMYLCO. Κατά τη μέθοδο αυτή, κάθε κυβικό δοκίμιο στερεώθηκε κατάλληλα σε διάταξη όπου ταυτόχρονα εισέρχονταν νερό από την άνω επιφάνεια του με σταθερή πίεση 5bars για 72 ώρες. Μετά την εφαρμογή της πίεσης για τον προκαθορισμένο χρόνο, το δοκίμιο αφαιρέθηκε από τη συσκευή. Η περιοχή στην οποία εφαρμόστηκε η πίεση του νερού σκουπίστηκε για να απομακρυνθεί η περίσσεια νερού. Το δείγμα στη συνέχεια χωρίστηκε στο μέσο, κάθετα στην επιφάνεια στην οποία εφαρμόστηκε η πίεση του νερού μέσω ειδικής διάταξης και το μέγιστο βάθος που έχει διεισδύσει το νερό στο δοκίμιο καταγράφεται με ακρίβεια χιλιοστού. Στον Πίνακα 7.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του βάθους διείσδυσης για κάθε σύνθεση, όπως προέκυψαν από το σύνολο των μετρήσεων της μεθόδου που περιεγράφηκε παραπάνω.

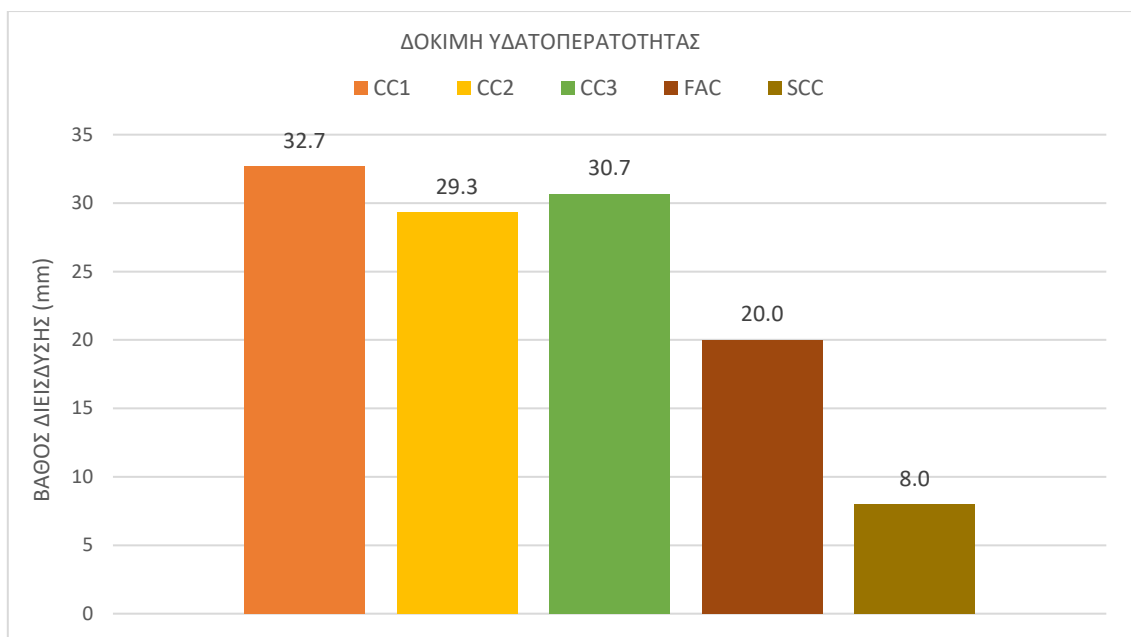
Πίνακας 7. 12 Βάθος διείσδυσης νερού για κάθε μια από τις εξεταζόμενες συνθέσεις

ΣΥΝΘΕΣΗ	CC1	CC2	CC3	FAC	SCC
ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ D ₁ (mm) ΜΕΤΡΗΣΗ 1	32	36	33	17	9
ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ D ₂ (mm) ΜΕΤΡΗΣΗ 2	31	28	28	18	8
ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ D ₃ (mm) ΜΕΤΡΗΣΗ 3	35	24	31	25	7
ΒΑΘΟΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ P (mm) ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	32.7	29.3	30.7	20.0	8.0

Το βάθος διείσδυσης καθορίστηκε με την ακόλουθη εξίσωση:

$$P = \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_n}{n} \quad (7.11)$$

όπου P είναι το μέσο βάθος, το D_n είναι το βάθος των δειγμάτων δοκιμής σε mm και το n είναι ο αριθμός των δειγμάτων. Βασική προϋπόθεση για τις επιτυχημένες μετρήσεις, αποτέλεσε το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της δοκιμής διατηρούνταν σταθερή η πίεση αλλά και ελέγχονταν συστηματικά για τυχούσα διαρροή νερού [134]. Τα αποτελέσματα της δοκιμής υδατοπερατότητας (βάθος διείσδυσης σε mm) για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις παρουσιάζονται συγκεντρωτικά με τη μορφή ιστογράμματος στο Σχήμα 7.55.

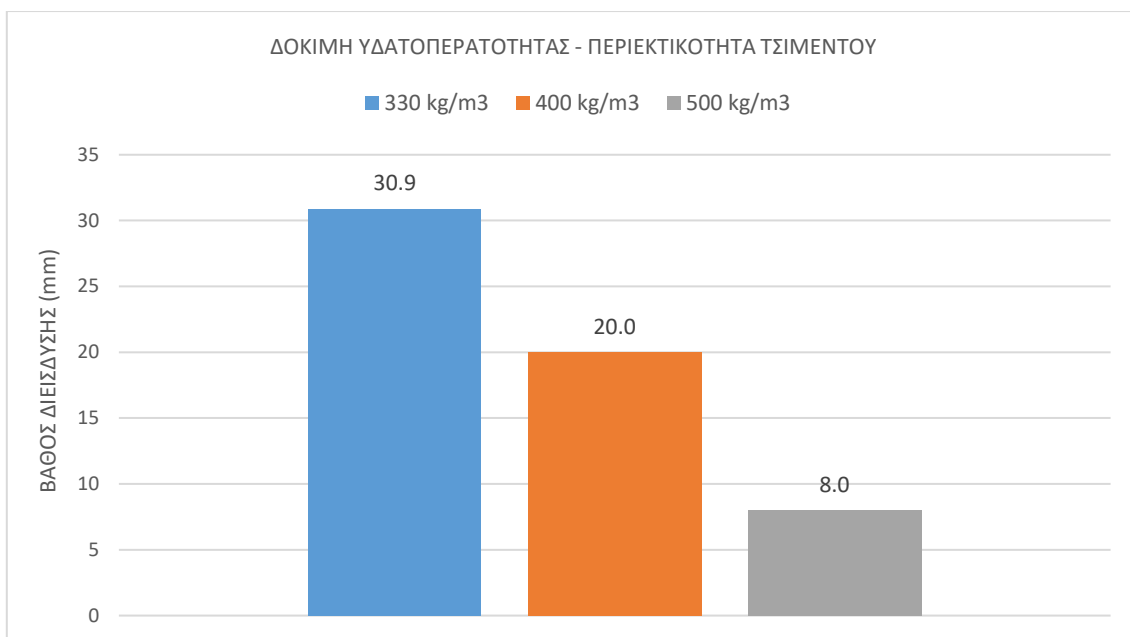


Σχήμα 7.55 Βάθος διείσδυσης για την κάθε σύνθεση όπως υπολογίσθηκαν με τη δοκιμή υδατοπερατότητας

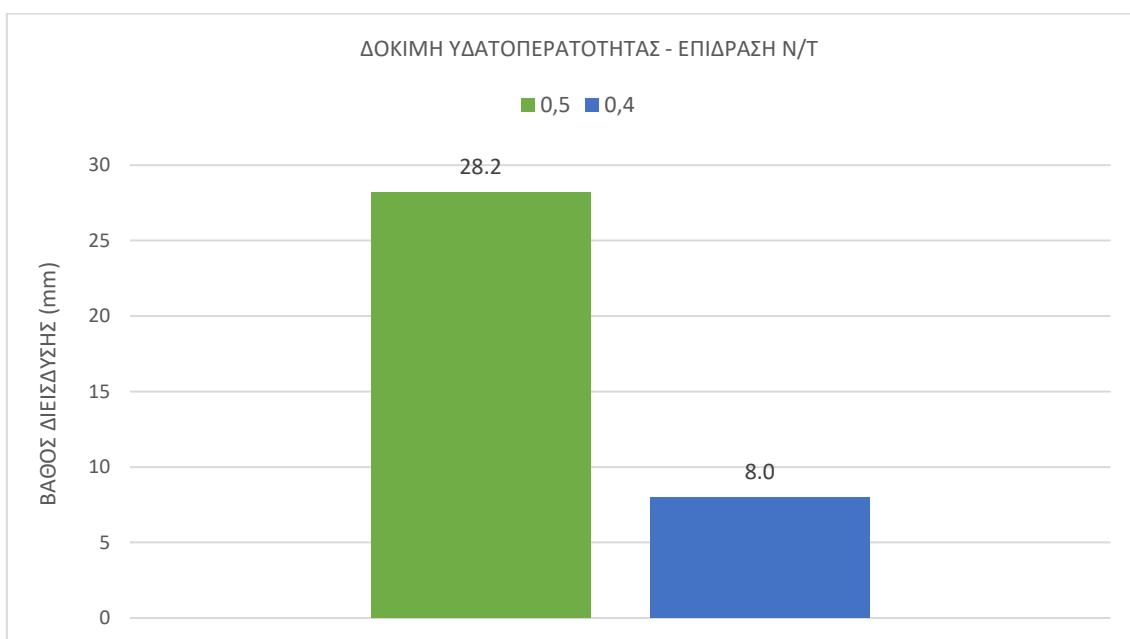
Η υδατοπερατότητα σχετίζεται άμεσα με το πορώδες, το οποίο επηρεάζει σημαντικά την ανθεκτικότητα ολόκληρης της κατασκευής. Κατά τη διείσδυση, η μεταφορά του νερού εξαρτάται από παράγοντες όπως η διασύνδεση των πόρων και η κατανομή του μεγέθους τους. Για το λόγο αυτό, γίνεται μια συγκριτική αξιολόγηση της υδατοπερατότητας των συνθέσεων στις παρακάτω ενότητες (7.7.1, 7.7.2) όπου εξετάζονται αναλυτικά οι επιπτώσεις των εξής δύο παραγόντων στην αντιδιαβρωτική συμπεριφορά των δοκιμών: Ο πρώτος παράγοντας είναι οι αναλογίες στο μίγμα των παραγόμενων συνθέσεων δηλαδή η σύστασή τους. Αυτό περιλαμβάνει την αναλογία και το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (κοκκομετρική ανάλυση), την ποσότητα τσιμέντου αλλά και τον λόγο N/T. Οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα). Ο δεύτερος παράγοντας του οποίου η επίδραση εκτιμήθηκε ήταν η επιρροή διαφορετικών μεθόδων προστασίας. Συγκεκριμένα οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.) και CC3 (ψεκασμός με υδρόφοβη στρώση).

7.7.1. Επίδραση σύστασης

Στην παράγραφο αυτή θα εξετασθεί ο συσχετισμός της σύστασης μιας σύνθεσης σκυροδέματος με την υδατοπερατότητά της, με την ιδιότητά της δηλαδή να προσλαμβάνει νερό υπό πίεση στο εσωτερικό της. Με τον όρο σύσταση μιας σύνθεσης εννοείται η αναλογία και το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (κοκκομετρική ανάλυση), η ποσότητα τσιμέντου αλλά και η ποσότητα του νερού και κατ' επέκταση ο λόγος N/T. Οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται και εξετάζονται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα). Τα αποτελέσματα των υπολογισθέντων συντελεστών υδατοαπορροφητικότητας για την κάθε σύνθεση παρουσιάζονται στα παρακάτω ιστογράμματα. Πραγματοποιήθηκε μια ομαδοποίηση των δοκιμών με βάση την περιεκτικότητα σε τσιμέντο που είχε κάθε σύνθεση (Σχήμα 7.56) και τον λόγο νερού/τσιμέντο (Σχήμα 7.57). Στην πρώτη περίπτωση συγκρίνονται τρεις διαφορετικές καταστάσεις (περιεκτικότητα σε τσιμέντο 330, 400 και 500kg ανά κυβικό) και στη δεύτερη περίπτωση δύο καταστάσεις (λόγος N/T 0,4 και 0,5).



Σχήμα 7. 56 Βάθος διείσδυσης νερού για την κάθε εξεταζόμενη περίπτωση περιεκτικότητας τσιμέντου



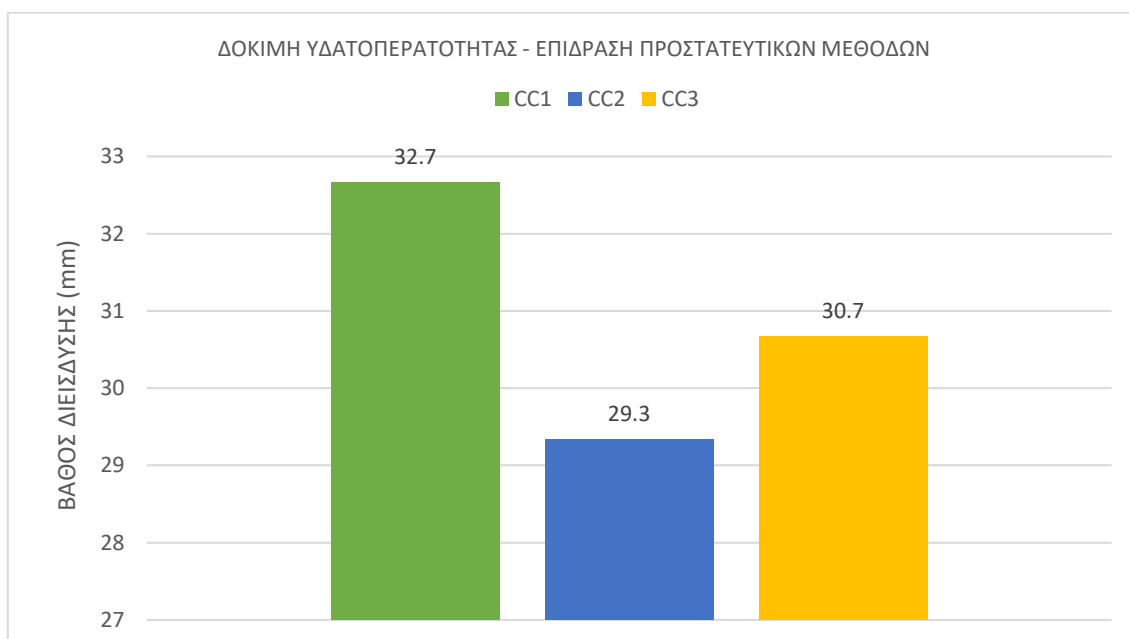
Σχήμα 7. 57 Βάθος διείσδυσης νερού για την κάθε εξεταζόμενη περίπτωση λόγου Ν/Τ

Από το Σχήμα 7.55 προκύπτει πως το μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης νερού και κατ' επέκταση τη μεγαλύτερη προδιάθεση για διάβρωση παρουσιάζουν τα δοκίμια της σύνθεσης CC1 με βάθος διείσδυσης 32.7mm. Στην συνέχεια και με σχετικά μεγάλη διαφορά από την σύνθεση CC1 παρατηρούμε τις συνθέσεις FAC και SCC με βάθος διείσδυσης 20 και 8mm αντίστοιχα. Μια παρατήρηση που προκύπτει από τα Σχήματα 7.56 και 7.57 είναι πως η μεγαλύτερη διαφοροποίηση στην υδατοπερατότητα παρατηρείται στην αλλαγή του λόγου Ν/Τ, όπου αλλαγή από 0.4 σε 0.5 επέφερε αύξηση του βάθους διείσδυσης κατά 20.2mm. Αυτό οφείλεται στο ότι η αλλαγή στον λόγο νερού/τσιμέντο επηρεάζει άμεσα το πορώδες του σκυροδέματος και κατ' επέκταση την υδατοαπορροφητικότητα των δοκιμίων. Αναλυτικά στα αποτελέσματα φαίνεται πως αύξηση του λόγου Ν/Τ από 0.4 σε 0.5 επέφερε αύξηση του βάθους διείσδυσης κατά 20.2mm (Σχήμα 7.57) Αντίστοιχα

αλλαγές στην περιεκτικότητα σε τσιμέντο (από 330 σε 400 και 500kg/m³) όπως παρατηρείται στο σχήμα 7.56 οδηγούν σε αντίστοιχες μεταβολές της υδατοπερατότητας του σκυροδέματος. Αναλυτικά από τα αποτελέσματα φαίνεται πως αύξηση από 330kg/m³ (σύνθεση CC1) σε 400kg/m³ (σύνθεση FAC) οδήγησε σε μείωση κατά 50% του βάθους διείσδυσης του νερού και από 400kg/m³ σε 500kg/m³ οδήγησε σε μείωση κατά 65%. Προκύπτει άρα πως αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο στο σκυρόδεμα οδηγεί σε μείωση της υδατοπερατότητας του. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης ενότητας, ο σχεδιασμός μιας ανθεκτικής κατασκευής οφείλει να περιλαμβάνει την επιλογή της κατάλληλης ποσότητας τσιμέντου σε συνδυασμό με έναν χαμηλό λόγο νερού/τσιμέντο. Χαρακτηριστικό είναι πως η σύνθεση SCC έδειξε τη μικρότερη διεισδυτικότητα με διαφορά από τις υπόλοιπες συνθέσεις (μόλις 8mm) καθιστώντας την έτσι κατάλληλη για χρήση σε κατασκευές που προσδοκούν σε μεγάλους χρόνους ζωής.

7.7.2. Επίδραση μεθόδων ανηδιαβρωτικής προστασίας

Στην ενότητα αυτή θα επιχειρηθεί να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα των διαφορετικών μεθόδων προστασίας που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα οι τρεις διαφορετικές συνθέσεις που μελετώνται συγκριτικά είναι οι: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος Α.Δ.) και CC3 (ψεκασμός με υδροφοβή στρώση). Έτσι με μια σύγκριση των μεθόδων τόσο μεταξύ τους όσο και με το σκυρόδεμα αναφοράς εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με το βαθμό προστασίας των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου προστασίας από διάβρωση. Παρακάτω παρουσιάζεται το ιστόγραμμα με τα αποτελέσματα του βάθους διείσδυσης όπως μετρήθηκαν για τις προαναφερθείσες συνθέσεις.



Σχήμα 7. 58 Βάθος διείσδυσης για τις συνθέσεις CC1, CC2, CC3 όπως υπολογίσθηκαν με τη δοκιμή υδατοπερατότητας

Από το Σχήμα 7.58 προκύπτει πως την μεγαλύτερη διαπερατότητα και κατ' επέκταση τη μεγαλύτερη προδιάθεση για διάβρωση παρουσίαζε η σύνθεση αναφοράς (CC1) με βάθος διείσδυσης 32.7mm Στην συνέχεια και με σχετικά μικρή διαφορά από την σύνθεση CC1 παρατηρούμε τις συνθέσεις CC2 και CC3 με αποτελέσματα παρόμοιας τάξης μεγέθους (30.7mm και 29.3mm αντίστοιχα). Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η εφαρμογή προστατευτικής υδατοαπωθητικής στρώσης στην επιφάνεια των δοκιμίων (CC3), οδηγεί σε μικρή μείωση της υδατοπερατότητας σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς κατά μόλις 6%. Ο αναστολέας διάβρωσης ως πρόσθετο στο σκυρόδεμα σε ποσότητα 4% κ.β. τσιμέντου (σύνθεση

CC2), ανέπτυξε καλύτερη προστασία έναντι διείσδυσης νερού καθώς παρουσίασε το μικρότερο βάθος διείσδυσης (29.3mm) από τις 3 εξεταζόμενες συνθέσεις. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγούμενος, οι διαφορές που παρουσίασαν τα δοκίμια στα οποία εφαρμόστηκε προστασία (CC2, CC3) σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς (CC1) είναι αρκετά μικρή και μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως οι μέθοδοι προστασίας δεν λειτούργησαν αποτελεσματικά στην παρούσα δοκιμή. Αυτό για την περίπτωση CC3 όπου εφαρμόστηκε επιφανειακός ψεκάσμος μπορεί να οφείλεται στην καταστροφή του διάφανου προστατευτικού στρώματος λόγω της εισροής νερού υπό συνεχή πίεση. Αντίστοιχα για τη σύνθεση CC2 με τον πρόσθετο αναστολέα διάβρωσης, η εισροή νερού υπό πίεση πιθανότατα να κατέστρεψε μερικώς τις κρυσταλλικές δομές που είχαν δημιουργηθεί στους πόρους των δοκιμίων, οδηγώντας το έτσι στην αύξηση της υδατοπερατότητάς του. Στην ακόλουθη παράγραφο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της δοκιμής υδατοπερατότητας για όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις.

7.7.3. Μερικά Συμπεράσματα VII

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της δοκιμής υδατοπερατότητας που πραγματοποιήθηκε κατά το πρότυπο EN 12390-8 προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- I. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση στα αποτελέσματα της υδατοπερατότητας παρατηρείται όταν υπάρχει αντίστοιχη αλλαγή του λόγου N/T. Πιο συγκεκριμένα αλλαγή από 0.4 σε 0.5 επέφερε αύξηση του βάθους διείσδυσης κατά 20.2mm. Αυτό οφείλεται στο ότι η αλλαγή στον λόγο νερού/τσιμέντο επηρεάζει άμεσα το πορώδες του σκυροδέματος και κατ' επέκταση την υδατοαπορροφητικότητα των δοκιμίων. Αναλυτικά στα αποτελέσματα φαίνεται πως αύξηση του λόγου N/T από 0.4 σε 0.5 επέφερε τριπλάσιο βάθος διείσδυσης, επιβεβαιώνοντας τις επικρατούσες αντιλήψεις πως ο λόγος N/T πρέπει να διατηρείται χαμηλός (κάτω του 0.5) για κατασκευές που στοχεύουν σε μεγάλη διάρκεια ζωής.
- I. Σχετικά με την επιρροή της περιεκτικότητας σε τσιμέντο παρατηρήθηκε πως αύξηση από 330kg/m³ (σύνθεση CC1) σε 400kg/m³ (σύνθεση FAC) οδήγησε σε μείωση κατά 50% του βάθους διείσδυσης του νερού και από 400kg/m³ σε 500kg/m³ οδήγησε σε μείωση κατά 65%. Προκύπτει άρα πως αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο στο σκυρόδεμα οδηγεί σε μείωση της υδατοπερατότητας του. Χαρακτηριστικό είναι πως η σύνθεση SCC έδειξε τη μικρότερη διεισδυτικότητα με διαφορά από τις υπόλοιπες συνθέσεις (μόλις 8mm) καθιστώντας την έτσι κατάλληλη για χρήση σε κατασκευές που προσδοκούν σε μεγάλους χρόνους ζωής. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα, ο σχεδιασμός μιας ανθεκτικής κατασκευής οφείλει να περιλαμβάνει την επιλογή της κατάλληλης ποσότητας τσιμέντου σε συνδυασμό με έναν χαμηλό λόγο νερού/τσιμέντο.
- II. Η εφαρμογή προστατευτικής υδατοαπωθητικής στρώσης στην επιφάνεια των δοκιμίων (CC3), οδηγεί σε μικρή μείωση της υδατοπερατότητας σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς κατά μόλις 6%. Ο αναστολέας διάβρωσης ως πρόσθετο στο σκυρόδεμα σε ποσότητα 4% κ.β. τσιμέντου (σύνθεση CC2), ανέπτυξε καλύτερη προστασία έναντι διείσδυσης νερού καθώς παρουσίασε το μικρότερο βάθος διείσδυσης (29.3mm) από την σύνθεση αναφοράς. Ωστόσο οι διαφορές που παρουσίασαν τα δοκίμια στα οποία εφαρμόστηκε προστασία (CC2, CC3) σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς (CC1) είναι αρκετά μικρή και μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως οι μέθοδοι προστασίας δεν λειτούργησαν αποτελεσματικά στην παρούσα δοκιμή. Αυτό για την περίπτωση CC3 όπου εφαρμόστηκε επιφανειακός ψεκάσμος μπορεί να οφείλεται στην καταστροφή-αστοχία του διάφανου προστατευτικού στρώματος λόγω της εισροής νερού υπό συνεχή πίεση. Αντίστοιχα για τη σύνθεση CC2 με τον πρόσθετο αναστολέα διάβρωσης, η εισροή νερού υπό πίεση πιθανότατα να κατέστρεψε μερικώς τις κρυσταλλικές δομές που είχαν δημιουργηθεί στους πόρους των δοκιμίων, οδηγώντας έτσι στην αύξηση της υδατοπερατότητάς του.

7.8. Ποροσιμετρία Υδραργύρου

Τα χαρακτηριστικά του πορώδους είναι αυτά που καθορίζουν τη συμπεριφορά της κατασκευής και την ανθεκτικότητά της απέναντι στα επιβλαβή στοιχεία του περιβάλλοντος, τα οποία διεισδύουν στο σκυρόδεμα και προκαλούν φθορές. Το σκυρόδεμα, όπως και οι φυσικοί λίθοι, δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές αλλά περιέχει πλήθος από εσωτερικές κοιλότητες που ονομάζονται πόροι και οι οποίοι περιέχουν αέρα ή νερό. Το σύνολο αυτών των κοιλοτήτων ονομάζεται πορώδες του σκυροδέματος [138]. Η ποροσιμετρία υδραργύρου αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μεθόδους εκτίμησης και ανάλυσης της μικροδομής των πορωδών υλικών και προσδιορισμού του πορώδους τους. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου βασίζεται στην εισαγωγή υδραργύρου με εφαρμογή υψηλής πίεσης στο εσωτερικό του υλικού και αφού πρώτα έχει επιτευχθεί κενό στο περιβάλλον και κυρίως στους πόρους του υλικού. Ο υδράργυρος έχει υψηλή επιφανειακή τάση και ως εκ τούτου χαρακτηρίζεται ως μη διαβρέχον υγρό σε σχέση με στερεά. [139]

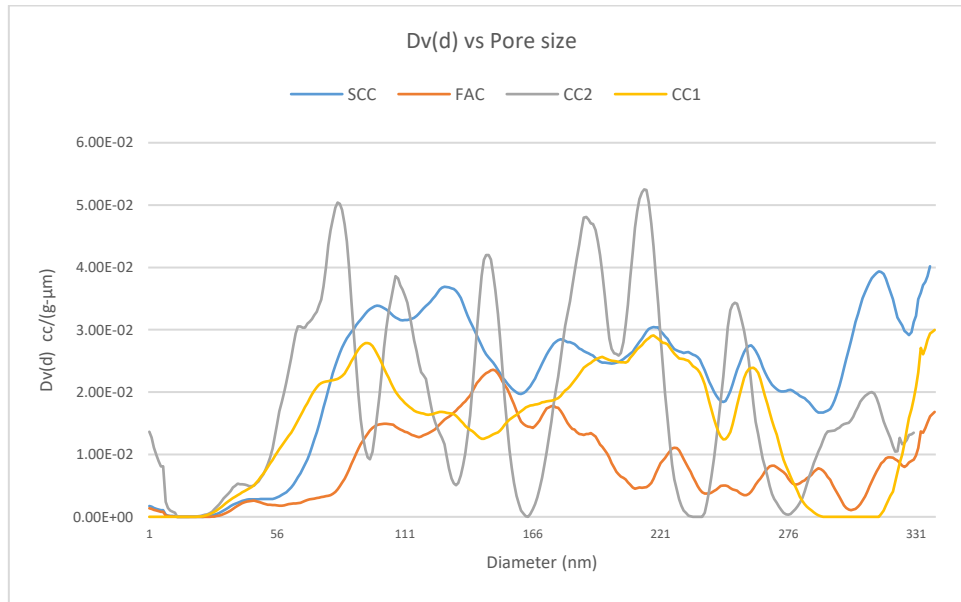
Το ποροσίμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο Poremaster της Quantachrome και τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος» (ΕΚΕΦΕ «Δ»). Η συσκευή αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα (Low pressure station) χρησιμεύει για τη μέτρηση μεγάλων πόρων ακτίνας $4,26 \div 950\mu\text{m}$, ενώ το δεύτερο (High pressure station) για τη μέτρηση μικρότερων πόρων ακτίνας $0,0036 \div 10,66\mu\text{m}$. Και τα δύο τμήματα είναι συνδεδεμένα με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω μιας μονάδας ελέγχου, στον οποίο γίνεται απευθείας η αποθήκευση και η επεξεργασία των δεδομένων. Το πρότυπο EN 1936:2006 περιγράφει τον προσδιορισμό της φαινόμενης πυκνότητας και του ανοικτού πορώδους. Η φαινόμενη πυκνότητα εκφράζεται σε kg/m^3 και είναι ο λόγος της μάζας του δοκιμίου προς τον φαινόμενο όγκο του (όγκος υλικού + όγκος πόρων). Το ανοικτό πορώδες εκφράζεται σε ποσοστό % κατ' όγκο. και είναι ο όγκος των ανοικτών πόρων του δοκιμίου, ως ποσοστό % του φαινόμενου όγκου του. Οι τέσσερις διαφορετικές πάστες τσιμέντου που μελετώνται συγκριτικά είναι από της συνθέσεις σκυροδέματος: CC1 (συμβατικό σκυρόδεμα), CC2 (πρόσθετος α.δ.) FAC (γαρμπυλοσκυρόδεμα) και SCC (αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα). Ο λόγος που απουσιάζει από τη δοκιμή ποροσιμετρίας η σύνθεση CC3 είναι το ότι η επιφανειακή προστασία που εφαρμόστηκε σε αυτήν δεν μεταβάλλει το εσωτερικό πορώδες. Έτσι γίνεται η παραδοχή πως η πάστα της σύνθεσης CC3 έχει το ίδιο πορώδες με τη σύνθεση CC1 καθότι έχουν ακριβώς τον ίδιο σχεδιασμό σύνθεσης.

Πίνακας 7. 13 Αποτελέσματα πορώδους όπως προέκυψαν από τη ποροσιμετρία υδραργύρου

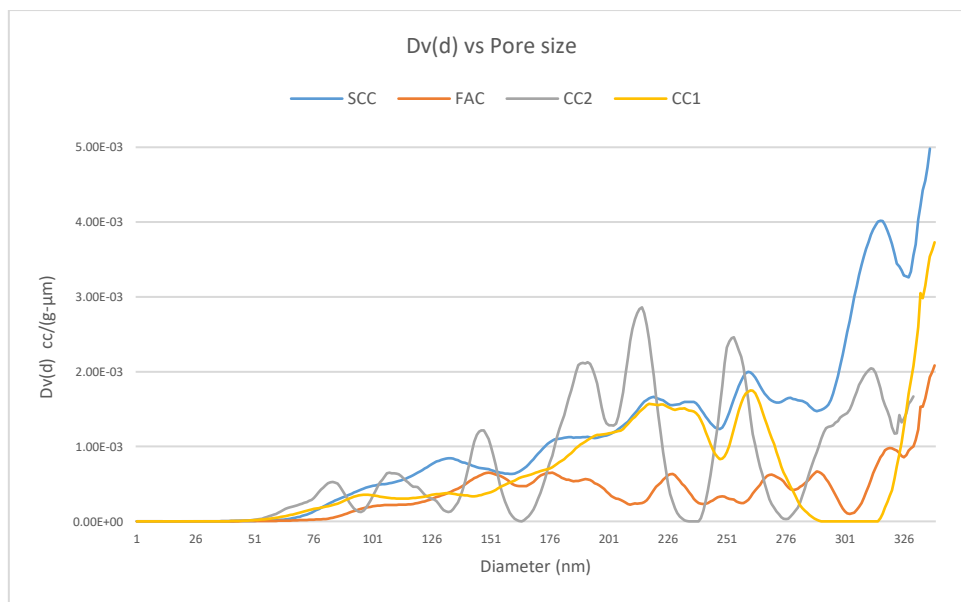
	Interparticle porosity %	Intraparticle porosity %	Total Porosity %
CC1	1.35	8.29	9.64
CC2	0.39	8.55	8.94
FAC	1.91	7.24	9.15
SCC	1.06	7.70	8.76

Προκειμένου να εκτιμηθεί η πορώδης δομή της σκληρυμένης και ξηραμένης πάστας τσιμέντου έχουν χρησιμοποιηθεί: η διαφορική κατανομή μεγέθους πόρων (Σχήμα 7.59, 7.60) και η σχετική κατανομή του εισερχόμενου όγκου ως προς την ακτίνα των πόρων (Σχήμα 7.60). Καθώς η συσκευή ποροσιμετρίας αποτελείται από το πρώτο τμήμα (Low pressure station) που χρησιμεύει για τη μέτρηση μεγάλων πόρων ακτίνας $4,26 \div 950\mu\text{m}$, και το δεύτερο (High pressure station) για τη μέτρηση μικρότερων πόρων ακτίνας $0,0036 \div 10,66\mu\text{m}$, παρουσιάζονται δύο διαγράμματα διαφορικής κατανομής μεγέθους πόρων (Σχήμα 7.59, 7.60), ένα για την κάθε περίπτωση. Από την αθροιστική κατανομή εισερχόμενου όγκου ως προς την ακτίνα των πόρων εξάγονται σημαντικές παράμετροι. Μια

από αυτές είναι η κρίσιμη ακτίνα των πόρων. Η κρίσιμη ακτίνα των πόρων (r_{cr}) αντιστοιχεί στην ακτίνα όπου η κλίση της αθροιστικής κατανομής είναι πιο απότομη και προσδιορίζεται καλύτερα το σημείο που έχει μέγιστο η διαφορική κατανομή πόρων. Η κρίσιμη ακτίνα των πόρων ελέγχει το πόσο διαπερατό είναι το υλικό και είναι η ακτίνα που έχουν οι περισσότεροι διασυνδεδεμένοι πόροι και που επιτρέπει τη μέγιστη διάδοση χημικών ενώσεων εντός της πορώδους πάσσας.[39]

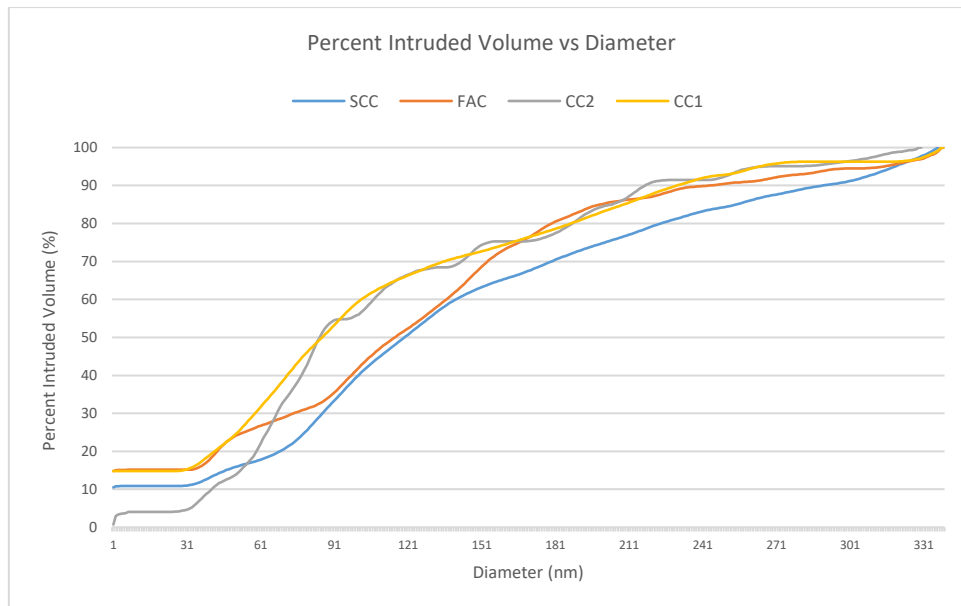


Σχήμα 7. 59 Διαφορική κατανομή μεγέθους πόρων ως προς την διάμετρο των πόρων (High pressure station) για τις συνθέσεις CC1, CC2, FAC και SCC



Σχήμα 7. 60 Διαφορική κατανομή μεγέθους πόρων ως προς την διάμετρο των πόρων (Low pressure station) για τις συνθέσεις CC1, CC2, FAC και SCC

Η σχετική κατανομή εισερχόμενου όγκου ως προς την ακτίνα των πόρων είναι μια καμπύλη η οποία παρουσιάζει το ποσοστό των πόρων σε όλο το εύρος των ακτινών. Η χρήση της καμπύλης αυτής έχει το πλεονέκτημά ότι επιτρέπει την απευθείας σύγκριση των κατανομών διαφορετικών δειγμάτων.



Σχήμα 7. 61 Σχετική κατανομή εισερχόμενου όγκου ως προς την ακτίνα των πόρων για τις συνθέσεις CC1, CC2, FAC και SCC

Οι πόροι που έχουν ακτίνα μεγαλύτερη από 10000 nm ονομάζονται κενά αέρος και είναι αυτόνομες φυσαλίδες σφαιρικού σχήματος οι οποίες προστατεύουν τους πόρους της πάστας τσιμέντου από φθορά που προέρχεται από ψύξη. Από τις κατανομές των δειγμάτων φαίνεται ότι τα ασβεστολιθικά τσιμέντα έχουν περισσότερους πόρους αυτού του μεγέθους σε σχέση με εκείνα που δεν περιέχουν ασβεστόλιθο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα ασβεστολιθικά τσιμέντα να έχουν καλύτερη συμπεριφορά έναντι κύκλων ψύξης-θέρμανσης. Οι πόροι με ακτίνα από 50 έως 10000 nm ονομάζονται μεγάλοι τριχοειδείς. Το τριχοειδές πορώδες θεωρείται ότι παίζει μεγάλο ρόλο στην μεταφορά ιόντων μέσα στην πάστα τσιμέντου ενώ αντίθετα δεν σχετίζεται με τον ρυθμό ενυδάτωσης της πάστας τσιμέντου. Από την κατανομή των πόρων των εξεταζόμενων δειγμάτων φαίνεται ότι οι μεγάλοι τριχοειδείς πόροι μειώνονται καθώς αυξάνεται το ποσοστό του ασβεστόλιθου στο τσιμέντο, συμπέρασμα που επιβεβαιώνεται και από την αθροιστική κατανομή πόρων, γεγονός που ενισχύει την εκτίμηση ότι ο ασβεστόλιθος δρα ως πληρωτικό υλικό. Επίσης, η απουσία πόρων σε αυτή την περιοχή δικαιολογεί και την μείωση της ακτίνας «κατώφλι». Οι πόροι με ακτίνα από 10 έως 50 nm ονομάζονται μεσαίοι τριχοειδείς. Οι πόροι αυτού του μεγέθους επηρεάζουν τη διαπερατότητα της πάστας του τσιμέντου και συνήθως εμφανίζονται ως αποτέλεσμα ορυκτών προσθέτων συστατικών. Όπως ήταν αναμενόμενο η προσθήκη ασβεστόλιθου στο τσιμέντο δημιουργεί μεγάλο ποσοστό πόρων αυτού του μεγέθους. Οι πόροι με ακτίνα από 2,5 έως 10 nm ονομάζονται μικροί τριχοειδείς. Αυτοί οι πόροι δεν σχετίζονται με την διαπερατότητα της πάστας τσιμέντου αλλά επηρεάζουν την συρρίκνωση. Τέτοιοι πόροι υπάρχουν σε όλα τα εξεταζόμενα δείγματα.

Τα συμπεράσματα από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο (7.8.1). Με μια πρώτη ανάγνωση των αποτελεσμάτων είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι τιμές πορώδους των τεσσάρων δοκιμίων είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Επίσης να σημειωθεί ξανά πως η δοκιμή έγινε σε κομμάτια πάστας τσιμέντου των δοκιμαζόμενων συνθέσεων. Η επιρροή των αδρανών στο πορώδες δεν αξιολογείται στη συγκεκριμένη δοκιμή, καθώς τα δείγματα που εισέρχονται στο όργανο πρέπει να είναι ορισμένων διαστάσεων. Να τονισθεί επίσης πως τα αποτελέσματα του πορώδους δεν δίνουν πληροφορίες για τη μορφή, το σχήμα, το μέγεθος καθώς και για την κατανομή των κοιλιοτήτων που αποτελούν ουσιώδη χαρακτηριστικά για τη συμπεριφορά του υλικού και τη διείσδυση του νερού.

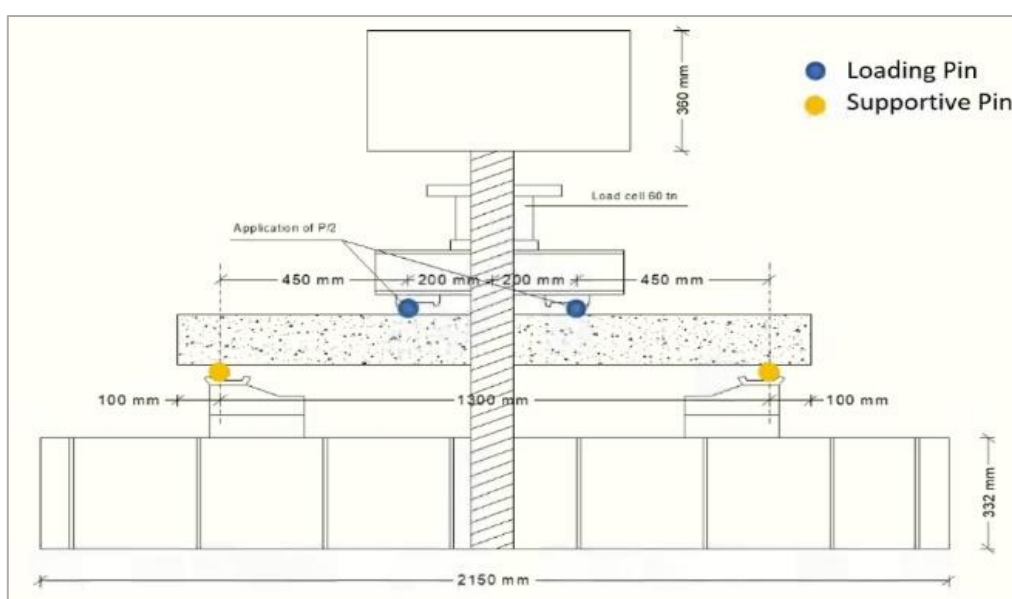
7.8.1. Μερικά Συμπεράσματα VIII

Παρατηρώντας τα Σχήματα 7.59-7.61 παραπάνω σε συνδυασμό με την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των ειδικών αλλά και του ολικού πορώδους για κάθε περίπτωση (Πίνακας 7.13), παρουσιάζονται και αναλύονται παρακάτω τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

- I. Το χαμηλότερο πορώδες είναι αυτό της σύνθεσης SCC η οποία κατέχει τον μικρότερο λόγο N/T. Αυτό επιβεβαιώνει την αντίληψη πως όσο περισσότερο είναι το νερό σε σχέση με το τσιμέντο, οι βελόνες των προϊόντων ενυδάτωσης γίνονται πιο αραιές, τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ των προϊόντων ενυδάτωσης των διπλανών κόκκων είναι σχετικά μεγάλα, με αποτέλεσμα η τάση που απαιτείται για να σπάσει αυτός ο «δεσμός», να είναι σχετικά μικρή και τα κενά να περιορίζονται. Όταν ο λόγος N/T είναι μικρότερος (0,4 έναντι 0,5), οι βελόνες των προϊόντων ενυδάτωσης έχουν πυκνό σχηματισμό, τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ τους είναι σχετικά μικρά, με αποτέλεσμα η τάση που απαιτείται για να «σπάσει» αυτός ο δεσμός να είναι μεγαλύτερη (μεγαλύτερη αντοχή) και το πορώδες μειωμένο. Έτσι προκύπτει πως μια καλή ποιότητα σκυροδέματος (αυξημένη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, χαμηλός λόγος N/T, μεγάλη αντοχή) μπορεί πέρα από ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες να προσφέρει και ικανοποιητική ανθεκτικότητα στην κατασκευή.
- II. Στην περίπτωση του δοκιμίου της σύνθεσης SCC, η κρίσιμη ακτίνα πόρων είναι ελαφρώς μικρότερη από τις υπόλοιπες περιπτώσεις και αυτό υποδεικνύει ότι η πορώδης δομή της πάστας τσιμέντου ελέγχεται κυρίως από την ποσότητα της σκωρίας που περιέχει. Οι μεγάλοι τριχοειδείς πόροι (από 50 έως 10000 nm) μειώνονται καθώς το ποσοστό των προσθέτων συστατικών αυξάνεται. Όπως ήταν και αναμενόμενο η εισαγωγή προσθέτων συστατικών στο τσιμέντο αυξάνει τον αριθμό των μεσαίων τριχοειδών πόρων (από 10 έως 50 nm), οι οποίοι αποτελούν την πλειοψηφία των πόρων που εμφανίζονται στα σύνθετα τσιμέντα. Μικροί τριχοειδείς πόροι (από 2,5 έως 10 nm) εμφανίζονται σε όλα τα εξεταζόμενα τσιμέντα ενώ αποτελούν την πλειοψηφία στην περίπτωση του τσιμέντου Πόρτλαντ CEM I-32.5. Η κρίσιμη ακτίνα πόρων και των τεσσάρων συνθέσεων είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.
- III. Στο μείγμα της σύνθεσης FAC, όπου σύμφωνα με το σχεδιασμό περιέχει περισσότερα κλάσματα αδρανών καθώς είναι η μόνη σύνθεση που περιέχει ρύζι (4mm<d<8mm), παρατηρείται αυξημένος λόγος κενών στο διασωματιδιακό επίπεδο 1.91%. Επισημαίνεται πως 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. Το μεγάλο εύρος αδρανών που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη σύνθεση, αν και κατά γενική παραδοχή δεν αντιδρούν χημικά με το συγκολλητικό μέσο πιθανότατα να αύξησε την ποσότητα παιπάλης στο μίγμα, αυξάνοντας έτσι τον αριθμό των μεσαίων τριχοειδών πόρων, οι οποίοι αποτελούν την πλειοψηφία των πόρων που εμφανίζονται στα σύνθετα τσιμέντα.

7.9. Καμπτική Αντοχή Δοκών και Παρακολούθηση Ρηγματώσεων

Αντοχή σε κάμψη είναι η αντοχή που παρουσιάζουν τα δοκίμια όταν υποβάλλονται σε καμπτική καταπόνηση από φορτίο κάθετο προς τον άξονά τους. Ο υπολογισμός της καμπτικής αντοχής μιας διατομής υπολογίζεται με βάση την ισορροπία δυνάμεων και ροπών που αναπτύσσονται στην εξεταζόμενη διατομή του φορέα. Για να εκτιμηθεί η καμπτική συμπεριφορά των δοκιμίων Ο.Σ., εξετάστηκε ένα σύνολο 15 δοκιμίων από τις δοκούς που χρησιμοποιήθηκαν στο πεδίο υπό μονοτονική δοκιμή κάμψης 4 σημείων. Οι δοκοί είχαν καθαρό άνοιγμα $L = 1300\text{mm}$ και διατομή $b \times h = 250 \times 150\text{mm}^2$. Η διαμόρφωση του οπλισμού όπως περιεγράφηκε και προηγουμένως αποτελείται από 4 διαμήκεις ράβδους στις 4 γωνίες της διατομής, διαμέτρου $D = 12\text{mm}$, ενώ ταυτόχρονα τοποθετήθηκαν συνδετήρες (οπλισμός διάτμησης) διαμέτρου $D = 8\text{mm}$ κάθε 150mm . Η επικάλυψη του οπλισμού με σκυρόδεμα σχεδιάστηκε στα 20mm οδηγώντας σε αποτελεσματικό βάθος διατομής ίσο με $d = 130\text{mm}$. Σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης φαίνεται στο Σχήμα 7.62.



Σχήμα 7. 62 Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης δοκιμής κάμψης 4 σημείων

Το βέλος κάμψης των δοκών μετρήθηκε μέσω δέκα μηκυσιόμετρων DCDT τα οποία τοποθετήθηκαν σε 5 χαρακτηριστικά σημεία εκατέρωθεν της δοκού. Οι θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.62 είναι: στις θέσεις των δύο στηριγμάτων (κίτρινο χρώμα), στις θέσεις των δύο φορτίων $P/2$ (μπλε χρώμα) και στο μέσο της δοκού. Τα μηκυσιόμετρα στηρίχθηκαν σε δύο αμφιέριστες δοκούς αλουμινίου διαστάσεων $160 \times 1,5 \times 3\text{cm}$, οι οποίες στηρίχθηκαν σε μεταλλικές ράβδους $\Phi 8$ εγκάρσια τοποθετημένες σε ειδικές οπές στη θέση στηρίξεων των δοκών, στο μέσο του ύψους της διατομής. Το επιβαλλόμενο φορτίο P , η μετατόπιση του εμβόλου και το βέλος κάμψης καταγράφονταν καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος στο αυτόματο σύστημα καταγραφής. Μέσω της δοκιμής αυτής και με την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των συνθέσεων στις διαφορετικές εξωτερικές καταπονήσεις που δέχονται θα διαπιστωθεί κατά πόσο αυτές επηρέασαν τις μηχανικές τους ιδιότητες. Σημαντικό ρόλο σε αυτή την αλληλεπίδραση έχει η απώλεια συνεκτικότητας μεταξύ χάλυβα οπλισμού και σκυροδέματος. Σχετικά με τη συνοχή μεταξύ χάλυβα οπλισμού και σκυροδέματος, προηγούμενες μελέτες [166] έδειξαν ότι για χαμηλές τιμές διάβρωσης, η αντοχή της δοκού εμφανίζει την ίδια ή ακόμη και υψηλότερη τιμή από ό, τι στην περίπτωση των μη διαβρωμένων δοκών. Επίσης οι Ma et al. πρότειναν πως για ρυθμούς διάβρωσης $p_c < 2,41\%$ μπορεί να αγνοηθεί η επίδραση της διάβρωσης στη καμπτική συμπεριφορά της δοκού [167]. Αυτό συμβαίνει καθώς τα προϊόντα της οξειδωσίας σε αρχικό στάδιο δεν καταλαμβάνουν τόσο όγκο ώστε οι εσωτερικές τάσεις να οδηγήσουν σε ρηγματώση και στο στάδιο αυτό τα προϊόντα σκουριάς μπορούν να λειτουργήσουν ακόμη και προς

όφελος της συνεκτικότητας οπλισμού-σκυροδέματος. Καθώς σχεδόν όλοι οι ρυθμοί διάβρωσης στην παρούσα μελέτη υπολογίστηκαν κοντά σε αυτήν την οριακή τιμή, έχει παραμελήσει η επίδραση της διάβρωσης στις διαστάσεις του χάλυβα οπλισμού και στον υπολογισμό της καμπτικής αντοχής.

Πίνακας 7. 14 Θεωρητικός υπολογισμός καμπτικής αντοχής δοκού αναφοράς (P_f) και δοκού υπο διάβρωση (P_f')

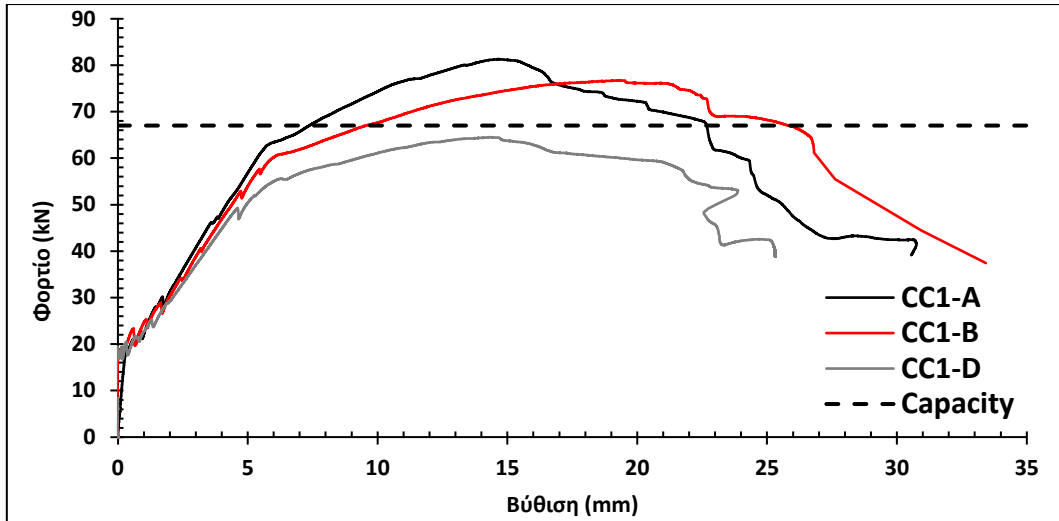
Beam name	P_f (kN) with full diameter D^*	Shear capacity $V_{RD,S}$ (kN)**	ρ_c (%) (Eq.2)	i ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) (mean value)	D' (mm) (Eq.3)	P_f' (kN) with diameter D'^*
CC1(A)	67.05		-	-	-	-
CC1(B)	67.05		2.76	1.43	11.93	66.37
CC1(D)	67.05		3.38	1.76	11.92	66.28
CC2(A)	66.68		-	-	-	-
CC2(B)	66.68		2.65	1.38	11.94	66.14
CC2(D)	66.68		2.97	1.54	11.93	66.05
CC3(A)	65.66		-	-	-	-
CC3(B)	65.66	39.50	2.79	1.45	11.93	65.04
CC3(D)	65.66		3.23	1.67	11.92	64.95
FAC(A)	70.77		-	-	-	-
FAC(B)	70.77		2.11	1.10	11.95	70.31
FAC(D)	70.77		2.84	1.47	11.93	70.12
SCC(A)	70.25		-	-	-	-
SCC(B)	70.25		1.37	0.71	11.97	69.98
SCC(D)	70.25		1.88	0.98	11.95	69.79

* $P_f=2M_f/a_v$, where M_f is the moment capacity

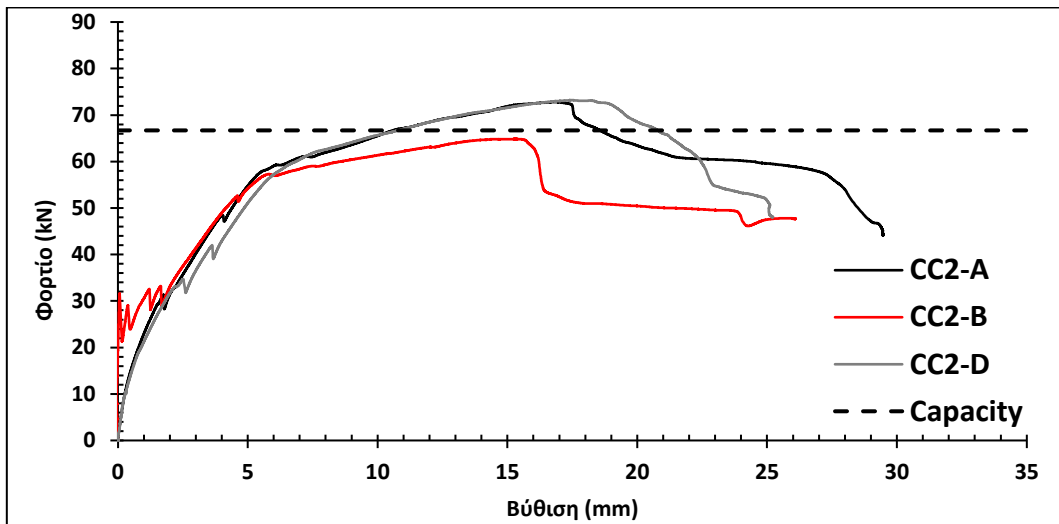
** $V_{RD,S}=(A_{sw}/s_w)*z*f_{yw}$, where $A_{sw}=2D8$, $s_w=150\text{mm}$, $z=0.9*d$,

f_{yw} =stirrups yield stress

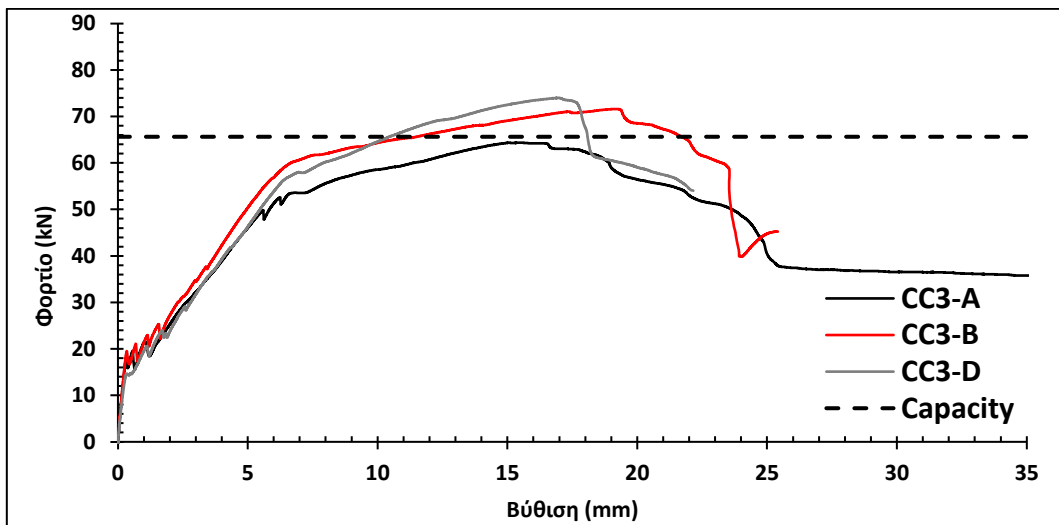
Η αντοχή σε κάμψη και διάτμηση υπολογίστηκε σύμφωνα με τις διατάξεις του EC2-1-1 [7] και συνοψίζεται στον Πίνακα 7.14. Το συνολικό φορτίο, P_f , αναφέρεται στο μέγιστο φορτίο που αντιστοιχεί στην ροπή M_f , ενώ η ικανότητα διάτμησης $V_{RD,S}$ είναι σε όλες τις περιπτώσεις χαμηλότερη από τη διάτμηση που αντιστοιχεί στο P_f ($V_{RD,S}>P_f/2$). Για λόγους σύγκρισης, υπολογίζονται επίσης οι τιμές, P_f και P_f' , που προσμετρούν την πλήρη και τη διαβρωμένη (μειωμένη) διάμετρο της ράβδου, αντίστοιχα. Οι κωδικές ονομασίες των δειγμάτων παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 7.1 και δόθηκαν ως εξής. Περίπτωση A: αναφέρεται σε μη διαβρωμένες δοκούς (δοκίμια αναφοράς), Περίπτωση B: αναφέρεται σε αφόρτιστα δοκίμια που εκτίθενται σε διαβρωτικές συνθήκες και Περίπτωση D για δείγματα που εκτίθενται σε διαβρωτικές συνθήκες με ταυτόχρονη μόνιμη φόρτιση η οποία ανέρχεται στο 20% του φορτίου λειτουργικότητας. Στα Σχήματα 7.63-7.67 παρουσιάζονται τα διαγράμματα φόρτισης-παραμόρφωσης για κάθε εξεταζόμενη σύνθεση (CC1, CC2, CC3, FAC, SCC) σε κάθε περίπτωση έκθεσης.



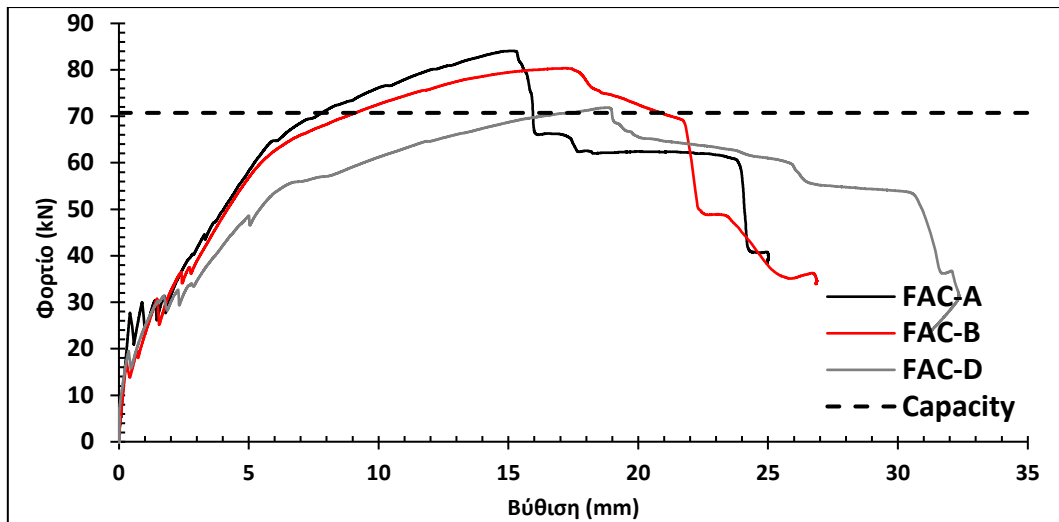
Σχήμα 7. 63 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης δοκού της σύνδεσης CC1 για κάθε περίπτωση έκθεσης (A,B,D)



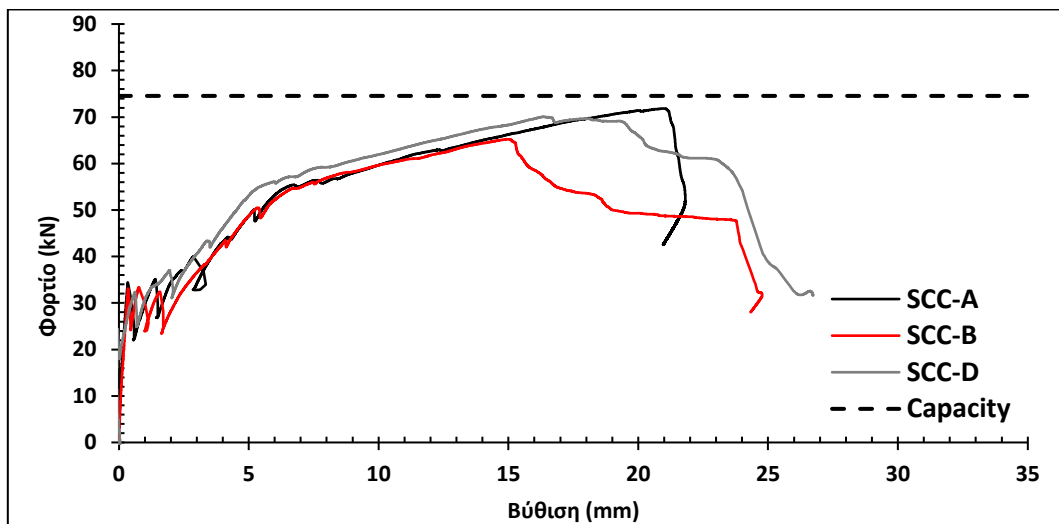
Σχήμα 7. 64 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης δοκού της σύνδεσης CC2 για κάθε περίπτωση έκθεσης (A,B,D)



Σχήμα 7. 65 Διάγραμμα φορτίου-βύθισης δοκού της σύνδεσης CC3 για κάθε περίπτωση έκθεσης (A,B,D)



Σχήμα 7. 66 Διάγραμμα φορτίου-θύθισης δοκού της σύνθεσης FAC για κάθε περίπτωση έκθεσης (A,B,D)



Σχήμα 7. 67 Διάγραμμα φορτίου-θύθισης δοκού της σύνθεσης SCC για κάθε περίπτωση έκθεσης (A,B,D)

Στον Πίνακα 7.15 συνοψίζονται τα εξαγόμενα πειραματικά αποτελέσματα. Η πλαστιμότητα για κάθε δοκίμιο υπολογίζεται με την παραδοχή τέλειας πλαστικής κατάστασης. Η τελική μετατόπιση, u_t , αντιστοιχεί σε απώλεια 20% του μέγιστου φορτίου P_{max} , όπου θεωρείται ότι συμβαίνει αστοχία. Το ισοδύναμο σημείο απόδοσης υπολογίζεται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, εξισώνοντας την περιοχή των δύο καμπυλών, ενώ η αρχική κλίση της καμπύλης ορίζεται έτσι ώστε να τέμνει την πραγματική καμπύλη στο σημείο που αντιστοιχεί στο 75% του υπολογιζόμενου σημείου απόδοσης, P_y , όπως πρότειναν οι Paulay και Priestley. [168]

Πίνακας 7. 15 Πειραματικά αποτελέσματα των δοκών που μελετήθηκαν σε δοκιμή κάμψης 4 σημείων

	P_{max} (kN)	$P_y=P_u$ (kN)	d_y (mm)	d_u (mm)	d_u/d_y
CC1.A	81.31	76.26	6.72	22.74	3.38
CC1.B	76.74	73.05	6.78	26.81	3.95
CC1.C	64.49	61.94	5.60	23.74	4.24
CC2.A	72.29	66.19	5.80	26.72	4.61
CC2.B	64.68	62.09	6.59	23.28	3.53
CC2.C	73.19	69.86	6.91	22.62	3.27
CC3.A	64.38	60.71	6.56	22.68	3.45
CC3.B	71.61	68.05	6.78	23.55	3.47
CC3.C	73.98	69.16	7.62	19.94	2.62
FAC.A	84.08	81.98	7.22	15.98	2.21
FAC.B	80.35	76.31	6.73	21.88	3.25
FAC.C	71.88	66.79	7.24	26.22	3.62
SCC.A	71.85	70.93	8.00	21.65	2.71
SCC.B	62.23	63.02	6.35	18.61	2.93
SCC.C	70.08	67.19	6.11	23.83	3.90

Στις ακόλουθες παραγράφους (7.9.1, 7.9.2) γίνεται μια σύγκριση της συμπεριφοράς των δοκών ανάλογα με το είδος επιπόνησης που δέχθηκαν, τόσο κατά τη διάρκεια της φόρτισης όσο και στα τελικά αποτελέσματα αντοχής. Μέσω της σύγκρισης αυτής θα αξιολογηθεί η επιρροή της διάβρωσης αλλά και της μόνιμης φόρτισης στην τελική καμπτική αντοχή της δοκού. Η βασική παράμετρος που θα καθορίσει αυτόν το συσχετισμό είναι ο βαθμός που έχει προχωρήσει η διάβρωση του οπλισμού και κατ' επέκταση το στάδιο στο οποίο βρίσκεται η εσωτερική ρηγμάτωση. Στο πρώτο στάδιο, μια ζώνη πορώδους υπάρχει γύρω από την ράβδο χάλυβα, την οποία γεμίζουν τα προϊόντα σκουριάς προτού ασκήσουν εσωτερικές τάσεις στο γύρω σκυρόδεμα. Σύμφωνα με τα σύνθετα ένυδρα της σκουριάς, η περιοχή που περιβάλλει την ράβδο διογκώνεται και αυξάνεται ο όγκος της από δύο έως έξι φορές. Όταν τα χλωριόντα εισέρχονται στην επικάλυψη του σκυροδέματος, βαθμιαία γεμίζουν την ζώνη του πορώδους γύρω από την επιφάνεια της ράβδου και του σκυροδέματος. Όταν οι ακτινικές τάσεις στο περιβάλλον σκυρόδεμα είναι μηδενικές, τότε ποσοστό της μάζας του χάλυβα χάνεται. Ο όγκος της διαβρωμένης ράβδου αυξάνεται περισσότερο από επιπρόσθετα προϊόντα σκουριάς που ασκούν επιπλέον τάσεις διόγκωσης κατά το δεύτερο στάδιο. Το περιβάλλον σκυρόδεμα βρίσκεται υπό ακτινική πίεση και ρηγματώνεται όταν η ακτινική πίεση αποκτήσει την τιμή της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος και επιπλέον ποσοστό της μάζας του χάλυβα χάνεται. Στο τρίτο στάδιο η διαβρωμένη ράβδος υφίσταται περαιτέρω ακτινική διόγκωση και αυξάνει το εύρος της ρωγμής όπως μετρείται από την εξωτερική επιφάνεια. Έπειτα από την εμφάνιση της ρηγμάτωσης στο σκυρόδεμα, η περιοχή που περικλείει το σκυρόδεμα παρουσιάζει παρόμοια ευκαμψία καθώς επίσης και παρόμοιο ρυθμό μεταβολής του όγκου λόγω της σκουριάς. Στο Σχήμα 7.68 παρουσιάζονται παραδείγματα φωτογραφιών των καμπτικών ρωγμών που σχηματίστηκαν στις δοκούς μετά την αστοχία, όπως καταγράφηκαν από το μικροσκόπιο.



Σχήμα 7. 68 Παρακολούθηση και καταγραφή πλάτους ρωγμών με ειδικό μικροσκόπιο

Για την καταγραφή των ρωγμών χρησιμοποιήθηκε ρωγμόμετρο ενσωματωμένο σε μικροσκόπιο με μεγέθυνση 20X και εύρος μετρήσεων από 0.02mm έως 15mm. Το μικροσκόπιο διαθέτει φακό υψηλή ευκρίνειας που σε συνδυασμό με το ενσωματωμένο φως και την κλίμακα μέτρησης που διαθέτει κατέστησαν δυνατή την ανίχνευση και την μέτρηση του εύρους των ρωγμών στις δοκούς. Η κλίμακα μέτρησης είναι χωρισμένη σε τμήματα 0,2mm, τα οποία υποδιαιρούνται σε τμήματα 0,02mm (Σχήμα 7.68) [169]. Στον Πίνακα 7.16 παρουσιάζεται το πλάτος ρωγμών των δοκών σκυροδέματος όπως καταγράφηκαν με το μικροσκόπιο μετά την αστοχία τους. Για κάθε δοκίμιο μετρήθηκαν 4 αντιπροσωπευτικές ρωγμές σε 10 χαρακτηριστικά σημεία και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.16 είναι ο μέσος όρος αυτών των μετρήσεων. Αναλυτικά όλες οι μετρήσεις παρουσιάζονται στο Παράρτημα του παρόντος (Κεφάλαιο 10.1 - Appendix.b. Πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών)

Πίνακας 7. 16 Μέσο πλάτος ρωγμών για κάθε περίπτωση όπως μετρήθηκαν με το ρωγμόμετρο

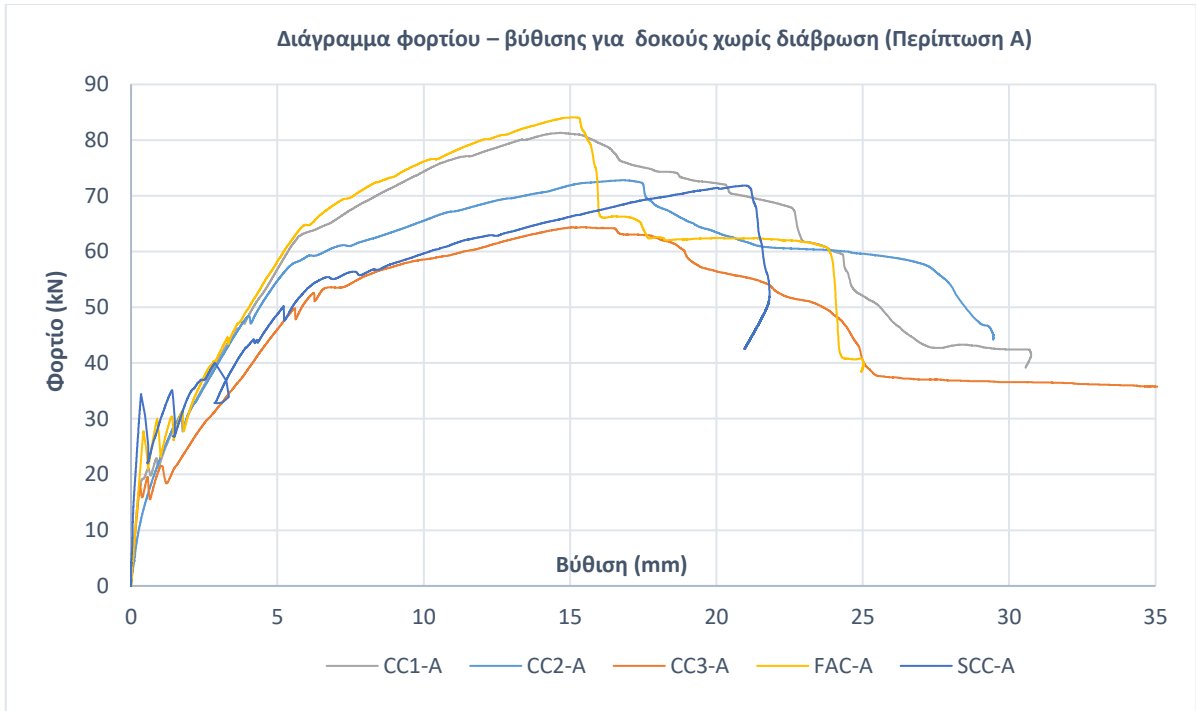
Σύνθεση	Μ.Ο. πλάτους ρωγμών (mm) (Περίπτωση Α)	Μ.Ο. πλάτους ρωγμών (mm) (Περίπτωση Β)	Μ.Ο. πλάτους ρωγμών (mm) (Περίπτωση D)
CC1	0,79	0,75	1,14
CC2	0,73	1,31	1,44
CC3	2,12	1,93	1,69
FAC	1,02	0,71	1,49
SCC	1,14	1,57	1,98

Στη δοκό οπλισμένου σκυροδέματος με την αύξηση του φορτίου αναπτύσσονται εφελκυστικές και διατμητικές τάσεις που υπερβαίνουν την εφελκυστική και διατμητική, αντίστοιχα, αντοχή του σκυροδέματος, κατά συνέπεια η δοκός αρχίζει να ρηγματώνεται, παρά την τοποθέτηση του οπλισμού. Λόγω της πολύ μικρής τιμής της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος, οι καμπτικές ρωγμές εμφανίζονται για πολύ μικρή στάθμη του φορτίου (μικρό ποσοστό της φέρουσας ικανότητας της δοκού) [170]. Με την αύξηση του φορτίου, όμως, οι αρχικά αόρατες ρωγμές διευρύνονται και για στάθμη φορτίου 30% περίπου της φέρουσας ικανότητας γίνονται ορατές. Με περαιτέρω αύξηση του φορτίου και μέχρι τη στάθμη 50 έως 60% της φέρουσας ικανότητας, το άνοιγμα και το μήκος των ρωγμών παραμένουν περίπου σταθερά (λόγω και της ενδεχόμενης εμφάνισης νέων ρωγμών). Πέρα από τη στάθμη αυτή, περαιτέρω αύξηση του φορτίου επιταχύνει το ρυθμό εξέλιξης των ρωγμών με συνέπεια την αστοχία της δοκού. Η κατάσταση της δοκού στη στάθμη 50 έως 60% της φέρουσας ικανότητας που αντιστοιχεί στο φορτίο λειτουργίας της δοκού περιγράφεται ως οριακή κατάσταση λειτουργικότητας και, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, χαρακτηρίζεται από ελεγχόμενη ρηγματώση [171]. Στην παρούσα ερευνητική διαδικασία μελετήθηκαν μόνιμες φορτίσεις σε ποσοστά 7 και 20% της φέρουσας ικανότητας των δοκών. Σύμφωνα με τα παραπάνω εσωτερικές ρωγμές αναμένεται να έχουν δημιουργηθεί στο εσωτερικό των δοκών ωστόσο, όπως παρατηρήθηκε και στην πράξη, αυτές δεν έφτασαν την επιφάνεια τους δεν έγιναν δηλαδή ορατές. Παρακάτω αναλύεται ξεχωριστά η καμπτική συμπεριφορά των συνθέσεων, όπως καταγράφηκε από τη δοκιμή κάμψης 4 σημείων, για κάθε περίπτωση έκθεσης δηλαδή για τις δοκούς αναφοράς (Κεφάλαιο 7.9.1), για τις διαβρωμένες δοκούς χωρίς φόρτιση (Κεφάλαιο 7.9.2) και για τις διαβρωμένες δοκούς με μόνιμη φόρτιση (Κεφάλαιο 7.9.3).

7.9.1. Καμπτική αντοχή μη διαβρωμένων δοκών – δοκιμών αναφοράς (Περίπτωση Α)

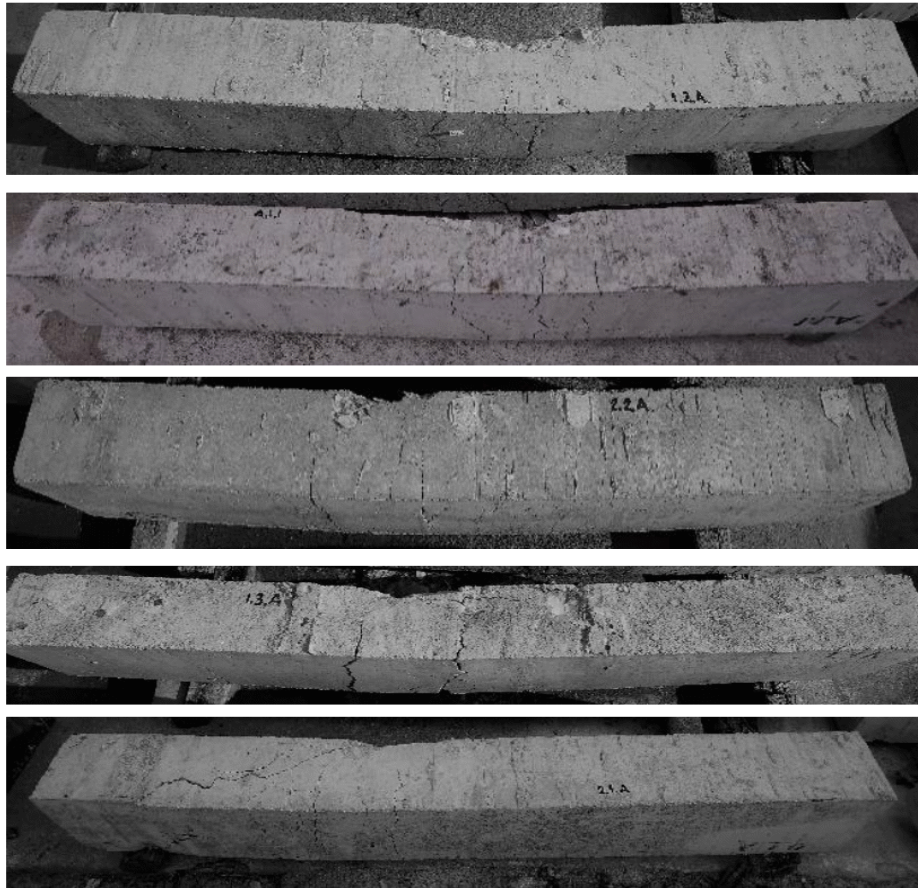
Στην παράγραφο αυτή μελετώνται τα αποτελέσματα της καμπτικής αντοχής των δοκών αναφοράς για κάθε σύνθεση, δηλαδή οι περιπτώσεις CC1-A, CC2-A, CC3-A, FAC-A, SCC-A. Σε πρώτο στάδιο γίνεται ανάλυση της συμπεριφοράς των δοκών αναφοράς κατά τη διάρκεια της δοκιμής κάμψης 4 σημείων με την παρακολούθηση των φορτίσεων και των αντίστοιχων μετατοπίσεων. Στη συνέχεια και μετά το τέλος της δοκιμής κάμψης όπου οι δοκοί έχουν αστοχήσει, γίνεται μια οπτική παρατήρηση του μοτίβου των ρηγματώσεων που εμφανίστηκαν στην επιφάνειά τους.

Η δοκός για κάθε σύνθεση που δεν διαβρώθηκε ούτε φορτίστηκε ώστε να λειτουργήσει ως αναφοράς παρουσίασε καμπτική συμπεριφορά με διαρροή του εφελκυστικού χαλύβδινου οπλισμού και τελικά θραύση του σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη. Το σκυροδέμα ρηγματώθηκε αρχικά στο μεσαίο καμπτικό άνοιγμα της δοκού. Σε υψηλότερα φορτία που αντιστοιχούν στο επίπεδο της λειτουργικότητας της δοκού, περισσότερες ρωγμές σχηματίστηκαν στο μεσαίο καμπτικό άνοιγμα και αύξησαν το εύρος τους. Στα διατμητικά ανοίγματα σχηματίστηκαν καμπτοδιατμητικές ρωγμές που είχαν αρκετά μικρότερο εύρος. Η διαρροή του εφελκυστικού χάλυβα καταγράφηκε για βυθίσεις της δοκού από $\delta_y=5.8\text{mm}$ έως $\delta_y=8\text{mm}$, όπως σημειώθηκε από τις παραμορφώσεις που μετρήθηκαν από τα 10 ηλεκτρικά παραμορφωσιόμετρα που είχαν επικολληθεί εκατέρωθεν της δοκού. Η αστοχία των δοκών επήλθε λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη, ενώ το φορτίο αστοχίας των δοκών αναφοράς κυμαινόταν από $P_u=60.7\text{kN}$ έως $P_u=81.98\text{kN}$ με αντίστοιχες βυθίσεις από $\delta_u=15.98\text{mm}$ έως $\delta_u=26.72\text{mm}$. Παρατηρείται πως την μέγιστη καμπτική αντοχή καταγράφει η σύνθεση FAC ενώ το μικρότερο αποτέλεσμα είχε η δοκός της σύνθεσης CC3. Επίσης παρατηρείται πως τις μεγαλύτερες βυθίσεις είχαν οι δοκοί των συνθέσεων CC1, CC2, CC3 με αντίστοιχες τιμές $\delta_u=26.72\text{mm}$, 22.68mm και 22.74mm ενώ τις μικρότερες βυθίσεις είχαν οι δοκοί των συνθέσεων FAC και SCC ($\delta_u=15.98\text{mm}$, 21.65mm). Στο Σχήμα 7.69 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά το διάγραμμα φορτίου P (kN) – βύθισης δ (mm) για τις δοκούς χωρίς διάβρωση.



Σχήμα 7. 69 Διάγραμμα φορτίου P (kN) – βύθισης d (mm) για τις δοκούς αναφοράς κάθε σύνθεσης

Όλες οι ρωγμές αυξήθηκαν αρκετά μετά την αστοχία, με την μέγιστη να έχει υπερβεί τα 3.00mm (3.4mm στην δοκό CC3-A) και την μέγιστη καμπτοδιατμητική ρωγμή να έχει εύρος 0.60mm. Στο Παράρτημα του παρόντος εντοπίζονται όλες οι μετρήσεις του εύρους ρωγμών όπως πραγματοποιήθηκαν με το ειδικό μικροσκόπιο καθώς και αναλυτικά οι μετρήσεις βύθισης των δοκών στο χρόνο κατά τη διάρκεια της δοκιμής κάμψης. Η μορφολογία των ρωγμών στην κατάσταση αστοχίας όλων των μη διαβρωμένων δοκών παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.70.



Σχήμα 7. 70 : Μοτίβο ρωγμών μετά το πέρας της φόρτισης έως την αστοχία των δοκών αναφοράς (Περίπτωση Α) σε πλάγια όψη

Παρατηρείται πως οι καμπτικές ρωγμές αναπτύχθηκαν μεταξύ των δύο σημείων επιβολής φορτίου και καμπτο-διατμητικές ρωγμές μικρότερου εύρους στην υπόλοιπα τμήματα των δοκών. Επίσης εμφανίζεται συγκέντρωση των παραμορφώσεων σε ένα ή δύο σημεία στο μέσο του ανοίγματος, με διεύρυνση μίας ή δύο ρωγμών και πολλές τριχοειδείς ρωγμές. Μια πρώτη ανάγνωση του Σχήματος 7.70 φανερώνει πως πέρα από μικρές διαφοροποιήσεις οι οποίες αναλύονται παρακάτω, όλες οι δοκοί παρουσίασαν παρόμοια μορφολογία ρωγμών. Αναλυτικά τα αποτελέσματα της καταγραφής του εύρους των ρωγμών (μέσος όρος, μέγιστη και ελάχιστη τιμή) για την κάθε σύνθεση στην περίπτωση που εξετάζεται (Περίπτωση Α) παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.17.

Πίνακας 7. 17 Πλάτος ρωγμών (μ.ο., max, min) για κάθε περίπτωση όπως μετρήθηκαν με το ρωγμόμετρο

Σύνθεση	Μ.Ο. πλάτους ρωγμών (mm)	Ελάχιστο πλάτος ρωγμών (mm)	Μέγιστο πλάτους ρωγμών (mm)
CC1-A	0,79	0,4	1,1
CC2-A	0,73	0,3	1,8
CC3-A	2,12	0,4	3,4
FAC-A	1,02	0,3	1,6
SCC-A	1,14	0,8	2

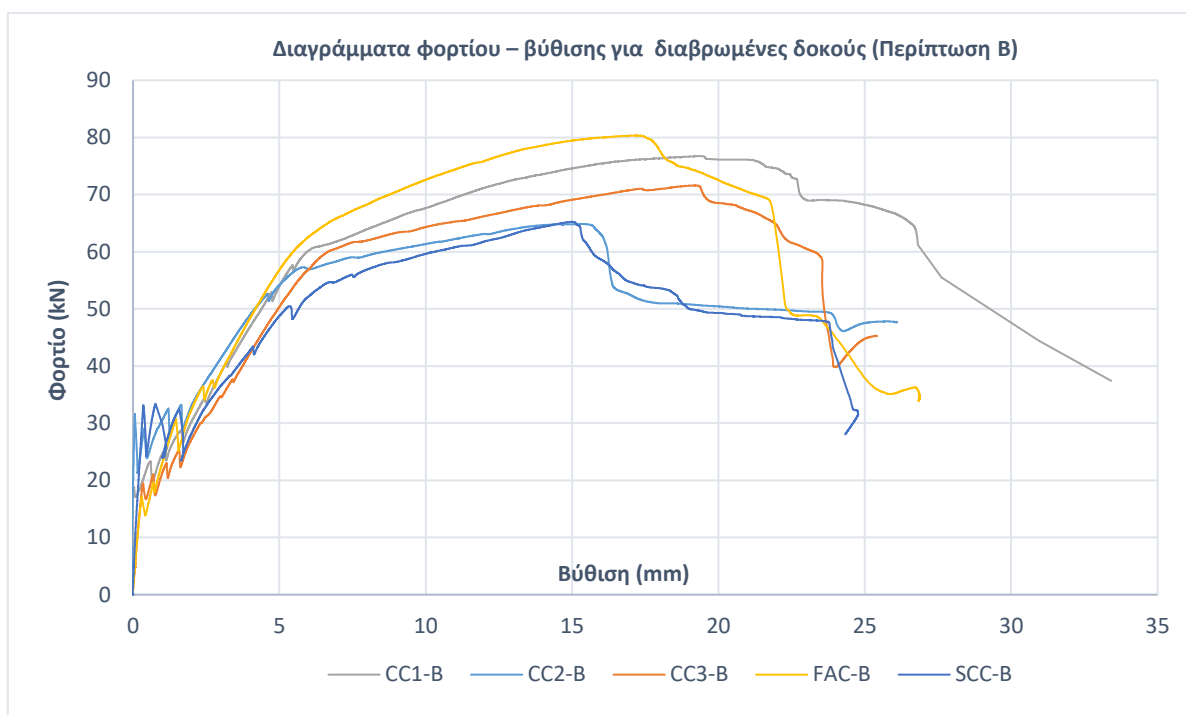
Η μη διαβρωμένη δοκός της σύνθεσης CC3-A ανέπτυξε περισσότερες ρωγμές και η απόσταση μεταξύ των ρωγμών ήταν σχετικά μικρότερη σε σχέση με τις αντίστοιχες των υπολοίπων. Όμως, οι μέγιστες καμπτικές ρωγμές της μη διαβρωμένης δοκού CC3 είχαν μεγαλύτερο εύρος που κυμαινόταν από 0.40-3.40 mm, ενώ οι αντίστοιχες καμπτικές ρωγμές των υπολοίπων δοκών ήταν μικρότερες σε εύρος, μεταξύ 0.40-2.30 mm για το ίδιο ύψος της διατομής της έντονα ρηγματωμένης διατομής. Στο Σχήμα 7.70 στο άνω μέρος των δοκών διαφαίνονται τα τμήματα σκυροδέματος στο μέσο τους που αποκολλήθηκαν κατά την διάρκεια της φόρτισης.

7.9.2. Καμπτική αντοχή διαβρωμένων δοκών χωρίς φόρτιση (Περίπτωση Β)

Στην παράγραφο αυτή μελετώνται τα αποτελέσματα καμπτικής αντοχής των διαβρωμένων δοκών χωρίς φόρτιση για κάθε σύνθεση, δηλαδή τα δοκίμια CC1-B, CC2-B, CC3-B, FAC-B, SCC-B. Σε πρώτο στάδιο γίνεται ανάλυση της συμπεριφοράς των προαναφερθέντων δοκών κατά τη διάρκεια της δοκιμής κάμψης 4 σημείων με την παρακολούθηση των φορτίσεων, των αντίστοιχων μετατοπίσεων αλλά και των αρχικών ρηγματώσεων. Στη συνέχεια και μετά το τέλος της δοκιμής κάμψης όπου η δοκός έχει αστοχήσει, γίνεται παρατήρηση και καταγραφή του μοτίβου των ρηγματώσεων που εμφανίστηκαν.

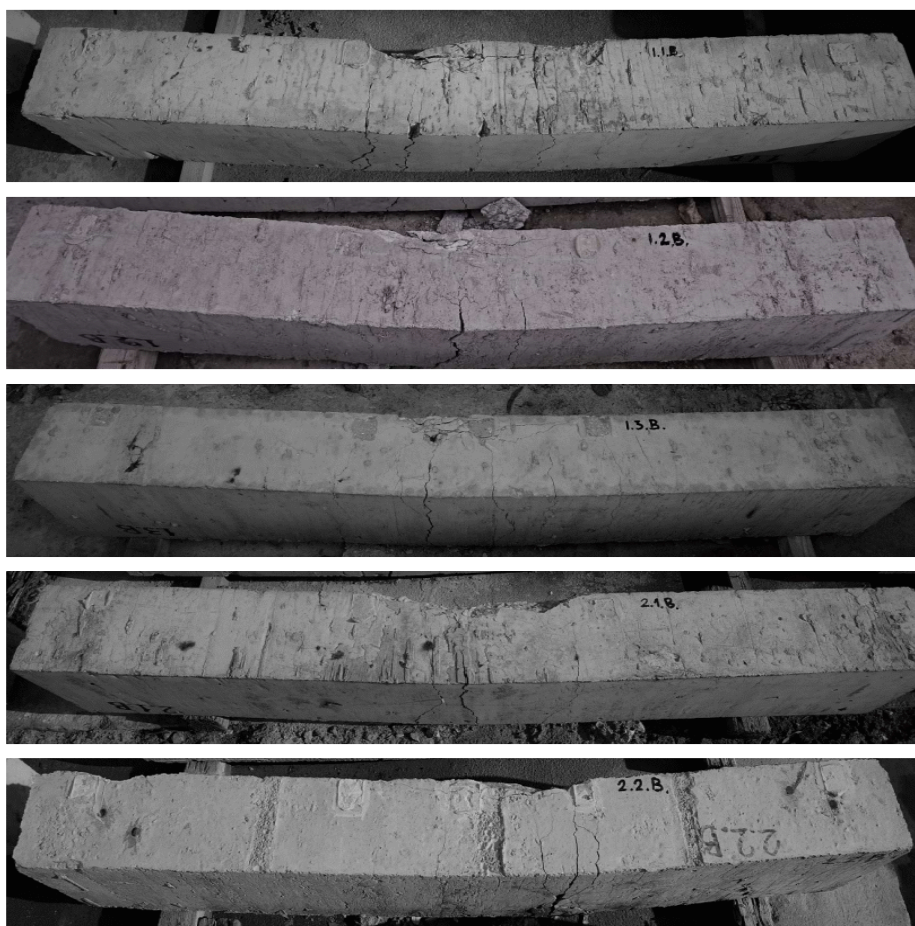
Οι δοκοί που διαβρώθηκαν χωρίς την παρουσία μόνιμης φόρτισης (Περίπτωση Β), παρουσίασαν τις πρώτες ρωγμές στο σκυρόδεμα σε λίγο μεγαλύτερα φορτία και βυθίσεις με εύρος από $\delta_{cr}=0.4\text{mm}$ έως $\delta_{cr}=1.6\text{mm}$. Η πρώτη ρωγή είχε εύρος μικρότερο από 0.10 mm και σχηματίστηκε στην μεσαία καμπτική περιοχή και στην θέση του συνδετήρα προς τα αριστερά. Σε φορτία που αντιστοιχούν στα φορτία λειτουργικότητας, περισσότερες καμπτικές ρωγμές αναπτύχθηκαν στο μέσον του ανοίγματος της δοκού με εύρος που δεν ξεπερνούσε τα 0.30 mm, ενώ οι διαμήκεις ρωγμές λόγω διάβρωσης δεν αύξησαν το εύρος τους. Παράλληλα, σχηματίστηκαν ρωγμές και στα διατμητικά ανοίγματα της δοκού με εύρος που δεν ξεπερνούσε τα 0.10 mm.

Η διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα καταγράφηκε για βυθίσεις των δοκών από $\delta_y=6.3\text{mm}$ έως $\delta_y=6.8\text{mm}$, όπως σημειώθηκε από τις παραμορφώσεις που μετρήθηκαν από τα 10 ηλεκτρικά παραμορφωσιόμετρα που είχαν επικολληθεί εκατέρωθεν της δοκού. Οι βυθίσεις αυτές είναι χαμηλότερες σε σχέση με τις δοκούς χωρίς διάβρωση (δοκούς αναφοράς) κατά 10.1%. Το εύρος των καμπτικών ρωγμών στο μεσαίο άνοιγμα κυμαινόταν μεταξύ 0.40-3.40 mm, ενώ στα διατμητικά ανοίγματα της δοκού το μέγιστο εύρος μετρήθηκε 0.20 mm. Η καμπτική αντοχή των διαβρωμένων δοκών χωρίς φόρτιση (κωδικός Β) ήταν κατά 4.9% μειωμένη σε σχέση με των μη διαβρωμένων δοκών. Όσο η δοκός συνέχιζε να παραλαμβάνει βυθίσεις, περισσότερα τμήματα του ρηγματωμένου υποστρώματος αποκολλούνταν στην μεσαία περιοχή της δοκού. Η μέγιστη ρωγή στο καμπτικό άνοιγμα ξεπέρασε σε εύρος τα 3.00 mm στην σύνθεση SCC-B ενώ η μέγιστη ρωγή στα διατμητικά ανοίγματα μετρήθηκε ίση με 0.50 mm. Σημειώνεται ότι δεν παρατηρήθηκε αύξηση του εύρους της διαμήκους ρωγμής λόγω της οξειδωσης του οπλισμού κατά την διάρκεια της φόρτισης των δοκών. Τελικά, οι δοκοί αστόχησαν λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη, σε φορτίο που κυμαινόταν από $P_u=62.09\text{kN}$ έως $P_u=76.3\text{kN}$ με αντίστοιχες βυθίσεις από $\delta_u=18.61\text{mm}$ έως $\delta_u=26.81\text{mm}$. Η αύξηση στην ικανότητα βυθίσεων των διαβρωμένων δοκών χωρίς φόρτιση ήταν οριακά μεγαλύτερη κατά 3.12% σε σχέση με των μη διαβρωμένων δοκών. Παρατηρείται πως την μέγιστη καμπτική αντοχή στις αφόρτιστες διαβρωμένες δοκούς, καταγράφει η σύνθεση FAC (76.31kN) ενώ το μικρότερο αποτέλεσμα είχε η δοκός της σύνθεσης CC2 (62.09kN). Επίσης παρατηρείται πως τις μεγαλύτερες βυθίσεις είχαν οι δοκοί των συνθέσεων CC1, CC2, CC3 με αντίστοιχες τιμές $\delta_u=26.81\text{mm}$, 23.28mm και 23.55mm ενώ τις μικρότερες βυθίσεις είχαν οι δοκοί των συνθέσεων FAC και SCC ($\delta_u=15.98\text{mm}$ και 21.65mm). Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τη συμπεριφορά των αντίστοιχων μη διαβρωμένων δοκών (Περίπτωση Α). Στο Σχήμα 7.71 παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου P (kN) –βύθισης δ (mm) για τις διαβρωμένες δοκούς χωρίς μόνιμη φόρτιση.



Σχήμα 7. 71 Διάγραμμα φορτίου P (kN) – βύθισης d (mm) για τις διαβρωμένες δοκούς κάθε σύνδεσης

Όλες οι ρωγμές αυξήθηκαν αρκετά μετά την αστοχία, με την μέγιστη να έχει υπερβεί τα 3.00mm (3.4mm στην δοκό SCC-B) και την μέγιστη καμπτοδιατμητική ρωγμή να έχει εύρος 0.50mm. Στο Παράρτημα του παρόντος εντοπίζονται όλες οι μετρήσεις του εύρους ρωγμών όπως πραγματοποιήθηκαν με το ειδικό μικροσκόπιο. Η μορφολογία των ρωγμών στην κατάσταση αστοχίας όλων των διαβρωμένων δοκών χωρίς φόρτιση παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.72.



Σχήμα 7. 72 Μοτίβο ρωγμών μετά την αστοχία των αφόρτιστων δοκών με διαβρωτικές συνθήκες σε πλάγια όψη

Παρατηρείται ότι οι καμπτικές ρωγμές αναπτύχθηκαν μεταξύ των δύο σημείων επιβολής φορτίου και καμπτο-διατμητικές ρωγμές μικρότερου εύρους στην υπόλοιπα τμήματα των δοκών. Επίσης εμφανίζεται συγκέντρωση των παραμορφώσεων σε ένα ή δύο σημεία στο μέσο του ανοίγματος, με διεύρυνση μίας ή δύο ρωγμών και πολλές τριχοειδείς ρωγμές. Μια πρώτη ανάγνωση του Σχήματος 7.72 φανερώνει πως πέρα από μικρές διαφοροποιήσεις οι οποίες αναλύονται παρακάτω, όλα τα δοκίμια παρουσίασαν παρόμοια μορφολογία ρωγμών. Αναλυτικά τα αποτελέσματα της καταγραφής των ρωγμών (μέσος όρος, μέγιστη και ελάχιστη τιμή) για την κάθε σύνθεση στην περίπτωση που εξετάζεται (Περίπτωση Β) παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.18.

Πίνακας 7. 18 Πλάτος ρωγμών (μ.ο., max, min) για κάθε περίπτωση όπως μετρήθηκαν με το ρωγμόμετρο

Σύνθεση	Μ.Ο. πλάτους ρωγμών (mm)	Ελάχιστο πλάτος ρωγμών (mm)	Μέγιστο πλάτους ρωγμών (mm)
CC1-B	0,75	0,6	1,3
CC2-B	1,31	0,6	2,5
CC3-B	1,93	1,2	2,4
FAC-B	0,71	0,4	1,2
SCC-B	1,57	0,6	3,4

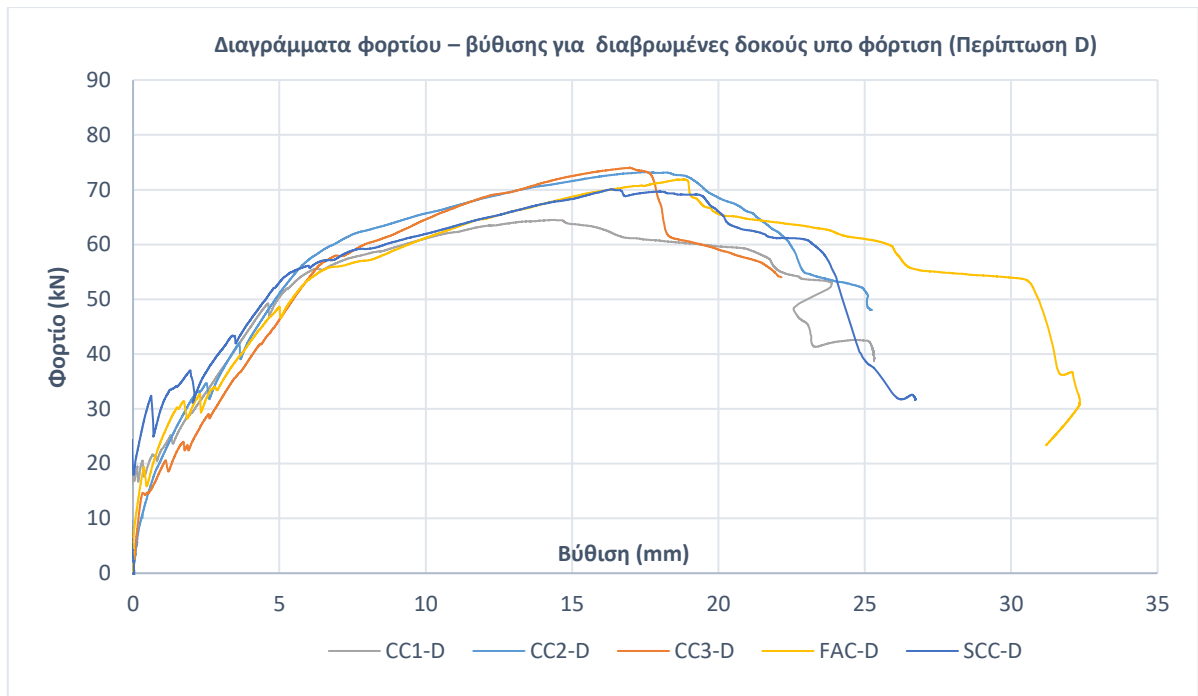
Η δοκός της σύνθεσης SCC ανέπτυξε περισσότερες ρωγμές και η απόσταση μεταξύ των ρωγμών ήταν μικρότερη σε σχέση με τις αντίστοιχες των υπολοίπων. Όμως, οι μέγιστες καμπτικές ρωγμές της διαβρωμένης δοκού SCC είχαν μεγαλύτερο εύρος που κυμαινόταν από 0.60-3.40 mm, ενώ οι αντίστοιχες καμπτικές ρωγμές των υπολοίπων δοκών ήταν μικρότερες και καταγράφηκαν μεταξύ 0.60-2.50 mm. Στο Σχήμα 7.72 φαίνονται για κάθε δοκό τα τμήματα σκυροδέματος στο μέσο τους που αποκολλήθηκαν κατά την διάρκεια της φόρτισης, ενώ χαρακτηριστική είναι στο σημείο αυτό η έλλειψη συνάφειας σκυροδέματος-χαλύβδινου οπλισμού.

7.9.3. Καμπτική αντοχή διαβρωμένων δοκών υπό μόνιμη φόρτιση (Περίπτωση D)

Στην παράγραφο αυτή μελετώνται τα αποτελέσματα καμπτικής αντοχής των διαβρωμένων δοκών υπό μόνιμη φόρτιση, ίση με το 20% του φορτίου λειτουργίας της δοκού για την κάθε σύνθεση, δηλαδή για τις δοκούς CC1-D, CC2-D, CC3-D, FAC-D, SCC-D. Σε πρώτο στάδιο γίνεται ανάλυση της συμπεριφοράς των προαναφερθέντων δοκών κατά τη διάρκεια της δοκιμής κάμψης 4 σημείων με την παρακολούθηση των φορτίσεων, των αντίστοιχων μετατοπίσεων αλλά και των ρηγματώσεων. Στη συνέχεια και μετά το τέλος της δοκιμής κάμψης όπου η δοκός έχει αστοχήσει, γίνεται μια οπτική αξιολόγηση του μοτίβου των ρηγματώσεων που εμφανίστηκε.

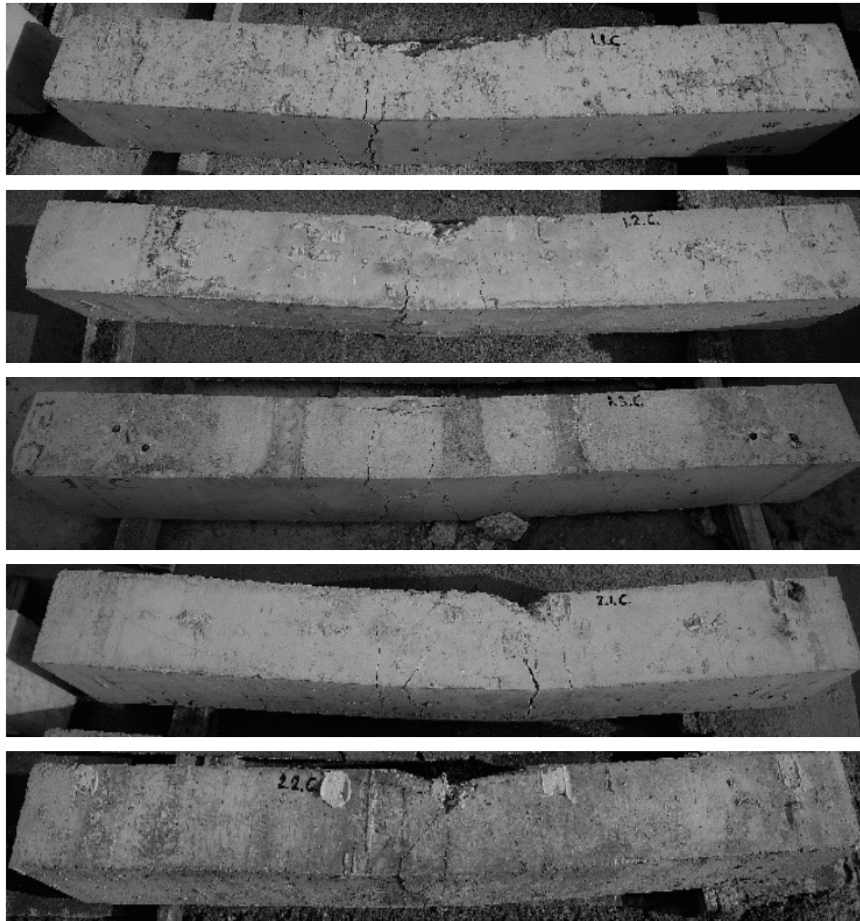
Η διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα καταγράφηκε για βυθίσεις των δοκών από $\delta_y=5.6\text{mm}$ έως $\delta_y=7.6\text{mm}$, όπως σημειώθηκε από τις παραμορφώσεις που μετρήθηκαν από τα 10 ηλεκτρικά παραμορφωσιόμετρα που είχαν επικολληθεί εκατέρωθεν της δοκού. Οι βυθίσεις αυτές είναι χαμηλότερες σε σχέση με τις δοκούς αναφοράς κατά μόλις 3%. Το εύρος των καμπτικών ρωγμών στο μεσαίο άνοιγμα κυμαινόταν μεταξύ 0.40-2.50mm. Η καμπτική ικανότητα των διαβρωμένων δοκών με φόρτιση ήταν κατά 5.43% μειωμένη σε σχέση με τις δοκούς αναφοράς (Περίπτωση A) και κατά μόλις 0.56% μειωμένη σε σχέση με τις αφόρτιστες διαβρωμένες δοκούς (Περίπτωση B). Όσο η δοκός συνέχιζε να παραλαμβάνει βυθίσεις, περισσότερα τμήματα του ρηγματωμένου υποστρώματος αποκολλούνταν στην μεσαία περιοχή της δοκού. Η μέγιστη ρωγμή στο καμπτικό άνοιγμα δεν ξεπέρασε σε εύρος τα 3.00mm και μετρήθηκε ίση με 2.5mm στην δοκό CC2-D και SCC-D. Τελικά, οι δοκοί αστόχησαν λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη, σε φορτίο που κυμαινόταν από $P_{ii}=61.94\text{kN}$ έως $P_{ii}=69.86\text{kN}$ με αντίστοιχες βύθισεις από $\delta_{ii}=19.941\text{mm}$ έως $\delta_{ii}=26.22\text{mm}$. Παρατηρείται πως την μέγιστη καμπτική αντοχή στις αφόρτιστες διαβρωμένες δοκούς, καταγράφει σε αυτήν την περίπτωση η σύνθεση SCC (69.86kN) ενώ το μικρότερο αποτέλεσμα είχε η δοκός της σύνθεσης CC1 (61.94kN).

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως η πλειονότητα των δοκών που δοκιμάστηκαν σε φορτίο 20% του φορτίου διαρροής, παρουσίασαν αισθητά μειωμένη καμπτική αντοχή ενώ η απώλεια μάζας του εφελκόμενου χάλυβα υπολογίστηκε θεωρητικά σε τιμές από $m_l=1.88\%$ έως $m_l=3.38\%$. Ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις (CC2, SCC) καταγράφηκαν παρόμοιες αντοχές με τις δοκούς αναφοράς. Αυτό οφείλεται, όπως έδειξαν και προηγούμενες μελέτες στο ότι για χαμηλές τιμές διάβρωσης, η αντοχή της δοκού εμφανίζει την ίδια ή ακόμη και υψηλότερη τιμή από ό, τι στην περίπτωση των μη διαβρωμένων δοκών. Επίσης οι Ma et al. πρότειναν πως για ρυθμούς διάβρωσης $\rho_c < 2,41\%$ μπορεί να αγνοηθεί η επίδραση της διάβρωσης στη καμπτική συμπεριφορά της δοκού. Αυτό συμβαίνει καθώς τα προϊόντα της οξειδωσης σε αρχικό στάδιο δεν καταλαμβάνουν τόσο όγκο ώστε οι εσωτερικές τάσεις να οδηγήσουν σε ρηγμάτωση και στο στάδιο αυτό τα προϊόντα σκουριάς μπορούν να λειτουργήσουν ακόμη και προς όφελος της συνεκτικότητας οπλισμού-σκυροδέματος. Στο Σχήμα 7.73 παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου P (kN) –βύθιση δ (mm) για τις δοκούς υπό μόνιμη φόρτιση.



Σχήμα 7. 73 Διάγραμμα φορτίου P (kN) – βύθισης d (mm) για τις διαβρωμένες δοκούς υπό μόνιμη φόρτιση

Όλες οι ρωγμές αυξήθηκαν αρκετά μετά την αστοχία, με την μέγιστη να μην έχει υπερβεί τα 3.00mm (2.50mm στις δοκούς CC2-D και SCC-D). Στο Παράρτημα παρουσιάζονται όλες οι μετρήσεις του εύρους ρωγμών όπως πραγματοποιήθηκαν με το ειδικό μικροσκόπιο. Η μορφολογία των ρωγμών στην κατάσταση αστοχίας όλων των διαβρωμένων δοκών με φόρτιση παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.74.



Σχήμα 7. 74 Μοτίβο ρωγμών μετά την αστοχία των δοκών υπό φόρτιση με διαβρωτικές συνθήκες (Περίπτωση D)

Παρατηρείται ότι οι καμπτικές ρωγμές αναπτύχθηκαν μεταξύ των δύο σημείων επιβολής φορτίου και καμπτο-διατμητικές ρωγμές μικρότερου εύρους στην υπόλοιπα τμήματα των δοκών. Επίσης εμφανίζεται συγκέντρωση των παραμορφώσεων σε ένα ή δύο σημεία στο μέσο του ανοίγματος, με διεύρυνση μίας ή δύο ρωγμών και πολλές τριχοειδείς ρωγμές. Μια πρώτη ανάγνωση του Σχήματος 7.74 δείχνει πως πέρα από μικρές διαφοροποιήσεις οι οποίες αναλύονται παρακάτω, όλες οι δοκοί παρουσίασαν παρόμοια μορφολογία ρωγμών. Αναλυτικά τα αποτελέσματα της καταγραφής των ρωγμών (μέσος όρος, μέγιστη και ελάχιστη τιμή) για την κάθε σύνθεση στην περίπτωση που εξετάζεται (Περίπτωση D) παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.19.

Πίνακας 7. 19 Πλάτος ρωγμών (μέσος όρος, max, min) για κάθε περίπτωση όπως μετρήθηκαν με το ρωγμόμετρο

Σύνθεση	Μ.Ο. πλάτους ρωγμών (mm)	Ελάχιστο πλάτος ρωγμών (mm)	Μέγιστο πλάτους ρωγμών (mm)
CC1-D	1,14	0,4	2,4
CC2-D	1,44	0,6	2,5
CC3-D	1,69	1,2	2,4
FAC-D	1,49	0,9	2,3
SCC-D	1,98	1,4	2,5

Η διαβρωμένη δοκός της σύνθεσης SCC ανέπτυξε περισσότερες ρωγμές και η απόσταση μεταξύ των ρωγμών ήταν μικρότερη σε σχέση με τις αντίστοιχες των υπολοίπων. Όμως, οι μέγιστες καμπτικές ρωγμές της διαβρωμένης δοκού SCC είχαν μεγαλύτερο εύρος που κυμαινόταν από 1.40-2.50 mm, ενώ οι αντίστοιχες καμπτικές ρωγμές των υπολοίπων δοκών ήταν μικρότερες και καταγράφηκαν μεταξύ 0.40-2.50 mm. Στο Σχήμα 7.74 φαίνονται για κάθε δοκό τα τμήματα σκυροδέματος στο μέσο τους που αποκολλήθηκαν κατά την διάρκεια της φόρτισης, ενώ χαρακτηριστική είναι στο σημείο αυτό η έλλειψη συνάφειας σκυροδέματος-χαλύβδινου οπλισμού.

7.9.4. Μερικά Συμπεράσματα IX

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης, τα διαγράμματα φόρτισης-βύθισης για την κάθε σύνθεση σκυροδέματος και την παρακολούθηση των ρηγματώσεων προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Λόγω του σχετικά χαμηλού επιπέδου διάβρωσης του οπλισμού (τιμές από 1.4% έως 3.4%), όλες οι δοκοί παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις στις καμπτικές τους αντοχές. Αυτό συμβαίνει καθώς τα προϊόντα της οξείδωσης σε αρχικό στάδιο δεν καταλαμβάνουν τόσο όγκο ώστε οι εσωτερικές τάσεις να οδηγήσουν σε ρηγμάτωση και στο στάδιο αυτό τα προϊόντα σκουριάς μπορούν να λειτουργήσουν ακόμη και προς όφελος της συνεκτικότητας οπλισμού-σκυροδέματος. Η αστοχία των δοκών αναφοράς επήλθε λόγω σύνθλιψης του σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη, ενώ το φορτίο αστοχίας των δοκών αναφοράς κυμαινόταν από $P_u=60.7\text{kN}$ έως $P_u=81.98\text{kN}$ με αντίστοιχες βυθίσεις από $\delta_u=15.98\text{mm}$ έως $\delta_u=26.72\text{mm}$. Παρατηρείται πως την μέγιστη καμπτική αντοχή μεταξύ των δοκών αναφοράς καταγράφει η σύνθεση FAC ενώ τη μικρότερη τιμή καταγράφει η δοκός της σύνθεσης CC3. Επίσης παρατηρείται πως τις μεγαλύτερες βυθίσεις είχαν οι δοκοί των συνθέσεων CC1, CC2, CC3 ενώ τις μικρότερες βυθίσεις είχαν οι δοκοί των συνθέσεων FAC και SCC. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται στην διαφορετική σύσταση των συνθέσεων πράγμα το οποίο υποδηλώνει πως χαμηλότεροι λόγοι N/T καθώς και περισσότερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο (kg/m^3) σε μια σύνθεση βελτιώνει την καμπτική αντοχή της.

Σε όλες τις περιπτώσεις οι καμπτικές ρωγμές αναπτύχθηκαν μεταξύ των δύο σημείων επιβολής φορτίου και καμπτο-διατμητικές ρωγμές μικρότερου εύρους στην υπόλοιπα τμήματα των δοκών. Καθώς το εφαρμοζόμενο φορτίο αυξανόταν, οι ρωγμές αναπτύχθηκαν τόσο σε μήκος όσο και σε πλάτος ακολουθούμενες από σύνθλιψη του σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη όπως φαίνεται στα αντίστοιχα σχήματα. Οι μη διαβρωμένες δοκοί αναφοράς ανέπτυξαν περισσότερες ρωγμές και η απόσταση μεταξύ των ρωγμών ήταν σχετικά μικρότερη σε σχέση με τις αντίστοιχες των διαβρωμένων δοκών. Οι καμπτικές ρωγμές των δοκών αναφοράς είχαν μεγαλύτερο εύρος που κυμαινόταν από 0.40-3.40 mm, ενώ οι αντίστοιχες καμπτικές ρωγμές των διαβρωμένων δοκών με φόρτιση ήταν μικρότερες σε εύρος μεταξύ 0.40-2.50 mm.

ΜΕΡΟΣ Γ' – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ

8.1. Συμπεράσματα Διδακτορικής Διατριβής

Σε αυτό το κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Το θέμα το οποίο πραγματεύεται η Διδακτορική Διατριβή είναι η διερεύνηση της επιρροής παραγόντων που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα μιας κατασκευής από σκυρόδεμα. Η πραγματοποίηση της έρευνας περιέλαβε τη δημιουργία πέντε διαφορετικών συνθέσεων σκυροδέματος, με τρία διαφορετικά επίπεδα φόρτισης και την εξέταση διαφόρων παραμέτρων που επιδρούν στη διάβρωση του οπλισμού τους. Αναλυτικά οι παράγοντες που διερευνώνται είναι οι εξής: Ο πρώτος είναι οι αναλογίες στο μίγμα των παραγόμενων συνθέσεων. Αυτό περιλαμβάνει την αναλογία και το είδος των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν (κοκκομετρική ανάλυση), την ποσότητα τσιμέντου αλλά και την ποσότητα του νερού. Ο δεύτερος παράγοντας του οποίου η επίδραση εκτιμήθηκε ήταν η επιρροή διαφορετικών μεθόδων προστασίας. Οι προστατευτικές μέθοδοι εφαρμόστηκαν στο σκυρόδεμα είτε με χρήση αναστολέα διάβρωσης ως πρόσθετο, είτε μέσω ψεκασμού στην επιφάνεια των δοκιμίων. Ο τρίτος παράγοντας είναι η επίδραση της μόνιμης καμπτικής φόρτισης που φέρει ένα στοιχείο σκυροδέματος στην διατήρηση των ιδιοτήτων του στο χρόνο. Στα δοκίμια δοκών που εξετάστηκαν επιβλήθηκαν 3 επίπεδα καμπτικής επιπόνησης, στο 0%, 7% και 20% της οριακής κατάστασης λειτουργίας τους. Ο συσχετισμός αυτός αποτελεί το βασικό σημείο εστίασης της παρούσας έρευνας καθότι οι βιβλιογραφικές αναφορές για το θέμα μέχρι στιγμής είναι περιορισμένες και δεν αρκούν για την ολοκληρωμένη αξιολόγησή του. Η μεθοδολογία και ο πειραματικός σχεδιασμός που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής βασίζονται στη δημιουργία συνθηκών οι οποίες προσομοιώνουν κατά το δυνατόν καλύτερα τις πραγματικές. Η επιλογή των υπό μελέτη δομικών υλικών έλαβε χώρα λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες και τα δομημένα συμφέροντα της ελληνικής αγοράς και πραγματικότητας, ενώ ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στο να προσομοιωθούν κατά το βέλτιστο δυνατό οι πραγματικές συνθήκες σκυροδέτησης αλλά και έκθεσης στο φυσικό περιβάλλον. Γι' αυτό το λόγο η σκυροδέτηση όλων των δοκιμίων έγινε σε εργοστάσιο σκυροδέματος, η επίτευξη των φορτίων στις δοκούς έγινε με «μπλοκ» σκυροδέματος τα οποία εδράστηκαν στο μέσον των δοκών και η έκθεση έγινε με φυσικό τρόπο, με τακτικό ψεκασμό των δοκών με διάλυμα NaCl (περιεκτικότητας 5%) και όχι με ηλεκτρικά επιταχυνόμενη διάβρωση. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν τα εξής γενικά συμπεράσματα:

- Προκειμένου να αξιολογηθεί η κατάσταση διάβρωσης του οπλισμού των υπό μελέτη δοκών, για μια περίοδο 42 μηνών πραγματοποιήθηκε τακτική παρακολούθηση του δυναμικού διάβρωσής τους. Σύμφωνα με τις μετρήσεις η έναρξη της διάβρωσης του οπλισμού χρειάστηκε 16 μήνες για τις δοκούς υπό φόρτιση και 21 μήνες για τις αφόρτιστες δοκούς κατά μέσο όρο. Η συμπεριφορά αυτή αποτελεί ένδειξη πως η μόνιμη φόρτωση επηρεάζει την έναρξη της διάβρωσης και συγκεκριμένα την επιταχύνει. Επίσης τιμές δυναμικού που υποδηλώνουν σχεδόν βέβαιη έναρξη της διάβρωσης ($<-350\text{mV}$) χρειάστηκαν 23 έως 25 μήνες για τις συνθέσεις με βάση το C30/37 (σελ. 158) και 27 έως 29 μήνες για τις «λεπτότερες» συνθέσεις (FAC, SCC) πράγμα το οποίο υποδηλώνει πως χαμηλότεροι λόγοι N/T (0,4 έναντι 0,5) καθώς και μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο (kg/m^3) σε μια σύνθεση αυξάνουν την χρονική περίοδο κατά την οποία ο οπλισμός παραμένει χωρίς διάβρωση.

- Η διαπερατότητα χλωριόντων, η θλιπτική αντοχή, η ενανθράκωση και η υδατοπερατότητα των δοκιμίων σκυροδέματος, ανεξαρτήτως του τύπου των αδρανών, επηρεάζεται άμεσα από το λόγο N/T. Αύξηση του λόγου N/T σε μια σύνθεση σκυροδέματος οδηγεί σε μεγαλύτερη προδιάθεση σε διάβρωση του οπλισμού. Για τους λόγους N/T οι οποίοι μελετήθηκαν παρατηρήθηκε πως μείωσή τους από 0,5 σε 0,4 οδήγησε σε εμφανώς βελτιωμένα αποτελέσματα στη πλειονότητα των πειραματικών δοκιμών. Αυτό συνέβη καθότι το τσιμέντο δεσμεύει περί το 40% του βάρους του σε νερό. Το πλεονάζον και μη δυνάμενο να δεσμευθεί νερό εξατμίζεται αφήνοντας τριχοειδείς πόρους, από όπου γίνεται η διείσδυση της υγρασίας και η διάχυση των αερίων καθιστώντας το στοιχείο πιο ευπρόσβλητο σε βλαβερούς εξωτερικούς παράγοντες, όπως παρατηρήθηκε για τις συνθέσεις με τον υψηλό λόγο N/T.
- Η διαπερατότητα χλωριόντων, η θλιπτική αντοχή, η ενανθράκωση και η υδατοπερατότητα των συνθέσεων σκυροδέματος επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητά τους σε τσιμέντο. Η αυξημένη περιεκτικότητα του τσιμέντου στο σκυρόδεμα μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης λόγω αύξησης της περιεκτικότητας σε $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Στα αποτελέσματα παρατηρείται πως αύξηση από 330kg/m^3 σε 400kg/m^3 προστατεύει δραστικά το σκυρόδεμα έναντι διείσδυσης βλαβερών ουσιών (χλωριόντα, CO_2) και μειώνει σε μεγάλο βαθμό την υδατοπερατότητά του. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως αυξημένη περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο μειώνει το βάθος ενανθράκωσης, καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα του μίγματος σε $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Όπως προκύπτει από το σύνολο των μετρήσεων, την συγκριτικά χειρότερη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά παρουσίασε η σύνθεση αναφοράς (C30/37) και την συγκριτικά καλύτερη συμπεριφορά είχε το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Αυτό οφείλεται στην ιδιαίτερη δομή του (αυξημένα λεπτόκοκκα αδρανή, αυξημένη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, χαμηλός λόγος N/T) και δείχνει πως μια καλή ποιότητα σκυροδέματος, όπως το αυτοσυμπυκνούμενο, μπορεί πέρα από καλύτερη εργασιμότητα και ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες να προσφέρει και ικανοποιητική αντιδιαβρωτική προστασία.
- Μια από τις μεθόδους προστασίας που εφαρμόστηκε ήταν αναστολέας διάβρωσης με βάση την αμινοαλκοόλη. Ο αναστολέας προστέθηκε στο νερό ανάμιξης πριν την προσθήκη στο ξηρό μείγμα τσιμέντου αδρανών σε περιεκτικότητα 4kg ανά 100 kg τσιμέντου. Ως κύριο συστατικό του αναστολέα, η αμινοαλκοόλη μεταναστεύει γρήγορα στο σκυρόδεμα στη φάση αερίου ή στην υγρή φάση. Όταν φτάσει στην επιφάνεια της ράβδου χάλυβα, σχηματίζει ένα υδρόφοβο μονομοριακό στρώμα με φυσική προσρόφηση του αζώτου στην επιφάνεια του χάλυβα. Το μόριο απομονώνει τα ιόντα χλωρίου, το οξυγόνο και το νερό και προστατεύει τον οπλισμό. Αξιοποιώντας αυτές τις ιδιότητες ο πρόσθετος αναστολέας διάβρωσης έδειξε συγκριτικά την καλύτερη αντιδιαβρωτική συμπεριφορά καθότι διατήρησε τις υψηλότερες τιμές δυναμικού διάβρωσης σε σχεδόν όλη τη διάρκεια των 42 μηνών και άρα παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με το σκυρόδεμα αναφοράς αλλά και τη μέθοδο προστασίας μέσω ψεκάσμου. Εν κατακλείδι ο πρόσθετος αναστολέας διάβρωσης προστατεύει τον οπλισμό του σκυροδέματος και επιμηκύνει το χρόνο ζωής μιας κατασκευής ωστόσο δεν πρέπει να παραληφθεί το ότι αυξάνει σημαντικά το κόστος μιας κατασκευής
- Η άλλη μέθοδος προστασίας που εφαρμόστηκε ήταν μια υδατοαπωθητική στρώση στην επιφάνεια των δοκιμίων. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόστηκε ένα διάφανο, υγρό εμποτισμού σιλοξανικής βάσεως το οποίο ψεκάστηκε σε δύο λεπτές στρώσεις. Η μέθοδος αυτή, σχηματίζοντας μια υδροφοβική στρώση η οποία αποτρέπει την είσοδο χλωριόντων και νερού αλλά επιτρέπει την εξάτμιση των ατμών, ανέπτυξε καλύτερη συμπεριφορά από το σκυρόδεμα αναφοράς, ωστόσο όχι σε αξιοσημείωτο βαθμό. Όπως παρατηρείται από τα πειραματικά αποτελέσματα και ιδιαίτερα σε αυτά του δυναμικού διάβρωσης, στο επίπεδο φόρτισης 20%, τα δοκίμια με επιφανειακή προστασία παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές με τα δοκίμια αναφοράς. Αυτό ίσως να οφείλεται στις μικροπαραμορφώσεις και μικρορηγματώσεις που δημιουργήθηκαν ως αποτέλεσμα της φόρτισης,

οι οποίες οδήγησαν στην τοπική αστοχία του προστατευτικού στρώματος καθώς παρόμοια συμπεριφορά δεν παρατηρείται στις εργαστηριακές δοκιμές στις οποίες δεν υπάρχει φόρτιση. Η σύνθεση με την εφαρμογή προστατευτικής υδατοαπωθητικής στρώσης ανέπτυξε την καλύτερη προστασία έναντι διείσδυσης CO₂ και άρα αποτελεί αποτελεσματική λύση στο σχεδιασμό κατασκευών εκτεθειμένων σε ρυπογόνο περιβάλλον (αυξημένα ποσοστά CO₂ στην ατμόσφαιρα). Προκύπτει λοιπόν πως η εφαρμογή επιφανειακής προστασίας είναι αποτελεσματική ωστόσο πρέπει να γίνεται με προσοχή και ιδιαιτέρως σε στοιχεία σκυροδέματος που παρουσιάζουν μεγάλες παραμορφώσεις καθότι μια αστοχία στο προστατευτικό στρώμα μπορεί να οδηγήσει σε καθολική αποτυχία της μεθόδου.

- Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από όλες τις μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν, προκύπτει πως μια μόνιμη καμπτική φόρτιση σε μια δοκό οπλισμένου σκυροδέματος σε μέγεθος από 7 έως 20% της αντοχής της, οδηγεί σε μεγαλύτερη προδιάθεση του οπλισμού σε διάβρωση. Συγκεκριμένα στα αποτελέσματα του δυναμικού διάβρωσης η φόρτιση σε επίπεδο 20% του φορτίου λειτουργίας των οπλισμένων δοκών οδήγησε σε ηλεκτραρνητικότερες τιμές σε σχέση με τις αφόρτιστες δοκούς. Σε ανάλυση των αποτελεσμάτων του ρυθμού διάβρωσης προκύπτει πως μια μόνιμη καμπτική φόρτιση σε μια δοκό σκυροδέματος οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού οξείδωσης του οπλισμού της. Επιπροσθέτως σε όλες τις εξεταζόμενες συνθέσεις οι μεγαλύτεροι ρυθμοί διάβρωσης παρουσιάζονται στο μεγαλύτερο επίπεδο φόρτισής τους. Στη συνέχεια έρχονται οι τιμές των δοκών με το επίπεδο φόρτισης 7% και τέλος τη μικρότερη προδιάθεση για διάβρωση παρουσιάζουν οι αφόρτιστες δοκοί. Αξίζει να αναφερθεί πιο αναλυτικά, πως το επίπεδο φόρτισης 20% οδήγησε σε αύξηση του ρυθμού απώλειας μάζας κατά 26% σε σχέση με τις αφόρτιστες δοκούς και το επίπεδο φόρτισης 7% οδήγησε σε αύξηση του ρυθμού απώλειας μάζας κατά 18% κατά μέσο όρο στο σύνολο των μετρήσεων. Προκύπτει λοιπόν από τα αποτελέσματα ένας καθαρός συσχετισμός της μόνιμης φόρτισης που φέρει ένα στοιχείο σκυροδέματος με το ρυθμό απώλειας μάζας οπλισμού λόγω διάβρωσης και κατ' επέκταση την ανθεκτικότητά του.

8.2. Προοπτικές και Προτάσεις για μελλοντικά ερευνητικά βήματα

Το διακύβευμα της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής ήταν η έμφαση στην Αειφόρο Κατασκευή, μέσω της βελτιστοποίησης των συνθέσεων σκυροδέματος, της σωστής αξιολόγησης και εφαρμογής προστατευτικών μεθόδων και τέλος με την κατά το δυνατόν ολοκληρωμένη ανάγνωση του φαινομένου της διάβρωσης, περικλείοντας παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την εξέλιξη της αλλά δεν λαμβάνονται υπόψιν σε πρακτικές εφαρμογές, όπως η μόνιμη φόρτιση. Εντούτοις, μέσω της πειραματικής διερεύνησης αυτών των παραγόντων η αναπτυχθείσα μεθοδολογία της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής αποτελεί καινοτόμο συνεισφορά και ώθηση προς ένα ενοποιημένο όραμα Αειφόρου Δόμησης/Κατασκευής. Η δόμηση μιας κατασκευής σκυροδέματος θα πρέπει να γίνεται μετά από αναλυτική μελέτη των περιβαλλοντικών παραγόντων αλλά και των παραγόντων ανθεκτικότητας και να επιλέγονται τα κατάλληλα υλικά, ούτως ώστε η ακεραιότητα της κατασκευής να διατηρείται για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα πριν την πραγματοποίηση της πρώτης επισκευής. Βάσει του παραπάνω οράματος τίθεται η πρόκληση του τεχνολογικού σχεδιασμού με στόχο την Ανθεκτικότητα και την Αειφορία. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι η έναρξη της επιστημονικής και ταυτόχρονα κοινωνικής συζήτησης περί αξιοποίησης και συνέργειας μεταξύ των διαφόρων ειδικοτήτων Μηχανικών με απώτερο σκοπό την ολιστική, λειτουργική και βιώσιμη επίτευξη εφαρμογών αειφόρου κατασκευής. Κατά την διάρκεια εκτέλεσης της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής και πραγμάτευσης των θεμάτων που ανέκυψαν, αναγνωρίστηκαν και καταγράφηκαν τόσο πιθανές ερευνητικές εφαρμογές επιστημονικού ενδιαφέροντος όσο και εν δυνάμει καινοτόμες προσεγγίσεις, οι οποίες χρήζουν Ορισμένες προτάσεις για την συνέχιση της παρούσας Έρευνας αλλά και γενικότερες σκέψεις και προτάσεις του συγγραφέα για το μέλλον του κατασκευαστικού κλάδου συμπεριλαμβάνουν τις κάτωθι:

- Τονίζεται η ανάγκη επέκτασης της ερευνητικής δραστηριότητας που περιλαμβάνουν πειραματικές δοκιμές σε δοκούς υπό διάβρωση με παράλληλη εφαρμογή μιας μόνιμης εξωτερικής φόρτισης. Η βιβλιογραφία σχετικά με τον συγκεκριμένο συσχετισμό είναι περιορισμένη και η απόκτηση περισσότερων ερευνητικών αποτελεσμάτων σχετικά με την επιρροή της μόνιμης φόρτισης είναι απαραίτητη για την δημιουργία μιας ολοκληρωμένης προστασίας των κατασκευών έναντι της διάβρωσης και για την αύξηση του χρόνου ζωής τους. Επισημαίνεται στην ίδια λογική και η ανάγκη χρήσης και ενσωμάτωσης καλύτερων αισθητήριων μέσων στα πλαίσια της περαιτέρω αξιοποίησης των δυνατοτήτων που προσφέρουν οι νέες τεχνολογίες προκειμένου να καταγραφεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η αλληλεπίδραση της μόνιμης φόρτισης που φέρει ένα στοιχείο με τη διάβρωση του οπλισμού του σε μια κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος.
- Επέκταση της μελέτης των πρώτων υλών, ως πρωταρχικών συστατικών των υπό μελέτη σκυροδεμάτων που εφαρμόζονται στην Κατασκευή (π.χ. εφαρμογή σε δοκίμια σκυροδεμάτων με συνθέσεις αποτελούμενες από εξαιρετικά χαμηλούς λόγους N/T, πράσινα/εναλλακτικά τσιμέντα με περιβαλλοντικά φιλικό προσανατολισμό) κατά την διάρκεια σχεδίασης και παραγωγής τους ή και καινοτόμα προϊόντα προστασίας του οπλισμού (είτε ως πρόσθετα είτε με επιφανειακή εφαρμογή), όπως αναστολείς διάβρωσης, στεγνωτικά υλικά κτλ. με σκοπό την πληρέστερη και αποτελεσματικότερη ανάλυση συμπεριφοράς της κατασκευής η οποία θα οδηγήσει σε αυξημένους χρόνους ζωής των κατασκευών.
- Ανάδειξη των επικείμενων βιομηχανικών τεχνολογιών οι οποίες θα μεταβάλλουν άρδην την Κατασκευή όπως είναι γνωστή τον προηγούμενο αιώνα: βελτιωμένα προϊόντα/πρώτες ύλες χαμηλού κόστους ικανές να μεταδίδουν και να καταγράφουν/αποθηκεύουν ψηφιακές πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο και για το πλήρες εύρος ζωής μίας Κατασκευής/Έργου. Αυτά τα σύγχρονα βελτιωμένα προϊόντα όχι μόνο “αντιλαμβάνονται” την κατάσταση τους και το γύρω περιβάλλον, εντούτοις διαδρούν και ελέγχουν και τις ίδιες τους τις παρατηρήσεις. Με την εκμετάλλευση των παραπάνω υλικών θα μπορέσει να γίνει περισσότερο κατανοητή η σχέση φόρτισης-διάβρωσης, η

οποία μελετάται και στην παρούσα έρευνα. Έτσι θα μπορέσουν να αξιολογηθούν καλύτερα οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση και θα επιτευχθεί μια πιο στοχευμένη και αποτελεσματική αντιμετώπισή της. Σε δεύτερο στάδιο, αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η επικοινωνία με άλλα, συνδεδεμένα “έξυπνα” υλικά και συστήματα και φυσικά τον Ανθρώπινο Χρήστη. Αυτή ακριβώς η μετάβαση και αξιοποίηση των ψηφιακών μνήμων των προϊόντων (“digital product memory”), αποτελεί όχι μόνο την πρωτόλεια βάση του Ίντερνετ των Πραγμάτων (διασυνδέοντας την Ψηφιακή Πληροφορία με τα φυσικά αυτούσια αντικείμενα/καταστάσεις του Πραγματικού Κόσμου) αλλά και την πρώτη ύλη για τα επικείμενα συστήματα παραγωγής.

- Αναμόρφωση και εναρμόνιση των κείμενων και κοινοτικών νομοθετικών, κανονιστικών και διοικητικών διατάξεων μέσω των αντίστοιχων Κανονισμών και Προτύπων όσον αφορά τους περιορισμούς και τα όρια που θέτουν σε κατασκευές με ειδικές συνθήκες περιβάλλοντος αλλά και όσον αφορά τα προϊόντα του τομέα των Δομικών Κατασκευών, ώστε να συμπεριλαμβάνεται η συνδυαστική εφαρμογή Μεθόδων Μη-Καταστρεπτικού Ελέγχου στο “οπλοστάσιο” του Ελέγχου Ποιότητας, πάντα με έμφαση στην Αειφόρο Ανάπτυξη. Κάποια πρώτα βήματα γίνονται και με τον νέο Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ 2016) ο οποίος επιβάλλει περιορισμούς στην επιλογή των συνθέσεων σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθούν σε ειδικές περιβαλλοντικές συνθήκες ωστόσο κρίνεται αναγκαία η συνεχής ανανέωση τους σύμφωνα με τα νέα επιστημονικά ευρήματα.
- Εν συνεχεία της παραπάνω έναρξης διαλόγου, είναι εξαιρετικής ανάγκης να υιοθετηθεί μία κουλτούρα αποτίμησης απόδοσης (“performance”), όπου πέραν της αντίληψης του τελικού χρήστη όσον αφορά ένα συγκεκριμένο προϊόν, η μέτρηση της απόδοσης θα λαμβάνει χώρα μέσω της υιοθέτησης κατάλληλων δεικτών απόδοσης οι οποίοι θα είναι συνάμα προσανατολισμένοι τόσο προς τις υπηρεσίες (“service”) όσο και την επιτελεσματικότητα (“efficiency”). Επιστέγασμα αυτής της προσπάθειας είναι η μεταστροφή του Σχεδιασμού βάσει Χρήσεων (“Design by Uses”) στον Σχεδιασμό για Βιώματα (“Design for Experiences”) αλλά και η πρώτη επιχειρησιακή εισαγωγή της έννοιας των μετρήσεων παραμέτρων και επιδόσεων (“benchmarking”) προς επίτευξη μιας συγκριτικής αξιολόγησης. Επιπροσθέτως και στο ίδιο κλίμα ενσωμάτωση αρχών της “προ των θυρών” Τεχνολογικής Επανάστασης του “Ίντερνετ των Πραγμάτων” , η οποία ως συθέμελη μεταβολή της θεώρησης των Πραγμάτων θα αλλάξει ριζικά τόσο την ίδια την αντιμετώπιση των συνδεδεμένων συσκευών (με τεράστιο εύρος εφαρμογών στην Καθημερινότητα του Ανθρώπου όσο και επεκτάσεις στην Κοινωνία της ίδια) όσο και την παρακολούθηση της αξιοπιστίας μιας κατασκευής στο χρόνο.

ΜΕΡΟΣ Δ' – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EN, British Standard. "206-1 Concrete-Part 1: Specification, performance, production and conformity." British Standards Institution (2000).
- [2] Γ. Μπατής, "Φθορά και Προστασία των Υλικών," Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [3] Ε. Ε. Μ. Π. Α. Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., 2004, Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου, Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., 2004, Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου, Εκδόσεις Ε.Μ.Π. Αθήνα. .
- [4] "Σύνδεσμος Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος (Σ.Τ.Ε.) (Hellenic Cement Industry Association)." [Online]. Available: <http://www.hcia.gr/el/cement-concrete/concrete/>.
- [5] N. . Winter, "Cement history, Understanding Cement, WHD Microanalysis Consultants Ltd, Woodbridge UK," 2012. [Online]. Available: <http://www.understanding-cement.com/history.html>.
- [6] Π. Αναγνωστόπουλος, *Ιστορία του Τσιμέντου και του Σκυροδέματος*. 2016.
- [7] "The Concrete Network," 2016. [Online]. Available: <http://www.concretenetwork.com/concrete-history/>.
- [8] Λιουτα, Δημητρα, Μαρια Ζαφειροπουλου, Μαρια Λυμπεροπουλου. "Κριτήρια συμμόρφωσης σκυροδέματος με ΚΤΣ 2016 και EN 206." (2018).
- [9] Τ. Σ., "Δομικά Υλικά (Τσιμέντο – Ασβέστης – Σκυρόδεμα – Κονιάματα)."
- [10] "Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 12350-6:2000."
- [11] "Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 12350-7:2000."
- [12] Μ. Κοκκίνη, "Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα," 2011.
- [13] Diamond, Sidney. 'Mercury porosimetry: an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials.' *Cement and concrete research* 30.10 (2000): 1517-1525.
- [14] Jennings, Hamlin M. 'A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste.' *Cement and concrete research* 30.1 (2000): 101-116.
- [15] Li, Leo Gu, et al. 'Pervious concrete: effects of porosity on permeability and strength.' *Magazine of Concrete Research* (2019): 1-11.
- [16] M. M. Dubinin, "The potential theory of adsorption of gases and vapors for adsorbents with energetically nonuniform surfaces," *Chem. Rev.*, 1960, doi: 10.1021/cr60204a006.
- [17] Young, J. F. 'Capillary porosity in hydrated tricalcium silicate pastes.' *Powder Technology* 9.4 (1974): 173-179.
- [18] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Third Edition Prentice- Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ*. 2006.
- [19] S. Mindess, *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete (Second Edition)*. 2019.

- [20] S. Diamond, "Aspects of concrete porosity revisited," *Cem. Concr. Res.*, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00122-2.
- [21] Τσακαλάκης, Κ., and Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών. 'Τεχνολογία παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος.' ΕΜΠ, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Τομέας Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών, Εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων (2010).
- [22] En, B. S. '197-1: 2011.' *Cement, Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements*. London, England: British Standard Institution (BSI) (2011).
- [23] W. Kurdowski, *Cement and concrete chemistry*. 2014.
- [24] Tsimas, S., and S. Tsivilis. 'Science and technology of cement.' Athens: National Polytechnics University, Dept of Mechanical Engineering (2001): 301-328.
- [25] Portland Cement Association, 2016. PCA Manual, Aggregates for concrete, University of Memphis.
- [26] "Aggregates for concrete," in *Construction Materials: Their Nature and Behaviour, Fourth Edition*, 2010.
- [27] Μπεάζη-Κατσιώτη, Μ., 2008. Αδρανή σκυροδέματος, τυποποίηση, μύθος & πραγματικότητα, Ημερίδα «Σχεδιασμός & Κατασκευή», Τρίπολη.
- [28] M. Alexander, *Aggregates in Concrete*. 2005.
- [29] I. Sims and B. Brown, "Concrete Aggregates," in *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 2003.
- [30] BS:EN:1008:2002, "Mixing water for concrete. Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete," *BSI Stand. Publ.*, 2002.
- [31] Ζέρης, Χ., 2013. Στοιχεία τεχνολογίας σκυροδέματος - Τα επί μέρους υλικά, Σχολή Αρχιτεκτόνων Ε.Μ.Π., <http://courses.arch.ntua.gr/106102.html>.
- [32] Ζαχαροπούλου, Α. 'Επίδραση πρόσθετων-πρόσμικτων στην διάβρωση του χάλυβα οπλισμού του σκυροδέματος.' Διδακτορική διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχ/κών ΕΜΠ (2013).
- [33] S. B. Singh, P. Munjal, and N. Thammishetti, "Role of water/cement ratio on strength development of cement mortar," *J. Build. Eng.*, 2015, doi: 10.1016/j.jobbe.2015.09.003.
- [34] Χρυσουλάκης, Γ. & Παντελής, Δ., 2003. Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- [35] Μαυροειδής, Π., 2005. Χάλυβες Οπλισμένου Σκυροδέματος, εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- [36] Βατάλης, Α., 2009. Επιστήμη & Τεχνολογία Υλικών, 2η εκδ, εκδ. Ζήτη, Θεσ/κη.
- [37] Βουδικλάρης, Θ.Γ., 2004. Από τον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων – 2000 στο σχέδιο Προτύπου prEN 10080, Ημερίδα: Θέματα Τεχνολογίας Σκυροδέματος και Δομικών Χαλύβων με τα Νέα Ευρωπαϊκά Πρότυπα ΕΛΟΤ EN, ΤΕΕ.
- [38] 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 .

- [39] Ρούτουλας, Α., Μέντρεα, Κ., Κολοβός, Κ., Πανταζοπούλου, Π., 2011. Έλεγχος Ποιότητας και Τεχνολογία Δομήσιμων Υλικών – Σημειώσεις Εργαστηριακού Μαθήματος, ΤΕΙ Πειραιά, Αιγάλεω.
- [40] Reynolds, C.E, Steedman, J.C. & Threlfall, A.J., 2008. Reinforced Concrete Designer's Handbook, Taylor & Francis, 11th Ed, New York.
- [41] S. Diamond, "Concrete admixtures handbook," *Cem. Concr. Res.*, 1986, doi: 10.1016/0008-8846(86)90054-2.
- [42] Anon, "Chemical admixtures for concrete," *Concr. Int.*, 1993, doi: 10.1520/cca10483j.
- [43] Y. Ohama, "Polymer-based admixtures," *Cem. Concr. Compos.*, 1998, doi: 10.1016/s0958-9465(97)00065-6.
- [44] EN 206-1, *Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity*. 2000.
- [45] P. C. Hewlett and M. Liska, *Lea's chemistry of cement and concrete*. 2019.
- [46] A. A. Hilal, "Microstructure of Concrete," in *High Performance Concrete Technology and Applications*, 2016.
- [47] Ρούτουλας Α., 2010, Σημειώσεις Μαθήματος «Έλεγχος Ποιότητας και Τεχνολογία Δομήσιμων Υλικών», Αθήνα.
- [48] British Standards Institution, "Concrete — Specification , performance , production and conformity," *BS EN 206*, 2016.
- [49] Bs En 206:2013:, "BSI Standards Publication Concrete — Specification , performance , production and conformity," *Br. Stand.*, 2013.
- [50] Μαρσέλλος, Ν., Κανονισμός Τεχνολογίας. "Σκυροδέματος-Από τον ΚΤΣ 97 στον ΚΤΣ 2013." (2013).
- [51] 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.
- [52] Παπαδάκης, Ε. Γ. 'Υπολογισμός διάρκειας ζωής οπλισμένου σκυροδέματος λόγω διάβρωσης οπλισμού.' Ημερίδα τεχνολογίας σκυροδέματος και χαλύβων, ΤΕΕ, Ιωάννινα (2004).
- [53] Ρούτουλας, Αθανάσιος. Ανθεκτικότητα σκυροδεμάτων με σύνθετα τσιμέντα. Diss. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Τμήμα Χημικών Μηχανικών. Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, 1999.
- [54] H. Böhni, *Corrosion in Reinforced Concrete Structures*. 2005.
- [55] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, and R. Polder, *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*. 2005.
- [56] L. O. Nilsson, "Corrosion of steel in concrete," in *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*, 2019.
- [57] Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος ΚΤΧ 2008(ΦΕΚ 1416/Β/17- 07-2008 και ΦΕΚ 2113/Β/13-10-2008).
- [58] Tutti, K. 'Corrosion of Steel in Concrete (Ph. D. Thesis).' Lund University, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm (1982): 1-474.
- [59] Τάσιος, Θ. Π., and Κ. Αλιγιζάκη. 'Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος.' Εκδόσεις

- Φοίβος, Αθήνα (1993).
- [60] Bardal, Einar, and J. M. Drugli. 'Corrosion detection and diagnosis.' *Materials science and engineering* 3 (2004).
- [61] A. Zacharopoulou, E. Zacharopoulou, and G. Batis, "Protection Systems for Reinforced Concrete with Corrosion Inhibitors," *Open J. Met.*, 2014, doi: 10.4236/ojmetal.2014.44010.
- [62] A. T. Routoulas and G. Batis, "Performance evaluation of steel rebars corrosion inhibitors with strain gauges," *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 1999, doi: 10.1108/00035599910273458.
- [63] Μπατής, Γ., and Ε. Μ. Π. Καθηγητής. 'Χρήση νέων υλικών για την αύξηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών.' Εισήγηση στην ημερίδα ΤΕΕ, ενίσχυση κτιρίων με σύγχρονα υλικά 6 (2007).
- [64] N. Patsikas, N. Katsiotis, P. Pipilikaki, D. Papageorgiou, E. Chaniotakis, and M. Beazi-Katsioti, "Durability of mortars of white cement against sulfate attack in elevated temperatures," *Constr. Build. Mater.*, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.050.
- [65] "Σίδερης, Κ. Κ. 'Ανθεκτικότητα κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος.' ΣΕΛΚΑ-4Μ, Ξάνθη (2010)."
- [66] V. Shah, K. Scrivener, B. Bhattacharjee, and S. Bishnoi, "Changes in microstructure characteristics of cement paste on carbonation," *Cem. Concr. Res.*, 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.04.016.
- [67] Siemes, Aj M., Acw M. Vrouwenvelder, and A. Van den Beukel. 'Durability of buildings: a reliability analysis.' *Heron (Delft)* 30.3 (1985): 3-48.
- [68] C. F. Chang and J. W. Chen, "The experimental investigation of concrete carbonation depth," *Cem. Concr. Res.*, 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.07.025.
- [69] Landolt, Dieter, and P. Marcus. 'Introduction to surface reactions: electrochemical basis of corrosion.' *CORROSION TECHNOLOGY-NEW YORK AND BASEL- 17* (2002): 1-18.
- [70] A. Neville, "Chloride attack of reinforced concrete: an overview," *Mater. Struct.*, 1995, doi: 10.1007/BF02473172.
- [71] S. Ahmad, "Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - A review," *Cement and Concrete Composites*. 2003, doi: 10.1016/S0958-9465(02)00086-0.
- [72] G. Markeset, S. Rostam, and O. Klinghoffer, *Guide for the use of stainless steel reinforcement in concrete structures*. 2006.
- [73] Hausmann, D. A. 'Steel corrosion in concrete--How does it occur?.' *Materials protection* (1967).
- [74] M. G. Grantham and J. Broomfield, "The use of linear polarisation corrosion rate measurements in aiding rehabilitation options for the deck slabs of a reinforced concrete underground car park," *Constr. Build. Mater.*, 1997, doi: 10.1016/S0950-0618(97)00040-8.
- [75] Swamy, R. Narayan, ed. *The alkali-silica reaction in concrete*. CRC Press, 1991.
- [76] Μπεάζη-Κατσιώτη, Μ. 'Ειδικά κεφάλαια Ανόργανης Χημείας.' Αθήνα, Κάλλιπος (2015).
- [77] Lumley, J.S., 1997. ASR Suppression by Lithium Compounds. *Cement and Concrete Research*, 27(2), pp. 235-244.

- [78] Ramachandran, V.S., 1998. Alkali-aggregate Expansion Inhibiting Admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 28, pp. 149-161.
- [79] Attiogbe, E.K., Farrington, S.A., 1993. Chemical Admixtures for Inhibition of ASR in Concrete, proc. 'Concrete 2000', Dundee UK, pp. 1033-1042.
- [80] T. Oey *et al.*, "Calcium nitrate: A chemical admixture to inhibit aggregate dissolution and mitigate expansion caused by alkali-silica reaction," *Cem. Concr. Compos.*, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103592.
- [81] Swenson, C. A. 'Compression of the Alkali Metals to 10 000 Atmospheres at Low Temperature.' *Physical Review* 99.2 (1955): 423.
- [82] Basheer, P. A. M., et al. 'A performance-based strategy for ensuring the sustainability of concrete infrastructure.' *International Conference on Advances in Concrete Technology Sustainability Challenges and Advances in Concrete Technology*. 2012.
- [83] G. Batis and E. Rakanta, "Corrosion of steel reinforcement due to atmospheric pollution," *Cem. Concr. Compos.*, 2005, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.038.
- [84] P. Garcés, M. J. Sánchez De Rojas, and M. A. Climent, "Effect of the reinforcement bar arrangement on the efficiency of electrochemical chloride removal technique applied to reinforced concrete structures," *Corros. Sci.*, 2006, doi: 10.1016/j.corsci.2005.02.010.
- [85] A. Brenna, F. Bolzoni, S. Beretta, and M. Ormellese, "Long-term chloride-induced corrosion monitoring of reinforced concrete coated with commercial polymer-modified mortar and polymeric coatings," *Constr. Build. Mater.*, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.099.
- [86] G. P. Bierwagen, "Reflections on corrosion control by organic coatings," *Prog. Org. Coatings*, 1996, doi: 10.1016/0300-9440(95)00588-9.
- [87] P. Molera, X. Oller, M. Del Valle, and F. González, "Formulation and characterisation of anticorrosive paints," *Pigment Resin Technol.*, 2004, doi: 10.1108/03699420410524911.
- [88] H. Zheng, W. Li, F. Ma, and Q. Kong, "The effect of a surface-applied corrosion inhibitor on the durability of concrete," *Constr. Build. Mater.*, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.007.
- [89] B. A. Miksic, A. Y. Furman, and M. A. Kharshan, "New generation of water-treatment products formulated from biodegradable and renewable raw materials," in *NACE - International Corrosion Conference Series*, 2007.
- [90] M. Kharshan and C. Cracauer, "Applications for biodegradable vapor phase corrosion inhibitors," *Mater. Perform.*, 2011.
- [91] Γ.Μπατής, Α.Ζαχαροπούλου, Ε.Ζαχαροπούλου, 'Προστασία παραβολικών πύργων ψύξεως με οργανικές επικαλύψεις', 11ο Συμπόσιο χρωμάτων.
- [92] G. Fajardo, G. Escadeillas, and G. Arliguie, "Electrochemical chloride extraction (ECE) from steel-reinforced concrete specimens contaminated by 'artificial' sea-water," *Corros. Sci.*, 2006, doi: 10.1016/j.corsci.2004.11.015.
- [93] D. Darwin *et al.*, "CAUSES, EVALUATION, AND REPAIR OF CRACKS IN CONCRETE STRUCTURES," *J. Am. Concr. Inst.*, 1984.
- [94] A. M. Vaysburd and P. H. Emmons, "Corrosion inhibitors and other protective systems in concrete repair: Concepts or misconcepts," *Cem. Concr. Compos.*, 2004, doi: 10.1016/S0958-9465(03)00044-1.

- [95] Batis, G., G. Grigoriadis, and C. A. Meletiou. 'Protection of Steel Rebars in Lightweight Concrete with the Use of Corrosion Inhibitors.' *Modern Concrete Materials: Binders, Additions and Admixtures*. Thomas Telford Publishing, 1999. 493-501.
- [96] E. Ramirez, E. Otero, and J. A. González, "Determination of critical inhibition threshold in Fe—Ca(OH)₂—Cl—NO₂ system," *Br. Corros. J.*, 2013, doi: 10.1179/000705993798268197.
- [97] M. I. Prieto, A. Cobo, Á. Rodríguez, and M. D. L. N. González, "The efficiency of surface-applied corrosion inhibitors as a method for the repassivation of corroded reinforcement bars embedded in ladle furnace slag mortars," *Constr. Build. Mater.*, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.014.
- [98] M. Daniyal and S. Akhtar, "Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review," *J. Build. Pathol. Rehabil.*, 2020, doi: 10.1007/s41024-019-0067-3.
- [99] V. Saraswathy and H. W. Song, "Improving the durability of concrete by using inhibitors," *Build. Environ.*, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.08.003.
- [100] K. A. A. Al-Sodani, M. Maslehuiddin, O. S. B. Al-Amoudi, T. A. Saleh, and M. Shameem, "Performance of corrosion inhibitors in cracked and uncracked silica fume cement concrete beams," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, 2020, doi: 10.1080/19648189.2018.1475306.
- [101] P. Faustino, A. Brás, and T. Ripper, "Corrosion inhibitors' effect on design service life of RC structures," *Constr. Build. Mater.*, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.098.
- [102] Al-Amoudi, Omar S. Baghabra, et al. 'Effectiveness of corrosion inhibitors in contaminated concrete.' *Cement and Concrete Composites* 25.4-5 (2003): 439-449.
- [103] M. Ormellese, F. Bolzoni, L. Lazzari, A. Brenna, and M. Pedefferri, "Organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in reinforced concrete," *Mater. Corros.*, 2011, doi: 10.1002/maco.201005763.
- [104] F. Bolzoni *et al.*, "Corrosion inhibitors for reinforced concrete: 15 years of experiments @PoliLaPP | Inibitori di corrosione per calcestruzzo armato: 15 anni di sperimentazione @PoliLaPP," *Metall. Ital.*, 2015.
- [105] T. A. Söylev and M. G. Richardson, "Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report," *Constr. Build. Mater.*, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.10.013.
- [106] K. Y. Ann, H. S. Jung, H. S. Kim, S. S. Kim, and H. Y. Moon, "Effect of calcium nitrite-based corrosion inhibitor in preventing corrosion of embedded steel in concrete," *Cem. Concr. Res.*, 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.09.003.
- [107] T. Pastore, M. Cabrini, L. Coppola, S. Lorenzi, P. Marcassoli, and A. Buoso, "Evaluation of the corrosion inhibition of salts of organic acids in alkaline solutions and chloride contaminated concrete," *Mater. Corros.*, 2011, doi: 10.1002/maco.201005789.
- [108] J. M. Gaidis, "Chemistry of corrosion inhibitors," *Cem. Concr. Compos.*, 2004, doi: 10.1016/S0958-9465(03)00037-4.
- [109] A. M. Abdel-Gaber, E. Khamis, and A. Hefnawy, "Utilizing Arghel extract as corrosion inhibitor for reinforced steel in concrete," *Mater. Corros.*, 2011, doi: 10.1002/maco.201005653.
- [110] H. E. Jamil, A. Shriri, R. Boulif, M. F. Montemor, and M. G. S. Ferreira, "Corrosion behaviour of reinforcing steel exposed to an amino alcohol based corrosion inhibitor," *Cem. Concr. Compos.*, 2005, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.019.

- [111] Μάλλη, Βασιλική. 'Προστασία του σπλισμού στο σκυρόδεμα σε θαλάσσιο περιβάλλον με αναστολές διάβρωσης και επικαλύψεις.' (2015).
- [112] ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, 'ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ 4.'
- [113] T. Zafeiropoulou, E. Rakanta, and G. Batis, "Performance evaluation of organic coatings against corrosion in reinforced cement mortars," in *Progress in Organic Coatings*, 2011, doi: 10.1016/j.porgcoat.2011.04.005.
- [114] A. M. Aguirre-Guerrero, R. A. Robayo-Salazar, and R. M. de Gutiérrez, "A novel geopolymers application: Coatings to protect reinforced concrete against corrosion," *Appl. Clay Sci.*, 2017, doi: 10.1016/j.clay.2016.10.029.
- [115] Μπατής, Γ., and Π. Καρύδης. 'Καθοδική Προστασία του σπλισμού στο σκυρόδεμα.' 13ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Ρέθυμνο (1999).
- [116] Κυριάκου, Ελένη. Διάβρωση του σπλισμού του σκυροδέματος. BS thesis. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Σχολή Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, 2011.
- [117] Μπατής, Γ., and Ε. Ντάφλος. 'Μελέτη Καθοδικής Προστασίας Γενικού Κρατικού Νοσοκομείου Νίκαιας.' (2008).
- [118] P. A. Schweitzer, "Cathodic protection," in *Corrosion and Corrosion Protection Handbook, Second Edition*, 2017.
- [119] P. Pedefferri, "Cathodic protection and cathodic prevention," *Constr. Build. Mater.*, 1996, doi: 10.1016/0950-0618(95)00017-8.
- [120] L. Bertolini, F. Bolzoni, P. Pedefferri, L. Lazzari, and T. Pastore, "Cathodic protection and cathodic prevention in concrete: Principles and applications," *J. Appl. Electrochem.*, 1998, doi: 10.1023/A:1003404428827.
- [121] Κουλουμπή, Νίκη. 'Ηλεκτροχημεία.' Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα (2005).
- [122] E. Rakanta, T. Zafeiropoulou, and G. Batis, "Corrosion protection of steel with DMEA-based organic inhibitor," *Constr. Build. Mater.*, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.030.
- [123] Κουλουμπή, Ν., and Α. Καραντώνης. 'Προσδιορισμός της μορφής και της ταχύτητας διάβρωσης μετάλλων με τη μέθοδο ανάλυσης ηλεκτροχημικού θορύβου.' Σημειώσεις Ασκήσεων Εργαστηρίου για το μάθημα «Φθορά και Προστασία Υλικών», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2009DIN (2009)
- [124] ASTM C876-15, "ASTM Standard C876," *Annu. B. ASTM Stand.*, 2015, doi: 10.1520/C0876-15.2.
- [125] ASTM C876, "ASTM C 876 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete," *ASTM Stand.*, 2016, doi: 10.1520/C0876-15.2.
- [126] S. W. Tang, Y. Yao, C. Andrade, and Z. J. Li, "Recent durability studies on concrete structure," *Cement and Concrete Research*. 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.021.
- [127] ASTM, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete 's Ability to Resist Chloride," *C 1202-07*, 2009, doi: 10.1520/C1202-10.2.
- [128] "Earth Conduction Effects in Transmission Systems," *Students Q. J.*, 1949, doi: 10.1049/sqj.1949.0067.
- [129] S. Laurens and F. Deby, "Electrochemical Methods," in *Non-destructive Testing and*

Evaluation of Civil Engineering Structures, 2018.

- [130] D. D. Jackson, "Interpretation of Inaccurate, Insufficient and Inconsistent Data," *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1972, doi: 10.1111/j.1365-246X.1972.tb06115.x.
- [131] G. E. Monfore, "the Electrical Resistivity of Concrete," *Portl. Cem. Assoc R D Lab Bull*, 2012.
- [132] P. Azarsa and R. Gupta, "Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review," *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017, doi: 10.1155/2017/8453095.
- [133] EN, British Standard. '12390-8,' Depth of penetration of water under pressure." British Standards Institution (2000).
- [134] Anon, "Permeability of concrete," *Concr. Constr. - World Concr.*, 1989.
- [135] E. P. Kearsley and P. J. Wainwright, "Porosity and permeability of foamed concrete," *Cem. Concr. Res.*, 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00490-2.
- [136] G. Batis, A. Routoulas, and E. Rakanta, "Effects of migrating inhibitors on corrosion of reinforcing steel covered with repair mortar," *Cem. Concr. Compos.*, 2003, doi: 10.1016/S0958-9465(01)00047-6.
- [137] ASTM C1543, "Standard Test Method for Determining The Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding," *Astm*, 1996, doi: 10.1520/C1543-10a.2.
- [138] R. A. Cook and K. C. Hover, "Mercury porosimetry of hardened cement pastes," *Cem. Concr. Res.*, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00083-6.
- [139] E. P. Favvas *et al.*, "Characterization of carbonate rocks by combination of scattering, porosimetry and permeability techniques," *Microporous Mesoporous Mater.*, 2009, doi: 10.1016/j.micromeso.2008.09.015.
- [140] Μπατής Γ. et al. 'Επίδραση του αναστολέα διάβρωσης με βάση την N, N-διμεθυλαμινοαιθανόλη στη προστασία του οπλισμού σκυροδέματος λόγω ενανθράκωσης και ταυτόχρονης παρουσίας χλωριόντων.' 14ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Κως (2003).
- [141] "BSI. 'BS EN 12620: Aggregates for concrete.' (2002)."
- [142] IS 516:2014, "Method of Tests for Strength of Concrete," *IS 516 - 1959 (Reaffirmed 2004)*, 2004, doi: 10.3403/02128947.
- [143] "Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials," *ASTM Special Technical Publication*. 2006, doi: 10.1520/stp169d-eb.
- [144] E. P. Koehler and D. W. Fowler, "Summary of concrete workability test methods," *Int. Cent. Aggregates Res.*, 2003.
- [145] L. Bertolini, B. Elsener, E. Redaelli, and R. Polder, *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair: Second Edition*. 2013.
- [146] J. Broomfield, "Understanding and calculating the corrosion of steel in concrete," in *Corrosion of Steel in Concrete*, 1996.
- [147] R. B. Polder, "Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation," *Constr. Build. Mater.*, 2001, doi: 10.1016/S0950-0618(00)00061-1.
- [148] ISO, EN. '12944-2.' Paints and varnishes—Corrosion protection of steel structures by protective paint systems—Part 2: Classification of environments (ISO 12944 2 (1998)).

- [149] A. Ababneh and M. Sheban, "Impact of mechanical loading on the corrosion of steel reinforcement in concrete structures," *Mater. Struct. Constr.*, 2011, doi: 10.1617/s11527-010-9688-3.
- [150] A. Poursaeed and C. M. Hansson, "The influence of longitudinal cracks on the corrosion protection afforded reinforcing steel in high performance concrete," *Cem. Concr. Res.*, 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2008.03.018.
- [151] M. Stefanoni, U. Angst, and B. Elsener, "Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete – A critical review," *Cement and Concrete Research*. 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.10.007.
- [152] EN 13295 (2004) Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures—Test Methods—Determination of Resistance to Carbonation.
- [153] S. K. Roy, K. B. Poh, and D. O. Northwood, "Durability of concrete - Accelerated carbonation and weathering studies," *Build. Environ.*, 1999, doi: 10.1016/S0360-1323(98)00042-0.
- [154] BS EN 12390-8:2000 (2000) Testing Hardened Concrete, Part 8: Depth of Penetration of Water under Pressure.
- [155] R. Kumar and B. Bhattacharjee, "Assessment of permeation quality of concrete through mercury intrusion porosimetry," *Cem. Concr. Res.*, 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.08.013.
- [156] B. B. Das and B. Kondraivendhan, "Implication of pore size distribution parameters on compressive strength, permeability and hydraulic diffusivity of concrete," *Constr. Build. Mater.*, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.055.
- [157] H. Ma, "Mercury intrusion porosimetry in concrete technology: Tips in measurement, pore structure parameter acquisition and application," *J. Porous Mater.*, 2014, doi: 10.1007/s10934-013-9765-4.
- [158] Οδηγός του μαθήματος Επιστήμη, Εργαστηριακός. 'Τεχνική Υλικών του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ.' (2014).
- [159] R. Kumar and B. Bhattacharjee, "Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete," *Cem. Concr. Res.*, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00942-0.
- [160] K. Wang, W. J. Weiss, and S. P. Shah, "Interaction between loading, corrosion, and serviceability of reinforced concrete Improving sulfate-resistivity of concrete with nanoSiO₂ View project Deicing Salt Damage View project," *Artic. Aci Struct. J.*, 2000.
- [161] L. Hariche, Y. Ballim, M. Bouhicha, and S. Kenai, "Effects of reinforcement configuration and sustained load on the behaviour of reinforced concrete beams affected by reinforcing steel corrosion," *Cem. Concr. Compos.*, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.07.010.
- [162] A. Ouglova, Y. Berthaud, F. Foct, M. François, F. Ragueneau, and I. Petre-Lazar, "The influence of corrosion on bond properties between concrete and reinforcement in concrete structures," *Mater. Struct. Constr.*, 2008, doi: 10.1617/s11527-007-9298-x.
- [163] K. F. Tee and C. Q. Li, "A numerical study of maintenance strategy for concrete structures in marine environment," in *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering - Proceedings of the 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, 2011, doi: 10.1201/b11332-94.
- [164] O. Poupard, V. L'Hostis, S. Catinaud, and I. Petre-Lazar, "Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment," *Cem.*

- Concr. Res.*, 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.11.004.
- [165] L. Fedrizzi, F. Azzolini, and P. L. Bonora, "The use of migrating corrosion inhibitors to repair motorways' concrete structures contaminated by chlorides," *Cem. Concr. Res.*, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.05.018.
- [166] F. Pedrosa and C. Andrade, "Corrosion induced cracking: Effect of different corrosion rates on crack width evolution," *Constr. Build. Mater.*, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.030.
- [167] C. Cao, M. M. S. Cheung, and B. Y. B. Chan, "Modelling of interaction between corrosion-induced concrete cover crack and steel corrosion rate," *Corros. Sci.*, 2013, doi: 10.1016/j.corsci.2012.11.028.
- [168] Paulay, Thomas, and MJ Nigel Priestley. 'Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings.' (1992): 135-146.
- [169] Y. Zhao, J. Yu, and W. Jin, "Damage analysis and cracking model of reinforced concrete structures with rebar corrosion," *Corros. Sci.*, 2011, doi: 10.1016/j.corsci.2011.06.018.
- [170] S. J. Jaffer and C. M. Hansson, "Chloride-induced corrosion products of steel in cracked-concrete subjected to different loading conditions," *Cem. Concr. Res.*, 2009, doi: 10.1016/j.cemconres.2008.11.001.
- [171] J. Wang, P. A. M. Basheer, S. V. Nanukuttan, A. E. Long, and Y. Bai, "Influence of service loading and the resulting micro-cracks on chloride resistance of concrete," *Constr. Build. Mater.*, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.005.

10. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

10.1. Appendix.a. Τεχνικά χαρακτηριστικά υλικών



DOMYLCO
Construction Chemicals

Χημικά Δομικά Υλικά

Φουντουκιάς 6, 136 77 Αχαρνές, Αθήνα - Τηλ.: 210 6254470, Φαξ: 210 6254478
- www.domylco.gr

Σειρά CHEMIUM: Πρόσθετα Σκυροδέματος Νέας Γενιάς

CHEMIUM 325

ΥΠΕΡΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗΣ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ - ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΡΕΥΣΤΟΤΗΤΑΣ - ΓΙΑ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ - ΓΙΑ ΓΡΗΓΟΡΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΝΤΟΧΩΝ

Κατηγορία: Σειρά CHEMIUM: Πρόσθετα Σκυροδέματος Νέας Γενιάς

Το CHEMIUM 325 είναι υδατικό διάλυμα τροποποιημένων πολυμερών έτοιμο για χρήση, πολύ μεγάλης απόδοσης τόσο σε ρευστότητα όσο και σε διάρκεια ρευστότητας. Πληροί την προδιαγραφή EN 934-2 πίνακας 3.1 – 3.2.

ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ

Το CHEMIUM 325 είναι ιδανικό πρόσθετο για μεταφερόμενα σκυροδέματα μεγάλων απαιτήσεων όπως π.χ. πολύ χαμηλός λόγος νερού / τσιμέντου.

Εχοντας αυτήν την δυνατότητα χρησιμοποιείται στην παραγωγή μεταφερόμενου σκυροδέματος επιτυγχάνοντας πολύ υψηλές πρώιμες και τελικές αντοχές και υψηλές πυκνότητες σκυροδέματος. Προσδίδει ρευστότητα πολύ μεγάλης διάρκειας.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Ρευστό αντλητό σκυρόδεμα με πολύ χαμηλό λόγο νερού/τσιμέντου χωρίς πτώση κάθισης.
- Αυξάνει την στεγανότητα λόγω υψηλής μείωσης του νερού.
- Ελαττώνει ή και αφαιρεί την απαίτηση χρήσης θέρμανσης στις προκατασκευές.
- Δεν απαιτεί δόνηση του σκυροδέματος.
- Βελτιώνει τη δομή και την εμφάνιση του σκυροδέματος.
- Αυξάνει πολύ τις πρώιμες (12-24 ώρες) και τελικές αντοχές.
- Αυξάνει την πρόσφυση του σκυροδέματος στον οπλισμό.
- Μειώνει τον ερπισμό και τις ρηγματώσεις.

ΤΡΟΠΟΣ ΧΡΗΣΗΣ

Το CHEMIUM 325 λόγω της μεγάλης διάρκειας ρευστότητας που προσδίδει στο σκυρόδεμα προστίθεται αποκλειστικά στον αναμικτήρα της μονάδας παραγωγής. Διάρκεια ρευστότητας 1-2 ώρες στους 20 C.

Δοσολογία:



DOMYLCO
Construction Chemicals

Χημικά Δομικά Υλικά

Φουντουκιάς 6, 136 77 Αχαρνές, Αθήνα - Τηλ.: 210 6254470, Φαξ: 210 6254478
- www.domylco.gr

Σειρά CHEMIUM: Πρόσθετα Σκυροδέματος Νέας Γενιάς

CHEMIUM 325

Για συνήθεις θερμοκρασίες και για τα ελληνικά τσιμέντα συνιστάται δοσολογία 0,5 - 3 κιλά για 100 κιλά τσιμέντου. Για την επίτευξη λόγων νερού / τσιμέντο κάτω από 0,3, η δόση μπορεί να αυξηθεί ως και 5 κιλά στα 100 κιλά τσιμέντου ή και παραπάνω ανάλογα με τις ανάγκες, κατόπιν δοκιμών, χωρίς παρενέργειες.

Η δοσολογία εξαρτάται από την θερμοκρασία, την ποσότητα και την ποιότητα τσιμέντου και αδρανών, από τον λόγο N / T κλπ.

ΧΡΗΣΙΜΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Συσκευασία: Βαρέλια 220 kg. Δοχεία 20 kg.

Αποθήκευση: 6 μήνες στην αρχική κλειστή συσκευασία και σε δροσερό μέρος.

Αν παγώσει, το ξεπαγώνουμε σε χαμηλή θερμοκρασία (30 C) ανακατεύοντας και το χρησιμοποιούμε χωρίς πρόβλημα.

Το CHEMIUM 325 συνεργάζεται με τα άλλα πρόσθετα της εταιρείας μας.



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 N/T κ.α. Το CHEM PROTECT δεν υποκαθιστά αλλά προϋποθέτει μία σωστή μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος.

Προσοχή: Συνιστάται η ποσότητα CHEM PROTECT να συνυπολογίζεται στην ολική ποσότητα νερού της σύνθεσης όταν αυτό χρησιμοποιείται σε νωπό σκυρόδεμα.

ΧΡΗΣΙΜΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Συσκευασία: Βαρέλια 200 kg. Δοχεία 20 kg

Αποθήκευση: 6 μήνες στην αρχική κλειστή συσκευασία και σε δροσερό μέρος.

Το CHEM PROTECT συνεργάζεται με τα άλλα πρόσθετα της εταιρείας μας.



DOMYLCO
Construction Chemicals

Χημικά Δομικά Υλικά

Φουντουκιάς 6, 13671 Πιπνές, Αθήνα Τηλ.: 210 6254470, Φαξ: 210 6254478 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

Κατανάλωση 200 g/m² ανά στρώση. Σε απορροφητικό μπετόν και για καλύτερο αποτέλεσμα εφαρμόστε 2 στρώσεις. Εφαρμόστε τη δεύτερη στρώση μόλις απορροφηθεί η πρώτη και όχι αργότερα.



DOMYLCO
Construction Chemicals

Χημικά Δομικά Υλικά

Φουντουκιάς 6, 13671 Αιπρινές, Αθήνα Τηλ.: 210 6254470, Φαξ: 210 6254478 domylco.gr

Υλικά Επιφανειακής Προστασίας - Υλικά Δαπέδων

KRISTALION

Προσοχή: Μη χρησιμοποιείτε KRISTALION σε επιφάνειες που θα καλυφθούν με μπετόν ή κονία. Στην περίπτωση αυτή, η επιφάνεια θα πρέπει να ξεπλυθεί πρώτα με διάλυμα ξιδιού σε νερό 1:20. Το KRISTALION είναι συμβατό με μπετόν που έχει υποστεί επεξεργασία με DOMOCRON.

ΧΡΗΣΙΜΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Συσκευασία: Δεξαμενές 1100 kg. Βαρέλια 200 kg. Δοχεία 20 kg.

Αποθήκευση: 6 μήνες στην αρχική κλειστή συσκευασία και σε δροσερό μέρος.

ΠΡΟΣ : ΚΟΚΛΑΣ Ι-ΓΕΩΡΓΟΥΛΙΑΣ Χ-ΤΟΥΡΝΑΣ Κ ΟΕ

Ασπρόπυργος, 28.04.2015

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ - ΤΕΧΝΙΚΟ ΔΕΛΤΙΟ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ
ΚΑΤΑ EN 10204/3.1

Βεβαιώνεται ότι η ποσότητα συγκολλησίμου χάλυβα σπλισμού σκυροδέματος κατηγορίας B500C που σας παραδίδε προέρχεται από τις παρακάτω χυτεύσεις, έχει ελεγχθεί και πληροί τις απαιτήσεις των προτύπων ΕΛΟΤ EN 10080 και ΕΛΟΤ 1421-3. Η παραπάνω ποσότητα χάλυβα έχει ελεγχθεί και βρέθηκε ελεύθερη από ραδιενέργεια.

Δελτίο Αποστολής : ΔΑ 1210006495

Ημερομηνία Αποστολής : 28.04.2015

Χυτήριο No	d mm	C %	S %	P %	N %	Cu %	Ceq %	Re MPa	Rm MPa	Rm/Re	Agt %	fR	Κάμψη / Ανάκαμψη
02458	14.0	0,21	0,031	0,018	0,011	0,38	0,43	556	657	1,18	9,7	OK	OK
03548	18.0	0,21	0,032	0,010	0,011	0,25	0,38	567	674	1,19	9,3	OK	OK
00823	12.0	0,21	0,028	0,022	0,012	0,39	0,38	546	639	1,17	9,8	OK	OK
00828	14.0	0,20	0,036	0,031	0,011	0,38	0,37	552	652	1,18	10,2	OK	OK
00887	14.0	0,20	0,038	0,020	0,011	0,43	0,37	549	645	1,17	10,1	OK	OK

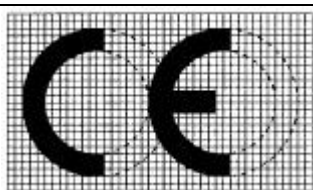
 Αριθμός Πιστοποιητικού:
 XOS - C - 08/12 (ΡΑΒΔΟΙ)
 XOS - C - 09/12 (ΡΟΛΛΟΙ)

 ΣΗΜΑΝΣΗ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ
 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

 Αριθμός Πιστοποιητικού:
 XOS - C - 10/12 (ΡΑΒΔΟΙ)
 XOS - C - 03/12 (ΡΟΛΛΟΙ)

 ΣΗΜΑΝΣΗ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ
 ΛΙΜΑΣΣΟΛΟΥ


Ο ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ



0654-05

Χάλυψ Δομικά Υλικά Α.Ε.
Υποκατάστημα Λατομικού Κλάδου – «Λατομεία Χάλυψ», HeidelbergCement 196 00
Κεραμιδέζα Μάνδρα, Αττική – Ελλάς

-
Halyps Building Materials S.A.
Quarry Division – “Halyps Quarries”, HeidelbergCement 196 00
Keramideza, Mandra, Attica - Greece

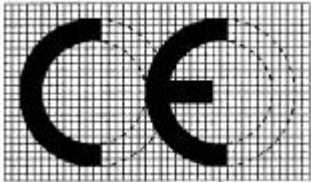
05

No. 1128 – CPR – 0691 / 1

EN 12620

Άμμος Σκυροδέματος - Concrete Sand

Μέγεθος Αδρανούς	Particle size	0/4
Κοκκομετρική Διαβάθμιση	Grading	G _{F85}
Πυκνότητα	Particle density (pssd)	2,64 Mg/m ³
Καθαρότητα	Cleanliness	
Περιεχόμενη Παιπάλη	Fines content	f ₁₆
Ποιοτικός Έλεγχος Παιπάλης	Fines quality	MB : 0,5 SE4 : 72
Μέτρο Λεπτότητας	Fines modulus	CF
Σύνθεση/περιεχόμενο	Composition/content	
Προσδιορισμός Ευδιάλυτων Χλωριόντων	Chloride content	0,001% C
Προσδιορισμός Ευδιάλυτων σε Οξεία SO ₃	Acid-soluble sulfate content	AS _{0,2}
Προσδιορισμός Οργανικών Προσμίξεων	Sodium hydroxide	Χρώμα διαλύματος ανοιχτότερο του προτύπου - Colour solution lighter than standard colour
Υδαταπορροφητικότητα	Water absorption	0,4%
Ανθεκτικότητα σε Αποσάρθρωση	Durability against freeze-thaw	MS ₁₈
Ανθεκτικότητα σε Αλκαλοπυριτική Αντίδραση	Durability against alkali-silica reactivity	Αβλαβές – Innocuous
Ελαφροβαρείς		0.25%
Ολικό θείο	Total sulfur test	Μη ανισχνεύσιμο
Πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες		Κάτω από τα επιτρεπτά όρια
Βαρέα μέταλλα		Κάτω από τα επιτρεπτά όρια

Ραδιονουκλίδια		Κάτω από τα επιτρεπτά όρια
		
0654-05 Χάλυψ Δομικά Υλικά Α.Ε. Υποκατάστημα Λατομικού Κλάδου – «Λατομεία Χάλυψ», HeidelbergCement 196 00 Κεραμιδέζα Μάνδρα, Αττική – Ελλάς - Halyps Building Materials S.A. Quarry Division – “Halyps Quarries”, HeidelbergCement 196 00 Keramideza, Mandra, Attica - Greece		
05 No. 1128 – CPR – 0691 / 4		
EN 12620 Γαρμπίλι - Fine Gravel		
Σχήμα Κόκκων	Particle shape	F ₁₅
Μέγεθος Αδρανούς	Particle size	4/16
Κοκκομετρική Διαβάθμιση	Grading	G _{C90/15}
Ανοχών Κοκκομετρίας	Tolerance category	G _{T17,5}
Πυκνότητα	Particle density (pssd)	2,64 Mg/m ³
Καθαρότητα	Cleanliness	
Περιεχόμενη Παιπάλη	Fines content	f _{1,5}
Αντοχή σε Θρυμματισμό LA	Resistance to fragmentation	LA ₃₀
Υδαταπορροφητικότητα	Water absorption	WA ₂₄ 0,8
Ανθεκτικότητα σε Αποσάρθρωση	Durability against freeze-thaw	MS ₁₈
Δείκτης στίλβωσης αδρανών	PSV	PSV34
Χουμικά συστατικά	Hummus	Δεν περιέχει χουμικά συστατικά
Ελαφροβαρείς	Light weight organic contaminators	<0.25%
Προσδιορισμός Ευδιάλυτων Χλωριόντων	Chloride content	0,001% C
Προσδιορισμός Ευδιάλυτων σε Οξέα SO ₃	Acid-soluble sulfates content	AS _{0,2}
Αντοχή σε Φθορά (Micro Deval)	Resistance to wear (Micro Deval)	M _{DE} 20
Προσδιορισμός Οργανικών Προσμίξεων	Sodium hydroxide	Χρώμα διαλύματος ανοιχτότερο του προτύπου - Colour solution lighter than standard colour
Ολικό θείο	Total sulfur test	Μη ανισχνεύσιμο
Πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες		Κάτω από τα επιτρεπτά όρια

Βαρέα μέταλλα		Κάτω από τα επιτρεπτά όρια
		
0654-05 Χάλυψ Δομικά Υλικά Α.Ε. Υποκατάστημα Λατομικού Κλάδου – «Λατομεία Χάλυψ», HeidelbergCement 196 00 Κεραμιδέζα Μάνδρα, Αττική – Ελλάς - Halyps Building Materials S.A. Quarry Division – “Halyps Quarries”, HeidelbergCement 196 00 Keramideza, Mandra, Attica - Greece No. 1128 – CPR – 0691 / 5		
EN 12620 Χαλίκι - Gravel		
Σχήμα Κόκκων	Particle shape	FI ₁₅
Μέγεθος Αδρανούς	Particle size	11/32
Κοκκομετρική Διαβάθμιση	Grading	G _{c90/15}
Ανοχών Κοκκομετρίας	Tolerance category	G _{T15}
Πυκνότητα	Particle density (pssd)	2,68 Mg/m ³
Καθαρότητα	Cleanliness	
Περιεχόμενη Παιπάλη	Fines content	f _{1,5}
Αντοχή σε Θρυμματισμό LA	Resistance to fragmentation	LA ₃₀
Υδαταπορροφητικότητα	Water absorption	1% WA ₂₄
Ανθεκτικότητα σε Αποσάρθρωση	Durability against freeze-thaw	MS ₁₈
	PSV	PSV ₃₄
Χουμικά συστατικά	Hummus	Δεν περιέχει χουμικά συστατικά
Ελαφροβαρείς	Light weight organic contaminators	<0.25%
Προσδιορισμός Ευδιάλυτων Χλωριόντων	Chloride content	0,001% C
Προσδιορισμός Ευδιάλυτων σε Οξέα SO ₃	Acid-soluble sulfates content	AS _{0,2}
Αντοχή σε Φθορά (Micro Deval)	Resistance to wear (Micro Deval)	M _{DE 20}
Προσδιορισμός Οργανικών Προσμίξεων	Sodium hydroxide	Χρώμα διαλύματος ανοιχτότερο του προτύπου - Colour solution lighter than standard colour
Ολικό θείο	Total sulfur test	Μη ανισχνεύσιμο
Πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες		Κάτω από τα επιτρεπτά όρια
Βαρέα μέταλλα		Κάτω από τα επιτρεπτά όρια

10.2. Appendix.b. Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών

	CC1	CC2	CC3	FAC	SCC
CEM II 42.5	330	330	330	400	500
Νερό	165	165	165	190	200
<u>Θραυστά</u> <u>Ασβεστολιθικά:</u>					
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.С)	-	13.2	-	-	-
Ρυθμιστής Ιξώδους VMA	-	-	-	0.5	0.5
Σύνολο συστατικών (kg/m ³)	2402	2415.2	2402	2349	2326
Λόγος W/C	0.50	0.50	0.50	0.48	0.40
Κάθιση - Εξάπλωση (cm)	2-3cm	S2	2-3cm	S2	60cm
Θερμοκρασία (°C)	19.3	19.2	19	19	19.3
Ημ/νία σκυροδέτησης:	20-03-19	05-04-19	27-03-19	22-03-19	02-04-19
Ημ/νία 28 ημερών:	18-06-19	03-05-19	24-04-19	19-04-19	30-04-19

Δυναμικό Διάρθρωσης Οπλισμού (βάση ηλεκτροδίου αναφοράς (θετικού γαλκού) - (ASTM C876)

Α.Α. Μέγερσης	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
3.0.3.7 Μηνιαίο	08-04-16	11-05-16	08-06-16	07-07-16	09-09-16	15-10-16	11-12-16	03-02-17	08-04-17	10-05-17	19-06-17	11-07-17	07-09-17	22-10-17	30-11-17	15-01-18	24-02-18	09-04-18	25-05-18	22-07-18	15-09-18	17-10-18	09-12-18	20-01-19	27-02-19	29-03-19	
1.A.1	-38	-18	-18	-10	-34	-23	-32	-29	-33	-56	-106	-98	-142	-85	-88	-125	-137	-88	-111	-141	-159	-136	-120	-112	-118	-120	
1.A.2	-54	-14	-30	-8	-9	-11	-38	-42	-13	-45	-111	-105	-107	-89	-107	-135	-137	-148	-163	-165	-168	-128	-132	-143	-136	-132	
1.B.1	-29	-32	-22	-12	-45	-22	-52	-17	-81	-113	-193	-108	-198	-172	-208	-219	-149	-158	-150	-184	-230	-222	-309	-354	-330	-385	
1.B.2	-24	-15	-25	-11	-57	-47	-26	-38	-62	-111	-180	-109	-169	-145	-188	-178	-156	-201	-161	-192	-262	-241	-337	-370	-367	-361	
1.F.1	-69	-81	-20	-23	-73	-112	-72	-118	-48	-174	-206	-190	-112	-169	-172	-166	-227	-198	-224	-244	-269	-172	-166	-337	-396	-428	-442
1.F.2	-68	-62	-49	-42	-103	-83	-96	-86	-178	-183	-205	-221	-221	-202	-208	-195	-237	-207	-239	-207	-252	-315	-323	-389	-431	-425	
1.A.1	-16	-64	-59	-50	-83	-84	-48	-123	-113	-130	-218	-227	-198	-187	-209	-191	-270	-287	-302	-268	-332	-342	-332	-389	-390	-411	
1.A.2	-13	-58	-70	-38	-79	-60	-122	-139	-198	-212	-235	-199	-248	-189	-241	-220	-268	-222	-287	-320	-367	-345	-367	-402	-380	-424	
2.A.1	-26	-91	-17	-9	-57	-60	-12	-22	-33	-23	-45	-63	-121	-93	-112	-164	-123	-129	-138	-146	-172	-112	-122	-121	-115	-158	
2.A.2	-19	-83	-24	-45	-47	-24	-39	-36	-80	-70	-36	-103	-80	-119	-118	-112	-135	-156	-171	-122	-106	-132	-138	-111	-130	-170	
2.B.1	-60	-91	-97	-95	-86	-15	-56	-75	-85	-158	-175	-108	-113	-144	-188	-174	-171	-207	-202	-195	-233	-239	-291	-336	-350	-369	
2.B.2	-38	-77	-112	-102	-112	-113	-48	-76	-80	-70	-174	-159	-111	-181	-157	-178	-204	-222	-191	-176	-248	-242	-284	-312	-339	-340	
2.F.1	-47	-82	-98	-103	-100	-113	-125	-98	-137	-107	-200	-157	-190	-188	-212	-216	-194	-212	-238	-256	-230	-238	-333	-338	-384	-385	
2.F.2	-49	-105	-131	-115	-114	-92	-122	-94	-153	-193	-187	-202	-232	-230	-169	-228	-248	-232	-221	-310	-294	-275	-362	-357	-370	-368	
2.A.1	-98	-108	-123	-132	-124	-78	-72	-81	-98	-145	-200	-157	-255	-212	-234	-186	-215	-198	-222	-264	-274	-303	-357	-349	-360	-383	
2.A.2	-49	-113	-131	-111	-113	-68	-78	-82	-100	-151	-151	-208	-208	-232	-218	-197	-223	-239	-243	-272	-307	-277	-326	-328	-388	-397	
3.A.1	-72	-26	-24	-59	-12	-5	-43	-11	-27	-43	-61	-46	-103	-82	-108	-120	-109	-106	-162	-178	-172	-221	-201	-168	-170	-190	
3.A.2	-49	-58	-18	-34	-23	-9	-49	-36	-33	-66	-105	-58	-56	-92	-112	-140	-120	-152	-108	-113	-182	-111	-121	-177	-160	-115	
3.B.1	-85	-83	-97	-41	-92	-52	-14	-31	-102	-52	-119	-188	-159	-185	-152	-152	-183	-166	-212	-212	-277	-312	-344	-348	-370	-373	
3.B.2	-87	-109	-86	-25	-56	-44	-55	-53	-120	-102	-179	-198	-135	-210	-118	-198	-222	-192	-187	-230	-245	-313	-305	-361	-345	-353	
3.F.1	-68	-82	-108	-63	-56	-30	-46	-74	-136	-197	-202	-211	-221	-169	-189	-239	-188	-199	-253	-276	-289	-401	-367	-405	-413		
3.F.2	-107	-88	-118	-47	-89	-32	-44	-79	-105	-119	-194	-237	-89	-194	-255	-199	-197	-274	-263	-211	-283	-319	-303	-351	-391	-430	-405
3.A.1	-98	-81	-133	-133	-114	-77	-89	-56	-179	-156	-200	-232	-202	-239	-198	-239	-267	-228	-278	-271	-301	-268	-287	-337	-395	-415	
3.A.2	-73	-103	-137	-142	-90	-66	-88	-80	-174	-172	-219	-222	-204	-227	-211	-188	-281	-319	-302	-358	-340	-362	-388	-392	-440	-421	
4.A.1	-33	-23	-65	-18	-13	-23	-38	-22	-9	32	-76	-89	-132	-109	-87	-120	-110	-132	-107	-154	-130	-162	-112	-138	-132	-147	
4.A.2	-29	-8	-31	-3	-52	-41	-62	-10	-56	-15	-58	-77	-62	-98	-111	-138	-119	-107	-148	-161	-160	-101	-141	-117	-120	-105	
4.B.1	-39	-21	-82	-38	-30	-22	-72	-22	-84	-139	-166	-112	-98	-127	-98	-131	-141	-98	-185	-154	-170	-159	-212	-248	-240	-305	
4.B.2	-18	-5	-96	-47	-56	-13	-38	-15	-198	-188	-241	-154	-156	-161	-123	-133	-168	-114	-198	-139	-181	-205	-212	-238	-287	-293	
4.F.1	-52	-14	-24	-51	-90	-24	-36	-48	-207	-180	-249	-190	-191	-187	-180	-176	-184	-154	-186	-159	-177	-169	-275	-271	-333	-335	
4.F.2	-25	-11	-40	-40	-109	-81	-73	-72	-86	-190	-185	-222	-169	-211	-198	-226	-201	-168	-178	-184	-199	-251	-287	-257	-340	-380	
4.A.1	-50	-11	-75	-32	-105	-37	-33	-34	-112	-189	-222	-196	-156	-215	-170	-178	-234	-182	-201	-229	-272	-312	-290	-351	-370	-366	
4.A.2	-52	53	-28	-36	-113	-58	-43	-15	-148	-214	-228	-212	-208	-220	-193	-201	-227	-209	-169	-194	-242	-310	-319	-341	-337	-385	
5.A.1	-63	-57	-35	-15	-22	-8	-62	-33	-19	-12	-45	-88	-132	-105	-120	-102	-122	-157	-148	-125	-155	-111	-168	-118	-127	-131	
5.B.1	-62	-73	-23	-8	-21	-11	-28	-51	-85	-60	-113	-105	-90	-159	-138	-232	-214	-197	-211	-290	-322	-355	-359	-405	-405	-412	
5.F.1	-15	-60	-67	-68	-95	-61	-28	-47	-104	-111	-167	-156	-139	-219	-180	-211	-282	-260	-367	-357	-408	-412	-399	-418	-466	-450	
5.F.2	-2	-68	-11	-52	-113	-85	-95	-186	-182	-204	-227	-189	-209	-238	-199	-237	-287	-323	-311	-354	-385	-392	-379	-443	-493	-461	
6.A.1	-21	-6	-8	-49	-57	-24	-47	-52	-70	-61	-76	-65	-48	-84	-105	-138	-103	-98	-141	-124	-140	-108	-128	-132	-130	-144	
6.B.1	-26	-12	-14	-69	-82	-47	-12	-38	-89	-106	-128	-107	-90	-122	-92	-124	-136	-109	-131	-135	-165	-188	-199	-195	-201	-232	
6.F.1	-39	-40	-20	-72	-93	-56	-28	-63	-101	-108	-156	-112	-132	-142	-123	-208	-171	-186	-202	-194	-230	-217	-202	-226	-290	-285	
6.F.2	-38	-40	-18	-38	-59	-44	-12	-24	-79	-96	-163	-157	-141	-173	-168	-182	-189	-159	-179	-188	-221	-202	-228	-262	-260	-303	

Ειδική Αντίσταση Σκυροδέματος

Ασκήσιο / Α.Α. Μετρώμε	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
Ημερομ.	08-04-16	11-05-16	08-06-16	07-07-16	09-09-16	15-10-16	11-12-16	03-02-17	08-04-17	10-05-17	19-06-17	11-07-17	07-09-17	22-10-17	30-11-17	15-01-18	24-02-18	09-04-18	25-05-18	22-07-18	15-09-19	17-10-18	09-12-18	20-01-18	27-02-19		
C30/37	1.A.1	11	10	24	29	33	31	30	32	39	51	44	41	35	23	34	39	33	33	42	41	27	37	44	34	36	
	1.A.2	14	11	23	29	23	27	36	40	43	50	44	41	38	33	36	36	29	35	44	39	26	39	41	40	34	
	1.B.1	12	10	19	32	24	24	16	42	36	39	45	40	32	29	33	38	41	35	38	37	28	29	34	32	24	
	1.B.2	12	14	25	24	19	21	24	49	39	42	43	38	36	32	35	42	31	34	43	32	26	35	30	29	25	
	1.F.1	17	14	23	33	34	28	23	47	41	41	49	39	40	37	41	44	32	41	45	42	22	31	29	29	23	
	1.F.2	14	17	21	28	23	24	27	41	45	45	47	45	37	41	38	34	39	39	44	41	26	28	32	29	20	
	1.A.1	20	18	21	27	29	31	26	45	44	48	47	40	38	30	38	36	38	38	43	38	25	29	31	32	20	
	1.A.2	13	14	22	31	20	23	25	48	44	48	43	35	40	29	40	41	40	40	47	39	24	33	31	29	21	
C30/37-ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ	2.A.1	10	17	16	29	15	24	36	37	29	28	37	35	43	29	42	29	45	42	38	41	34	40	41	39	41	
	2.A.2	7.6	20	13	24	11	24	28	39	36	36	37	35	42	34	41	31	39	38	39	32	32	41	41	39	35	
	2.B.1	8.3	22	14	21	10	27	35	41	46	39	42	38	38	31	36	28	29	34	38	30	35	30	37	33	29	
	2.B.2	6.7	26	17	20	15	22	30	48	39	44	36	35	35	33	35	38	36	36	41	37	27	31	30	35	24	
	2.F.1	9.4	29	18	22	22	27	33	44	40	44	43	40	42	38	42	41	46	42	34	42	34	27	31	29	25	
	2.F.2	10	14	16	29	13	28	40	41	45	41	42	49	41	46	38	49	31	44	50	42	32	34	26	21	27	24
	2.A.1	9.8	22	25	27	16	23	43	42	42	40	41	38	44	39	50	33	43	49	34	38	35	32	27	34	31	
	2.A.2	9.2	12	21	29	13	27	39	44	47	44	46	43	41	44	41	34	44	41	32	32	36	29	32	29	29	
C30/37-ΒΕΚΑΖΟΜ.	3.A.1	6.4	18	15	21	19	20	21	42	33	29	43	41	39	29	39	41	38	38	29	38	30	36	44	38	42	
	3.A.2	7.6	21	13	21	14	13	14	45	36	41	39	46	38	28	41	45	46	43	37	48	31	37	43	35	44	
	3.B.1	7.3	17	13	22	13	15	17	44	39	46	48	38	37	31	38	42	41	41	38	44	28	26	33	32	28	
	3.B.2	6.4	21	14	21	10	14	17	41	40	40	41	43	36	33	36	34	39	35	39	34	30	27	41	30	29	
	3.F.1	7.6	21	13	23	15	21	25	43	44	51	44	48	39	27	41	44	51	42	44	46	37	29	27	29	23	
	3.F.2	11	46	20	28	14	19	22	44	44	47	50	50	43	33	42	35	46	41	39	38	34	22	29	39	27	
	3.A.1	11	18	16	23	18	21	24	45	43	41	48	49	38	39	41	39	51	43	44	48	29	37	29	28	33	
	3.A.2	12	29	15	28	10	22	28	45	49	46	51	42	42	31	47	41	44	52	41	53	31	32	26	22	26	
ΓΑΡΜΠΥΑΔΕΡ	4.A.1	11	19	18	23	23	24	28	44	39	35	37	36	33	31	30	27	48	27	41	31	32	35	40	38	38	
	4.A.2	12	17	19	20	20	27	38	41	42	45	35	43	34	28	31	22	42	28	42	32	31	35	32	41	41	
	4.B.1	16	17	23	21	15	19	25	41	38	42	37	42	36	38	32	38	34	28	38	34	29	28	34	29	30	
	4.B.2	15	18	25	24	22	27	26	46	37	39	39	35	38	41	31	42	39	24	40	37	29	30	28	33	28	
	4.F.1	8.9	22	19	21	15	25	30	42	42	43	44	38	33	31	29	44	42	26	52	42	35	44	38	33	41	
	4.F.2	7.6	19	21	22	17	22	27	43	39	39	46	35	41	33	35	31	52	29	42	48	29	42	38	32	34	
	4.A.1	7.8	29	27	32	13	19	30	46	41	46	44	40	38	48	42	42	51	26	40	42	29	27	32	31	35	
	4.A.2	10	22	31	23	13	25	36	43	44	45	47	42	39	44	32	38	48	24	43	46	29	31	34	25	32	
C30/37-ΒΕΚΑΖΟΜ/ΑΝΑΣΤΟΛΕΑ	5.A.1	14	20	21	37	35	41	42	46	44	35	33	48	42	47	43	28	28	43	36	44	29	27	25	32	26	
	5.B.1	14	19	21	31	28	33	31	45	39	37	39	50	48	41	43	32	36	38	42	28	27	32	28	18	16	
	5.F.1	16	22	24	23	26	29	45	46	42	36	40	35	38	38	37	34	29	35	41	32	29	31	22	18	14	
	5.F.2	13	25	25	35	22	31	35	48	43	39	39	39	41	39	35	28	33	29	37	31	34	22	22	21	14	
ΑΥΤΟΕΚΜΟΧΝΩΜΗ ΟΞΑΛΟΧΩΡΗΤΗ	6.A.1	17	21	28	27	35	33	46	52	39	42	46	42	46	33	34	32	34	32	43	39	41	44	39	44	46	
	6.B.1	14	18	25	28	26	36	47	56	41	41	39	48	42	39	39	38	39	37	45	42	45	43	46	46	51	
	6.F.1	14	25	30	32	35	37	47	49	47	44	49	35	47	41	35	44	38	36	46	39	49	42	47	37	47	
	6.F.2	12	16	24	26	40	40	35	50	42	42	45	39	40	35	39	32	38	36	48	43	43	39	45	47	49	

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

66 ημέρες στον θάλαμο

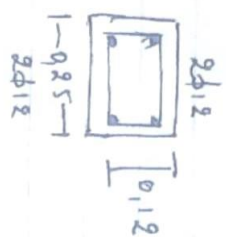
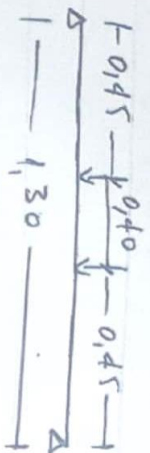
CC1				CC2				CC3				FAC				SCC			
20/3/20				5/4/20				29/3/20				22/3/20				02-04-20			
8	9	11	8	7	8	6	4	4	4	2	6	7	6	7	5	1	0	2	2
8	10	10	8	6	8	6	3	5	3	3	7	8	7	8	5	1	1	3	2
9	9	9	10	8	9	8	3	6	4	3	5	7	7	6	5	1	1	3	1
9	10	9	9	7	7	5	3	4	6	2	6	6	5	7	6	2	1	2	3
8	9	8	8	7	6	6	4	4	5	4	4	5	4	7	7	2	1	1	3
7	8	10	9	6	8	7	2	5	4	3	4	6	4	7	5	1	0	2	1
7	9	10	9	8	7	8	2	5	3	2	4	7	5	6	5	2	1	3	1
8	9	9	9	7	7	8	3	4	4	3	4	6	5	6	5	1	0	2	2
8.8				6.1				4.1				6.0				1.5			

113 ημέρες στον θάλαμο (mm)

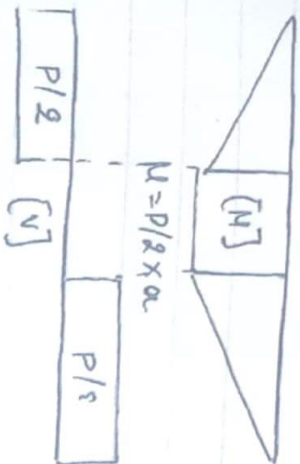
CC1				CC2				CC3				FAC				SCC			
20/3/20				5/4/20				29/3/20				22/3/20				02-04-20			
10	9	10	10	6	6	7	6	5	6	4	5	6	7	6	6	2	3	3	3
10	10	11	11	6	7	7	7	6	6	5	6	6	7	6	6	3	3	3	3
11	10	11	10	6	8	7	8	5	5	6	5	7	8	7	7	3	2	4	2
11	11	10	10	7	8	8	8	5	5	5	5	7	8	7	7	2	2	4	3
10	11	9	11	7	7	8	8	5	6	4	6	7	6	7	7	3	2	3	3
9	10	9	11	6	7	8	7	6	5	4	5	6	6	8	8	3	2	-	2
9	10	10	10	6	6	7	6	6	5	5	5	6	6	8	8	4	3	3	3
9	10	11	10	7	6	7	6	5	5	5	5	6	7	7	8	3	3	3	3
10.1				6.9				5.2				6.8				2.8			

ΔΟΚΙΜΗ ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ - EN 12390										
ΣΥΝΘΕΣΗ	CC1		CC2		CC3		FAC		SCC	
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	
ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ - BS 1881										
ΣΥΝΘΕΣΗ	CC1		CC2		CC3		FAC		SCC	
Βάρος (gr) - αρχ-τελ - 1	8104	8130	8144	8166	7956	7978	7862	7880	7963	7982
Συντελεστής υδτοαπορ. (%) - 1	0.321%		0.270%		0.277%		0.229%		0.239%	
Βάρος (gr) - αρχ-τελ - 2	8064	8092	8082	8096	8126	8142	7950	7968	7998	8014
Συντελεστής υδτοαπορ. (%) - 2	0.347%		0.173%		0.197%		0.226%		0.200%	
Συντελεστής υδτοαπορ. (%) - Μ.Ο.	0.33%		0.22%		0.24%		0.23%		0.22%	

- ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΑΜΦΙΕΡΙΣΤΗΣ ΔΟΚΟΥ (ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ):



$\sigma_{s\delta} \phi 9/15$
 $f_y = 580 \text{ MPa}$
 C 50/57
 $f_{ck} = 50 + 8 = 58 \text{ MPa}$



Προσβεβαινώσιμα με κάλυψη:

$$z = 0,9d = 0,9 \times 0,12 = 0,108 \text{ m}$$

$$F_s = A_s \times f_y = 2 \times 3,14 \times \frac{12^2}{4} \times 580 = 131126 \text{ N}$$

$$N = F_s \times z = 131126 \text{ (N)} \times 0,108 \text{ (m)} = 14162 \text{ Nm} = 14,16 \text{ kNm}$$

$$M = \frac{P}{2} \times a \Rightarrow P = \frac{2N}{a} = \frac{2 \times 14,16}{0,45} = 62,93 \text{ kN} \Rightarrow \boxed{P = 62,93 \text{ kN}}$$

Προσβεβαινώσιμα με τσιπρωσά:

$$V_{red,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} z f_{yd} = \frac{100,48}{150} \times 108 \times 580 = 41961 \text{ N} = 41,96 \text{ kN}$$

$$A_{sw} = 2 \times 3,14 \times \frac{8^2}{4} = 100,48 \text{ mm}^2$$

$$V = \frac{P}{g} \Rightarrow P = 2V = 2 \times 41,96 = 83,92 \text{ kN} \rightarrow \boxed{P_3 = 83,92 \text{ kN}}$$

$$P_u = w_{11y} (P_F, P_S) = w_{11y} (62,93; 83,92) = 62,93 \text{ kN}$$

$$\boxed{P_u = 62,93 \text{ kN}}$$

Βεβλος κάλυψης

Ο τύπος του βεβλούς κάλυψης ισχύει για τον ελαστικό ημίσφαιρο. Εμφανίσιμος δε εμπόδι να θεωρηθεί το γούρνο διαφράγματος. Βεβλος, ήτ ήτα σταθμίσω ομολογεί $R_y = P_u = 62,93 \text{ kN}$
 αρρα:

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{250 \times 150^3}{12} = 70512500 \text{ mm}^4$$

$$E_c = 22 \left(\frac{P_{cm}}{10} \right)^{0,5} = 22 \times \left(\frac{38}{10} \right)^{0,5} = 32,83 \text{ GPa}$$

$$\delta = \frac{P_u (3L^2 - 4a^2)}{48EI} = \frac{62,93 \times 10^3 (\text{N}) \times (3 \times 1300^2 - 4 \times 450^2) (\text{mm}^2) \times 150 (\text{mm})}{48 \times 32,83 \times 10^3 \left(\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) \times 70512500 (\text{mm}^4)}$$

$$= 1,21 \text{ mm}$$

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ - ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΠΗΣ 4 ΣΗΜΕΙΩΝ

CC1-A		CC1-B		CC1-D		CC2-A		CC2-B		CC2-B_repeat		CC2-D		CC3-A		CC3-B		CC3-D		FAC-A		FAC-B		FAC-D		SCC-A		SCC-B		SCC-D	
0	67.05	0	67.05	0	67.05	0	66.68	0	66.68	0	66.68	0	66.68	0	65.66	0	65.66	0	65.66	0	70.77	0	70.77	0	70.77	0	74.57	0	74.57	0	74.57
P	d	P	d	P	d	P	d	P	d	P	d	P	d	P	d	P	d	P	d	P	d	P	d	P	d	P	d	P	d	P	d
-0.00425	0.00016	-0.0121	0.00797	0.00035	-0.00002	0.01051	0.00122	0.00135	0.00039	-0.0044	0.01593	-0.00022	-0.00016	-0.00141	-0.00028	-0.00222	-0.00031	0.0063	0.01011	-0.00802	0.00054	-0.00585	0.00056	-0.00644	-0.00218	-0.00141	0.00086	-0.00538	-0.00238	-0.80415	0.03633
-0.00342	0.00026	-0.01356	0.00827	-0.00149	-0.00031	0.0116	0.00148	0.00392	0.00055	-0.00528	0.01625	0.00149	-0.00011	-0.00278	0.0006	-0.00084	0.00003	0.00238	0.01007	-0.00776	0.00039	-0.00761	0.00027	-0.00827	-0.00215	-0.00241	0.00022	-0.00326	-0.00283	-0.80572	0.03657
-0.0035	0.00047	-0.01263	0.00851	-0.00047	-0.00043	0.01236	0.00115	0.00507	0.00048	-0.00535	0.0158	-0.00001	0.00019	-0.00513	0.00122	0.00204	-0.00051	0.00168	0.01019	-0.00808	0.00069	-0.00832	0.00022	-0.00534	-0.00137	-0.00044	-0.00726	-0.00267	-0.80576	0.03621	
-0.0006	0.00054	-0.01563	0.00836	-0.00113	0.0001	0.00905	0.00118	0.00315	-0.00034	-0.00389	0.01518	-0.00209	0.00026	-0.00543	0.00081	0.00444	-0.00091	-0.00007	0.01079	-0.00461	0.00109	-0.00686	0.00035	-0.00282	-0.00229	0.00017	-0.00025	-0.011	-0.00251	-0.80501	0.0361
0.00416	0.00063	-0.00935	0.00833	0.00151	0.00021	0.01151	0.00123	0.00218	-0.00031	-0.00418	0.01502	-0.00014	0.00017	-0.00305	0.00056	0.00693	-0.0008	0.002	0.0108	-0.00403	0.00125	-0.00416	0.00021	-0.00264	-0.00227	0.00012	-0.00024	-0.00988	-0.0022	-0.80131	0.03646
0.003	0.0103	-0.00481	0.00841	-0.00031	0.00033	0.0121	0.00127	0.00164	0.00007	-0.00356	0.01536	-0.00012	0.00001	-0.00374	0.00024	0.00753	-0.00102	0.00663	0.01008	-0.00845	0.00105	-0.00584	0.00013	-0.00388	-0.00253	0.00197	-0.00388	-0.01256	-0.00246	-0.80175	0.03646
-0.00129	0.00098	-0.00411	0.00828	0.00094	0.00029	0.0123	0.0016	-0.001	-0.00407	-0.00407	0.01521	-0.00009	-0.00037	-0.00362	-0.00009	0.00498	-0.00069	0.00647	0.0097	-0.00826	0.00127	-0.00796	0	-0.0045	-0.00332	-0.00175	-0.00053	-0.0149	-0.0032	-0.79946	0.03683
-0.00306	0.00111	-0.00378	0.00836	0.00051	0.00014	0.00952	0.00122	-0.00048	0.00022	-0.00105	0.01523	0.00161	-0.00022	-0.00135	0.00043	0.00436	-0.00023	0.00308	0.01015	-0.00325	0.00138	-0.00604	0.00045	-0.00316	-0.00338	-0.00317	-0.00102	-0.0108	-0.00327	-0.79933	0.03704
-0.00285	0.0008	-0.00352	0.00851	-0.00243	0.00009	0.00938	0.00102	0.0036	0.00021	-0.00431	0.01563	0.00383	0.00061	-0.00164	-0.00016	0.00381	-0.00029	0.00214	0.01056	-0.00028	0.00086	-0.00264	0.00082	0.0003	-0.00268	0.00025	-0.0014	-0.00621	-0.00308	-0.80127	0.03679
-0.0025	0.00028	-0.00512	0.00803	-0.00251	0.00002	0.01228	0.00079	0.00425	0	-0.00874	0.01591	0.00478	0.0008	-0.0036	-0.00036	0.00387	0.00012	0.00425	0.01055	-0.00144	0.00067	-0.0018	0.00069	0.00067	-0.00251	0.00583	-0.00132	-0.00308	-0.00276	-0.80325	0.03612
0.00156	0.00048	-0.00688	0.00766	-0.00026	-0.0002	0.0151	0.00072	0.00533	0.00008	-0.00709	0.01571	0.00478	0.00008	-0.00572	-0.00024	0.00752	-0.00009	0.00734	0.01047	-0.00288	0.00052	-0.00099	0.00042	-0.00011	-0.00264	0.00516	-0.00069	-0.00401	-0.00299	-0.80301	0.03586
0.00114	0.00063	-0.00417	0.00806	0.00012	0.00012	0.01213	0.00058	0.00739	0.00007	-0.00796	0.01541	0.00376	0.00033	-0.00457	0.00067	0.007	-0.00005	0.01028	0.01036	-0.0053	0.00055	0.00099	0.00119	-0.00186	-0.00259	0.00041	-0.00039	-0.00402	-0.00327	-0.8057	0.03602
-0.00149	0.00038	-0.00586	0.00813	0.00018	0.00035	0.00924	0.00029	0.00828	-0.00032	-0.01106	0.01541	0.00296	0.00022	0.00075	0.00097	0.00514	-0.00034	0.00788	0.01048	-0.00902	0.00042	0.00132	0.00014	-0.00458	-0.00272	0.00654	-0.00071	-0.00057	-0.00334	-0.80582	0.03603
-0.00174	0.0002	-0.00353	0.00789	0.00137	0.00014	0.01082	0.00032	0.00906	-0.0006	-0.01058	0.01574	0.00417	-0.00029	0.00336	0.00052	0.00498	-0.00036	0.00419	0.01046	-0.00134	0.00007	0.00093	-0.00009	-0.00192	-0.00243	0.00591	-0.00083	-0.0001	-0.00304	-0.80421	0.03595
0.00248	0.00031	-0.00582	0.00793	0.00323	-0.00036	0.01257	0.00037	0.00532	-0.0006	-0.007	0.01528	0.00242	-0.00021	0.0025	0.00039	0.00375	-0.00042	0.005	0.0105	-0.00705	-0.00206	-0.00291	-0.00005	-0.00124	-0.00247	0.00315	-0.0004	-0.00482	-0.00349	-0.80405	0.03594
0.00175	0.00064	-0.00443	0.00749	0.00566	-0.00032	0.01237	0.00052	0.00639	-0.0006	0.00047	0.01528	0.00006	0.00052	0.00275	0.00067	0.00085	-0.00029	0.00756	0.0105	-0.00113	0.00022	-0.00541	0.00027	-0.00009	-0.00255	0.00246	0.00018	-0.00643	-0.00332	-0.80531	0.0362
0.00154	0.00114	-0.00406	0.00737	0.00312	-0.00022	0.01438	0.00076	0.00577	-0.00015	0.00026	0.01508	-0.00329	0.00044	0.00417	0.00029	0.00123	0.00013	0.00449	0.01064	-0.00618	0.00088	-0.00428	0.00038	0.00341	-0.00225	0.00359	0.0002	-0.00438	-0.00312	-0.80467	0.03603
0.00315	0.00058	-0.00195	0.00781	-0.00065	-0.00022	0.01306	0.00054	0.00501	-0.00007	-0.00509	0.01468	-0.00156	0.0004	0.0016	0.00011	0.00095	-0.00093	-0.00145	0.011	-0.00107	0.00141	-0.00512	0.0005	0.00323	-0.00261	0.00069	-0.00037	-0.00229	-0.00321	-0.80242	0.03631
0.00233	0.00025	-0.00197	0.00805	-0.00237	-0.00011	0.01215	0.00019	0.00607	0.00006	-0.00669	0.01498	0.00158	0.0006	-0.00017	-0.00015	0.00136	-0.00146	-0.0167	0.01132	-0.00805	0.00074	-0.00565	0.00043	0.00265	-0.00357	0.00191	-0.00031	-0.00203	-0.00312	-0.80312	0.03608
0.00183	0.0003	-0.00608	0.00838	-0.00034	-0.00012	0.01198	0.00018	0.00527	-0.00056	-0.00356	0.01543	0.00261	0.0002	-0.00143	-0.00059	0.00307	-0.00089	0.00035	0.01139	-0.00792	0.0009	-0.0024	-0.0006	0.00445	-0.00345	0.00082	-0.0006	-0.0046	-0.00241	-0.80341	0.03636
0.0044	0.00031	-0.00831	0.00852	0.00241	-0.00044	0.01374	0.00049	0.00239	-0.00026	0.00016	0.0159	0.00386	0.00046	-0.00218	-0.00038	0.00388	0.00002	0.00549	0.01157	-0.00982	0.00025	-0.00649	-0.00006	0.00715	-0.00289	0.00371	-0.00006	-0.00273	-0.00226	-0.80266	0.03667
0.00448	0.00063	-0.00731	0.00844	0.00369	-0.00053	0.01169	0.0008	0.00393	-0.00032	0.00474	0.01569	0.00082	0.00029	0.00068	-0.00041	-0.00008	-0.00018	0.00714	0.0114	-0.0124	0.00124	-0.00382	-0.00003	0.00614	-0.00286	0.00501	-0.00005	-0.00052	-0.00297	-0.79988	0.03692
0.00103	0.00077	-0.0069	0.00836	0.00444	0.00007	0.01102	0.00081	0.0048	0	0.00426	0.01485	0.00052	0.00033	0.00105	-0.00025	-0.00161	-0.00116	0.00575	0.01097	-0.00942	0.00153	-0.00002	-0.00001	0.00212	-0.00311	0.00263	-0.00046	-0.00173	-0.00238	-0.80198	0.0366
-0.00137	0.00012	-0.00543	0.00785	0.00223	0.00047	0.01172	0.00098	0.00046	0.00004	-0.00217	0.01493	0.00262	0.0004	0.00256	0.00018	0.00118	-0.00128	0.00321	0.01066	-0.00652	0.00167	-0.00083	-0.00015	-0.0005	0.00351	0.00316	-0.0004	-0.00321	-0.00312	-0.805	0.03638
-0.00155	0.00007	-0.00531	0.00769	0.00041	0.00025	0.0141	0.00126	-0.00324	-0.00021	-0.00699	0.01544	0.00078	0.00077	0.00319	0.00003	0.00264	-0.00065	0.00198	0.01073	-0.00222	0.00133	-0.00292	-0.00029	0.0019	-0.00307	0.00303	-0.00036	-0.00466	-0.00296	-0.80631	0.03644
-0.00249	-0.00025	-0.00799	0.00794	-0.0011	0.00045	0.01269	0.00123	-0.00247	-0.00018	-0.00697	0.0156	0.00539	0.00079	0.00014	-0.00005	0.00058	-0.00038	0.00216	0.01052	-0.00781	0.00104	-0.0035	0.00008	0.00152	-0.0024	-0.00109	-0.00008	-0.00364	-0.00272	-0.80415	0.03679
0.00063	0.0001	-0.00892	0.00811	-0.00196	0.00069	0.00831	0.00144	0.00066	0.00009	-0.00663	0.01579	0.00395	-0.00018	-0.00411	-0.00005	-0.00096	-0.00049	0.00521	0.01042	-0.0069	0.00116	-0.0054	0.00073	0.00023	-0.00233	-0.00049	-0.00229	-0.0047	-0.00265	-0.80143	0.03697
0.00129	0.00085	-0.00739	0.00834	0.00315	0.00085	0.00883	0.00165	0.00076	-0.00004	-0.00586	0.01554	0.00296	-0.00046	-0.00423	-0.00011	0.00123	-0.00047	0.00466	0.01075	-											

0.00122	-0.00001	-0.01023	0.00798	0.00386	0.00045	0.0166	0.00089	0.00153	-0.00021	0.00007	0.01517	0.0011	0.00005	0.00023	-0.00013	0.00417	-0.00048	0.00343	0.01068	-0.00774	0.00077	-0.00093	-0.00023	-0.00289	-0.00232	-0.00115	-0.00038	-0.00516	-0.00233	-0.80304	0.03611
-0.00078	-0.00003	-0.00675	0.00802	-0.00063	0.00047	0.01289	0.001	-0.00434	0.0001	-0.00343	0.0153	0.00427	0.00039	-0.00039	0.00034	0.00341	-0.00037	0.00382	0.01106	-0.00714	0.00069	-0.00253	0.00055	-0.00212	-0.00287	-0.00068	-0.0075	-0.00268	-0.80561	0.03572	
0.00132	-0.00014	-0.00988	0.00802	-0.0018	-0.00008	0.00997	0.00054	-0.00489	0.00089	-0.00575	0.01597	0.00033	0.00109	0.00262	0.00064	0.0021	-0.00029	0.00293	0.01114	-0.00704	0.00133	-0.00641	0.0007	-0.00084	-0.00319	0.00003	-0.00081	-0.00697	-0.00272	-0.80557	0.03555
0.00349	-0.00016	-0.00842	0.00808	0.00038	-0.00053	0.01104	0.00039	-0.00052	0.00136	-0.00408	0.01657	0.00036	0.00101	0.00216	0.0003	0.00107	-0.00019	0.0019	0.01088	-0.00725	0.00167	-0.00073	-0.00064	0.00026	-0.00073	-0.0033	0.00008	-0.00478	-0.00271	-0.80462	0.03578
0.00213	-0.00005	-0.00402	0.00745	0.00547	-0.00043	0.01197	0.0006	0.00609	0.00124	0.00141	0.01625	-0.00012	0.00005	0.00376	-0.00016	-0.00074	-0.00048	0.0006	0.01075	-0.00958	0.00124	-0.00475	0.00011	0.00095	-0.00332	0.00164	-0.00012	-0.00348	-0.00242	-0.80513	0.03591
-0.00281	-0.00011	-0.00431	0.00716	0.00445	-0.00002	0.01037	0.00069	0.00515	0.00033	0.00134	0.01561	0.00275	0.00008	0.0036	-0.00014	0.001	-0.00081	0.00114	0.01034	-0.00991	0.00052	-0.00366	-0.0002	0.00021	-0.00355	-0.00013	-0.0001	-0.00491	-0.00246	-0.80766	0.03579
-0.00294	0.00004	-0.00456	0.00741	-0.00045	-0.00066	0.00802	0.00069	0.00406	-0.00099	0.00033	0.154	0.0352	-0.00017	0.0021	-0.00035	0.00382	-0.0107	0.00121	0.01007	-0.00654	0.00064	-0.00442	0.00022	-0.0071	-0.00342	-0.00044	-0.00021	-0.00941	-0.003	-0.81153	0.03587
0.00192	0.00025	-0.00633	0.00756	-0.00512	-0.0009	0.00766	0.0006	0.00467	0.00077	-0.00341	0.01571	0.00149	0.0004	-0.00158	-0.0007	0.00218	-0.0012	0.00141	0.01029	-0.00591	0.00141	-0.00316	0.0004	-0.00333	-0.00318	-0.00297	-0.00099	-0.00987	-0.00289	-0.81054	0.03582
0.00567	0.00046	-0.01055	0.00794	-0.00462	0.00019	0.00998	0.00069	0.00336	-0.00004	-0.00567	0.01593	-0.00098	0.00088	-0.00151	-0.00051	0.00168	-0.00144	0.00304	0.01044	-0.00649	0.00146	-0.00397	-0.00025	-0.00246	-0.00305	-0.00326	0.00021	-0.00767	-0.00263	-0.80483	0.03607
0.00226	0.00032	-0.00792	0.00792	0.00271	0.00092	0.01256	0.00083	0.00028	0.0004	-0.00227	0.01612	0.00021	0.0007	0.00084	-0.00051	0.0008	-0.00177	0.00754	0.00974	-0.00484	0.00121	-0.00576	-0.00072	0.00047	-0.00289	0.00234	0.00073	-0.00505	-0.00247	-0.80104	0.03643
-0.00106	0.00044	-0.00509	0.00733	0.0043	0.00056	0.01394	0.00131	0.00058	0.00073	-0.00175	0.01598	0.00252	0.00009	0.00126	-0.0008	0.00127	-0.00148	0.00869	0.00979	-0.00156	0.00138	-0.00065	-0.00049	0.00327	-0.00289	0.00852	0.00049	-0.00382	-0.0023	-0.80062	0.03629
0.00229	0.00022	-0.00589	0.0074	0.00112	0.00011	0.01127	0.00212	-0.00027	0.00029	-0.00238	0.01584	0.00344	-0.00016	0.00118	-0.00056	0.00308	-0.00126	0.00634	0.01037	-0.00021	0.00145	-0.00598	0.00009	0.00545	-0.00329	0.0059	-0.00016	-0.00297	-0.00284	-0.8024	0.03618
0.00241	0.00054	-0.00578	0.00785	-0.00042	0.00027	0.00092	0.00027	0.00184	0.00008	-0.00292	0.01536	0.00698	0.00009	0.00085	-0.00067	0.00617	-0.0008	0.00583	0.01065	-0.00306	0.00127	-0.00455	-0.00026	0.00343	-0.00354	0.00035	-0.00052	-0.00355	-0.00236	-0.80385	0.03591
0.00295	0.00101	-0.00657	0.0076	0.00073	-0.00008	0.01157	0.00146	0.00445	0.00052	-0.00451	0.01534	0.0099	0.00065	0.00144	-0.00058	0.00833	-0.00053	0.00577	0.0109	-0.00439	0.00128	-0.00251	-0.00097	-0.00101	-0.00369	0.0026	0.00001	-0.00617	-0.00365	-0.80145	0.03556
0.00288	0.00094	-0.00588	0.00693	0.00201	-0.00024	0.01368	0.00055	0.00886	0.00081	-0.00371	0.01561	0.00918	0.00073	-0.00112	-0.00011	0.00788	-0.00082	0.00688	0.01137	-0.00294	0.00169	-0.0026	-0.00094	-0.00308	-0.00319	-0.013	0.00022	-0.00667	-0.00354	-0.80119	0.03607
0.00083	0.00076	-0.00496	0.00751	0.00191	-0.00027	0.01476	0.00026	0.00842	0.00054	-0.00243	0.01616	0.00756	0.00056	-0.00304	0.00116	0.00345	-0.0007	0.00641	0.01124	-0.00358	0.00216	-0.00411	-0.00017	-0.00387	-0.00261	-0.0042	-0.00003	-0.00572	-0.00325	-0.80194	0.03668
-0.00397	0.00025	-0.00682	0.00782	-0.00027	-0.00027	0.0152	0.00033	0.00337	0.00044	-0.00383	0.01637	0.00541	0.00042	-0.00433	0.00052	0.00387	-0.00054	0.00429	0.0109	-0.00679	0.00213	-0.00447	0.00043	-0.00181	-0.00266	-0.00475	-0.00026	-0.0058	-0.00283	-0.80313	0.03663
-0.00346	0.00022	-0.00817	0.00778	0.0021	-0.00036	0.01485	0.00033	-0.00143	0.00019	-0.00065	0.01595	0.00421	0.00065	-0.00232	0.00045	0.00581	-0.0007	0.00125	0.01055	-0.00742	0.00188	-0.00588	0.00095	0.00015	-0.00302	-0.0016	-0.00003	-0.00534	-0.00291	-0.80501	0.03682
0.00089	0.00024	-0.00564	0.00803	0.00141	-0.00079	0.01256	0.00065	0.00074	0.00007	0.0023	0.0159	0.0034	0.00084	-0.00152	0.0006	0.00358	-0.00075	0.00033	0.01044	-0.00742	0.00144	-0.00572	0.00099	0.00051	-0.0032	0.0008	-0.00013	-0.00415	-0.00259	-0.80275	0.03709
0.00313	-0.00012	-0.00727	0.00822	-0.00267	-0.00052	0.0121	0.00138	-0.00147	0.00056	0.00095	0.01612	0.0017	0.00067	0.00066	0.00026	0.0001	-0.00101	0.00165	0.01052	-0.00871	0.00093	-0.00444	0.00054	0.00101	-0.00312	0.00247	-0.00022	-0.00488	-0.00229	-0.79993	0.03704
0.00285	0.00022	-0.00572	0.00804	-0.00126	-0.00047	0.01293	0.00136	-0.00226	0.00072	-0.0016	0.01632	0.00082	0.00076	-0.00056	0.00038	0.00151	-0.00171	0.00255	0.01015	-0.00839	0.00081	-0.00421	0.00022	-0.00239	-0.00282	0.0009	-0.003	-0.00447	-0.00239	-0.80072	0.03681
0.00432	0.00083	-0.00124	0.00761	0.0017	-0.00022	0.01153	0.001	-0.00002	0.00032	-0.00357	0.01593	0.00166	0.00068	-0.00083	-0.00056	0.00191	-0.00203	0.00289	0.01029	-0.00653	0.00095	-0.00435	0.00017	-0.00372	-0.0029	-0.00475	-0.0005	-0.0001	-0.00262	-0.80374	0.03695
0.00399	0.00034	-0.00477	0.00784	0.00063	0.0002	0.01305	0.00091	0.00247	0.00021	-0.00393	0.01577	0.00298	0.00076	0.0012	-0.00093	0.00256	-0.0015	0.00391	0.01098	-0.00696	0.00105	-0.00371	0.00039	-0.00219	-0.00338	-0.00774	-0.00442	-0.00261	-0.00256	-0.79966	0.03722
0.00269	-0.00055	-0.0087	0.00756	0.00491	-0.00009	0.0128	0.00083	0.00017	0.00028	-0.00561	0.01593	0.00092	0.0007	0.00294	-0.00099	0.00376	-0.00073	0.00033	0.01141	-0.00773	0.00119	-0.00445	0.00034	-0.00093	-0.00322	-0.00562	-0.00023	-0.00355	-0.0027	-0.79864	0.03673
0.00218	-0.00046	-0.00537	0.00746	0.00521	-0.00013	0.01504	0.00016	-0.00094	0.00045	-0.00649	0.01607	0.00029	0.00036	0.00135	-0.00094	0.0036	-0.00029	0.00221	0.01135	-0.00525	0.00012	-0.00204	-0.00311	-0.004	-0.00007	-0.00162	-0.00279	-0.80315	0.03648		
0.00298	0.00002	-0.00352	0.00766	0.00357	0.0005	0.01633	0.00037	-0.00268	0.00052	-0.005	0.01629	0.00205	0.00054	0.0011	-0.00052	0.00443	0.00015	0.00323	0.01119	-0.00434	0.00127	-0.00438	-0.00012	-0.00265	-0.00547	-0.00008	-0.00048	-0.00296	-0.80586	0.0365	
0.00238	0.00018	-0.00323	0.00807	0.00236	0.00077	0.01287	0.00118	-0.0023	0	-0.00554	0.01611	0.00226	0.00065	0.00086	0.00036	0.00619	-0.00222	0.00396	0.01084	-0.00573	0.00145	-0.00309	-0.00039	-0.00225	-0.00029	-0.00253	0.00007	0.00034	-0.00299	-0.80432	0.03642
0.00115	-0.00001	-0.00378	0.00823	0.00148	0.0006	0.01105	0.00171	-0.00075	-0.00045	-0.00628	0.01583	0.00316	0.00066	0.00085	0.00055	0.00539	-0.00086	0.00341	0.01043	-0.00822	0.00203	-0.00328	-0.0002	-0.00192	-0.00317	-0.00068	0.00005	-0.00116	-0.00281	-0.80404	0.03645
0.00239	-0.00001	-0.00614	0.00799	-0.00029	0.00053	0.01063	0.0013	0.00048	-0.0001	-0.00609	0.01566	0.00358	0.00067	-0.00059	0.00025	0.00082	-0.00074	0.00219	0.01045	-0.01329	0.00188	-0.00633	0.00003	-0.00213	-0.00338	-0.00012	-0.00442	-0.00174	-0.00237	-0.80312	0.03642
0.00254	0.00013	-0.00911	0.00792	-0.00176	0.00029	0.01159	0.0007	0.00351	0.00047	-0.00433	0.01553	0.00231	0.00058	-0.0031	-0.00035	0.00033	-0.00074	0.00538	0.01087	-0.01602	0.00153	-0.00922	0.00015	-0.00308	-0.00294	-0.00409	-0.00029	-0.00553	-0.00234	-0.80134	0.03596
0.00184	-0.00011	-0.01038	0.00795	-0.00201	0.00001	0.01326	0.00055	0.00581	0.00041	0.00011	0.01521	0.00001	0.00058	-0.00385	-0.00233	0.00038	-0.00059	0.00691	0.01093	-0.01052	0.00156	-0.00778	0.00007	-0.00236	-0.00463	0.00001	-0.0052	-0.00225	-0.80337	0.03555	
0.00189	0.00021	-0.00602	0.00766	0.00327	0.00001	0.01344	0.00055	0.00445	0.00037	0.0025	0.01539	-0.00265	0.00085	-0.00203	0.00093	0.00231	-0.00094	0.00572	0.01026	-0.00643	0.00129	-0.00382	0.00029	-0.00066	-0.0019	-0.00243	-0.00002	-0.00755	-0.00283	-0.80481	0.03584
0.00218	0.00003	-0.00571	0.00708	0.00495	-0.00002	0.01246	0.0009	0.00639																							

0.0005	0.00255	-0.00534	0.0072	0.00266	-0.00007	0.01499	0.00038	0.00009	-0.00026	-0.00354	0.0159	-0.00378	0.00122	0.0028	-0.00049	0.00745	-0.00064	0.00552	0.01053	-0.0023	0.00119	-0.00377	0.00014	-0.00022	-0.00278	-0.00399	-0.00024	-0.0071	-0.00255	-0.80017	0.03615
0.00255	0.00042	-0.00856	0.00732	0.00026	0	0.01386	-0.00006	0.0005	-0.00045	-0.0072	0.0159	-0.00303	0.00081	0.00028	-0.00083	0.0078	-0.00012	0.00849	0.01033	0.00155	0.00184	-0.00218	0.00027	-0.0015	-0.00268	-0.00346	-0.00029	-0.00594	-0.00284	-0.79957	0.03607
0.00281	0.00055	-0.00798	0.00774	0.00067	-0.00027	0.01209	-0.0001	0.00276	-0.00039	-0.0101	0.0157	-0.00242	0.00091	-0.00225	-0.00092	0.00854	-0.00014	0.0054	0.0104	0.00056	0.00188	-0.00441	-0.00009	-0.00078	-0.00254	-0.00293	0.00001	-0.00689	-0.0035	-0.80586	0.03571
-0.00099	0	-0.00793	0.00766	0.00107	-0.00057	0.01289	0.00056	0.00444	-0.00049	-0.011	0.01556	-0.00242	0.00084	-0.00254	-0.00089	0.00824	-0.00087	0.00235	0.0108	-0.00283	0.00154	-0.00219	-0.00063	0.00019	-0.00273	-0.00028	-0.00004	-0.00653	-0.00384	-0.80817	0.03567
-0.0027	-0.00025	-0.0087	0.00735	0.00024	-0.00046	0.01132	0.0104	0.00424	-0.00002	-0.00936	0.01558	-0.001	0.00054	0.00098	-0.00096	0.00458	-0.00137	0.00277	0.01114	-0.0056	0.00095	-0.0011	-0.0007	0.00061	-0.00317	-0.00053	-0.00029	-0.00343	-0.00402	-0.803	0.03577
-0.0073	-0.00024	-0.0086	0.00703	-0.00185	0.00006	0.00903	0.01005	0.00327	-0.00027	-0.00656	0.01597	-0.00153	0.00093	0.00193	-0.00077	0.00034	-0.00156	0.00241	0.0114	-0.00518	0.00067	-0.00008	-0.00001	-0.00029	-0.00301	-0.00264	-0.00031	-0.00558	-0.00346	-0.80179	0.0357
0.0408	-0.00017	-0.0077	0.00725	-0.00254	0.00036	0.00798	0.0119	0.00274	0.00036	-0.00715	0.01595	-0.00285	-0.00083	0.00277	-0.0006	0.00257	-0.0182	0.00287	0.01143	-0.00604	0.00086	-0.00149	0.0007	-0.0199	-0.0006	0.00003	-0.00848	-0.00301	-0.8042	0.03597	
0.00505	-0.00009	-0.00529	0.00769	0.00045	-0.00007	0.00596	0.0119	0.00505	0.0006	-0.00461	0.01602	0.00003	0.0002	-0.00058	0.000774	0.00074	-0.0016	0.00394	0.01107	-0.00773	0.00137	-0.00278	0.00077	0.00145	-0.00325	0.00491	-0.00012	-0.00555	-0.00309	-0.80331	0.03619
0.00443	0.00086	-0.00325	0.0079	0.00065	-0.00049	0.00685	0.00087	0.00612	0.001	-0.00327	0.01586	0.00581	0.00024	-0.00235	-0.00032	0.00978	-0.00126	0.00425	0.01042	-0.00882	0.00148	-0.00056	0.00027	0.00189	-0.0034	0.00429	-0.00023	-0.00427	-0.00313	-0.80401	0.03604
0.00115	0.00117	-0.00257	0.00793	0.00063	-0.00002	0.01118	0.00048	0.00019	0.00095	-0.00525	0.01544	0.00404	0.00053	-0.00543	-0.00038	0.00698	-0.00112	0.01077	0.01057	-0.00994	0.00148	-0.00053	-0.00014	-0.00221	-0.00352	-0.00096	-0.00017	-0.00273	-0.00328	-0.80372	0.03597
-0.00151	0.0004	-0.00325	0.00842	0.00019	0.00028	0.01091	0.00022	-0.00018	0.00052	-0.00469	0.01537	0.004	0.00076	-0.00597	-0.00039	0.00231	-0.0015	-0.00175	0.01079	-0.0107	0.00012	-0.00003	0.00117	-0.00432	-0.00321	-0.00027	0.00006	-0.00174	-0.00329	-0.8046	0.03646
-0.00065	-0.00003	-0.00554	0.00815	-0.00063	-0.00008	0.01113	0.00033	0.00119	0.00033	-0.0026	0.01553	0.00009	0.00072	-0.00397	-0.00047	0.00193	-0.00178	-0.00333	0.01066	-0.00849	0.0011	-0.00049	0.00036	-0.00433	-0.00296	0.00183	0.00047	-0.00193	-0.00291	-0.80763	0.03653
0.00007	-0.00009	-0.00759	0.00733	-0.00174	-0.00043	0.01158	0.0068	0.00258	0.00029	-0.00409	0.01564	-0.00037	0.00067	-0.0021	-0.00091	0.00356	-0.00152	-0.0008	0.01093	-0.0069	0.00114	-0.00354	0.00007	-0.00417	-0.00291	-0.00087	0.00075	-0.00144	-0.00293	-0.80582	0.03613
0.00214	0.0002	-0.00679	0.00703	0.00388	-0.00034	0.0121	0.00083	0.00042	0.00032	-0.00681	0.01594	0.00274	0.0003	-0.00215	-0.00104	0.00604	-0.00117	0.01064	0.01135	-0.00782	0.00134	-0.00491	0.00009	-0.00358	-0.00266	-0.00134	0.00025	-0.00285	-0.0031	-0.80074	0.03568
0.00203	0.00036	-0.00478	0.00707	0.00035	-0.00056	0.01013	0.00057	-0.00072	0.0006	-0.00641	0.01631	0.00725	0.0001	-0.00096	-0.00048	0.00691	-0.00089	0.00285	0.01148	-0.00826	0.00139	-0.00513	0.00047	-0.00343	-0.00281	-0.00011	-0.00502	-0.00309	-0.80094	0.03529	
0.00218	0.00029	-0.00363	0.00797	0.00041	-0.00038	0.00763	0.00033	-0.00097	0.00049	-0.00424	0.01637	0.00639	0.00044	0.00273	0.00005	0.00556	-0.00064	0.00623	0.01151	-0.0031	0.00118	-0.00486	0.00069	-0.00291	-0.00239	0.0019	0.00026	-0.0064	-0.00285	-0.8031	0.03561
0.00236	0.00051	-0.00393	0.00836	0.00189	0.00046	0.00732	0.00028	-0.00283	0.00029	-0.00448	0.01591	0.00322	0.00056	-0.00004	0.00761	0.0113	-0.00301	0.00117	-0.00377	0.00089	-0.00025	-0.00261	-0.00008	0.00076	-0.0006	-0.00076	-0.00236	-0.80295	0.03635		
0.00098	0.00063	-0.00588	0.00833	-0.00067	0.00052	0.00882	0.0002	-0.00006	0.00057	-0.00322	0.01578	0.01003	0.0007	0.00692	-0.00017	0.0036	-0.00027	0.00956	0.01089	-0.00583	0.00171	-0.0012	0.00089	0.00339	-0.00269	-0.00104	0.00008	-0.00703	-0.0035	-0.80472	0.03675
-0.00028	0.00025	-0.00917	0.00805	-0.00027	0.00037	0.00952	0.00028	0.00244	0.00064	-0.00544	0.01527	-0.00045	0.0004	0.00458	-0.00003	0.00224	-0.00076	0.00754	0.01085	-0.007	0.00168	-0.00002	0.00024	0.00443	-0.00293	-0.00469	-0.00072	-0.0006	-0.00325	-0.80178	0.03653
-0.00072	0.00043	-0.00869	0.00769	0.00278	0.00013	0.00679	0.00039	0.00282	-0.00005	-0.00833	0.01476	0.00384	0.00048	0.00234	-0.00011	0.00106	-0.00108	0.00568	0.01104	-0.00729	0.00122	-0.00021	-0.00071	0.00553	-0.00275	-0.00627	-0.00056	-0.00081	-0.00313	-0.80543	0.03658
-0.00229	0.00054	-0.00845	0.0079	0.00067	-0.00009	0.00615	0.00026	0.00256	-0.0006	-0.01134	0.01529	0.00718	0.00072	0.0001	-0.00018	0.01103	-0.00109	0.00104	0.01085	-0.00651	0.00143	-0.00011	-0.00115	0.00594	-0.00255	-0.00092	-0.00049	-0.00839	-0.00332	-0.80284	0.03641
0.0003	0.00047	-0.00861	0.00832	0.00042	-0.00002	0.00987	0.00033	0.00529	-0.00037	-0.01195	0.01556	0.00554	0.00056	-0.00036	-0.00062	0.00366	-0.00087	0.00198	0.01057	-0.00393	0.00156	-0.00362	-0.00094	0.00297	-0.00264	0.00139	-0.00042	-0.01037	-0.0038	-0.80363	0.0361
0.00408	0.0002	-0.00695	0.00846	-0.00024	0.00019	0.00961	0.0005	0.009	-0.001	-0.00948	0.01539	0.00476	0.0006	0.00147	-0.00084	0.00021	-0.00048	0.00495	0.01048	-0.00399	0.00129	-0.00385	-0.00045	-0.00044	-0.00253	-0.00188	0.00003	-0.00641	-0.004	-0.80374	0.03584
0.00375	0.00008	-0.00752	0.00863	-0.00027	0.00007	0.01056	0.00036	0.00956	-0.00033	-0.00836	0.01558	0.00359	0.00017	0.00008	-0.00066	0.00169	-0.00019	0.00846	0.01024	-0.00596	0.00075	-0.00074	-0.00048	0.00054	-0.00028	-0.00662	0.00061	-0.00261	-0.00342	-0.80531	0.03579
-0.00049	0.00049	-0.00715	0.00806	0.00067	0.0002	0.01159	0.00025	0.00886	-0.0002	-0.00807	0.01594	0.00256	0.00034	0.00283	-0.00089	0.00372	-0.00032	0.00686	0.0107	-0.00473	0.00123	-0.00166	0.00007	-0.00178	-0.00342	-0.00108	0.00026	-0.00502	-0.0029	-0.80905	0.03568
-0.00295	0.00057	-0.00649	0.00801	-0.001	0.00069	0.01113	0.00055	0.00414	0.00035	-0.00872	0.01607	0.00257	-0.00007	0.00283	-0.0007	0.00257	-0.00072	0.00583	0.01092	-0.00726	0.00194	-0.00445	0.00023	-0.00452	-0.00332	-0.01212	0.00002	-0.00622	-0.00284	-0.8073	0.03572
-0.00182	0.00076	-0.00686	0.00804	-0.0003	0.00081	0.01208	0.00054	0.00079	0.00049	-0.0068	0.01605	0.00277	-0.0001	0.00074	-0.0002	0.00447	-0.00122	0.00602	0.01094	-0.00841	0.00188	-0.00458	0.00026	-0.00127	-0.00303	-0.00802	0.00017	-0.00463	-0.00312	-0.8019	0.03559
-0.00211	0.00058	-0.00628	0.00741	0.00066	0.00008	0.01146	0.00078	0.00167	0.00019	-0.00363	0.01616	-0.00114	0.00023	0.00055	0.00005	0.00955	-0.00139	0.00419	0.01085	-0.00864	0.002	-0.00561	0.00002	0.00316	-0.00318	-0.00387	0.00025	-0.0068	-0.00377	-0.8003	0.03593
-0.00451	0.00008	-0.00474	0.0069	0.00028	-0.00018	0.0098	0.00073	0.0014	-0.00023	-0.00354	0.01588	-0.00008	0.00043	0.00154	-0.00017	0.01007	-0.00101	0.00374	0.01034	-0.00906	0.00202	-0.00587	-0.00033	0.00337	-0.00355	0	-0.00005	-0.00897	-0.00362	-0.79889	0.03641
-0.00269	0	-0.00484	0.00688	0.00045	0.00004	0.01181	0.00079	0.00216	-0.00021	-0.00628	0.01537	0.00407	0.00066	0.00058	-0.00023	0.00699	-0.00084	0.00361	0.01056	-0.00797	0.00201	-0.00568	-0.00041	0.00317	-0.00322	0.00225	-0.00009	-0.00732	-0.00321	-0.79599	0.03619
-0.0007	0.00009	-0.00702	0.00706	-0.00387	0.00011	0.01065	0.00059	0.00498	0.0001	-0.00815	0.01549	0.00506	0.0001	-0.00196	-0.00022	0.00308	-0.00041	0.00316	0.01155	-0.00595	0.00168	-0.00757	-0.00028	0.00009	-0.00284	-0.00081	-0.00007	-0.00503	-0.00229	-0.79908	0.03641
0.00225	0.00017	-0.0086	0.00755	-0.0007	0.00018	0.00718	0.00048	0.00709	0.00055	-0.00916	0.01597	0.00592	0.00021	-0.00305	-0.00034	0.00197	-0.00002	0.00378	0.01188	-0.00237	0.00128	-0.00723	-0.00037	-0.00208	-0.00283	-0.00467	-0.00053	-0.00624	-0.00309	-0.80215	0.0361
0.00359	0.00068	-0.00777	0.00826	0.00044	0.00033	0.00535	0.00066	0.00433	0.00065	-0.00886																					

0.00528	0.00148	-0.00501	0.00804	0.00409	0.00608	0.01096	0.0003	0.00112	0	-0.00662	0.0152	0.00246	0.00057	-0.00333	-0.00036	0.00473	-0.00066	0.00846	0.01046	-0.00888	0.0017	-0.00089	-0.00006	0.02654	-0.00156	-0.00355	0.00049	-0.01094	-0.00307	-0.79804	0.03535
0.00031	0.00136	-0.00596	0.00782	0.00054	0.00051	0.01053	0.00005	0.00245	-0.00068	-0.00509	0.01531	0.00366	0.00035	-0.00528	0.00008	0.00628	-0.00077	0.00821	0.01081	-0.00621	0.00197	-0.00298	0.00016	0.02426	-0.00149	-0.00213	0.00035	-0.00566	-0.00302	-0.80045	0.03589
0.00462	0.00106	-0.00604	0.00721	0.00294	0.00061	0.00667	0.00036	0.00223	-0.00024	-0.0022	0.01535	0.00096	-0.00015	-0.0016	0.00053	0.00558	-0.00108	0.00487	0.01084	-0.00414	0.00276	-0.00282	-0.00017	0.02259	-0.00109	-0.00043	0.00009	-0.00206	-0.00289	-0.79818	0.03537
0.00408	0.00077	-0.0057	0.00745	0.00029	0.00078	0.00697	0.00053	0.00313	0.00054	-0.00199	0.01551	-0.00196	-0.001	-0.00224	0.00067	0.00327	-0.00092	0.00246	0.01087	-0.00715	0.00241	-0.00456	-0.00006	0.02216	-0.00071	-0.00048	-0.00001	-0.00219	-0.00271	-0.79739	0.03484
0.00252	0.00121	-0.00863	0.00736	0.00449	0.00069	0.01177	0.0005	0.00179	0.00007	-0.00496	0.01536	-0.00033	0.00054	-0.0041	0.00025	0.00569	-0.00086	0.00243	0.01089	-0.00813	0.00123	-0.00381	0.0011	0.02427	-0.00071	-0.00339	-0.00012	-0.00271	-0.00311	-0.79553	0.03472
0.00219	0.00149	-0.01034	0.00758	0.00374	0.00053	0.01484	0.00024	0.00267	-0.00039	-0.00483	0.01518	-0.00159	0.00068	0.00006	-0.00035	0.00761	-0.00099	0.00245	0.01112	-0.00657	0.00108	-0.00168	0.00022	0.02338	-0.00075	-0.00391	-0.00054	-0.00409	-0.00374	-0.79891	0.03463
0.0186	0.00999	-0.00777	0.00774	0.00255	0.00054	0.01567	0.00044	0.0054	-0.00039	-0.00541	0.01544	-0.00537	0.00065	0.00059	-0.0003	0.00653	-0.0009	0.00303	0.01199	-0.00145	0.00166	-0.00242	0.00569	0.02209	-0.00047	-0.00278	-0.00068	-0.00357	-0.00256	-0.80295	0.03455
0.00064	0.00993	-0.00457	0.00739	0.00026	0.00044	0.01443	0.00056	0.0065	-0.0001	-0.0033	0.01586	-0.00086	0.00048	-0.00292	-0.00002	0.00611	-0.00074	0.00487	0.01095	-0.00085	0.00126	-0.00326	0.00035	0.02424	-0.00058	-0.00041	-0.00001	0.00345	-0.00623	-0.80486	0.03486
0.00408	0.00071	-0.00597	0.00762	-0.00008	0.00041	0.01127	-0.00003	0.00397	-0.00018	-0.00312	0.01641	0.00355	-0.0004	-0.00046	-0.00004	0.00841	-0.00031	0.00532	0.00192	-0.00586	0.00108	-0.00022	0.02657	-0.00081	-0.00449	-0.00051	-0.00955	-0.00323	-0.80402	0.03505	
0.00455	0.00088	-0.00618	0.00802	0.00092	0.00059	0.00902	0.0001	0.00075	-0.00066	-0.0067	0.01624	0.00159	-0.00012	-0.00394	0.00012	0.00798	-0.00027	0.00467	0.01103	-0.00817	0.00122	-0.00333	0.00064	0.02632	-0.00087	-0.00022	-0.00052	-0.01154	-0.00301	-0.80117	0.03525
0.00443	0.00111	-0.00581	0.00837	0.00057	0.00116	0.01038	0.0007	0.00044	-0.00057	-0.00628	0.01541	0.00109	-0.00016	-0.00386	0.00055	0.00379	-0.00001	0.00323	0.01141	-0.00265	0.00097	-0.00571	0.00038	0.02627	-0.0011	-0.00035	-0.00086	-0.00983	-0.00297	-0.80229	0.03585
0.00488	0.00092	-0.0063	0.00797	-0.00001	0.00117	0.01165	0.00083	0.00489	-0.00017	-0.00199	0.01479	0.00389	0.0004	-0.00628	0.00063	0.00209	-0.00113	0.00399	0.01128	-0.00471	0.00057	-0.00692	-0.00053	0.02598	-0.00137	-0.00417	-0.00016	-0.00621	-0.00299	-0.8067	0.03625
0.00235	0.00102	-0.00913	0.00788	-0.00034	0.0005	0.01303	0.00093	0.00613	-0.00023	-0.00159	0.01538	0.00421	0.00033	-0.0043	0.0004	0.00289	-0.00186	0.00402	0.01107	-0.00673	0.00084	-0.00658	-0.00004	0.02385	-0.00151	-0.00019	0.00018	-0.00401	-0.00316	-0.80862	0.03572
0.00175	0.00123	-0.01128	0.00802	-0.00163	0.00023	0.01327	0.00084	0.00395	-0.00009	-0.00465	0.01563	0.00265	-0.00034	-0.00091	-0.00177	0.00473	-0.0016	0.00402	0.01116	-0.00679	0.00117	-0.00351	-0.00003	0.0228	-0.0012	-0.00455	-0.00022	-0.00561	-0.00352	-0.80478	0.03533
0.0019	0.00094	-0.00856	0.00855	-0.00206	0.00038	0.00991	0.00089	0.00383	-0.00019	-0.00575	0.01538	0.0034	-0.00093	-0.00093	-0.00056	0.0046	-0.00061	0.00404	0.01143	-0.0053	0.00079	-0.00147	-0.00017	0.02395	-0.00074	-0.00536	0.00012	-0.00632	-0.00372	-0.80386	0.03479
-0.00007	0.00114	-0.00635	0.00815	-0.00265	0.00084	0.00667	0.00054	0.005	-0.00045	-0.00725	0.01548	0.00282	-0.00078	-0.00029	-0.00067	0.00262	-0.00001	0.00477	0.01159	-0.00665	0.00056	-0.00229	-0.00051	0.02717	-0.0007	-0.00606	0.00064	-0.00212	-0.00388	-0.80615	0.03457
-0.00046	0.00115	-0.00667	0.00776	-0.00202	0.00068	0.00849	0.00012	0.00231	-0.00035	-0.00815	0.01575	0.00024	-0.00018	-0.00209	-0.00024	-0.00046	-0.00082	0.00381	0.01109	-0.00792	0.00057	-0.00366	-0.00017	0.02607	-0.00065	-0.00519	0.00061	-0.00198	-0.00329	-0.80668	0.03508
-0.00059	0.00095	-0.00578	0.00767	0.00216	0.00007	0.012	0.00069	-0.00075	0.00015	-0.00848	0.01532	0.00059	0.00066	-0.00317	0.00041	0.00075	-0.00152	0.02627	0.01081	-0.00566	0.00084	-0.00309	0.00048	0.02597	-0.00053	-0.00277	0.00034	-0.00291	-0.00291	-0.805	0.03527
-0.00102	0.00064	-0.00442	0.00775	0.00301	-0.00015	0.01434	0.00133	0.00055	0.00077	-0.009	0.01482	0.00021	0.00093	-0.003	0.00048	0.00317	-0.0018	0.00167	0.01089	-0.00447	0.00075	-0.00252	0.00047	0.02849	-0.00096	-0.00341	0.00035	-0.00219	-0.00304	-0.80348	0.0352
0.00313	0.00058	-0.00466	0.00785	0.00079	0.00028	0.01456	0.00149	0.00356	0.00065	-0.00862	0.01516	0.00345	-0.00002	-0.00232	0.00048	0.00258	-0.00153	0.00143	0.01105	-0.00704	0.00081	-0.00157	-0.00004	0.0294	-0.00105	-0.00961	-0.00001	-0.00726	-0.00335	-0.80617	0.0354
0.00359	0.00058	-0.00431	0.00779	-0.00061	0.00038	0.01293	0.00112	0.00214	-0.00062	-0.0057	0.01583	0.00123	-0.00035	-0.0024	0.00043	0.00456	-0.00021	0.0023	0.01099	-0.00808	0.00071	-0.00138	-0.00037	0.02426	-0.00029	-0.00301	0.00011	-0.00306	-0.0037	-0.80465	0.03573
0.00247	0.00023	-0.00156	0.00787	-0.00024	0.00019	0.01169	0.00099	0.00191	0.00047	-0.00324	0.01552	0.0017	-0.00004	-0.00194	0.00046	0.00346	-0.00048	0.00422	0.01086	-0.00883	0.00104	-0.0013	-0.00007	0.02269	-0.00063	0.00233	0.00051	-0.00554	-0.0038	-0.80362	0.0356
0.00261	0.0005	-0.00267	0.0079	0.00125	-0.00025	0.0105	0.00068	0.00409	0.00031	-0.0028	0.01521	0.0037	0.00025	-0.0014	0.00013	0.00468	-0.0005	0.00292	0.01023	-0.00707	0.00066	-0.00106	0.0003	0.02194	-0.00118	0.00255	0.00051	-0.00749	-0.00365	-0.80241	0.0353
0.00124	0.00106	-0.00122	0.00756	-0.00025	-0.00011	0.01299	0.00057	0.00221	0.00015	-0.00187	0.01526	0.00158	0.0004	0.01002	0.00005	0.00406	-0.00058	0.00238	0.01004	-0.00725	0.00084	-0.00074	0.00031	0.02257	-0.00111	0.00086	0.00059	-0.00541	-0.00334	-0.80353	0.03483
0.00219	0.00147	0.00129	0.00713	-0.0011	0.00022	0.01484	0.00081	-0.00006	-0.00026	-0.00193	0.01526	0.00138	0.00064	0.00247	-0.00002	0.00336	-0.00008	0.00698	0.01059	-0.00525	0.00133	-0.00058	0.00037	0.02274	-0.00075	-0.00016	0.00029	-0.00424	-0.00326	-0.80558	0.03484
0.00573	0.00121	0.00108	0.0072	-0.00162	0.00021	0.01246	0.00081	0.00037	-0.00035	-0.00337	0.01516	0.00175	0.00058	0.00116	-0.0003	0.00301	-0.00066	0.00841	0.01071	-0.00422	0.0015	-0.00268	0.00022	0.0274	-0.001	0.00024	-0.00011	-0.0041	-0.0031	-0.80364	0.03508
0.00643	0.00062	-0.00621	0.0073	-0.00094	0.00047	0.01265	0.00094	0.00226	-0.00032	-0.00282	0.01539	0.00245	0.00058	-0.00131	-0.00005	-0.00033	-0.00222	0.00253	0.01069	-0.00589	0.00139	-0.00347	-0.00023	0.03013	-0.00067	-0.00098	-0.00046	-0.00242	-0.00339	-0.80282	0.03523
0.00314	0.00044	-0.01097	0.00791	-0.00133	0.00051	0.01289	0.00079	0.00246	-0.00001	-0.00309	0.0157	0.00286	0.00066	-0.00184	0.00014	0.00014	-0.00038	0.00234	0.01071	-0.00839	0.00135	-0.00299	-0.00024	0.0278	-0.00053	-0.00261	-0.0002	-0.00364	-0.00331	-0.80328	0.03537
-0.00005	0.00066	-0.00844	0.0083	-0.00111	0.0003	0.01151	0.00061	0.00121	0.00014	-0.00279	0.0157	0.0029	0.0007	-0.0025	-0.00002	0.00442	-0.00047	0.00059	0.01059	-0.00837	0.00133	-0.00305	0.00019	0.02411	-0.00044	-0.00329	0.00049	-0.00406	-0.00297	-0.80324	0.03541
0.00075	0.00067	-0.00466	0.00805	0.00285	-0.00028	0.00969	0.0003	0.00089	-0.00039	-0.00223	0.01542	0.00241	0.00066	-0.00236	-0.00039	0.00659	-0.00056	0.00042	0.01118	-0.00832	0.00091	-0.0038	-0.00009	0.02474	-0.00037	-0.00078	0.00076	-0.00581	-0.00342	-0.803519	0.03519
0.00168	0.00072	-0.00623	0.00783	0.00258	0.00037	0.00922	0.00023	0.00305	-0.00069	-0.0028	0.01561	0.00243	0.00008	-0.0003	-0.00013	0.00458	-0.00074	0.00053	0.01157	-0.00484	0.00081	-0.00043	-0.0002	0.02807	-0.00075	-0.00549	0.00069	-0.00461	-0.00377	-0.80912	0.03574
0.00086	0.00082	-0.00851	0.00765	-0.00156	0.00081	0.00912	0.00076	0.00866	0.0001	-0.00497	0.01595	-0.00018	0.00005	0.00365	0.00073	0.00376	-0.00042	0.00178	0.01099	-0.00316	0.00162	0.00064	0.00024	0.02863	-0.00109	-0.00483	0.00059	-0.00476	-0.00396	-0.80804	0.03589
0.00169	0.00093	-0.00757	0.00768</																												

0.00145	-0.00002	-0.00644	0.00843	0.00172	0.00055	0.00876	0.00148	0.00396	-0.00002	-0.00353	0.01678	0.00395	-0.00003	0.00109	-0.0008	0.00562	-0.00033	0.00157	0.01126	-0.00559	0.00114	-0.00127	-0.00003	0.01843	-0.00058	-0.00246	0.00042	-0.0067	-0.00358	-0.80207	0.03588
0.0048	0.00018	-0.00151	0.00839	-0.0004	0.00045	0.00895	0.00174	0.00206	-0.00018	-0.00406	0.01674	0.00565	0.00008	0.00345	-0.00077	0.00623	-0.00036	0.00067	0.00129	-0.005	0.0011	-0.00164	-0.00003	0.01721	-0.00095	-0.00227	0.00027	-0.0067	-0.00408	-0.801	0.03579
0.00362	0.00026	0.00008	0.00825	0.00135	0.00045	0.00747	0.00179	0.00134	-0.00055	-0.0036	0.0161	0.00512	0.00008	0.00286	-0.00005	0.00774	-0.00006	-0.00216	0.01107	-0.00691	0.00132	-0.00213	-0.00003	0.01627	-0.00087	-0.00231	0.00012	-0.0038	-0.00418	-0.80095	0.03584
0.00221	0.00055	-0.00423	0.00809	0.00026	0.00031	0.00933	0.00128	-0.00002	-0.00044	-0.00135	0.01536	0.00387	0.00003	0.00163	-0.00002	0.00781	-0.00005	-0.00205	0.01011	-0.00929	0.00178	-0.00396	-0.00009	0.01493	-0.00062	-0.00132	-0.00015	-0.00087	-0.0041	-0.80085	0.03575
0.00455	0.00021	-0.00889	0.00804	0.00378	0.00021	0.00946	0.00116	-0.00253	-0.00051	0.00094	0.01509	0.00143	0.00049	0.00131	0.0002	0.00483	0.0002	0.00068	0.01142	-0.00732	0.002	-0.00537	0.00021	0.01716	-0.00011	-0.00166	-0.00053	-0.0008	-0.00369	-0.80529	0.0354
0.00721	0.00145	-0.01017	0.00809	0.00624	-0.00019	0.01176	0.00111	-0.00298	0.00044	-0.00118	0.01506	0.00003	0.00031	0.00052	0.00013	0.0018	0.00059	0.00355	0.00149	-0.0042	0.00173	-0.00599	0.00023	0.02224	0	-0.00407	-0.0006	-0.00079	-0.00366	-0.80702	0.03489
0.00563	0.00166	-0.00577	0.0079	0.00594	-0.00007	0.01496	0.00134	-0.00204	0.00102	-0.00577	0.01534	0.00246	0.00008	-0.00134	0.00055	0.00404	0.0003	0.00382	0.0113	-0.00565	0.00145	-0.00404	0.00336	0.0225	-0.00045	-0.00395	-0.00085	-0.00443	-0.80599	0.03491	
0.00264	0.00173	-0.00498	0.00797	0.00414	0.00037	0.01362	0.00142	0.00145	-0.00593	0.01559	-0.00024	-0.00002	-0.00082	-0.00019	0.00592	0.00004	0.00268	0.00054	0.01109	-0.01254	0.00125	-0.00099	0.00038	0.02096	-0.00061	-0.00346	0.00032	-0.00795	-0.80379	0.03507	
0.00186	0.00132	-0.00811	0.00817	0.00319	0.0001	0.01136	0.00133	0.00035	-0.00056	-0.0031	0.01564	0.00066	-0.00084	0.00283	-0.00051	0.00176	-0.00044	0.00065	0.01029	-0.01634	0.0012	-0.00129	0.00055	0.02479	-0.00005	-0.00405	0.00037	-0.00716	-0.80463	0.03555	
0.00248	0.0009	-0.01223	0.00852	0.00414	-0.00022	0.01043	0.00138	0.00297	0.00062	-0.00514	0.01577	0.00174	-0.00108	0.00259	-0.00009	0.00174	-0.00038	0.00071	0.00319	-0.01319	0.00135	-0.00228	0.00055	0.02889	-0.00066	-0.00069	0.00038	-0.00813	-0.00322	-0.79926	0.03558
0.00181	0.00086	-0.01161	0.00873	0.00159	-0.00045	0.01391	0.00134	0.00577	0.00051	-0.00719	0.01568	-0.00084	-0.00056	0.00091	0.00058	0.00108	0.00001	0.00236	0.01087	-0.00806	0.00138	-0.00132	0.00085	0.02646	-0.00087	-0.0024	0.00019	-0.00673	-0.00319	-0.79947	0.03542
0.00219	0.00094	-0.00913	0.00853	0.00359	-0.00016	0.01711	0.00117	0.00571	0.00079	-0.00373	0.01506	-0.00097	-0.00027	0.00222	0.00027	0.00367	-0.00008	0.00116	0.01097	-0.00772	0.00167	-0.00096	0.0013	0.02254	-0.001	-0.00364	-0.00026	-0.00275	-0.00372	-0.80222	0.03553
0.00052	0.00078	-0.00532	0.00843	0.00626	0.00026	0.01358	0.00132	0.00544	0.00177	-0.00187	0.01492	0.00025	-0.00007	0.00226	-0.00053	0.00235	-0.00056	0.00123	0.0109	-0.00545	0.00179	-0.0024	0.00106	0.02175	-0.0007	-0.0006	-0.00075	-0.00343	-0.00437	-0.80321	0.03569
0.00025	0.00017	-0.00424	0.00861	0.0041	0.00056	0.01214	0.00123	0.00452	0.00048	-0.00255	0.01547	0.00084	0.0001	0.00423	-0.00069	0.00571	-0.00103	0.00159	0.0107	-0.00678	0.00159	-0.00285	0.00025	0.02185	-0.00014	-0.00196	-0.00062	-0.00555	-0.00464	-0.80074	0.03563
0.00092	-0.00017	-0.00217	0.00851	0.00044	0.00002	0.01529	0.00101	0.0014	0.0002	-0.00433	0.01562	0.0009	0.0001	0.00253	-0.0002	0.0067	-0.00059	0.00098	0.01111	-0.00743	0.001	-0.00071	-0.00035	0.0217	-0.00001	-0.00602	-0.00005	-0.00768	-0.00476	-0.79933	0.03587
0.00103	0.00059	-0.00484	0.00802	-0.0007	-0.00033	0.01567	0.00113	-0.00037	0.00093	-0.00508	0.01546	-0.00135	0.0005	0.00024	0.00003	0.00325	-0.00034	-0.00093	0.01095	-0.00752	0.00061	0.00054	-0.00035	0.02232	-0.00024	-0.00492	-0.00051	-0.00759	-0.00448	-0.80007	0.03585
0.0006	0.00127	-0.00901	0.00804	-0.00013	0.00039	0.01435	0.00129	-0.00021	0.00091	-0.00517	0.01618	-0.00035	0.0007	-0.00183	-0.00004	0.00225	-0.00015	0.0001	0.01002	-0.00788	0.00064	0.00014	0.0018	0.02384	-0.00042	-0.00291	-0.00017	-0.00686	-0.00406	-0.80105	0.03569
0.00163	0.00134	-0.0096	0.00787	0.00269	0.00034	0.0124	0.00108	0.00132	0.0003	-0.00426	0.01647	-0.00343	-0.00014	-0.00244	-0.00029	0.00431	-0.00027	0.00037	0.01151	-0.00729	0.00108	-0.00185	0.00046	0.02577	-0.00021	-0.00549	-0.00033	-0.00408	-0.0042	-0.8049	0.0352
0.00338	0.00137	-0.00835	0.00757	0.00122	-0.00038	0.01128	0.00105	0.00046	0.00006	-0.00456	0.01557	-0.00093	-0.00004	-0.00132	-0.00029	0.00137	-0.0005	-0.00007	0.01051	-0.00924	0.00147	-0.00365	0.00028	0.02474	-0.00011	-0.00505	-0.00029	-0.00143	-0.00458	-0.80471	0.03478
0.00217	0.00116	-0.00794	0.00778	-0.00025	-0.00036	0.01411	0.00115	-0.00255	0.00018	-0.00655	0.01538	0.00346	0.00028	-0.00119	-0.00075	-0.00056	-0.00027	0.01029	-0.01133	0.0012	-0.00247	-0.00027	0.02263	-0.00037	-0.00502	-0.0004	-0.0024	-0.00363	-0.80379	0.03465	
0.00213	0.00078	-0.00912	0.00792	-0.0013	0.00003	0.0157	0.00105	-0.00271	-0.00001	-0.00388	0.016	0.00365	0.0005	0.00064	0.0002	0.00135	-0.00071	0.00576	0.01065	-0.01185	0.001	-0.0015	-0.00049	0.02092	-0.00102	-0.00636	-0.00042	-0.0045	-0.00404	-0.80207	0.03472
0.00139	0.00092	-0.01052	0.0079	0.00113	0.00048	0.01406	0.00159	0.00054	-0.00037	-0.00707	0.01599	0.00065	0.0015	0.00219	0.00233	0.00287	-0.00076	0.00914	0.01128	-0.0102	0.00138	-0.00229	0.001	0.02058	-0.00111	-0.00029	-0.00016	-0.00227	-0.00363	-0.80154	0.03492
0.00069	0.0009	-0.00947	0.00822	0.00175	0.00003	0.01423	0.00158	0.00186	-0.00027	-0.00387	0.01592	-0.00118	-0.00002	0.00031	-0.00038	0.00214	-0.00082	0.00715	0.0114	-0.00691	0.00163	-0.00291	0.00009	0.02347	-0.00073	-0.00169	0.0015	-0.00962	-0.00372	-0.80407	0.03552
0.00284	0.00116	-0.00845	0.00796	0.00035	-0.00015	0.01637	0.00159	-0.00163	0.0011	-0.00194	0.01585	-0.00034	0.00051	0.0025	-0.00066	0.00373	-0.00132	0.00021	0.01142	-0.00645	0.00199	-0.00261	0.00012	0.02337	-0.00087	-0.00398	0.00011	-0.00865	-0.00371	-0.80562	0.03564
0.00563	0.00132	-0.00691	0.00774	-0.00219	-0.00015	0.01819	0.00143	-0.00156	0.00001	-0.00193	0.01554	0.0032	0.00095	0.00127	-0.00033	0.00674	-0.00116	0.00067	0.01149	-0.00685	0.00156	-0.00192	-0.00009	0.0244	-0.00102	-0.00222	0.00006	-0.00561	-0.00401	-0.80337	0.03567
0.00441	0.00139	-0.00637	0.00782	-0.00229	0.00035	0.01433	0.00101	-0.00187	0.00002	-0.00188	0.01533	0.0072	0.00095	0.00027	-0.00015	0.00666	-0.00025	0.00023	0.01146	-0.00695	0.00048	-0.00207	-0.0006	0.02336	-0.00088	0.00131	0.00022	-0.0049	-0.00422	-0.80176	0.03593
0.00247	0.00123	-0.0046	0.00794	-0.002	0.00046	0.01234	0.00037	-0.00203	0.00051	-0.00079	0.01565	0.00632	0.00063	0.00098	-0.00032	0.00584	0.00037	-0.00051	0.01134	-0.01038	0.00011	0.00156	-0.00076	0.0234	-0.00089	-0.00013	0.00025	-0.00536	-0.0039	-0.80116	0.03584
-0.00172	0.00037	-0.00613	0.00783	-0.00015	-0.00005	0.01272	0.0006	0.000136	0.00053	-0.00233	0.01579	0.00221	0.0004	0.00488	-0.00046	0.00521	0.00026	0.0007	0.01102	-0.01047	0.00046	0.00113	-0.00011	0.01994	-0.001	-0.00452	0.00035	-0.00092	-0.00351	-0.80093	0.03546
-0.00188	0.0003	-0.00584	0.00785	-0.00038	-0.00044	0.0147	0.00059	0.00044	-0.00034	-0.0066	0.01592	-0.0006	-0.00015	0.00428	-0.00003	0.00658	-0.00026	0.00069	0.01117	-0.00961	0.00101	-0.00067	-0.00001	0.01623	-0.00091	-0.00772	0.00034	-0.00758	-0.00334	-0.80557	0.03495
0.00134	0.00086	-0.00606	0.00778	-0.00103	-0.00024	0.01617	0.00072	0.00082	-0.00039	-0.00555	0.01573	-0.00066	-0.0004	0.0039	0	0.00536	-0.00034	0.00291	0.01136	-0.00945	0.00152	-0.00464	-0.00004	0.01857	-0.00054	-0.0078	0.00032	-0.00768	-0.00318	-0.80724	0.03421
0.00199	0.00106	-0.00527	0.00793	0.00103	0.00017	0.01582	0.00086	0.00271	0.00026	-0.00153	0.01514	0.00037	-0.00038	0.00603	-0.00043	0.00615	-0.00018	0.00386	0.01112	-0.00903	0.00158	-0.00918	-0.00009	0.01895	-0.00059	-0.00497	0.0003	-0.00578	-0.00321	-0.80506	0.03478
0.00213	0.00134	-0.00885	0.00793	0.00255	0.00002	0.01587	0.00123	0.00483	0.0002	-0.0012	0.01495	-0.00005	0.00711	-0.0007	0.00582	-0.00025	0.00512	0.0109	-0.00631	0.00161	0.01262	-0.00025	0.01696	-0.0001	-0.00044	-0.00008	-0.00046	-0.00396	-0.80145	0.0355	
-0.00001	0.00141	-0.00273	0.00793	0.00538	-0.00064	0.01429	0.00127	0.00219	0.0019	-0																					

0.0027	-0.00003	-0.00879	0.00803	0.00061	0.00022	0.01599	0.00055	0.0017	0.00037	-0.00592	0.0156	0.00114	0.00016	-0.00203	-0.00025	0.00043	-0.00076	0.00049	0.01048	-0.00841	0.00076	-0.00118	0.00049	0.0243	-0.00058	-0.00276	0.00029	-0.00762	-0.00327	-0.80113	0.03545
0.00503	-0.00007	-0.01156	0.00615	0.00071	0.00011	0.01732	0.00071	0.0033	0.00029	-0.00489	0.01543	0.00246	0.00063	-0.00282	-0.00089	0.00578	-0.00118	0.00125	0.01078	-0.01056	0.00077	-0.00264	0.00023	0.02556	-0.001	-0.00411	0.00024	-0.00469	-0.00328	-0.80397	0.03603
0.0011	0.00018	-0.00746	0.00727	-0.00073	-0.00063	0.01662	0.00084	0.00025	0.00026	-0.00323	0.01561	0.0052	0.00092	-0.00159	-0.00072	0.00991	-0.00101	0.00479	0.01113	-0.00725	0.0013	-0.00628	0.00015	0.02343	-0.00119	-0.00497	-0.00001	-0.00403	-0.00396	-0.80708	0.03622
0.00666	0.00028	-0.0056	0.00712	-0.0001	-0.00012	0.01593	0.00051	-0.00453	0.00044	-0.00266	0.0157	0.00451	0.00092	0.00026	-0.0004	0.00924	-0.00079	0.00404	0.01127	-0.00244	0.00151	-0.00545	0.00031	0.02178	-0.00117	-0.00397	0.00012	-0.0046	-0.00453	-0.80438	0.03599
0.00257	0.00049	-0.00445	0.0075	0.00016	0.00067	0.01381	-0.00004	-0.00413	0.00047	-0.00375	0.01579	0.00038	0.00193	-0.00039	0.00722	-0.00052	0.00168	0.01105	-0.00236	0.00114	-0.00479	0	0.02281	-0.00111	-0.0036	0.00017	-0.00442	-0.00461	-0.80017	0.03559	
-0.00003	0.0007	-0.00682	0.00826	0.00019	0.00058	0.01247	0.00001	-0.00129	0.00058	-0.0054	0.01557	0.00027	0.00068	-0.00014	0.00365	-0.00029	0.00608	0.01092	-0.00496	0.00117	-0.00347	-0.00049	0.0251	-0.00074	-0.00227	-0.00015	-0.00638	-0.00451	-0.79914	0.03551	
-0.0243	0.0115	-0.0821	0.0845	0.00371	0.00048	0.00999	0.00055	-0.00947	0.00073	-0.00665	0.01604	0.00062	0.00352	0.00258	-0.00177	0.00247	0.00454	0.01082	-0.00385	0.00155	-0.00429	-0.00047	0.02228	-0.00061	-0.00047	-0.00011	-0.00774	-0.00425	-0.80104	0.03572	
-0.00235	0.00998	-0.05777	0.00812	0.00421	-0.0002	0.0123	0.00066	0.0016	0.00072	-0.00364	0.01598	-0.00032	0.00039	-0.00092	0.00376	-0.00052	0.00122	0.01077	-0.00287	0.00163	-0.00435	0.0001	0.02103	-0.00082	-0.00125	-0.00054	-0.00074	-0.00411	-0.80317	0.03579	
-0.00194	0.007	0.00081	0.00771	0.00404	-0.00078	0.01371	0.00109	0.00139	0.00079	-0.00209	0.0155	0.00042	0.00049	0.00253	-0.00169	0.00269	-0.00072	0.00058	0.01075	-0.00513	0.00157	-0.00291	-0.00005	0.02261	-0.00116	0.00263	-0.00027	-0.00848	-0.00394	-0.8037	0.03584
0.01006	0.0006	-0.00016	0.00798	0.00274	-0.00042	0.01586	0.0013	-0.00089	0.00066	-0.00536	0.01534	0.00188	0.00064	0.00251	-0.00163	0.00222	-0.00089	0.00231	0.01083	-0.00694	0.0014	-0.00123	-0.0002	0.02358	-0.00171	0.00547	0.00029	-0.00928	-0.00403	-0.80334	0.03562
0.00277	0.00049	-0.00788	0.00185	0.00137	-0.00026	0.01495	0.00086	-0.00472	0.00058	-0.00533	0.01531	0.00311	0.0005	0.00284	-0.00158	0.00352	-0.00074	0.01078	-0.0105	0.00121	-0.00137	-0.00035	0.02266	-0.00114	0.01078	0.00035	-0.01118	-0.00402	-0.80398	0.0359	
0.00239	0.0006	-0.01138	0.0079	0.00071	-0.00065	0.01578	0.00079	-0.00584	0.00094	-0.00451	0.01593	0.00287	0.00033	0.00379	-0.00152	0.00544	-0.00087	-0.00345	0.01099	-0.00994	0.00127	0.00027	-0.00021	0.02027	-0.00034	-0.00376	-0.00007	-0.0112	-0.00434	-0.80532	0.03616
0.00203	0.00054	-0.01029	0.00826	0.00127	-0.00076	0.01553	0.00092	-0.00167	0.00071	-0.00621	0.01616	0.00385	-0.00003	0.00517	-0.00096	0.00505	-0.00111	-0.00099	0.01123	-0.00887	0.00165	0.00006	-0.00043	0.02162	-0.00076	-0.00751	-0.00011	-0.01037	-0.00435	-0.80314	0.0356
0.00399	0.00018	-0.0086	0.00848	0.00223	-0.00035	0.0127	0.00059	-0.00135	0.00038	-0.00557	0.01604	0.00478	-0.00009	0.00787	-0.00048	0.00331	-0.00108	0.00239	0.01157	-0.0094	0.00201	-0.00136	-0.00108	0.02345	-0.00116	-0.00917	-0.00046	-0.01152	-0.00382	-0.80368	0.03534
0.00194	0.00026	-0.00473	0.00812	0.00346	0.00033	0.01198	0.00058	-0.00307	0.00041	-0.00335	0.01603	0.00483	0.00037	0.00689	-0.00059	0.00698	-0.00088	0.00033	0.01154	-0.00953	0.00189	-0.00046	-0.00049	0.02533	-0.00125	-0.01052	-0.00036	-0.01265	-0.00342	-0.80226	0.03556
-0.00038	0.00048	-0.00331	0.00778	0.00707	0.00032	0.01554	0.00047	0.00029	0.00036	-0.0038	0.0162	0.00568	0.00054	0.00228	-0.00119	0.00862	-0.00078	-0.00173	0.01146	-0.00772	0.00149	-0.00437	0.00002	0.02157	-0.00137	-0.00963	0.00033	-0.01177	-0.00354	-0.79666	0.03572
-0.00122	0.00081	-0.00514	0.00757	0.00009	0.00016	0.01744	0.00029	0.00218	0.00085	-0.00777	0.01631	0.00404	0.00034	0.00312	-0.00162	0.00872	-0.00049	-0.00026	0.01113	-0.0092	0.00078	-0.00801	0.00027	0.02003	-0.00141	-0.00536	0.00073	-0.00957	-0.00391	-0.79823	0.03551
-0.00022	0.00097	-0.00604	0.00793	0.00752	0.00012	0.01645	0.00053	0.00005	0.00165	-0.01223	0.01624	0.00378	0.00043	0.00346	-0.00138	0.00688	-0.00045	-0.00045	0.01063	-0.01068	0.00006	-0.00509	0.00035	0.01965	-0.00101	-0.00115	0.00064	-0.00736	-0.00415	-0.80007	0.0356
0.0027	0.00017	-0.00451	0.00827	0.00622	0.00044	0.01502	0.00092	-0.00195	0.00159	-0.01254	0.01588	0.00396	0.00028	-0.00036	-0.00088	0.00433	-0.00062	0.00095	0.01043	-0.0106	0.00106	-0.00102	0.00076	0.01861	-0.00015	-0.00001	-0.00054	-0.00396	-0.79989	0.03546	
0.0007	0.00068	-0.00564	0.00855	0.00375	0.00073	0.01486	0.00093	-0.00021	0.00144	-0.00578	0.01515	0.00033	-0.00009	-0.00109	-0.00039	0.00519	-0.00022	0.00229	0.01103	-0.00963	0.00102	0.00059	0.01945	-0.00076	-0.00262	-0.00024	-0.00541	-0.00347	-0.80016	0.03539	
0.00107	0.00016	-0.00822	0.00839	0.00462	0.0005	0.01477	0.00039	-0.00099	0.00148	-0.00079	0.01461	-0.00141	-0.00039	0.00034	-0.0005	0.00432	0.00011	0.00389	0.01173	-0.00887	0.00129	-0.00165	0.0001	0.02215	-0.00086	-0.00531	-0.00029	-0.00775	-0.00337	-0.80225	0.03569
0.0006	-0.00007	-0.00774	0.00769	0.00392	0.00033	0.01356	-0.00008	0.00053	0.00108	-0.00267	0.0151	0.00083	-0.0004	0.00195	-0.0008	0.00574	0.00002	0.00419	0.01148	-0.00553	0.00181	-0.00344	-0.00039	0.02245	-0.00078	-0.00382	-0.00001	-0.0114	-0.00305	-0.80167	0.03584
0.00214	0.00013	-0.00497	0.00735	0.00218	0.00042	0.0131	-0.0003	0.0009	0.00092	-0.00676	0.01562	0.00237	-0.00008	0.00204	-0.00106	0.00506	-0.00058	0.00078	0.01084	-0.00396	0.00199	-0.00306	-0.00053	0.02032	-0.0007	-0.00268	0.00031	-0.00667	-0.00284	-0.80038	0.03559
0.00059	0.00024	-0.00528	0.00791	0.0107	0.00022	0.01301	-0.00043	-0.00114	0.00086	-0.0055	0.01569	0.0026	0.00007	0.00404	-0.0008	0.00264	-0.00079	-0.00121	0.0019	-0.00613	0.01172	-0.00138	-0.00005	0.01961	-0.00098	-0.00363	0.00045	-0.00477	-0.00323	-0.79725	0.03527
0.0034	-0.00017	-0.00455	0.00804	0.00383	0.00005	0.01216	-0.00035	-0.0055	0.00059	-0.00686	0.01615	0.00505	0.00021	0.00386	-0.00002	0.00306	-0.00091	0.0003	0.01077	-0.00432	0.00097	0.0007	-0.00008	0.02109	-0.00167	-0.00673	0.00028	-0.00789	-0.00337	-0.79604	0.03511
0.00313	-0.00046	-0.00493	0.00788	0.00472	0.00022	0.00792	-0.00006	-0.00779	0.00179	0.01687	0.01687	0.00464	0.00048	0.00059	-0.00012	0.0065	-0.00148	-0.00002	0.01086	-0.00399	0.00085	0.00142	-0.00007	0.02244	-0.00218	-0.00667	0.00015	-0.00721	-0.00372	-0.80239	0.03568
0.00514	-0.00004	-0.00546	0.00784	0.00465	0.00063	0.00635	0.00004	-0.00428	0.00148	-0.0029	0.01716	0.00079	0.00049	0.00474	-0.00041	0.0043	-0.00145	-0.00051	0.01114	-0.00358	0.00126	0.0002	0.00025	0.02392	-0.00193	-0.00381	0.00014	-0.00411	-0.00399	-0.80439	0.03626
0.00559	0.0003	-0.00684	0.00815	0.00447	0	0.00974	-0.00024	0.00105	0.00108	-0.00242	0.01679	-0.00157	0.00073	0.00074	-0.00051	0.00161	-0.00004	0.00045	0.01084	-0.00598	0.00148	-0.0019	0.00046	0.02288	-0.00092	-0.00321	0.00013	-0.00648	-0.00391	-0.80337	0.03659
0.00331	0.00047	-0.00421	0.00864	0.00697	-0.00044	0.01282	-0.00048	0.00054	0.00096	-0.00416	0.01647	-0.0028	0.00082	0.00043	-0.00008	0.00422	-0.0001	0.00045	0.01049	-0.00315	0.00124	-0.00122	0.00043	0.01904	-0.00077	-0.00686	0.00038	-0.00352	-0.00368	-0.8022	0.0366
0.0011	0.00049	-0.00256	0.00825	0.0039	0.00024	0.01352	-0.00033	-0.00072	0.00057	-0.00353	0.01601	0.00038	0.00001	-0.00085	0.00031	0.00479	-0.00033	0.00128	0.01108	-0.00533	0.00151	-0.0013	0.00063	0.01902	-0.00109	-0.00608	0.00059	-0.00535	-0.00346	-0.7995	0.03623
-0.00055	0.0004	-0.00335	0.00744	0.00223	0.00078	0.01252	-0.00029	0.00459	0.00008	-0.00395	0.01624	0.00133	-0.00031	0.00195	0.00048	0.00351	-0.00026	0.0035	0.01152	-0.00652	0.00096	-0.00104	0.00009	0.02179	-0.00126	-0.00414	0.00067	-0.00877	-0.00334	-0.79615	0.03541
0.00143	0.00061	-0.00511	0.0071	0.00184	0.00075	0.01173	-0.00033	0.00672	-0.00023	-0.00376	0.01686	0.00105	0.00003	0.00262	0.00116	0.00344	-0.00035	0.0006	0.01134	-0.00722	0.00035	-0.00166	0.00058	0.02369	-0.00097	-0.00576	0.00066	-0.00608	-0.00331	-0.79593	0.03512
0.00127	0.00042	-0.0056	0.00727	0.00071	0.00025	0.00886	-0.00031	0.00341	-0.00042	-0.																					

0.00688	0.00076	-0.00486	0.00772	0.0012	0.00048	0.02592	-0.00008	0.00296	0.00087	-0.00643	0.01632	0.00168	0.00102	0.00042	-0.00044	0.00801	-0.00117	-0.00104	0.01131	-0.00089	0.0014	-0.0016	-0.00027	0.02175	-0.00132	-0.00607	-0.00072	-0.00541	-0.00307	-0.79939	0.03557
0.00538	0.00103	-0.00782	0.00772	0.00138	0.00049	0.03228	0.00009	0.00712	0.00098	-0.00558	0.01629	0.00344	0.00129	0.00042	-0.00019	0.00767	-0.00099	-0.00009	0.0131	-0.00068	0.00144	-0.00427	0.00038	0.01928	-0.0011	-0.0069	-0.00047	-0.00864	-0.00293	-0.80084	0.03553
0.00494	0.00128	-0.00863	0.00781	0.00116	0.00007	0.03897	0.00002	-0.00133	0.00067	-0.00768	0.01651	0.00171	0.00157	0.0072	-0.00015	0.00849	-0.00055	0.00367	0.01558	-0.00088	0.00127	-0.00408	0.0004	0.02045	-0.00068	-0.00784	-0.0004	-0.0131	-0.0033	-0.80041	0.03526
0.00482	0.00086	-0.00626	0.00786	0.00216	0.00017	0.04859	-0.00049	0.00016	0.00066	-0.00946	0.01675	0.00051	0.0017	0.00701	-0.00066	0.00075	-0.0004	0.00131	0.01104	-0.01047	0.00163	-0.00308	0.00049	0.02529	-0.00026	-0.00743	-0.00023	-0.0128	-0.00394	-0.80105	0.03494
0.00135	0.0003	-0.00577	0.0081	0.00385	0.00062	0.05476	-0.00045	0.00348	0.00064	-0.00716	0.01698	0.00474	0.00115	0.00675	-0.00008	0.00073	-0.00074	0.00251	0.01106	-0.00998	0.0019	-0.00396	0.00053	0.02574	-0.00019	-0.00694	0.00038	-0.0116	-0.00381	-0.79981	0.03467
0.00057	0.00068	-0.00819	0.00824	0.00015	0.00034	0.06083	-0.00046	0.00007	0.00041	-0.0066	0.01652	0.00696	0.00073	0.00437	-0.00073	0.0011	-0.00099	-0.00029	0.00148	-0.00593	0.00115	-0.00059	0.00007	0.0212	-0.00019	-0.00679	0.00027	-0.0101	-0.00349	-0.80091	0.03489
0.001	0.00083	-0.00588	0.008	0.00094	-0.00012	0.07108	-0.00089	0.00024	0.00004	-0.0071	0.01582	0.00524	0.00097	0.00348	-0.0002	0.00527	-0.01049	-0.0002	0.0122	-0.00472	0.001	-0.00658	-0.00008	0.01735	-0.00036	-0.00329	-0.00044	-0.01079	-0.00384	-0.80106	0.03573
0.0011	0.00116	-0.00275	0.00772	0.00193	-0.00061	0.08619	-0.00107	0.00097	0.00006	-0.00837	0.01603	0.00077	0.00097	0.00285	0.01033	-0.00054	0.01012	-0.00079	0.02037	-0.00854	0.00102	-0.00792	0.00337	0.01814	-0.00072	-0.00282	-0.00064	-0.01034	-0.00391	-0.80036	0.03587
0.00007	0.00161	-0.00359	0.00774	0.0042	-0.00057	0.09937	-0.00073	0.00751	0.00008	-0.01098	0.01625	0.00074	0.00075	-0.00059	-0.00208	0.00945	-0.00029	0.00676	0.01116	-0.01056	0.00157	-0.00699	0.00008	0.0193	-0.00123	-0.00154	-0.00032	-0.00919	-0.00394	-0.80166	0.03588
-0.00099	0.0013	-0.00573	0.00811	0.00158	-0.00029	0.11144	-0.0006	0.00596	0.0007	-0.00917	0.01607	-0.00329	0.00052	-0.00137	-0.00088	0.00702	-0.00037	0.00541	0.01008	-0.00963	0.00181	-0.00335	-0.00079	0.02143	-0.00125	-0.00283	-0.00004	-0.00816	-0.00385	-0.8029	0.03611
0.00095	0.00116	-0.00857	0.00832	-0.00032	0.12519	-0.0007	0.00394	0.00071	-0.00904	0.01587	-0.00329	0.00033	0.00038	-0.00078	0.0049	-0.00059	0.00177	0.01008	-0.00897	0.00193	-0.00031	-0.0004	0.02304	-0.00027	-0.00625	0.0.0	-0.00772	-0.00328	-0.79884	0.0358	
0.00705	0.00088	-0.00785	0.00802	-0.00002	-0.00005	0.13705	-0.00032	0.00494	0.00056	-0.01079	0.01619	-0.00239	0.00012	0.00106	-0.00031	0.00694	-0.01002	-0.00388	0.01092	-0.00764	0.00165	0.00091	0.00061	0.02325	-0.00071	-0.00742	0.00023	-0.01278	-0.00351	-0.79973	0.03527
0.00753	0.00066	-0.00675	0.00778	0.00032	-0.00023	0.14676	0.00002	0.0047	0.00012	-0.00993	0.01624	-0.0005	0.00014	0.00106	-0.00003	0.00983	-0.01225	-0.00295	0.01028	-0.00711	0.00151	-0.0103	0.00091	0.2441	-0.0004	0.00022	-0.00236	-0.00519	-0.8003	0.03555	
0.00391	0.00107	-0.00527	0.00759	0.00138	-0.00014	0.15669	0.00034	0.00169	0.00007	-0.00844	0.01585	0.00175	0.00009	0.00353	-0.00015	0.00902	-0.01057	-0.00147	0.01137	-0.00529	0.00113	-0.00126	0.00065	0.20085	-0.00119	-0.00225	-0.00008	-0.01542	-0.00387	-0.80346	0.03561
0.00287	0.00121	-0.00512	0.00752	-0.00019	0.00004	0.16857	0.00077	-0.00139	0.00059	-0.00577	0.01589	0.00208	0.00007	-0.00276	-0.00051	0.00617	-0.00129	-0.0007	0.01122	-0.00548	0.00037	0.00111	0.00029	0.01705	-0.00141	-0.0021	-0.00028	-0.01434	-0.00389	-0.80049	0.03501
0.00462	0.00106	-0.0068	0.00768	0.00111	0.00006	0.18148	0.00074	-0.00152	0.00064	-0.00557	0.01609	0.00132	0.00045	-0.00068	-0.00075	0.00214	-0.00063	-0.00135	0.01119	-0.00718	0.0004	-0.00236	0.00001	0.01513	-0.00123	-0.00281	0.00004	-0.01248	-0.00393	-0.80227	0.03467
0.00383	0.00072	-0.00551	0.00804	0.00189	-0.00003	0.19394	0.00091	-0.00144	0.00045	-0.00703	0.0159	0.00143	0.00037	0.00202	-0.00056	0.00183	-0.00052	-0.00092	0.01122	-0.00405	0.00071	-0.00577	0.00012	0.01746	-0.00087	-0.00079	0.00011	-0.0105	-0.00372	-0.80118	0.03493
0.00309	0.00044	-0.00493	0.00801	0.00258	0.00028	0.20819	0.0011	0.00103	0.00053	-0.00647	0.01589	0.00229	0.00025	0.00245	-0.00041	0.00241	-0.0006	0.00096	0.01125	-0.0004	0.0012	-0.00633	0.00005	0.01918	-0.0007	-0.01026	-0.00024	-0.00815	-0.00336	-0.80383	0.03548
0.00052	0.00044	-0.00389	0.00757	0.00056	-0.00034	0.22016	0.0011	0.00103	0.00075	-0.00556	0.01575	0.00382	0.00038	0.00387	-0.00056	0.00367	-0.00056	0.00056	0.0113	-0.00037	0.00159	-0.00013	0.00023	0.02022	-0.00087	-0.00747	-0.00021	-0.00716	-0.00301	-0.80366	0.03592
-0.00077	0.00039	-0.0056	0.00696	0.00615	-0.00033	0.23259	0.00136	0.00102	-0.00695	0.01578	0.00427	0.0013	0.0016	0.00021	0.00243	-0.00016	0.00162	0.01132	-0.00279	0.00156	-0.00188	0.00006	0.01937	-0.00137	-0.00259	0.00001	-0.00863	-0.00317	-0.80333	0.03591	
-0.00205	0.00016	-0.00858	0.00692	0.00146	-0.00029	0.2442	0.00211	-0.00156	0.00114	-0.00719	0.01574	0.00057	0.00015	0.00011	0.00017	0.00201	-0.00012	0.0017	0.01132	-0.00268	0.00116	-0.00235	-0.00228	0.02128	-0.00161	-0.00003	0.00023	-0.00923	-0.00407	-0.80318	0.0357
-0.00189	0.00034	-0.00836	0.00747	-0.00018	-0.00026	0.25827	0.0018	-0.00117	0.00126	-0.00608	0.0152	0.0073	0.00082	0.00047	0.00056	0.00134	-0.0004	0.00003	0.01104	-0.00484	0.00067	-0.00063	0.00008	0.02402	-0.00162	-0.00059	0.0004	-0.00819	-0.00408	-0.7993	0.03556
-0.00236	0.00046	-0.00575	0.00758	0.0032	0.00004	0.27524	0.00207	-0.00681	0.00108	-0.00527	0.01561	0.00642	0.00071	0.00189	-0.01008	0.00016	-0.00056	-0.00252	0.01126	-0.00721	0.00074	-0.00001	0.00117	0.02091	-0.00145	-0.00293	0.0005	-0.00817	-0.00385	-0.79765	0.03547
-0.00091	0.00025	-0.00507	0.00764	0.00344	-0.00005	0.28912	0.00253	-0.00641	0.00031	-0.00391	0.0164	0.00354	0.00014	0.00031	-0.00071	0.00005	-0.00051	-0.00108	0.01141	-0.00613	0.00145	-0.001	-0.00008	0.01813	-0.00118	-0.00357	0.00023	-0.00862	-0.00417	-0.80104	0.03504
0.00093	-0.00009	-0.00577	0.00781	0.00061	-0.00018	0.30095	0.00303	-0.00193	-0.00008	-0.00278	0.01617	0.0016	0.00032	0.00045	-0.00071	0.00318	-0.00047	0.00025	0.01145	-0.00404	0.0024	0.00148	-0.00021	0.01581	-0.00096	0.00222	-0.00023	-0.00689	-0.00414	-0.80323	0.03508
0.00191	0.00023	-0.00559	0.00724	0.00116	0.00016	0.31626	0.00368	0.00442	-0.00017	-0.00074	0.01536	0.0004	0.00031	0.00396	-0.00057	0.00544	-0.01007	-0.00303	0.01149	-0.00802	0.00279	0.00216	0.00222	0.01616	-0.001	0.00534	-0.00045	-0.00747	-0.00397	-0.802	0.03538
0.00434	0.00041	-0.00453	0.00702	0.00127	0.0001	0.33437	0.00422	0.00384	0.00049	-0.0134	0.01525	0.0005	0.00033	0.0064	-0.00059	0.00735	-0.0128	-0.00296	0.01181	-0.00762	0.00208	0.00357	0.0007	0.01822	-0.00068	0.00322	-0.00042	-0.00816	-0.00382	-0.79912	0.03567
0.0055	0.0002	-0.00408	0.00757	-0.00009	-0.00013	0.34771	0.00488	0.00097	0.00025	-0.01498	0.01582	0.00223	0.00061	0.00518	-0.00054	0.0093	-0.00057	-0.00472	0.01244	-0.00341	0.00119	0.00011	0.00056	0.0194	-0.00028	0.00185	-0.00033	-0.00144	-0.00334	-0.8001	0.03547
0.00416	0.00036	-0.00545	0.00811	-0.00294	0.00018	0.35853	0.00509	-0.00205	0.00013	-0.01056	0.01599	0.00304	0.00067	0.00144	-0.00055	0.00652	-0.00004	-0.00097	0.01213	-0.00471	0.00107	-0.00521	0.00014	0.01993	-0.00077	0.0016	0.00001	-0.01382	-0.00343	-0.80422	0.03527
0.00111	0.00065	-0.00535	0.00753	0.00123	0.00056	0.36777	0.00463	0.00135	0.00032	-0.0093	0.01559	0.00155	0.00045	0.00222	-0.00046	0.00536	-0.00007	0.00259	0.01153	-0.00659	0.00118	-0.0067	0.00014	0.02057	-0.0013	-0.00062	0.00010	-0.01469	-0.00308	-0.80097	0.0354
0.00408	0.00077	-0.00102	0.00721	0.00623	0.00044	0.37996	0.00481	0.00561	0.00035	-0.01011	0.01502	0.0013	0.00015	-0.00049	-0.00058	0.00648	-0.00046	0.00407	0.01125	-0.00667	0.00107	-0.00524	0.00016	0.01895	-0.00085	-0.00301	0.00024	-0.01045	-0.00395	-0.79684	0.03541
0.00222	0.00102	-0.00085	0.00793	0.00069	0.00036	0.39891	0.00522	0.00654	0.00044	-0.01091	0.0153	0.00167	0.00001	-0.00181	-0.00039	0.00575	-0.00071	0.00609	0.01133	-0.00709	0.001	-0.00268	0.00017	0.01835	-0.00026	0.00154	0.00021	-0.00519	-0.00352	-0.79545	0.03538
0.00298	0.00093	-0.0077	0.00813	0.00632	-0.00015	0.41																									

0.00388	0.00135	-0.00037	0.00787	-0.00202	0.00094	1.13571	0.01739	-0.00162	0.00017	-0.00974	0.01616	0.00074	0.00117	0.00199	-0.00071	0.00954	-0.00029	0.00051	0.01077	-0.00469	0.0006	-0.00531	-0.00007	0.02285	-0.00081	-0.00753	0.00066	-0.00844	-0.0041	-0.80315	0.03465
0.00238	0.00068	-0.00003	0.00815	-0.00008	0.00052	1.15109	0.0184	-0.00087	0.00018	-0.0086	0.01583	0.00243	0.00027	0.00425	-0.00062	0.00955	-0.00001	-0.00178	0.01077	-0.00952	0.00083	-0.00386	-0.00007	0.02108	-0.00092	-0.00599	0.00025	-0.0061	-0.00367	-0.80143	0.03483
0.00248	0.00075	0.00132	0.00836	0.00039	0.00013	1.16832	0.01939	-0.00086	-0.00008	-0.00652	0.01506	0.00471	0.00006	0.00568	0.00007	0.00806	0.00025	0.00048	0.01056	-0.00703	0.00162	-0.0059	0.00007	0.02093	-0.00078	-0.00582	-0.00019	-0.00666	-0.00347	-0.80076	0.03529
0.00506	0.00079	0.00052	0.00827	-0.00112	0.00034	1.18482	0.02023	0.00248	-0.00004	-0.00762	0.01472	0.00626	0.00077	0.00367	0.00007	0.00651	0.00035	0.00115	0.01055	-0.00805	0.00217	-0.00722	-0.00029	0.02263	-0.00085	-0.00377	-0.00022	-0.00666	-0.00338	-0.79978	0.03484
0.0054	0.00063	0.00012	0.00798	-0.00035	0.00049	1.20007	0.02048	0.00305	0.00014	-0.00928	0.01502	0.00287	0.0001	0.00039	-0.00032	0.00663	0.00017	-0.00262	0.01168	-0.01043	0.00172	-0.00743	-0.00039	0.0235	-0.00118	-0.0013	-0.00026	-0.00982	-0.0037	-0.80068	0.03428
0.00441	0.00072	-0.00044	0.00763	-0.000183	0.00024	1.21618	0.0202	-0.00068	0.00008	-0.00745	0.01517	0.00037	0.00083	0.00169	-0.00073	0.00536	0.00004	-0.00299	0.01193	-0.00937	0.00134	-0.0053	-0.00064	0.02361	-0.00114	-0.00268	-0.00042	-0.00982	-0.00372	-0.80457	0.03443
0.00128	0.00058	-0.0001	0.00729	-0.00057	0.00022	1.23268	0.02032	-0.00244	0.00061	-0.00742	0.01536	0.00036	0.00068	0.00316	-0.00086	0.00177	-0.00001	-0.00159	0.01166	-0.00891	0.00166	-0.0019	-0.00056	0.02489	-0.00128	-0.00418	-0.00095	-0.00817	-0.00353	-0.80463	0.0348
-0.00177	0.00073	-0.00342	0.00754	0.00024	0.00032	1.24601	0.02074	0.00082	0.00009	-0.00541	0.01521	0.00064	0.00008	0.00114	-0.00018	0.00182	0.00006	-0.00096	0.01127	-0.00784	0.00119	0.00122	0.00018	0.02457	-0.00159	-0.00166	0.00001	-0.00385	-0.79951	0.03466	
0.00005	0.00086	-0.00098	0.00832	0.00272	0.00019	1.26156	0.02121	0.00065	0.00027	-0.0066	0.0151	0.00176	0.00037	-0.00167	0.00032	0.00269	-0.0004	0.0025	0.0113	-0.00724	0.00092	0.00022	0.00095	0.02278	-0.00157	-0.00194	-0.00008	-0.00891	-0.00433	-0.79673	0.0346
0.00207	0.00142	-0.00258	0.00818	0.00116	0.00059	1.27877	0.02094	0.00344	0.0013	-0.0107	0.01489	0.0024	0.00002	-0.00345	0.00045	0.00264	-0.01008	0.00252	0.01121	-0.00751	0.00089	0.00257	0.00075	0.01915	-0.0015	-0.00501	0.00012	-0.0105	-0.00416	-0.7954	0.03523
0.0038	0.00154	-0.00373	0.00777	-0.00013	0.00102	1.2962	0.02076	0.00504	0.00062	-0.01097	0.01489	0.00188	0.00017	-0.00329	-0.00103	0.00365	-0.0123	-0.00409	0.01127	-0.00779	0.00049	-0.00052	0.00016	0.02033	-0.00121	-0.00688	0.00005	-0.01041	-0.00365	-0.79551	0.03467
0.00338	0.00105	-0.00302	0.00749	0.00081	0.00094	1.31061	0.02103	0.00685	-0.00027	-0.01173	0.01509	-0.00028	0.00008	0.00028	-0.00054	0.00538	-0.00056	-0.00411	0.01135	-0.00836	0.00064	-0.00111	-0.00001	0.02236	-0.00113	-0.00696	-0.00026	-0.00828	-0.00337	-0.79904	0.03408
0.00303	0.00057	-0.00048	0.00749	0.00063	0.00068	1.32486	0.02063	0.0058	-0.00001	-0.00923	0.01501	0.00033	0	0.00297	-0.00055	0.00646	0.00011	-0.00331	0.01137	-0.00542	0.00091	-0.00112	-0.00017	0.02092	-0.00095	-0.00664	0.00031	-0.01056	-0.00329	-0.80275	0.03454
0.00432	0.00064	0.00174	0.0078	0.00474	0.00066	1.34114	0.02266	0.00284	0.00107	-0.00767	0.01474	-0.00185	0.00025	0.00299	-0.00032	0.00599	-0.00037	0.00138	0.01129	-0.0048	0.00123	-0.00299	0.00034	0.01969	-0.00088	-0.00462	0.00066	-0.01031	-0.00302	-0.80269	0.03563
0.00461	0.00124	-0.00079	0.00819	0.00061	0.00064	1.35806	0.02256	0.00262	0.00132	-0.0084	0.01473	-0.00231	0.00029	0.00299	0.00045	0.00716	-0.00094	0.00277	0.01184	-0.00684	0.0013	-0.00226	0.00033	0.02161	-0.00067	-0.00512	0.00056	-0.00909	-0.00331	-0.80524	0.03599
0.00485	0.00148	-0.00002	0.00781	0.00527	0.00019	1.37514	0.02222	0.003	0.00078	-0.00859	0.01482	-0.00435	0.00019	0.00267	0.00073	0.00641	-0.00094	0.0011	0.01222	-0.00597	0.00149	-0.00182	0.00024	0.01971	-0.00065	-0.00158	0.00049	-0.00892	-0.00371	-0.80638	0.0359
0.0038	0.00131	-0.00228	0.00749	0.00477	0.0005	1.39119	0.02273	0.00177	0.00042	-0.00987	0.01514	-0.00474	0.00001	0.00041	-0.00003	0.00081	-0.00074	-0.00036	0.01154	-0.00411	0.00144	-0.00211	0.00054	0.02084	-0.00003	-0.00211	0.00066	-0.00788	-0.00366	-0.80361	0.03546
0.00491	0.00118	-0.0053	0.00742	0.00529	0.00064	1.4072	0.02331	0.00248	0.00015	-0.00958	0.01578	-0.00105	0.00017	-0.00228	0.00005	-0.00191	-0.00001	0.00056	0.0115	-0.00606	0.00141	-0.00287	0.00085	0.02449	-0.00033	-0.00701	0.00066	-0.00716	-0.00354	-0.80182	0.03505
0.00367	0.00141	-0.00547	0.00755	0.00203	0.00051	1.42347	0.02357	0.00003	0.00029	-0.00785	0.016	0.00023	0.00005	-0.00202	0.00065	0.00077	0.00035	0.00066	0.0114	-0.00606	0.00163	-0.00282	0.00071	0.02558	-0.00056	-0.00765	0.00064	-0.00877	-0.00356	-0.79939	0.03522
0.00545	0.00168	-0.00594	0.00788	-0.00346	0.00019	1.43905	0.02443	-0.00019	0.00013	-0.010115	0.01568	-0.00277	-0.00035	-0.00209	0.00061	0.00375	0.00016	0.00271	0.0117	-0.00877	0.00195	-0.00129	0.00069	0.02387	-0.00092	-0.00585	0.00007	-0.01124	-0.00324	-0.7996	0.03577
0.00266	0.0018	-0.00858	0.0079	-0.00683	0.00032	1.45395	0.02518	-0.01016	-0.0006	-0.01214	0.01568	-0.00276	-0.00017	-0.00189	0.00052	0.00451	-0.00006	0.00046	0.01214	-0.00415	0.00223	-0.00219	0.00018	0.02341	-0.00091	-0.00268	0	-0.0142	-0.00302	-0.79732	0.036
0.00203	0.00156	-0.00688	0.00826	-0.00451	0.00062	1.46845	0.02596	-0.00091	-0.00039	-0.01091	0.01591	0.00087	0.00014	-0.00024	0.00029	0.00509	-0.00029	0.00121	0.01202	-0.00802	0.0021	-0.00393	-0.00064	0.02213	-0.00116	-0.00012	0.00023	-0.01141	-0.00365	-0.79792	0.03524
0.00187	0.00112	-0.00232	0.00831	-0.00157	0.00034	1.48641	0.02539	-0.00187	-0.00039	-0.0096	0.01591	0.00087	0.00014	-0.00023	0.00056	0.00294	-0.00076	-0.00062	0.01246	-0.00496	0.00222	-0.00432	-0.00084	0.02215	-0.00104	-0.00279	0.00025	-0.0119	-0.0042	-0.7981	0.03431
0.00442	0.00081	-0.00053	0.00767	0.00072	-0.00026	1.50402	0.02594	-0.00238	-0.00031	-0.00873	0.01603	0.00176	0.00048	0.00393	-0.00013	0.0113	-0.00076	-0.00217	0.01292	-0.00998	0.00188	-0.00132	-0.00046	0.02238	-0.00029	-0.00559	0.00017	-0.00874	-0.00373	-0.8004	0.03449
0.005	0.0009	-0.00251	0.00766	0.00043	-0.00128	1.51786	0.02633	0.00119	-0.00001	-0.00807	0.01603	0.00171	0.0006	0.00192	0.00016	0.00343	-0.00076	-0.00031	0.0114	-0.01238	0.00115	0.0008	-0.00014	0.02376	-0.00027	-0.00667	-0.00002	-0.01254	-0.00311	-0.80027	0.03526
0.0018	0.00105	-0.00532	0.0078	0.00403	-0.00104	1.53269	0.02681	0.00211	0.0006	-0.00805	0.01597	0.00189	0.00069	0.00134	0.00058	0.00611	-0.00057	-0.00071	0.01155	-0.01018	0.00119	-0.00207	-0.00018	0.02495	-0.00072	-0.00818	-0.00008	-0.0117	-0.00347	-0.8003	0.03536
0.0036	0.00119	-0.00341	0.00812	-0.00028	-0.00004	1.5486	0.0271	-0.001	0.00064	-0.00867	0.01591	0.00098	0.00017	-0.00079	0.00052	0.00424	-0.00042	-0.0061	0.01219	-0.0082	0.00206	-0.0021	-0.00031	0.02441	-0.00094	-0.00798	0.0004	-0.00793	-0.00362	-0.79947	0.0352
0.00173	0.00057	-0.00396	0.0082	0.00517	0.00031	1.56389	0.0275	-0.0026	0.00015	-0.00756	0.01618	0.0013	0.00043	-0.00234	0.00044	0.01004	-0.00018	-0.00031	0.01249	-0.00724	0.00251	-0.0024	-0.00013	0.02372	-0.00003	-0.00515	0.00015	-0.00761	-0.00362	-0.80009	0.03536
0.00077	0.00069	-0.00711	0.00721	0.00606	0.00038	1.57871	0.02776	0.00076	-0.00015	-0.00707	0.01617	0.00296	0.00083	-0.00158	0.00069	-0.00107	0.00022	-0.00348	0.01093	-0.00725	0.00183	-0.00326	0.00018	0.02234	-0.00033	-0.00201	-0.0002	-0.00669	-0.00366	-0.80053	0.03556
0.00223	0.00113	-0.00736	0.00679	0.0005	0.00025	1.59398	0.02809	0.00541	0.00004	-0.00592	0.01514	0.00501	0.00093	-0.00125	0.00055	-0.0016	0.00023	-0.00196	0.01095	-0.00588	0.00183	-0.00406	0.00042	0.02183	-0.00065	-0.00269	-0.00022	-0.00641	-0.0041	-0.80278	0.03551
0.00066	0.00149	-0.00766	0.00745	0.00349	0.00019	1.60891	0.02837	0.00569	0.00025	-0.00641	0.01469	0.00517	0.0006	-0.00034	0.0001	0.00063	-0.00003	0.00032	0.01095	-0.00531	0.00089	-0.00331	0.00033	0.02208	-0.00102	-0.0091	0.00029	-0.00669	-0.00429	-0.80521	0.0351
-0.00129	0.00182	-0.00757	0.00814	0.00166	0.00025	1.62707	0.0289	0.00399	0.00045	-0.00734	0.01526	0.00196	0.0006	0.00019	0.00035	0.00403	0.00002	0.00030	0.01086	-0.00724	0.00147	-0.00398	0.00023	0.02011	-0.00108	-0.00971	0.00004	-0.00798	-0.00441	-0.80435	0.03505
-0.00144	0.00144	-0.00494	0.00826	-0.0007																											

0.00015	0.00092	-0.00369	0.00679	0.00194	0.00045	2.43105	0.04884	0.00348	0.00062	-0.01121	0.01583	0.0001	0.00051	0.00438	-0.00005	0.00638	-0.00059	-0.00093	0.01108	-0.01074	0.00129	0.00035	-0.00031	0.02223	-0.0013	-0.00745	-0.00042	-0.01402	-0.00353	-0.80176	0.03599	
0.00118	0.00061	-0.00303	0.00062	0.0037	0.00105	2.45037	0.04926	0.00531	0.00061	-0.00841	0.01568	-0.00073	0.00075	0.00378	-0.0006	0.0077	-0.00063	-0.00298	0.00171	-0.01038	0.00057	-0.00059	-0.00043	0.01789	-0.00124	-0.00538	-0.00043	-0.01417	-0.00382	-0.79769	0.03622	
0.00298	0.00041	-0.00225	0.00747	0.00426	0.00077	2.46593	0.05034	0.0058	0.00002	-0.00665	0.01512	-0.00121	0.00104	0.00441	-0.00054	0.00601	-0.00068	-0.00469	0.01185	-0.00732	0.00047	-0.00197	-0.00038	0.01997	-0.00065	-0.00489	-0.00046	-0.0127	-0.00396	-0.79785	0.03602	
0.00441	0.00094	-0.00392	0.000785	0.00129	0.00011	2.48213	0.05087	0.00289	0.00016	-0.00727	0.01535	0.00164	0.00136	0.00411	-0.0001	0.00173	-0.00053	-0.00253	0.00131	-0.00662	0.00093	-0.00209	0.00007	0.02346	-0.00011	-0.00162	-0.00005	-0.01027	-0.00368	-0.80014	0.03557	
0.00256	0.00141	-0.00474	0.00811	-0.00008	0.00026	2.49935	0.05085	0.00209	0.00079	-0.00985	0.01558	0.00291	0.0119	0.00549	0.00014	0.00131	-0.00008	0.00096	0.0109	-0.007	0.00156	-0.00122	0.00054	0.02383	-0.00017	-0.00141	0.00012	-0.01063	-0.00334	-0.80061	0.03561	
0.00164	0.00135	-0.00578	0.00791	-0.00005	0.00037	2.51536	0.05126	0.00426	0.00054	-0.01055	0.01555	0.00092	0.00088	0.00461	0.00009	0.00376	-0.00019	0.00037	0.01116	-0.00679	0.00204	0.00008	0.00017	0.02086	-0.00078	-0.00278	-0.00027	-0.01224	-0.00334	-0.80243	0.03583	
-0.00002	0.00117	-0.00289	0.00769	0.00006	0.00003	2.52274	0.05218	0.00576	0.00064	-0.00932	0.01542	-0.00248	0.00041	0.00134	0.00014	0.00049	-0.00087	-0.00448	0.01137	-0.00835	0.00011	-0.00039	-0.00005	0.01924	-0.00151	-0.0001	-0.00093	-0.00445	-0.80098	0.03573		
0.00213	0.00108	-0.00293	0.00837	-0.00005	0.00011	2.54818	0.05254	0.00316	0.00051	-0.00832	0.01562	-0.00064	0.00013	0.00077	0.00004	0.00466	-0.0011	-0.00506	0.01178	-0.01011	0.00045	-0.00138	0.0001	0.0205	-0.0014	-0.00026	0.00035	-0.00916	-0.00443	-0.79888	0.03567	
0.00462	0.00134	-0.00371	0.00851	0.0012	0.00018	2.56378	0.05262	0.00084	0.00084	-0.00729	0.01578	-0.00784	0.00006	0.00022	0.00033	0.00148	-0.00066	-0.00153	0.01187	-0.00942	0.00047	-0.00021	0.00004	0.02174	-0.00148	-0.00364	0.00001	-0.00973	-0.00416	-0.79727	0.0357	
0.00118	0.0011	-0.00412	0.00812	0.00262	0.00003	2.58061	0.05305	0.00003	0.00084	-0.00734	0.01595	-0.00614	-0.00018	0.00011	-0.00015	0.00483	-0.00022	0.00061	0.01137	-0.00728	0.00109	-0.00481	0.00001	0.01943	-0.00134	-0.00458	0.00023	-0.00846	-0.00356	-0.79682	0.03529	
-0.00071	0.00123	-0.00087	0.00773	0.00234	0.00004	2.59722	0.05346	0.00171	0.00077	-0.00983	0.01562	-0.00203	0.00003	-0.00084	-0.00012	0.0063	-0.00007	0.00025	0.01057	-0.00693	0.00164	-0.00573	0.00001	0.02157	-0.00156	-0.00062	0.00025	-0.00981	-0.00336	-0.7982	0.03537	
0.00163	0.00123	-0.00349	0.00727	0.00087	-0.00022	2.61413	0.05405	0.00225	0.00024	-0.01129	0.01486	0.0024	0.00035	-0.00384	0.00031	0.00456	0.00022	0.00172	0.01076	-0.00797	0.00161	-0.00694	-0.00016	0.02544	-0.0013	-0.00573	0	-0.00947	-0.00362	-0.79803	0.03575	
0.00129	0.00087	-0.0047	0.0075	-0.00007	-0.00015	2.62994	0.05485	0.00348	0.00026	-0.01268	0.01505	0.00349	0.00039	-0.00028	0.0012	0.0033	-0.00001	-0.00197	0.00919	-0.00619	0.00136	-0.00406	0.00003	0.02704	-0.00077	-0.00759	-0.00008	-0.00561	-0.00372	-0.79793	0.03523	
0.00132	0.00059	-0.00462	0.00769	-0.00026	0.00045	2.64729	0.05536	0.00034	0.00041	-0.00941	0.01545	0.0031	-0.00015	0.00049	0.00002	0.00041	-0.00032	-0.00226	0.01094	-0.00256	0.00148	-0.00233	0	0.0248	-0.00048	-0.00886	-0.00021	-0.00646	-0.00381	-0.79696	0.0348	
0.00286	0.00061	-0.0017	0.00768	-0.00009	0.00068	2.66468	0.0558	-0.00255	0.00046	-0.00723	0.01524	0.00303	-0.00042	0.00052	0.00013	0.00033	-0.0004	-0.00085	0.00999	-0.0001	0.00172	-0.00054	0.00018	0.02153	-0.00075	-0.00167	-0.00038	-0.00636	-0.00344	-0.79748	0.03482	
0.00061	0.00045	0.00122	0.00778	-0.00189	0.0008	2.68195	0.05564	-0.00216	0.0002	-0.00793	0.01445	0.00318	-0.00015	0.00095	0.0001	0.003	-0.0001	-0.00048	0.01148	-0.00253	0.00184	0.00061	-0.00017	0.02059	-0.00075	-0.00585	-0.00014	-0.00768	-0.00331	-0.80005	0.03485	
-0.00099	0.00094	-0.00072	0.00756	-0.00075	0.00056	2.69792	0.05559	-0.00135	0.00018	-0.00951	0.01462	0.00506	0.0001	-0.00041	0.00046	0.00513	0.00018	0.00032	0.01178	-0.00506	0.00176	-0.00077	-0.00031	0.02024	-0.00106	-0.00564	0.00027	-0.0092	-0.00384	-0.79991	0.03519	
-0.002	0.00134	-0.00283	0.00767	0.00227	0.00026	2.71249	0.05615	0.00029	0.00081	-0.00951	0.01565	0.00253	0.00013	0.00254	0.00077	0.00444	-0.00011	0.02024	0.01183	-0.00429	0.00166	-0.0001	0.00008	0.02062	-0.00114	-0.00582	0.00044	-0.00903	-0.00419	-0.79948	0.03571	
-0.00185	0.0008	-0.00209	0.00823	0.00495	0.00034	2.72602	0.05673	0.00085	0.00085	-0.01102	0.01577	-0.00033	0.00039	0.00393	0.00096	0.00368	-0.0007	0.02024	0.01181	-0.00574	0.00187	-0.0021	0.00018	0.02079	-0.00113	-0.00367	0.00055	-0.01036	-0.00409	-0.79778	0.03577	
-0.00007	0.00043	-0.00077	0.0084	0.00539	0.00083	2.73943	0.05753	0.00175	0.00079	-0.01184	0.0157	-0.00297	0.0007	0.00028	0.00066	0.00555	-0.00111	0.02073	0.01109	-0.00086	0.00177	-0.00159	0.00043	0.02073	-0.00117	-0.00052	0.00078	-0.00978	-0.00373	-0.79636	0.03544	
0.00058	0.00091	-0.00298	0.00796	0.00494	0.00092	2.75752	0.05851	0.0021	0.00075	-0.00992	0.01578	-0.00117	0.00046	-0.00127	-0.00004	0.00641	-0.00042	0.00295	0.01087	-0.01003	0.0013	-0.00237	0.00053	0.02042	-0.00093	0.00027	0.0008	-0.00767	-0.00305	-0.79856	0.03514	
0.00116	0.00161	-0.00455	0.00745	0.00269	0.00019	2.77874	0.05857	0.00192	0.00021	-0.01183	0.0155	-0.00232	0.00097	-0.00312	-0.00049	0.00593	-0.00045	0.01914	0.01134	-0.00794	0.00093	0.00215	0.00015	0.01768	-0.00097	-0.00055	0.00056	-0.00754	-0.00329	-0.80151	0.03546	
-0.00259	0.00143	-0.00541	0.00726	0.00035	0.00039	2.79482	0.05864	0.00208	-0.00001	-0.01167	0.01557	0.00326	0.00108	-0.00163	0.00008	0.00366	-0.00022	-0.00017	0.01172	-0.00545	0.00078	-0.00527	-0.00018	0.01584	-0.00086	-0.0012	0.00043	-0.00778	-0.00416	-0.80271	0.03592	
-0.0035	0.00104	-0.00343	0.00758	-0.00004	0.00096	2.80662	0.05885	0.00462	-0.00008	-0.01121	0.0159	0.00264	0.00047	0.00026	0.00047	0.00027	-0.00016	-0.00199	0.0111	-0.00325	0.00057	-0.00528	-0.00042	0.0175	-0.00106	-0.00202	0.00025	-0.00823	-0.00429	-0.80148	0.03619	
0.00012	0.00099	-0.00071	0.0076	-0.00206	0.00098	2.82229	0.05877	0.00049	0.00035	-0.00946	0.01617	0.00207	0.00019	0.00387	0.00077	0.00269	0.00023	0.00026	0.01075	-0.00569	0.00081	-0.00394	-0.00039	0.01905	-0.00131	-0.00273	0.00025	-0.00858	-0.00416	-0.79964	0.03626	
0.00343	0.00098	-0.00342	0.00734	-0.00206	0.00053	2.84026	0.05945	-0.00299	0.00047	-0.00737	0.01642	-0.00099	0.00048	0.00287	-0.00008	0.00669	-0.00013	0.00172	0.01076	-0.00694	0.00117	-0.00357	-0.00052	0.02086	-0.00078	-0.0033	0.00049	-0.01032	-0.00365	-0.80105	0.03609	
0.00412	0.00101	-0.00328	0.00728	-0.00212	0.00036	2.85504	0.06025	-0.00043	0.00032	-0.00599	0.01612	-0.00294	0.00065	0.00011	-0.00087	0.0072	-0.00033	-0.0004	0.01103	-0.00599	0.0013	-0.00355	-0.00077	0.01987	-0.00049	-0.00218	0.00064	-0.00888	-0.00384	-0.80199	0.03602	
0.0018	0.00114	-0.00146	0.00731	0.00307	0.00022	2.87449	0.0615	0.00365	0.0001	-0.00329	0.0159	-0.00336	0.00038	0.00051	-0.00058	0.00804	-0.00035	-0.00451	0.01131	-0.00696	0.00103	-0.00551	-0.00078	0.01801	-0.00056	-0.00266	0.00099	-0.0081	-0.00401	-0.79864	0.03563	
0.00184	0.00132	-0.00301	0.00789	0.00431	-0.00015	2.89419	0.06239	0.00124	0.00021	-0.0048	0.01599	0.00187	0.00025	0.00394	0.00044	0.00731	-0.00001	-0.00322	0.01166	-0.00547	0.00088	-0.00318	-0.00054	0.02126	-0.00102	-0.00147	0.001	-0.00929	-0.00374	-0.79712	0.03558	
0.00282	0.00088	-0.00453	0.0081	0.0074	0.00046	2.90898	0.0622	-0.00339	0.00092	-0.01019	0.01587	0.00279	0.00087	0.0002	0.00382	0.00045	0.00627	0.01019	0.00011	0.01178	-0.00389	0.00077	0.00203	-0.00026	0.02067	-0.00145	0.00092	0.00088	-0.012	-0.00388	-0.79845	0.03544
0.00293	0.00094	-0.00363	0.00799	0.00555	0.0005	2.92092	0.06206	-0.00467	0.00125	-0.01016	0.01548	0.00013	0.00016	0.00076	-0.00032	0.00544	-0.00007	-0.0037	0.01128	-0.00546	0.00106	0.00392	-0.00023	0.01969	-0.00145	-0.00008	0.00074	-0.01531	-0.00392	-0.80079	0.03544	
0.0027	0.00113	-0.00529	0.00797	0.00073	0.00028	2.93695	0.06236	-0.00197	0.00079	-0.00995	0.01539	-0.00232	0.00035	-0.00089	-0.00027	0.00568	-0.00044	-0.00529	0.01107	-0.00462	0.00205	0.00047	-0.00032	0.02203	-0.00088	-0.00056	0.00046	-0.01223	-0.00393	-0.80099	0.03555	
0.00377	0.00098	-0.0																														

0.00235	0.0009	-0.00287	0.00877	0.00418	-0.00004	3.78322	0.08366	-0.0033	0.00004	-0.00589	0.01587	-0.00048	0.00072	0.00165	0.00057	0.00387	-0.00067	-0.00141	0.0112	-0.00752	0.00097	0.00018	0.00022	0.02137	-0.00113	-0.00031	0.00002	-0.00194	-0.00432	-0.79686	0.03544
0.00304	0.00047	-0.00488	0.00824	0.0057	-0.00002	3.80219	0.08462	-0.00101	0.00015	-0.00661	0.01621	-0.00028	0.00094	0.00062	0.00071	0.0041	-0.00082	-0.00048	0.0101	-0.00717	0.00096	-0.00257	0.00036	0.02186	-0.00116	0.00038	-0.00018	-0.00176	-0.004	-0.79802	0.03503
0.00683	0.00021	-0.00761	0.01063	0.00192	0.00058	3.81847	0.0856	0.00144	0.00085	-0.00862	0.01606	0.00358	0.00117	0.00288	0.00042	0.00463	-0.00068	0.00173	0.01008	-0.00888	0.00137	-0.00056	0.00028	0.02368	-0.00112	-0.00472	-0.00064	-0.0091	-0.00348	-0.79786	0.03622
0.00894	0.00048	-0.0071	0.0073	-0.00097	0.00079	3.83554	0.08634	0.00375	0.00096	-0.00835	0.01593	0.00547	0.00145	0.00501	0.00028	0.00174	-0.00086	-0.00074	0.011	-0.01048	0.00177	0.00067	0.00009	0.02573	-0.00108	-0.00032	-0.00076	0.01265	-0.00323	-0.79857	0.03628
0.00644	0.00112	-0.00594	0.00741	0.0008	0.00026	3.857	0.08595	0.00129	0.00013	-0.00834	0.01551	0.00597	0.00126	0.00238	0.00015	0.00152	-0.00008	-0.00329	0.01057	-0.00917	0.00144	-0.00268	0.00006	0.02676	-0.00009	-0.00724	-0.00074	-0.01192	-0.00305	-0.79927	0.03601
0.00348	0.00127	-0.00442	0.00759	0.00327	-0.00028	3.87528	0.08596	-0.00249	0.00043	-0.00127	0.01517	0.00087	0.00047	-0.00195	-0.00043	0.00017	-0.00055	-0.00032	0.01097	-0.0038	0.00116	-0.00344	0.00003	0.02537	-0.00068	-0.00476	-0.00019	-0.00123	-0.00357	-0.80374	0.03603
0.00283	0.00153	-0.00424	0.00778	0.00517	-0.00042	3.89931	0.08654	0.00249	0.00028	-0.1141	0.01522	0.00051	0.00042	-0.00251	-0.00069	0.00239	-0.00002	0.00213	0.01123	-0.00911	0.00102	-0.00339	-0.00002	0.02094	-0.00046	-0.0009	0	-0.01393	-0.80392	-0.806	0.03599
0.00027	0.0015	-0.00399	0.00749	0.00956	-0.00049	3.90831	0.08769	0.00491	-0.0002	-0.01311	0.01541	0.00365	0.00066	0.00149	-0.00025	0.00029	0.00027	0.00051	0.01129	-0.00933	0.00111	-0.00365	-0.00043	0.01732	-0.00023	-0.00694	0	-0.01248	-0.80385	-0.80565	0.03565
-0.00109	0.00141	-0.00465	0.00742	0.00706	-0.00079	3.9251	0.08908	0.00512	0.00028	-0.00988	0.01564	0.00259	0.00053	0.00307	0.00013	0.00391	0.00008	0.00209	0.01099	-0.01207	0.00165	-0.00708	-0.00014	0.01897	-0.00009	-0.00209	-0.0116	-0.00384	-0.80467	0.03616	
-0.00099	0.00165	-0.00571	0.00736	0.00513	-0.00096	3.94166	0.0898	0.00573	0.0012	-0.00691	0.01606	-0.00199	0.00047	0.0018	-0.00001	0.00613	-0.00029	-0.00534	0.01094	-0.01132	0.00175	-0.00848	0.00004	0.02294	-0.00032	-0.00847	-0.00047	-0.00486	-0.80069	0.03659	
0.00075	0.00095	-0.00153	0.00715	0.00632	-0.00059	3.96007	0.08974	0.00376	0.0015	-0.00492	0.01609	-0.00307	0.00037	0.00136	-0.00019	0.00568	-0.00087	-0.00404	0.01077	-0.00878	0.00133	-0.00928	0.00021	0.02555	0.00007	-0.00749	-0.00031	-0.00807	-0.00371	-0.79949	0.03617
0.00548	-0.00001	-0.00017	0.00728	0.00584	-0.00016	3.97528	0.08953	0.00248	0.00156	-0.00509	0.01582	0.00002	0.00073	0.00206	-0.00025	0.00339	-0.00112	-0.00263	0.01235	-0.00674	0.00123	-0.0087	-0.00046	0.02317	0.00025	-0.00277	0.00045	-0.01	-0.00417	-0.80181	0.03552
0.00951	0.00049	-0.00545	0.00734	0.00744	-0.00015	3.98977	0.08991	0.00093	0.00124	-0.00659	0.01613	0.00252	0.00027	-0.00034	0.00004	0.00284	-0.01005	-0.00002	0.01202	-0.0052	0.00134	-0.00751	-0.00009	0.02049	-0.00055	0.00148	-0.00708	-0.0047	-0.00431	-0.80344	0.03547
0.00813	0.00134	-0.00702	0.00761	0.00707	-0.00016	4.00003	0.09075	-0.00005	0.00051	-0.01004	0.01663	0.00478	0.004	0.00031	0.00062	0.00522	-0.00055	0.00382	0.01136	-0.0057	0.00101	-0.00681	0.00082	0.01869	-0.0013	0.00017	0.00012	-0.0109	-0.00394	-0.80383	0.03583
0.00387	0.0015	-0.00783	0.00771	0.00365	0.00016	4.02505	0.09155	0.00238	-0.00021	-0.011	0.01603	0.00299	0.00088	0.00046	0.00045	0.00634	-0.00101	0.00412	0.01135	-0.00715	0.00117	-0.00549	0.00082	0.0204	-0.00143	-0.00101	-0.00029	-0.01109	-0.00357	-0.80325	0.03566
0.00163	0.00115	-0.009	0.00795	0.00036	0.00024	4.0436	0.09217	0.00168	-0.00043	-0.01204	0.01567	-0.00071	0.00138	-0.00073	0.00029	0.00674	-0.00148	0.00312	0.01178	-0.00541	0.00173	-0.00495	-0.00015	0.02203	-0.00148	-0.0005	0.00004	-0.00743	-0.00339	-0.8	0.03517
-0.00007	0.0007	-0.01138	0.00782	0.00002	0.00024	4.06082	0.09233	0.0013	-0.00005	-0.009	0.01586	-0.00247	0.00053	-0.00113	0.00058	0.00325	-0.0012	0.00252	0.00181	-0.00225	0.0018	-0.00319	-0.00076	0.02414	-0.00091	0.00022	0.0002	-0.00635	-0.00222	-0.79728	0.03551
0.00145	0.00062	-0.01033	0.00767	0.00273	0.00001	4.07821	0.09251	0.00373	0.00012	-0.00325	0.01606	-0.00311	0.00114	0.00033	0.00064	0.0005	-0.00095	0.00359	0.00173	-0.00256	0.00114	-0.00056	0.00056	0.02353	-0.00063	-0.00222	-0.00001	-0.00059	-0.00359	-0.79464	0.03597
0.00506	0.00093	-0.00872	0.00791	0.00397	0.00002	4.09667	0.0931	0.00438	-0.0001	0.00008	0.01613	-0.00274	0.00083	0.00259	0.00045	0.00041	-0.00051	-0.00018	0.0111	-0.0072	0.0007	-0.00843	-0.00035	0.01795	-0.00084	-0.00585	0.0001	-0.01072	-0.00382	-0.79594	0.03621
0.00435	0.00148	-0.00533	0.00786	0.00207	0.00006	4.11434	0.09369	0.00111	-0.00014	-0.00108	0.01606	0.00133	0.00095	0.00071	0.00053	0.00319	-0.00042	0.00192	0.01095	-0.01066	0.00062	-0.00795	0.00016	0.01525	-0.00093	0.00031	-0.00979	-0.00385	-0.80083	0.03601	
0.00432	0.00142	-0.00148	0.00747	0.00103	0.00008	4.12904	0.09397	-0.00017	0.00038	-0.00805	0.01658	0.00293	0.00089	0.00092	0.00025	0.00642	-0.00007	0.00196	0.0112	-0.00982	0.00061	-0.00558	-0.00006	0.01611	-0.00101	0.00029	0.00038	-0.0148	-0.0039	-0.8065	0.03588
0.00314	0.00081	-0.00476	0.0073	0.00458	0.0002	4.14397	0.09457	0.00251	0.00049	-0.00859	0.01688	-0.00342	0.00072	-0.00063	0.00017	0.00826	-0.00028	-0.00998	0.0113	-0.0061	0.00111	-0.00369	-0.00007	0.01734	-0.00081	-0.00116	0.0014	-0.01462	-0.00401	-0.80652	0.03547
0.00306	0.00097	-0.00803	0.00738	0.00148	-0.00013	4.16427	0.09481	0.00228	0.00027	-0.00213	0.01677	-0.00463	0.00099	-0.00152	0.00012	0.0042	-0.00057	-0.00281	0.01157	-0.00992	0.00183	-0.00247	0.00017	0.02061	-0.00103	-0.00416	-0.00008	-0.01126	-0.00404	-0.80391	0.03547
0.00336	0.00127	-0.00692	0.00749	0.0014	-0.00065	4.18236	0.09526	0.00355	0.00014	-0.00317	0.01676	0.00118	0.00056	-0.00083	0.00028	0.0036	-0.00052	-0.0016	0.01204	-0.00594	0.00185	-0.00137	0.00064	0.02416	-0.00093	-0.00594	-0.00012	-0.01079	-0.004	-0.80171	0.03568
0.00422	0.00095	-0.00424	0.00785	0.00007	-0.00009	4.1981	0.09575	0.00018	-0.00007	-0.00739	0.01642	0.00079	-0.00006	0.00062	0.00042	0.00518	-0.00051	-0.00298	0.01197	-0.00833	0.00146	-0.00508	0.00087	0.02366	-0.00101	-0.00498	-0.00019	-0.00902	-0.00387	-0.80186	0.03548
0.00354	0.00045	-0.00452	0.00782	0.00339	-0.00102	4.21619	0.09609	-0.00312	0.00006	-0.00978	0.0161	0.00083	0.00039	0.00017	0.00355	0.0037	-0.00025	-0.00445	0.01194	-0.00583	0.00107	-0.00888	0.0007	0.02303	-0.00159	-0.00361	-0.00016	-0.00942	-0.00361	-0.80399	0.03522
0.00374	0.00055	-0.00576	0.00753	0.00448	-0.0005	4.23488	0.09672	-0.00025	0.00104	-0.00881	0.01612	0.00138	0.00049	0.01113	-0.00005	0.00643	-0.00036	-0.00055	0.01066	-0.00766	0.0011	-0.00841	0.00069	0.02388	-0.00126	-0.00117	-0.00008	-0.00993	-0.00346	-0.80273	0.03512
0.00464	0.00014	-0.0057	0.00753	0.00076	0.00017	4.25217	0.0972	0.00196	0.00067	-0.00953	0.01618	0.00175	0.0004	0.00675	-0.00018	0.00609	-0.00067	-0.00524	0.01129	-0.00893	0.0016	-0.00621	0.00045	0.02151	-0.00085	-0.00008	-0.00162	-0.01062	-0.00374	-0.80073	0.03558
0.00419	0.00132	-0.00498	0.00796	0.00265	0.00044	4.27284	0.09792	0.00173	0.00003	-0.01027	0.01647	-0.00008	0.00044	0.00002	0.00028	0.00434	-0.00069	-0.00501	0.01187	-0.01028	0.00145	-0.00705	0.00008	0.02002	-0.001	-0.00075	0.00024	-0.00963	-0.00388	-0.79934	0.03637
0.0019	0.00108	-0.0045	0.00783	0.00332	0.00008	4.29068	0.09829	0.00266	-0.00004	-0.01137	0.01648	-0.00085	0.00021	-0.01005	0.00093	0.00408	-0.00081	-0.00404	0.01187	-0.00889	0.00145	-0.00701	-0.00006	0.02477	-0.00083	-0.00476	-0.00027	-0.00861	-0.00377	-0.79789	0.03651
0.00377	0.00092	-0.00665	0.00777	-0.00064	0.00011	4.30643	0.09823	0.00239	0.00023	-0.01416	0.01615	0.0025	0.00063	0.00146	0.00083	0.00335	-0.00112	-0.0029	0.01189	-0.00758	0.00193	-0.00457	-0.00007	0.02542	-0.00117	-0.00787	-0.00015	-0.00777	-0.00382	-0.79773	0.03646
0.00512	0.00133	-0.00745	0.00762	-0.00102	0.00037	4.32147	0.09839	0.00193	0.00057	-0.01156	0.016	0.00574	0.00075	0.00019	0.00112	0.00501	-0.00089	-0.00033	0.01164	-0.00623	0.00223	-0.00349	-0.00017	0.02009	-0.00095	-0.00675	0.00021	-0.00697	-0.00379	-0.79768	0.03612
0.00364	0.00154	-0.00664	0.00737	0.00153	0.00004	4.33793																									

0.00176	0.00062	-0.00327	0.00715	0.00396	0.00048	4.83255	0.10853	-0.00304	0.00054	-0.00088	0.01549	-0.00142	0.00034	0.0046	0.00015	0.00056	-0.00113	-0.00212	0.01143	-0.00538	0.00132	-0.00139	0.01896	-0.00064	-0.00082	0.00017	-0.00083	-0.0034	-0.79654	0.03526	
0.00196	0.00018	-0.00277	0.00773	0.00389	-0.00014	4.8746	0.10809	-0.00008	0.00077	-0.01126	0.01556	-0.00267	-0.00012	0.00553	0.00011	-0.00005	-0.00108	-0.00135	0.01243	-0.00674	0.00148	0.00048	0.00206	-0.00066	-0.00155	-0.00017	-0.00025	-0.00409	-0.79624	0.03547	
0.00223	0.00014	-0.00302	0.00801	0.00428	-0.00074	4.8756	0.10789	0.0035	0.00051	-0.01317	0.01559	0.00074	-0.00028	0.00434	0.00002	0.00234	-0.00148	0.00034	0.01126	-0.00942	0.00148	0.00084	0.00051	0.02291	-0.00103	-0.0061	0.00003	-0.00542	-0.00414	-0.79792	0.0356
0.00493	0.00042	-0.00304	0.00778	0.00399	-0.0006	4.862	0.10773	0.00335	0.00011	-0.012	0.01585	0.00202	0.00011	0.00249	-0.00009	0.00461	-0.00174	0.00018	0.0113	-0.00926	0.0018	0.00146	0.00032	0.01974	-0.00172	-0.01209	0.00043	-0.00985	-0.00356	-0.80096	0.03611
0.00333	0.00071	-0.004	0.00671	0.00257	-0.00032	4.84818	0.10792	0.00019	0.00027	-0.00988	0.01569	0.00043	0.00007	0.0043	-0.00011	0.00311	-0.00134	0.00042	0.01222	-0.00608	0.00145	-0.00094	0.0005	0.0212	-0.00173	-0.00954	0.00069	-0.0108	-0.00341	-0.80002	0.03617
0.00165	0.00107	-0.00461	0.00679	0.00013	0.00015	4.7913	0.10798	-0.00116	0.00063	-0.00985	0.01531	0.00379	0.00007	0.00462	0.00014	0.0166	-0.00094	0.00313	0.0115	-0.00385	0.00104	-0.00297	0.00056	0.02191	-0.0011	-0.00489	0.00035	-0.01032	-0.00377	-0.79919	0.03584
-0.00062	0.00136	-0.00398	0.0073	0.0001	0.00049	4.7329	0.10844	-0.0002	0.00053	-0.00884	0.01608	0.00537	0.00054	0.00366	0.0003	0.01078	-0.00042	-0.00274	0.01176	-0.00175	0.00162	-0.00405	0.00119	0.02344	-0.001	-0.00316	-0.00041	-0.01029	-0.00353	-0.7974	0.03588
-0.0031	0.00094	-0.00074	0.00739	0.00171	0.00024	4.7115	0.10881	0.00124	0.00047	-0.00837	0.01685	0.00057	0.00067	0.00051	0.00561	-0.00056	-0.00112	0.01181	-0.00702	0.00182	-0.00532	0.00039	0.0229	-0.00128	-0.00034	-0.0001	-0.01002	-0.00353	-0.79704	0.03596	
0.00041	0.0005	-0.00275	0.00699	0.00397	0.0001	4.7115	0.1086	0.00311	0.00044	-0.007	0.0164	0.0038	0.00054	0.00488	0.00043	0.00683	0.00129	0.00342	0.01182	-0.01019	0.00233	-0.00559	0.00075	0.02301	-0.00155	-0.00047	0.00003	-0.01026	-0.00349	-0.79913	0.03572
0.00219	0.00033	-0.00848	0.00745	0.00455	-0.00022	4.7189	0.10862	0.00517	0.00044	-0.00476	0.01607	0.00226	0.00061	0.00622	-0.00113	0.00513	-0.00161	0.00297	0.0117	-0.00717	0.00207	-0.0048	0.00102	0.02433	-0.00146	-0.00103	0.00007	-0.01074	-0.00362	-0.80133	0.03535
0.00322	0.00064	-0.00574	0.00776	0.00123	-0.0008	4.765	0.10872	0.00314	0.00087	-0.00472	0.01658	0.0181	0.00062	0.00461	-0.00018	0.01006	-0.00113	0.00196	0.01164	-0.00429	0.00078	-0.00614	0.00094	0.02636	-0.000125	-0.00071	-0.00108	-0.0107	-0.00408	-0.80129	0.03503
0.00266	0.00062	-0.00291	0.00756	0.00092	-0.00066	4.8039	0.1089	-0.00118	0.00088	-0.00796	0.01663	0.00074	0.00102	0.00406	0.00058	-0.00005	-0.00037	0.00033	0.01194	-0.0026	0.00057	-0.0037	0.00031	0.02529	-0.00119	-0.00231	-0.00043	-0.01049	-0.00443	-0.79759	0.03557
-0.00081	0.00048	0.00013	0.00767	0.00262	0	4.8116	0.1091	-0.0014	0.00058	-0.01013	0.01651	0.0023	0.00098	0.00102	0.00144	-0.00047	0.00019	0.01197	-0.00219	0.00081	-0.00238	0.00025	0.02338	-0.00143	-0.00121	-0.00044	-0.01012	-0.00395	-0.79666	0.03594	
-0.001	0.00038	0.00112	0.00818	0.00348	-0.00002	4.7774	0.10874	0.00063	0.00019	-0.01027	0.01622	0.00372	0.0007	0.00301	0.00081	0.00423	-0.00088	-0.00033	0.01151	-0.00258	0.00108	-0.00163	0.00038	0.0229	-0.00136	0.00074	-0.00056	-0.01192	-0.00354	-0.79937	0.03612
0.00211	0.00108	-0.00165	0.00801	0.00105	-0.00006	4.7478	0.10835	0.00394	0.00056	-0.01025	0.01572	0.0142	0.00035	0.00325	0.0001	0.00435	-0.00054	-0.00255	0.01122	-0.00439	0.00145	-0.00465	0.00024	0.02131	-0.00106	-0.00187	-0.00022	-0.01287	-0.00362	-0.7985	0.03596
0.00183	0.00196	-0.00453	0.00774	0.00001	0.00007	4.7047	0.10775	0.00189	0.00072	-0.00957	0.01569	0.00097	0.00023	0.00394	-0.00006	0.00112	-0.0005	-0.00217	0.01125	-0.00459	0.00188	-0.00806	0.00006	0.02011	-0.00081	-0.00086	0.0002	-0.01385	-0.00399	-0.79805	0.03591
-0.00079	0.00194	-0.00676	0.00789	0.00333	0.00086	4.6699	0.10751	-0.00082	0.00046	-0.00808	0.01599	0.00214	0.00056	0.00104	-0.00006	0.00112	-0.0005	-0.00217	0.01135	-0.00307	0.00152	-0.01093	0.00017	0.01888	-0.00112	0.00125	0.00056	-0.01312	-0.00427	-0.80107	0.03572
-0.00246	0.00125	-0.00906	0.0078	0.0022	0.0012	4.6624	0.10763	-0.00014	0.00047	-0.00766	0.01613	0.00566	0.00034	-0.00156	0.00024	0.00699	-0.00064	-0.0018	0.01128	-0.00233	0.00073	-0.00839	0.00005	0.01841	-0.00175	-0.00038	0.00052	-0.01171	-0.00395	-0.80305	0.03588
-0.00018	0.00093	-0.01077	0.00767	0.00009	0.00067	4.6947	0.10794	0.00227	0.00074	-0.00839	0.01598	0.00375	-0.00004	-0.0015	-0.00004	0.0066	-0.00054	-0.00314	0.0118	-0.00509	0.00024	-0.00468	0.00021	0.02252	-0.00192	-0.00125	0.00016	-0.01163	-0.00398	-0.8022	0.03586
0.00337	0.00086	-0.00777	0.00754	-0.00174	-0.00009	4.7164	0.10808	0.00435	0.00054	-0.011	0.01557	0.00174	-0.00002	-0.00086	0	0.00266	-0.00044	-0.0015	0.01227	-0.00578	0.00064	-0.00491	0.00004	0.0277	-0.00128	-0.00207	-0.00054	-0.01275	-0.00362	-0.80407	0.03617
0.00451	0.00133	-0.00238	0.0075	-0.00315	-0.00052	4.7007	0.10815	0.0023	0.0002	-0.01005	0.01558	0.00238	0.0001	-0.00013	0.00008	0.00165	-0.00041	0.00051	0.01218	-0.00407	0.00138	-0.00452	0.00035	0.0288	-0.00063	-0.00008	-0.00018	-0.01123	-0.00395	-0.80214	0.03587
0.00446	0.001	0.00071	-0.0007	-0.00024	0	4.7303	0.10842	0.0029	-0.00027	-0.00991	0.01583	0.00246	0.00069	0.00027	0.00034	0.00121	-0.00057	-0.00152	0.0121	-0.00753	0.00158	-0.00418	0.00066	0.02518	-0.0006	0.00102	0.00062	-0.00862	-0.00437	-0.79804	0.03516
0.00283	0.0004	-0.00022	0.00723	0.00144	0.00009	4.6992	0.10849	0.00444	-0.00066	-0.00703	0.01626	0.00284	0.00111	0.00712	0.00021	0.00338	-0.00008	-0.00166	0.01209	-0.00829	0.00142	-0.0023	0.00049	0.02325	-0.00094	0.00165	-0.0007	-0.01018	-0.00425	-0.79644	0.03501
0.00057	0.00029	-0.00469	0.00758	0.00005	0.00036	4.6976	0.10896	0.00362	0.0001	-0.00396	0.01613	0.00263	0.00108	0.00593	0.00049	0.00417	-0.00052	-0.00114	0.01174	-0.00345	0.00113	0.00038	0.02149	-0.00139	-0.000326	0.0006	-0.01331	-0.00432	-0.79779	0.0357	
0.00149	0.00055	-0.00319	0.00741	-0.00273	0.00026	4.6712	0.10933	0.00292	0.00062	-0.00605	0.01588	0.00519	0.00062	0.0019	0.00041	0.00364	-0.00135	-0.00123	0.01164	-0.00135	0.00109	-0.0013	0.00021	0.02299	-0.00163	-0.00474	0.00032	-0.01386	-0.0041	-0.7997	0.03596
-0.00021	0.00085	-0.00352	0.00733	-0.00005	0.00042	4.6239	0.10888	0.00165	0.00084	-0.00706	0.01533	0.00503	0.0006	-0.00229	0.00042	0.00471	-0.00126	0.00109	0.01199	-0.00374	0.00135	-0.00212	0.00046	0.02339	-0.00099	-0.00356	0.00017	-0.01181	-0.00368	-0.79924	0.03563
-0.0031	0.00138	-0.00572	0.00707	0.00222	0.00028	4.6053	0.10839	0.00007	0.00079	-0.00544	0.01465	0.00345	0.00032	-0.00443	0.00064	0.00663	-0.00075	0.00058	0.01129	-0.00703	0.00137	-0.00476	0.0005	0.02308	-0.00067	-0.00365	0.00005	-0.01089	-0.00338	-0.79832	0.03533
-0.00199	0.00124	-0.00782	0.00722	0.00069	0.00021	4.6111	0.10841	-0.00145	0.0006	-0.00517	0.01484	0.00245	0.00009	-0.00309	0.00058	0.00415	-0.00092	-0.00166	0.01083	-0.00992	0.00115	-0.0042	0.00054	0.02219	-0.00091	-0.00233	-0.00341	-0.0121	-0.00344	-0.79818	0.0355
0.0012	0.00076	-0.00635	0.00803	-0.00108	0.0001	4.5986	0.10856	-0.00065	0.00061	-0.00572	0.0158	0.00279	0.00014	-0.00158	0.00047	0.00493	-0.00103	-0.00289	0.01127	-0.00506	0.0015	-0.00161	0.0003	0.01992	-0.00118	-0.00226	-0.0004	-0.01257	-0.00346	-0.7988	0.03592
-0.00014	0.00078	-0.00143	0.00831	0.00014	0.0002	4.6214	0.10876	-0.00001	0.00063	-0.00653	0.01604	-0.00199	0.00085	-0.00273	0.00032	0.00754	-0.00104	-0.00252	0.01185	-0.00122	0.00156	-0.00109	0.00021	0.0173	-0.00152	-0.00031	-0.00003	-0.01117	-0.00322	-0.7997	0.03588
-0.00167	0.00064	-0.00698	0.00812	0.00079	0.00042	4.686	0.1092	-0.00408	0.0009	-0.00656	0.01587	-0.00231	0.00136	-0.00116	0.00041	0.00668	-0.00111	-0.00058	0.01225	-0.0012	0.00114	-0.00075	0.00036	0.01815	-0.00103	-0.00324	0.00054	-0.00797	-0.00296	-0.79994	0.03585
0.00023	0.00043	-0.00798	0.00747	-0.00116	0.00035	4.7102	0.10939	0.00059	0.00122	-0.00504	0.01561	0.00092	0.00105	0.00409	0.00094	0.00493	-0.00121	-0.00045	0.01208	-0.00552	0.00113	-0.00462	0.00056	0.0192	-0.00101	-0.00462	0.00047	-0.00738	-0.00294	-0.79847	0.03584
0.00366	0.00031	-0.00625	0.00746	-0.00039	0.00011	4.7257	0.10862	-0.00035	0.00074	-0.00861	0.01578	0.00691																			

0.00216	0.00103	-0.00749	0.00763	0.00379	0.00024	5.17076	0.12191	-0.00077	0.00024	-0.00815	0.01622	0.00148	0.00000	-0.00423	0.0011	0.00155	-0.00079	-0.00336	0.01175	-0.00139	0.00176	-0.00553	0.00037	0.01903	-0.00103	-0.00623	0.00055	-0.01282	-0.00383	-0.79915	0.03539
0.00098	0.00119	-0.00473	0.00676	0.00372	0.00046	5.18664	0.12251	0.00115	-0.00024	-0.00624	0.01652	0.0039	-0.00027	-0.00347	0.00056	0.0013	-0.00087	-0.00411	0.00219	-0.00048	0.00147	-0.00408	0.00008	0.01935	-0.00102	-0.00704	0.0003	-0.01191	-0.00384	-0.80114	0.03532
0.00317	0.00127	-0.00021	0.00666	0.00109	0.00067	5.2033	0.12338	0.00272	0.00012	-0.00567	0.01619	0.00327	-0.00041	0.0018	0.00011	0.00467	-0.00044	-0.00466	0.01195	-0.00935	0.00135	-0.00345	0.00006	0.02198	-0.00118	-0.00613	0.00029	-0.01042	-0.00421	-0.8033	0.03574
0.00268	0.00151	0.00028	0.00692	0.00029	0.00076	5.22016	0.12349	0.00224	0.00057	-0.008	0.01611	0.00333	-0.00028	0.00041	0.00025	0.00899	-0.00071	-0.00456	0.01072	-0.00154	0.00106	-0.00546	0.00077	0.02204	-0.00134	-0.00404	-0.00014	-0.01047	-0.00415	-0.80041	0.03562
-0.00082	0.00133	-0.00042	0.00749	0.0016	0.00102	5.23629	0.12316	0.00149	0.00064	-0.00793	0.01611	0.0032	0.00023	0.00096	0.00052	0.01263	-0.00095	-0.00249	0.01167	-0.01027	0.00129	-0.00617	0.00058	0.02167	-0.00131	-0.00596	-0.00055	-0.01436	-0.0034	-0.79879	0.03554
0.00106	0.00023	-0.00021	0.00817	0.00038	0.00077	5.25103	0.12316	0.00029	0.00078	-0.00578	0.01594	0.00308	0.00063	0.00461	0.00073	0.01378	-0.00063	-0.00226	0.01202	-0.00897	0.00179	-0.00053	0.00012	0.02253	-0.00092	-0.00099	-0.00063	-0.01472	-0.0034	-0.79935	0.03551
0.00032	0.00002	-0.00158	0.0087	0.00427	0.00073	5.26655	0.12393	-0.00022	0.00063	-0.00714	0.01586	0.00342	0.00068	-0.00039	0.00065	0.01451	-0.00029	-0.00041	0.01219	-0.00739	0.00143	-0.00245	0.00034	0.02282	-0.0002	-0.00017	0.00006	-0.01127	-0.00354	-0.80032	0.0352
0.00542	0.00067	-0.00245	0.00904	0.00222	0.0008	5.28411	0.12326	0.00185	0	-0.01018	0.01591	0.00332	0.0007	-0.00238	0.0007	0.01287	-0.00019	0.00006	0.01182	-0.01068	0.00125	-0.00014	0.00081	0.02292	0.0001	-0.00439	0.00035	-0.00809	-0.80256	0.03539	
0.00413	0.00072	-0.00096	0.00839	-0.0001	0.00064	5.29855	0.12374	-0.00015	0.00003	-0.00737	0.01557	0.00327	-0.00019	-0.00004	-0.00034	0.00888	-0.00042	-0.00048	0.01164	-0.01197	0.00148	-0.00153	0.00112	0.02981	0.00002	-0.00571	0.00019	-0.00921	-0.308	-0.80404	0.03585
-0.00196	0.00091	-0.00041	0.00771	0.00102	0.00069	5.31344	0.12435	0.00057	0.00003	-0.00153	0.01528	0.00381	0.00003	0.00267	0.00005	0.00726	-0.00064	-0.00524	0.01225	-0.00779	0.00141	-0.00198	0.00074	0.02665	-0.00091	-0.00737	0.00013	-0.00954	-0.30889	-0.79909	0.03592
-0.00136	0.00112	-0.00168	0.00758	0.00119	0.00039	5.32915	0.12521	0.00235	-0.00023	-0.00339	0.01572	0.0033	0.00006	0.00066	0.00035	0.00747	-0.00067	-0.00712	0.01229	-0.00453	0.00121	-0.00271	0.00077	0.02244	-0.00135	-0.00621	0.00035	-0.01059	-0.00425	-0.79759	0.03579
0.00302	0.00118	-0.00317	0.00821	0.00233	-0.00004	5.34622	0.12506	-0.0016	-0.00045	-0.00705	0.01592	0.00595	0.00076	-0.00146	0.00039	0.00705	-0.00062	-0.00622	0.01239	-0.00372	0.00127	-0.0015	0.00084	0.01818	-0.00084	-0.00274	0.00033	-0.01287	-0.0047	-0.79777	0.03584
0.0038	0.00148	-0.00275	0.00833	0.0036	0.00031	5.35842	0.12485	-0.00197	-0.00045	-0.00948	0.0159	0.00518	0.00104	-0.0008	0.00764	-0.00084	-0.00232	0.01258	-0.00441	0.00144	-0.00258	0.00007	0.01999	-0.00046	-0.00299	-0.00004	-0.01258	-0.00468	-0.79889	0.03586	
0.00243	0.00152	-0.00124	0.00769	0.00057	0.0005	5.36967	0.12507	-0.00007	-0.00074	-0.00901	0.01592	0.00333	0.00039	0.00429	-0.00017	0.00857	-0.00082	-0.00136	0.01189	-0.00763	0.00164	-0.00583	-0.00016	0.02316	-0.00044	-0.00691	-0.00009	-0.00884	-0.00474	-0.79896	0.03558
0.00506	0.00082	-0.00234	0.00742	-0.00027	0.00011	5.38409	0.12596	0.00334	-0.00006	-0.00601	0.01564	0.00696	-0.00014	0.00571	0.00057	0.00985	-0.00081	-0.00201	0.01149	-0.00586	0.00164	-0.00607	0.0001	0.02301	-0.00078	-0.00762	-0.0002	-0.00847	-0.00502	-0.7981	0.03532
0.00502	0.00014	-0.00403	0.00783	-0.00181	0.00008	5.40209	0.12695	0.00527	0.00101	-0.00764	0.01519	0.00617	0.00033	0.00401	0.00144	0.01002	-0.0007	0.00057	0.01193	-0.00537	0.00183	-0.00638	0.00047	0.02514	-0.00089	-0.00437	-0.0006	-0.01356	-0.00554	-0.7991	0.03527
0.00258	0.00012	-0.00367	0.00812	0.00364	0.00062	5.41764	0.12792	0.0031	0.0008	-0.01075	0.0154	0.00421	0.00094	0.00319	0.00172	0.00862	-0.00059	0.00014	0.01209	-0.00646	0.00174	-0.00741	0.00106	0.02291	-0.00047	-0.00256	-0.00068	-0.01267	-0.0051	-0.80071	0.03553
0.00207	0.00076	-0.00272	0.00804	0.00553	0.00098	5.42853	0.12851	-0.0001	0.00019	-0.0102	0.0155	0.00545	0.00114	0.00302	0.00124	0.00776	-0.00036	0.00202	0.01124	-0.00994	0.00151	-0.00758	0.00091	0.02051	-0.00063	-0.01003	-0.00038	-0.00783	-0.00456	-0.80198	0.03578
0.00406	0.00105	-0.0024	0.00761	0.00053	0.00078	5.43828	0.12871	-0.00303	0.00036	-0.00822	0.01574	0.00511	0.00063	-0.00032	0.00079	0.00502	-0.00011	0.00314	0.01118	-0.01018	0.00132	-0.00715	0.00041	0.02105	-0.00095	-0.01052	-0.00048	-0.00683	-0.00435	-0.80189	0.03567
0.00487	0.00098	-0.00226	0.00738	0.00276	0.00094	5.45333	0.12859	-0.0036	0.00097	-0.00776	0.01589	0.00372	0.00023	0.00025	0.00105	0.00454	-0.00015	0.00039	0.01189	-0.01021	0.00121	-0.00283	0.00038	0.02174	-0.00112	-0.00367	-0.00059	-0.00855	-0.00422	-0.80199	0.03563
0.00484	0.0008	-0.0036	0.00737	0.00489	0.00081	5.47232	0.12863	-0.00176	0.00105	-0.00563	0.01554	-0.00185	-0.00022	0.00591	0.00102	0.00612	-0.0004	-0.0008	0.01172	-0.01222	0.00103	-0.00019	0.00116	0.01969	-0.00095	-0.00295	-0.00082	-0.01113	-0.00396	-0.79957	0.03571
0.00209	0.00132	-0.00412	0.00771	0.00333	0.00085	5.48805	0.12863	0.00085	0.00091	-0.00326	0.01557	-0.00461	-0.00057	0.00438	0.00699	0.00532	-0.00027	-0.00049	0.01183	-0.00234	0.00081	-0.00039	-0.00001	0.01771	-0.0005	-0.00009	-0.0003	-0.01237	-0.00374	-0.79878	0.03574
0.00133	0.00146	-0.00559	0.0078	0.00136	0.00072	5.5007	0.12848	-0.00039	0.00082	-0.00573	0.0155	-0.0017	-0.00061	0.00241	0.00042	0.00188	-0.00049	0.00051	0.01192	-0.00502	0.00075	-0.00109	0.00012	0.01912	-0.00024	-0.00194	0.00019	-0.0146	0.00352	-0.79779	0.03567
-0.00056	0.00088	-0.00557	0.00761	0.0039	0.00073	5.51552	0.12922	-0.00196	0.001	-0.00909	0.01607	0.001	-0.00025	0.00152	-0.00001	0.00242	-0.01009	-0.00038	0.01179	-0.00801	0.00127	-0.00466	-0.00008	0.01935	-0.00036	-0.00455	0.00045	-0.01443	-0.00386	-0.79925	0.03553
0.0013	0.00072	-0.00464	0.00709	0.00667	0.00086	5.53001	0.12992	-0.00114	0.00137	-0.0092	0.01635	0.00247	0.00042	0.00206	0.00023	0.00466	-0.00176	-0.00489	0.01181	-0.01225	0.00166	-0.00777	-0.00082	0.01939	-0.00079	-0.00407	0.00023	-0.01183	-0.00393	-0.79835	0.03526
0.00547	0.00117	-0.00561	0.00729	0.00346	0.0005	5.54091	0.13032	0.00271	0.00121	-0.00616	0.0161	0.00332	0.00051	0.00313	0.00609	0.00374	-0.00161	-0.00049	0.01161	-0.0137	0.00148	-0.00489	-0.00073	0.01214	-0.00105	-0.00532	0.00038	-0.01256	-0.0033	-0.79688	0.03492
0.00652	0.00119	-0.00671	0.00807	0.00112	0.00036	5.55309	0.13065	0.00412	0.00092	-0.00475	0.01577	-0.0001	0.00035	-0.00128	0.00042	0.00332	-0.0013	0.00098	0.01143	-0.0109	0.00163	-0.00289	0.00008	0.02101	-0.0008	-0.00614	0.00053	-0.01634	-0.00306	-0.79664	0.0349
0.00617	0.00123	-0.006	0.00831	0.00119	0.00043	5.56376	0.13067	0.00357	0.00065	-0.00513	0.01526	0.00003	0.00035	-0.00234	0.00063	0.00299	-0.00091	0.00066	0.01169	-0.00609	0.00182	-0.00369	0.00073	0.01866	-0.00075	-0.00402	0.0004	-0.01461	-0.0035	-0.79904	0.03539
0.00357	0.00128	-0.00412	0.0075	0.00551	0.00088	5.57357	0.13085	0.00296	-0.00003	-0.00439	0.01566	0.0004	-0.00024	0.00166	0.00048	0.00238	-0.0004	-0.00009	0.01186	-0.00445	0.00195	-0.00309	0.00088	0.01621	-0.00062	-0.00498	0.00031	-0.0118	-0.0039	-0.79842	0.03559
0.00068	0.00125	-0.00212	0.00699	0.00024	0.00091	5.58361	0.13153	-0.00098	-0.00025	-0.00697	0.01547	0.0015	-0.0004	0.00498	0.00018	0.00383	-0.00026	-0.00198	0.01188	-0.00719	0.00195	-0.00234	0.00088	0.018	-0.00056	-0.00608	0.00015	-0.01231	-0.00359	-0.79837	0.03562
0.00145	0.00144	-0.00132	0.0072	0.00696	0.00047	5.59763	0.13208	-0.00133	-0.00004	-0.00915	0.01536	0.00371	-0.00001	0.00436	0.00028	0.00635	-0.00042	-0.00242	0.01111	-0.00826	0.00154	-0.00248	0.00095	0.01886	-0.00102	-0.00456	0.00069	-0.01174	-0.0033	-0.80024	0.03537
0.00162	0.00142	-0.00002	0.00745	0.00339	0.00008	5.61195	0.1327	0.00027	0.00045	-0.00776	0.01588	0.00403	0.00029	0.00292	0.00028	0.00295	-0.00055	0.00057	0.01142	-0.00793	0.00103	-0.00281	0.00099	0.0204	-0.00157	-0.00288	0.00084	-0.01266	-0.00352	-0.79996	0.03525
0.00179	0.00128	0.00138	0.00785	0.0026																											

0.00285	0.00137	-0.00463	0.00777	0.00344	0.00066	5.4724	0.13428	0.00021	0.00049	-0.00599	0.01611	0.00192	0.00041	-0.00348	0.00033	0.0097	-0.00046	-0.00066	0.01139	-0.00921	0.00128	-0.00064	0.00063	0.02323	-0.00095	-0.00447	-0.00003	-0.01085	-0.00401	-0.80018	0.0351
0.00224	0.00131	-0.00485	0.0076	0.00253	0.00059	5.47893	0.13462	0.00272	0.00025	-0.00682	0.01654	0.00308	0.0003	-0.00026	0.00078	0.00883	-0.00058	-0.00139	0.01146	-0.00407	0.0015	-0.0016	0.0004	0.0233	-0.00071	-0.00455	0.00013	-0.00992	-0.00345	-0.80189	0.03516
0.00104	0.00174	-0.00526	0.00719	0.00525	0.00053	5.48337	0.13517	0.00373	0.00021	-0.00831	0.01662	0.00398	-0.00016	-0.00059	0.00143	0.00554	-0.00057	-0.00285	0.01175	-0.00176	0.00152	-0.00375	0.00045	0.02345	-0.00086	-0.00231	0.00024	-0.01283	-0.00333	-0.80193	0.03529
-0.00153	0.00114	-0.00369	0.00706	0.00514	0.00042	5.48844	0.13501	0.00607	0.00021	-0.00778	0.01655	0.00259	-0.00016	-0.00417	0.00168	0.00243	-0.00046	0.00068	0.01175	-0.00247	0.00089	-0.00722	0.00021	0.02205	-0.001	0.00029	0.00012	-0.01405	-0.00375	-0.80136	0.03539
-0.00145	0.00048	-0.00285	0.007	0.00501	0.00046	5.49032	0.13468	0.00729	0.00048	-0.00727	0.01671	0.00284	-0.0005	-0.00384	0.00126	0.00043	-0.00057	0.00121	0.01178	-0.0067	0.00069	-0.00675	0.00022	0.01715	-0.00108	0.00002	0.00018	-0.01392	-0.00349	-0.7982	0.0354
0.00077	0.00064	-0.00548	0.00746	0.00399	0.00041	5.49538	0.1346	0.00649	0.00059	-0.00659	0.01667	0.00592	-0.00036	-0.00157	0.00054	0.00148	-0.00121	-0.00327	0.01173	-0.01149	0.00097	-0.00587	0.00007	0.01452	-0.00094	-0.00357	0.00011	-0.01361	-0.00319	-0.79697	0.03546
0.00133	0.00133	-0.00439	0.00759	0.00354	0.00018	5.49938	0.13438	0.00797	0.00038	-0.00668	0.01646	0.00565	0.00003	-0.00094	0.00048	0.00539	-0.00163	-0.00596	0.01167	-0.0126	0.0013	-0.00552	-0.00008	0.01875	-0.00094	-0.00751	0.00006	-0.01149	-0.00335	-0.79758	0.03517
0.00497	0.00118	-0.00514	0.00743	-0.0001	0.00013	5.50645	0.134	0.00632	0.00019	-0.00811	0.01586	0.00152	0.00018	-0.00056	0.00086	0.00737	-0.00185	-0.00461	0.01159	-0.00933	0.00108	-0.00409	0.00015	0.021	-0.00124	-0.00723	0.00024	-0.0108	-0.00387	-0.79893	0.03493
0.00004	0.00124	-0.00503	0.00764	-0.00125	0.00014	5.51276	0.13362	0.00521	0.00001	-0.01107	0.01511	0.00029	0.00068	0.00054	0.00099	0.00646	-0.00146	-0.00193	0.01097	-0.00755	0.00045	-0.00306	0.00061	0.02191	-0.00109	-0.00689	0.0006	-0.01147	-0.00462	-0.80227	0.03489
-0.00061	0.00168	-0.00707	0.00803	0.00297	-0.00024	5.52128	0.13351	0.00204	0	-0.0104	0.01501	0.00259	0.00114	0.00113	0.00065	0.00466	-0.00078	0.00052	0.01093	-0.00899	0.00012	-0.00133	0.00047	0.02098	-0.00064	-0.00302	0.00105	-0.01173	-0.00516	-0.80401	0.03496
0.00214	0.0018	-0.00626	0.00825	0.00526	-0.00011	5.52879	0.13386	0.00263	0.00031	-0.0084	0.01566	0.00298	0.00068	0.00188	0.0004	0.00608	-0.00031	0.00044	0.01128	-0.0076	0.00047	0.001	-0.00001	0.02063	-0.00041	0.00024	0.00083	-0.01231	-0.0049	-0.80085	0.03514
0.00128	0.00184	-0.00464	0.00824	0.0035	0.00021	5.53769	0.13408	0.0025	0.00066	-0.00989	0.01626	0.00483	-0.00002	0.00133	0.00033	0.00855	-0.00062	-0.00091	0.0116	-0.00457	0.00095	0.00118	-0.00036	0.01984	-0.00041	-0.00061	-0.00008	-0.01167	-0.00505	-0.79783	0.0348
0.00094	0.00172	-0.0038	0.00846	0.00346	0.00008	5.54788	0.13442	0.00182	0.00131	-0.01119	0.01601	0.00744	-0.00013	0.00054	0.00005	0.00945	-0.00122	0.00021	0.01146	-0.00423	0.00145	-0.00045	-0.00024	0.0192	-0.00082	-0.00217	-0.00047	-0.01193	-0.00475	-0.79891	0.03467
0.0037	0.00147	-0.00513	0.00832	0.00045	0.00031	5.55768	0.13484	0.00081	0.00133	-0.00899	0.0157	0.00544	0.00024	0.00013	-0.00025	0.00865	-0.00122	0.00237	0.01129	-0.00293	0.00144	-0.00322	0.00004	0.01824	-0.00133	-0.00622	-0.00018	-0.01351	-0.00381	-0.79725	0.03514
0.00345	0.00081	-0.00278	0.0081	-0.00305	0.00086	5.56555	0.13472	-0.00006	0.00074	-0.00512	0.01556	0.00142	0.0007	0.00084	-0.00035	0.00733	-0.00085	0.00368	0.0115	-0.0041	0.00143	-0.00612	0.00028	0.0179	-0.00153	-0.0067	0.0004	-0.01059	-0.0034	-0.79607	0.03539
-0.00035	0.00113	-0.00069	0.00768	-0.00067	0.00118	5.57554	0.13437	0.00285	0.00031	-0.00222	0.01552	0.00024	0.00081	0.00534	-0.00044	0.00757	-0.00071	0.00267	0.01167	-0.00744	0.00131	-0.00586	-0.00015	0.01942	-0.00102	-0.00716	0.00045	-0.00831	-0.00395	-0.79545	0.03525
-0.0018	0.00142	-0.00588	0.00729	0.00079	0.00083	5.58941	0.1339	0.00399	-0.00001	-0.00585	0.01551	0.00002	0.00052	0.00723	0.00035	0.00596	-0.00075	0.00197	0.01147	-0.00654	0.0016	-0.00499	-0.00043	0.02169	-0.00087	-0.00765	0.00019	-0.01019	-0.00488	-0.79517	0.03489
-0.00029	0.00134	-0.0065	0.00735	0.00249	0.00011	5.60239	0.13377	0.00304	0.00002	-0.00614	0.01579	0.0011	0.00025	0.00306	0.00085	0.00707	-0.00063	-0.0005	0.01162	-0.00493	0.0017	-0.00596	-0.00009	0.0212	-0.00108	-0.00621	0.00085	-0.01264	-0.00508	-0.79628	0.03468
-0.00011	0.00129	-0.00523	0.00763	0.00285	0.00022	5.61546	0.13377	0.00481	0.00033	-0.00498	0.0158	0.00466	0.00057	0.00162	0.00084	0.00682	-0.00113	-0.00046	0.01181	-0.00491	0.00157	-0.00808	0.00038	0.02052	-0.00092	-0.00259	0.00144	-0.01492	-0.0048	-0.79685	0.03511
-0.00202	0.00139	-0.00698	0.00756	0.00189	0.00028	5.62811	0.13355	0.00294	0.00076	-0.0055	0.01546	0.00354	0.00096	-0.00188	0.00027	0.00622	-0.00147	-0.0001	0.01168	-0.00594	0.0013	-0.00766	-0.00001	0.02264	-0.00105	0.000192	0.00113	-0.01078	-0.0044	-0.79486	0.03545
-0.00154	0.002	-0.00735	0.00714	0.00054	0.00029	5.64313	0.13348	0.00313	0.00087	-0.00617	0.01562	0.00189	0.00089	-0.00409	-0.00002	0.00622	-0.001	-0.0001	0.01146	-0.00756	0.00105	-0.00675	0.00005	0.02459	-0.00171	-0.00183	0.00019	-0.00892	-0.00456	-0.79772	0.03499
0.00126	0.00181	-0.00193	0.00735	-0.00123	0.00056	5.66103	0.13332	0.00393	0.00049	-0.00885	0.01631	0.00548	0.0014	-0.002	0.00048	0.00599	-0.00043	0.00028	0.01143	-0.01143	0.00076	-0.00398	-0.00013	0.02553	-0.00153	-0.00474	0.00014	-0.01305	-0.0049	-0.80095	0.03488
0.00192	0.00134	0.00197	0.00764	-0.00236	0.00057	5.67601	0.13344	0.00186	0.00061	-0.01433	0.01657	0.00725	-0.00034	0.00002	0.0011	0.00577	-0.00018	0.00108	0.0118	-0.01156	0.00117	-0.00188	-0.00012	0.02506	-0.00072	-0.00432	0.00037	-0.01468	-0.00485	-0.80159	0.03523
0.00065	0.00092	0.00269	0.00778	0.0025	0.00041	5.68984	0.13388	-0.00025	0.00074	-0.01829	0.01606	0.00714	-0.00018	0.00014	0.00099	0.00405	-0.0007	0.00272	0.01212	-0.00948	0.00125	-0.00319	0.00002	0.0213	-0.00063	-0.00642	0.00015	-0.01347	-0.00484	-0.80198	0.03559
-0.00142	0.00073	-0.00168	0.00815	0.00354	-0.00003	5.70458	0.13436	-0.00194	0.00047	-0.01715	0.01584	0.00577	-0.00013	-0.00061	0.00082	0.00316	-0.00069	0.00153	0.01215	-0.00858	0.00118	-0.00399	0.00037	0.01946	-0.00103	-0.00843	0.00043	-0.0119	-0.00457	-0.79913	0.03593
-0.00363	0.00109	-0.00531	0.00867	0.00365	-0.00004	5.72231	0.13495	0.00028	0.00053	-0.01285	0.01602	0.00524	-0.00002	-0.00014	0.00086	0.00366	-0.00038	-0.00171	0.01179	-0.00749	0.00127	-0.00253	0.00045	0.02076	-0.00144	-0.00557	0.00076	-0.01145	-0.00414	-0.79819	0.03628
-0.00322	0.00131	-0.00305	0.00886	0.00372	0.00041	5.74088	0.13553	0.0029	0.00102	-0.01158	0.01576	0.00457	0.0003	0.00068	0.00078	0.00064	-0.00037	-0.00378	0.01129	-0.00493	0.00149	-0.00201	0.00062	0.02107	-0.00138	-0.00331	0.00064	-0.01091	-0.00436	-0.80185	0.03602
-0.00032	0.00093	-0.00033	0.00855	0.00343	0.00048	5.75824	0.13634	0.00377	0.00114	-0.0131	0.0158	0.00338	0.00067	0.00149	0.00066	-0.0017	-0.00023	-0.00536	0.01109	-0.00353	0.00103	-0.00087	0.00065	0.02113	-0.00136	-0.00126	0.00025	-0.01141	-0.00433	-0.79962	0.03565
0.0026	0.00027	-0.00048	0.00781	0.00357	0.00021	5.77443	0.13674	0.00374	0.00114	-0.01229	0.01614	0.00135	0.00101	0.00028	0.00065	0.00221	0.00017	-0.00731	0.01141	-0.00507	0.00057	-0.00313	0.00034	0.01977	-0.001	0.00009	-0.00016	-0.01023	-0.00424	-0.79528	0.03604
0.00392	0.00027	-0.00262	0.00748	0.00497	-0.00014	5.78928	0.13693	0.00175	0.00076	-0.01169	0.01617	0.00248	0.0015	0.0015	0.00066	0.00401	0.00033	-0.00365	0.01195	-0.00689	0.00037	-0.0072	0.00035	0.019	-0.00058	-0.00167	-0.0003	-0.00973	-0.0043	-0.79673	0.03604
0.00201	0.0012	-0.0058	0.00783	0.0043	-0.00005	5.80611	0.13703	-0.00208	0.0005	-0.01422	0.01589	0.00178	0.00149	0.00264	0.0006	0.00346	-0.00024	-0.00024	0.01218	-0.00742	0.00017	-0.00627	0.00042	0.02157	-0.00021	-0.00126	-0.00016	-0.01117	-0.00401	-0.79802	0.03612
0.00285	0.0019	-0.00457	0.00767	0.00221	-0.00003	5.8266	0.1371	-0.00317	0.00015	-0.01449	0.0156	-0.00004	0.00137	0.0038	0.0003	0.00367	-0.00018	-0.00093	0.01185	-0.00642	0.00067	-0.0018	0.00049	0.02226	-0.0003	0.00128	0.00037	-0.01258	-0.00396	-0.79997	0.03571
0.00535	0.00168	-0.00459	0.00713																												

Report date: 09/21/2020
08/30/2019

Analysis date:

QUANTACHROME CORPORATION
QUANTACHROME POREMASTER FOR WINDOWS® DATA REPORT
VERSION 8.1

SAMPLE ID EMP LK1.1 solid FILE NAME **CC2**
 SAMPLE WEIGHT 0.8194 grams BULK SAMPLE VOLUME 0.3563 cc
 SAMPLE DESCRIPTION solid
 BLANK CELL FILE C:\QCdata\PoroData\BLANKHP.PRM
 COMMENTS
 HG SURFACE TENSION 480.00 erg/cm² HG CONTACT ANGLE
 (I)140.00°, (E)140.00°
 MINIMUM DELTA VOL. 0.000 % FS MOVING POINT AVG. 11 (Scan
 Mode)
 OPERATOR AS Mercury volume normalized by
 sample weight.

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure -dV/d(log d) [PSI] [cc/g]	Pore Diameter [nm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(d) [cc/(nm-g)]
20.200	10560.72	0.0059	0.0059	14.80	4.090E-13
1.119E-08					
21.057	10130.59	0.0059	0.0000	14.80	3.656E-13
9.593E-09					
21.698	9831.49	0.0059	0.0000	14.80	3.435E-13
8.394E-09					
22.395	9525.43	0.0059	0.0000	14.80	3.248E-13
7.461E-09					
23.105	9232.66	0.0059	0.0000	14.80	3.112E-13
6.715E-09					
23.862	8939.67	0.0059	0.0000	14.80	3.015E-13
6.105E-09					
24.641	8657.14	0.0059	0.0000	14.80	3.215E-13
6.105E-09					
25.431	8388.16	0.0059	0.0000	14.80	3.427E-13
6.105E-09					
26.277	8118.36	0.0059	0.0000	14.80	3.654E-13
6.105E-09					
27.195	7844.06	0.0059	0.0000	14.80	1.873E-13
3.023E-09					
28.181	7569.79	0.0059	0.0000	14.80	2.009E-13
3.023E-09					
29.232	7297.55	0.0059	0.0000	14.80	0.000E+00
0.000E+00					
30.383	7021.21	0.0059	0.0000	14.80	0.000E+00
0.000E+00					
31.650	6740.09	0.0059	0.0000	14.80	0.000E+00
0.000E+00					
33.040	6456.52	0.0059	0.0000	14.80	0.000E+00
0.000E+00					

34.571	6170.56	0.0059	0.0000	14.80	0.000E+00
0.000E+00					
36.254	5884.10	0.0059	0.0000	14.80	0.000E+00
0.000E+00					
38.124	5595.50	0.0059	0.0000	14.80	0.000E+00
0.000E+00					
40.220	5303.84	0.0059	0.0000	14.80	0.000E+00
0.000E+00					
42.575	5010.48	0.0059	0.0000	14.80	0.000E+00
0.000E+00					
45.245	4714.84	0.0059	0.0000	14.80	0.000E+00
0.000E+00					
48.298	4416.78	0.0059	0.0000	14.80	8.956E-10
1.408E-05					
51.848	4114.41	0.0059	0.0000	14.80	2.950E-09
4.334E-05					
55.975	3811.00	0.0059	0.0000	14.80	8.209E-09
1.136E-04					
60.839	3506.33	0.0059	0.0000	14.80	1.565E-08
1.981E-04					
66.617	3202.21	0.0059	0.0000	14.80	2.726E-08
3.137E-04					
73.547	2900.50	0.0059	0.0000	14.81	4.427E-08
4.563E-04					
81.866	2605.76	0.0059	0.0000	14.85	6.823E-08
6.184E-04					
91.852	2322.46	0.0059	0.0000	14.95	1.033E-07
8.134E-04					
103.766	2055.79	0.0060	0.0000	15.07	1.536E-07
1.034E-03					
117.957	1808.48	0.0061	0.0001	15.25	2.274E-07
1.296E-03					
134.718	1583.48	0.0061	0.0001	15.48	3.334E-07
1.589E-03					
154.386	1381.75	0.0063	0.0001	15.75	4.758E-07
1.897E-03					
177.218	1203.73	0.0064	0.0001	16.07	6.652E-07
2.218E-03					
203.542	1048.05	0.0065	0.0001	16.44	8.847E-07
2.485E-03					
233.535	913.45	0.0067	0.0002	16.87	1.166E-06
2.762E-03					
267.405	797.75	0.0069	0.0002	17.35	1.494E-06
2.999E-03					
305.206	698.95	0.0071	0.0002	17.86	1.883E-06
3.232E-03					
347.045	614.68	0.0073	0.0002	18.40	2.349E-06
3.471E-03					
392.852	543.01	0.0075	0.0002	18.90	2.874E-06
3.692E-03					
442.658	481.91	0.0077	0.0002	19.42	3.478E-06
3.923E-03					
496.198	429.91	0.0079	0.0002	19.91	4.118E-06
4.121E-03					
553.419	385.46	0.0081	0.0002	20.40	4.822E-06
4.333E-03					
614.114	347.37	0.0083	0.0002	20.90	5.588E-06
4.550E-03					

678.209	314.54	0.0085	0.0002	21.40	6.417E-06
4.773E-03					
745.461	286.16	0.0087	0.0002	21.91	7.473E-06
5.095E-03					
815.812	261.48	0.0089	0.0002	22.41	8.684E-06
5.458E-03					
889.047	239.94	0.0091	0.0002	22.93	1.019E-05
5.914E-03					
965.179	221.02	0.0093	0.0002	23.47	1.192E-05
6.392E-03					
1044.068	204.32	0.0095	0.0002	24.01	1.388E-05
6.894E-03					
1125.820	189.48	0.0098	0.0002	24.61	1.616E-05
7.444E-03					
1210.206	176.27	0.0100	0.0003	25.24	1.866E-05
7.987E-03					
1297.523	164.41	0.0103	0.0003	25.92	2.155E-05
8.567E-03					
1387.573	153.74	0.0106	0.0003	26.60	2.469E-05
9.137E-03					
1480.434	144.09	0.0108	0.0003	27.31	2.817E-05
9.720E-03					
1575.889	135.37	0.0111	0.0003	28.04	3.204E-05
1.033E-02					
1673.929	127.44	0.0114	0.0003	28.76	3.602E-05
1.089E-02					
1774.348	120.23	0.0117	0.0003	29.49	4.019E-05
1.143E-02					
1877.101	113.64	0.0120	0.0003	30.21	4.448E-05
1.194E-02					
1981.901	107.64	0.0123	0.0003	30.95	4.904E-05
1.245E-02					
2088.605	102.14	0.0126	0.0003	31.70	5.395E-05
1.299E-02					
2196.765	97.11	0.0129	0.0003	32.44	5.903E-05
1.351E-02					
2306.496	92.49	0.0132	0.0003	33.18	6.472E-05
1.411E-02					
2417.282	88.25	0.0135	0.0003	33.92	7.097E-05
1.477E-02					
2529.190	84.34	0.0138	0.0003	34.66	7.773E-05
1.546E-02					
2641.881	80.75	0.0141	0.0003	35.42	8.500E-05
1.619E-02					
2755.364	77.42	0.0144	0.0003	36.17	9.248E-05
1.688E-02					
2869.449	74.34	0.0147	0.0003	36.95	1.005E-04
1.760E-02					
2984.202	71.48	0.0150	0.0003	37.75	1.087E-04
1.829E-02					
3099.500	68.82	0.0153	0.0003	38.56	1.173E-04
1.897E-02					
3215.457	66.34	0.0156	0.0003	39.38	1.263E-04
1.964E-02					
3331.934	64.02	0.0160	0.0003	40.18	1.350E-04
2.023E-02					
3449.145	61.85	0.0163	0.0003	40.98	1.439E-04
2.078E-02					

3566.817	59.81	0.0166	0.0003	41.77	1.520E-04
2.119E-02					
3685.199	57.89	0.0169	0.0003	42.56	1.593E-04
2.144E-02					
3804.076	56.08	0.0172	0.0003	43.34	1.659E-04
2.160E-02					
3923.579	54.37	0.0175	0.0003	44.09	1.720E-04
2.168E-02					
4043.635	52.76	0.0178	0.0003	44.83	1.781E-04
2.177E-02					
4164.384	51.23	0.0181	0.0003	45.54	1.841E-04
2.184E-02					
4285.611	49.78	0.0183	0.0003	46.21	1.901E-04
2.192E-02					
4407.400	48.40	0.0186	0.0003	46.86	1.962E-04
2.201E-02					
4529.484	47.10	0.0189	0.0003	47.50	2.025E-04
2.212E-02					
4652.047	45.86	0.0191	0.0003	48.13	2.095E-04
2.232E-02					
4774.982	44.67	0.0194	0.0002	48.76	2.174E-04
2.260E-02					
4898.469	43.55	0.0196	0.0002	49.38	2.267E-04
2.301E-02					
5022.270	42.48	0.0199	0.0002	50.01	2.379E-04
2.358E-02					
5146.466	41.45	0.0201	0.0003	50.64	2.504E-04
2.424E-02					
5271.075	40.47	0.0204	0.0003	51.28	2.639E-04
2.494E-02					
5396.203	39.53	0.0206	0.0003	51.94	2.776E-04
2.562E-02					
5521.594	38.63	0.0209	0.0003	52.60	2.914E-04
2.626E-02					
5647.482	37.77	0.0212	0.0003	53.29	3.047E-04
2.683E-02					
5773.674	36.95	0.0214	0.0003	53.98	3.174E-04
2.729E-02					
5900.427	36.15	0.0217	0.0003	54.66	3.291E-04
2.764E-02					
6027.609	35.39	0.0220	0.0003	55.34	3.394E-04
2.786E-02					
6155.319	34.66	0.0222	0.0003	56.01	3.476E-04
2.789E-02					
6283.333	33.95	0.0225	0.0003	56.66	3.535E-04
2.775E-02					
6411.893	33.27	0.0227	0.0002	57.28	3.564E-04
2.738E-02					
6540.947	32.61	0.0230	0.0002	57.88	3.569E-04
2.684E-02					
6670.446	31.98	0.0232	0.0002	58.45	3.552E-04
2.616E-02					
6800.201	31.37	0.0234	0.0002	59.00	3.520E-04
2.542E-02					
6930.492	30.78	0.0236	0.0002	59.51	3.478E-04
2.463E-02					
7061.080	30.21	0.0238	0.0002	60.00	3.427E-04
2.381E-02					

7192.269	29.66	0.0240	0.0002	60.45	3.373E-04
2.302E-02					
7323.790	29.13	0.0242	0.0002	60.88	3.319E-04
2.225E-02					
7455.920	28.61	0.0243	0.0002	61.29	3.259E-04
2.147E-02					
7588.496	28.11	0.0245	0.0002	61.68	3.202E-04
2.074E-02					
7721.781	27.63	0.0246	0.0001	62.06	3.153E-04
2.007E-02					
7855.610	27.16	0.0248	0.0001	62.42	3.115E-04
1.951E-02					
7990.197	26.70	0.0249	0.0001	62.77	3.092E-04
1.905E-02					
8125.461	26.25	0.0251	0.0001	63.11	3.081E-04
1.867E-02					
8261.624	25.82	0.0252	0.0001	63.43	3.066E-04
1.828E-02					
8398.546	25.40	0.0253	0.0001	63.75	3.054E-04
1.792E-02					
8536.417	24.99	0.0254	0.0001	64.06	3.048E-04
1.760E-02					
8675.029	24.59	0.0256	0.0001	64.37	3.048E-04
1.732E-02					
8814.715	24.20	0.0257	0.0001	64.67	3.044E-04
1.702E-02					
8955.009	23.82	0.0258	0.0001	64.96	3.057E-04
1.684E-02					
9096.194	23.45	0.0259	0.0001	65.24	3.085E-04
1.673E-02					
9238.024	23.09	0.0260	0.0001	65.51	3.116E-04
1.664E-02					
9380.711	22.74	0.0261	0.0001	65.79	3.148E-04
1.656E-02					
9523.901	22.40	0.0262	0.0001	66.05	3.171E-04
1.644E-02					
9667.833	22.07	0.0263	0.0001	66.31	3.202E-04
1.636E-02					
9812.343	21.74	0.0264	0.0001	66.58	3.256E-04
1.640E-02					
9957.503	21.42	0.0265	0.0001	66.85	3.322E-04
1.649E-02					
10103.216	21.11	0.0266	0.0001	67.11	3.398E-04
1.663E-02					
10249.591	20.81	0.0267	0.0001	67.37	3.461E-04
1.670E-02					
10396.392	20.52	0.0268	0.0001	67.63	3.541E-04
1.683E-02					
10544.036	20.23	0.0270	0.0001	67.89	3.591E-04
1.683E-02					
10692.140	19.95	0.0271	0.0001	68.15	3.635E-04
1.679E-02					
10840.963	19.68	0.0272	0.0001	68.42	3.666E-04
1.669E-02					
10990.230	19.41	0.0273	0.0001	68.68	3.700E-04
1.661E-02					
11140.340	19.15	0.0274	0.0001	68.93	3.745E-04
1.658E-02					

11290.978	18.89	0.0275	0.0001	69.17	3.774E-04
1.647E-02					
11442.308	18.64	0.0276	0.0001	69.41	3.771E-04
1.623E-02					
11594.215	18.40	0.0276	0.0001	69.63	3.735E-04
1.586E-02					
11746.832	18.16	0.0277	0.0001	69.85	3.677E-04
1.540E-02					
11899.977	17.93	0.0278	0.0001	70.08	3.633E-04
1.501E-02					
12053.913	17.70	0.0279	0.0001	70.29	3.569E-04
1.456E-02					
12208.327	17.47	0.0280	0.0001	70.49	3.539E-04
1.426E-02					
12363.615	17.25	0.0281	0.0001	70.68	3.509E-04
1.396E-02					
12519.497	17.04	0.0281	0.0001	70.85	3.494E-04
1.374E-02					
12676.247	16.83	0.0282	0.0001	71.03	3.461E-04
1.344E-02					
12833.557	16.62	0.0283	0.0001	71.19	3.408E-04
1.308E-02					
12991.690	16.42	0.0283	0.0001	71.36	3.359E-04
1.274E-02					
13150.435	16.22	0.0284	0.0001	71.54	3.343E-04
1.253E-02					
13310.012	16.03	0.0285	0.0001	71.71	3.384E-04
1.254E-02					
13470.173	15.84	0.0285	0.0001	71.87	3.455E-04
1.266E-02					
13631.228	15.65	0.0286	0.0001	72.02	3.535E-04
1.281E-02					
13792.751	15.47	0.0287	0.0001	72.17	3.634E-04
1.302E-02					
13955.050	15.29	0.0287	0.0001	72.33	3.729E-04
1.321E-02					
14117.812	15.11	0.0288	0.0001	72.50	3.820E-04
1.339E-02					
14281.372	14.94	0.0289	0.0001	72.68	3.907E-04
1.354E-02					
14445.402	14.77	0.0289	0.0001	72.85	4.038E-04
1.384E-02					
14610.142	14.60	0.0290	0.0001	73.04	4.209E-04
1.426E-02					
14775.360	14.44	0.0291	0.0001	73.22	4.407E-04
1.476E-02					
14941.321	14.28	0.0291	0.0001	73.40	4.599E-04
1.523E-02					
15107.671	14.12	0.0292	0.0001	73.58	4.759E-04
1.558E-02					
15274.777	13.97	0.0293	0.0001	73.77	4.902E-04
1.587E-02					
15442.230	13.81	0.0294	0.0001	73.97	5.038E-04
1.613E-02					
15610.441	13.67	0.0294	0.0001	74.17	5.174E-04
1.639E-02					
15779.093	13.52	0.0295	0.0001	74.37	5.314E-04
1.665E-02					

15948.435	13.38	0.0296	0.0001	74.57	5.459E-04
1.691E-02					
16118.140	13.23	0.0297	0.0001	74.77	5.631E-04
1.726E-02					
16288.537	13.10	0.0298	0.0001	74.97	5.783E-04
1.753E-02					
16459.355	12.96	0.0298	0.0001	75.17	5.897E-04
1.769E-02					
16630.867	12.83	0.0299	0.0001	75.37	6.006E-04
1.783E-02					
16802.768	12.70	0.0300	0.0001	75.57	6.103E-04
1.793E-02					
16975.432	12.57	0.0301	0.0001	75.78	6.190E-04
1.800E-02					
17148.459	12.44	0.0302	0.0001	75.99	6.276E-04
1.806E-02					
17322.248	12.31	0.0302	0.0001	76.19	6.382E-04
1.818E-02					
17496.496	12.19	0.0303	0.0001	76.39	6.515E-04
1.837E-02					
17671.529	12.07	0.0304	0.0001	76.59	6.605E-04
1.844E-02					
17847.023	11.95	0.0305	0.0001	76.79	6.705E-04
1.853E-02					
18023.357	11.84	0.0306	0.0001	76.98	6.790E-04
1.859E-02					
18200.164	11.72	0.0306	0.0001	77.18	6.876E-04
1.864E-02					
18377.779	11.61	0.0307	0.0001	77.38	6.983E-04
1.875E-02					
18555.904	11.50	0.0308	0.0001	77.58	7.089E-04
1.886E-02					
18734.811	11.39	0.0309	0.0001	77.78	7.231E-04
1.906E-02					
18914.182	11.28	0.0310	0.0001	77.98	7.437E-04
1.942E-02					
19094.328	11.17	0.0310	0.0001	78.18	7.678E-04
1.986E-02					
19274.977	11.07	0.0311	0.0001	78.38	7.906E-04
2.027E-02					
19456.369	10.96	0.0312	0.0001	78.58	8.074E-04
2.051E-02					
19638.180	10.86	0.0313	0.0001	78.79	8.318E-04
2.093E-02					
19820.701	10.76	0.0314	0.0001	79.01	8.589E-04
2.142E-02					
20003.506	10.66	0.0315	0.0001	79.24	8.848E-04
2.186E-02					
20186.977	10.57	0.0316	0.0001	79.47	9.126E-04
2.234E-02					
20370.758	10.47	0.0316	0.0001	79.69	9.437E-04
2.289E-02					
20555.174	10.38	0.0317	0.0001	79.92	9.746E-04
2.342E-02					
20739.982	10.29	0.0318	0.0001	80.16	1.003E-03
2.389E-02					
20925.471	10.19	0.0319	0.0001	80.39	1.027E-03
2.423E-02					

21111.408	10.10	0.0320	0.0001	80.63	1.046E-03
2.446E-02					
21298.037	10.02	0.0321	0.0001	80.87	1.065E-03
2.468E-02					
21485.070	9.93	0.0322	0.0001	81.12	1.088E-03
2.500E-02					
21672.877	9.84	0.0323	0.0001	81.36	1.109E-03
2.524E-02					
21861.236	9.76	0.0324	0.0001	81.61	1.125E-03
2.538E-02					
22050.512	9.67	0.0325	0.0001	81.85	1.144E-03
2.558E-02					
22240.416	9.59	0.0326	0.0001	82.08	1.156E-03
2.564E-02					
22431.250	9.51	0.0327	0.0001	82.32	1.158E-03
2.545E-02					
22622.645	9.43	0.0328	0.0001	82.57	1.162E-03
2.530E-02					
22814.898	9.35	0.0329	0.0001	82.80	1.165E-03
2.516E-02					
23007.713	9.27	0.0330	0.0001	83.04	1.169E-03
2.502E-02					
23201.359	9.19	0.0331	0.0001	83.27	1.176E-03
2.498E-02					
23395.533	9.12	0.0331	0.0001	83.49	1.183E-03
2.492E-02					
23590.582	9.04	0.0332	0.0001	83.71	1.189E-03
2.483E-02					
23786.127	8.97	0.0333	0.0001	83.93	1.197E-03
2.480E-02					
23982.445	8.89	0.0334	0.0001	84.14	1.207E-03
2.481E-02					
24179.219	8.82	0.0335	0.0001	84.36	1.213E-03
2.475E-02					
24376.693	8.75	0.0336	0.0001	84.58	1.232E-03
2.493E-02					
24574.594	8.68	0.0337	0.0001	84.80	1.269E-03
2.548E-02					
24773.281	8.61	0.0338	0.0001	85.03	1.303E-03
2.598E-02					
24972.469	8.54	0.0338	0.0001	85.25	1.337E-03
2.643E-02					
25172.482	8.47	0.0339	0.0001	85.48	1.370E-03
2.687E-02					
25372.949	8.41	0.0340	0.0001	85.71	1.397E-03
2.719E-02					
25574.180	8.34	0.0341	0.0001	85.97	1.429E-03
2.757E-02					
25775.857	8.28	0.0342	0.0001	86.22	1.464E-03
2.802E-02					
25978.279	8.21	0.0343	0.0001	86.47	1.494E-03
2.837E-02					
26181.180	8.15	0.0344	0.0001	86.72	1.521E-03
2.866E-02					
26384.811	8.09	0.0345	0.0001	86.96	1.552E-03
2.900E-02					
26588.975	8.02	0.0346	0.0001	87.20	1.571E-03
2.911E-02					

26793.969	7.96	0.0347	0.0001	87.45	1.568E-03
2.882E-02					
26999.600	7.90	0.0348	0.0001	87.70	1.563E-03
2.852E-02					
27206.105	7.84	0.0349	0.0001	87.94	1.559E-03
2.822E-02					
27413.102	7.78	0.0350	0.0001	88.18	1.556E-03
2.794E-02					
27621.051	7.72	0.0351	0.0001	88.42	1.563E-03
2.786E-02					
27829.588	7.67	0.0352	0.0001	88.63	1.564E-03
2.766E-02					
28038.998	7.61	0.0353	0.0001	88.85	1.547E-03
2.716E-02					
28249.092	7.55	0.0354	0.0001	89.06	1.529E-03
2.665E-02					
28460.082	7.50	0.0354	0.0001	89.27	1.515E-03
2.619E-02					
28671.719	7.44	0.0355	0.0001	89.49	1.499E-03
2.574E-02					
28884.180	7.39	0.0356	0.0001	89.71	1.491E-03
2.542E-02					
29097.143	7.33	0.0357	0.0001	89.90	1.497E-03
2.534E-02					
29310.736	7.28	0.0358	0.0001	90.09	1.505E-03
2.529E-02					
29524.623	7.23	0.0358	0.0001	90.28	1.506E-03
2.513E-02					
29739.238	7.17	0.0359	0.0001	90.48	1.512E-03
2.504E-02					
29954.164	7.12	0.0360	0.0001	90.67	1.496E-03
2.461E-02					
30169.836	7.07	0.0361	0.0001	90.87	1.480E-03
2.416E-02					
30385.932	7.02	0.0362	0.0001	91.07	1.475E-03
2.391E-02					
30602.670	6.97	0.0362	0.0001	91.26	1.469E-03
2.363E-02					
30819.779	6.92	0.0363	0.0001	91.45	1.447E-03
2.309E-02					
31037.648	6.87	0.0364	0.0001	91.63	1.409E-03
2.230E-02					
31256.002	6.82	0.0364	0.0001	91.79	1.354E-03
2.126E-02					
31475.176	6.78	0.0365	0.0001	91.96	1.279E-03
1.992E-02					
31694.893	6.73	0.0366	0.0001	92.12	1.196E-03
1.848E-02					
31915.631	6.68	0.0366	0.0001	92.25	1.120E-03
1.718E-02					
32136.949	6.64	0.0367	0.0000	92.37	1.031E-03
1.570E-02					
32359.199	6.59	0.0367	0.0000	92.47	9.646E-04
1.459E-02					
32582.039	6.55	0.0367	0.0000	92.55	9.046E-04
1.359E-02					
32805.766	6.50	0.0368	0.0000	92.63	8.617E-04
1.289E-02					

33030.082	6.46	0.0368	0.0000	92.70	8.328E-04
1.240E-02					
33255.340	6.41	0.0368	0.0000	92.76	8.391E-04
1.245E-02					
33481.160	6.37	0.0369	0.0000	92.84	8.708E-04
1.287E-02					
33707.879	6.33	0.0369	0.0000	92.92	9.257E-04
1.361E-02					
33935.133	6.29	0.0369	0.0000	93.02	1.013E-03
1.482E-02					
34163.336	6.24	0.0370	0.0000	93.13	1.124E-03
1.633E-02					
34392.000	6.20	0.0370	0.0001	93.27	1.239E-03
1.788E-02					
34621.523	6.16	0.0371	0.0001	93.42	1.365E-03
1.955E-02					
34851.551	6.12	0.0372	0.0001	93.57	1.475E-03
2.096E-02					
35082.410	6.08	0.0372	0.0001	93.75	1.578E-03
2.225E-02					
35313.754	6.04	0.0373	0.0001	93.94	1.655E-03
2.315E-02					
35545.965	6.00	0.0374	0.0001	94.13	1.709E-03
2.372E-02					
35778.648	5.96	0.0374	0.0001	94.32	1.732E-03
2.385E-02					
36012.098	5.92	0.0375	0.0001	94.51	1.749E-03
2.390E-02					
36246.016	5.89	0.0376	0.0001	94.68	1.746E-03
2.368E-02					
36480.711	5.85	0.0377	0.0001	94.85	1.714E-03
2.308E-02					
36715.762	5.81	0.0377	0.0001	95.00	1.650E-03
2.206E-02					
36951.629	5.77	0.0378	0.0001	95.14	1.562E-03
2.074E-02					
37187.848	5.74	0.0378	0.0001	95.29	1.469E-03
1.937E-02					
37424.590	5.70	0.0379	0.0001	95.42	1.378E-03
1.805E-02					
37661.371	5.66	0.0379	0.0000	95.54	1.285E-03
1.672E-02					
37898.398	5.63	0.0380	0.0000	95.64	1.193E-03
1.542E-02					
38135.234	5.59	0.0380	0.0000	95.73	1.115E-03
1.432E-02					
38372.281	5.56	0.0380	0.0000	95.81	1.033E-03
1.318E-02					
38609.242	5.53	0.0381	0.0000	95.89	9.312E-04
1.180E-02					
38846.441	5.49	0.0381	0.0000	95.96	8.311E-04
1.047E-02					
39083.566	5.46	0.0381	0.0000	96.02	7.343E-04
9.188E-03					
39321.004	5.43	0.0381	0.0000	96.08	6.549E-04
8.142E-03					
39558.371	5.39	0.0382	0.0000	96.13	5.925E-04
7.317E-03					

39796.184	5.36	0.0382	0.0000	96.17	5.270E-04
6.465E-03					
40034.512	5.33	0.0382	0.0000	96.20	4.628E-04
5.642E-03					
40273.887	5.30	0.0382	0.0000	96.22	4.014E-04
4.862E-03					
40514.312	5.27	0.0382	0.0000	96.24	3.415E-04
4.109E-03					
40756.223	5.23	0.0382	0.0000	96.26	2.716E-04
3.246E-03					
40999.277	5.20	0.0382	0.0000	96.28	2.153E-04
2.555E-03					
41243.793	5.17	0.0382	0.0000	96.30	1.752E-04
2.063E-03					
41489.391	5.14	0.0382	0.0000	96.31	1.409E-04
1.647E-03					
41736.488	5.11	0.0382	0.0000	96.31	1.149E-04
1.332E-03					
41984.672	5.08	0.0382	0.0000	96.31	8.837E-05
1.015E-03					
42234.281	5.05	0.0382	0.0000	96.31	6.136E-05
6.995E-04					
42484.902	5.02	0.0382	0.0000	96.31	4.044E-05
4.573E-04					
42736.676	4.99	0.0382	0.0000	96.31	2.267E-05
2.543E-04					
42989.121	4.96	0.0382	0.0000	96.31	8.086E-06
8.996E-05					
43242.516	4.93	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
43496.445	4.90	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
43751.277	4.88	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
44006.609	4.85	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
44262.816	4.82	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
44519.465	4.79	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
44777.012	4.76	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
45035.098	4.74	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
45294.090	4.71	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
45553.641	4.68	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
45814.184	4.66	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
46075.191	4.63	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
46337.125	4.60	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
46599.535	4.58	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
46862.910	4.55	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					

47126.863	4.53	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
47391.816	4.50	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
47657.316	4.48	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
47923.766	4.45	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
48190.750	4.43	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
48458.660	4.40	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
48727.059	4.38	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
48996.363	4.35	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
49266.125	4.33	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
49536.762	4.31	0.0382	0.0000	96.31	0.000E+00
0.000E+00					
49807.789	4.28	0.0382	0.0000	96.31	4.194E-05
4.264E-04					
50079.664	4.26	0.0382	0.0000	96.31	1.022E-04
1.031E-03					
50354.348	4.24	0.0382	0.0000	96.31	1.841E-04
1.845E-03					
50634.465	4.21	0.0382	0.0000	96.31	2.638E-04
2.623E-03					
50922.047	4.19	0.0382	0.0000	96.31	3.410E-04
3.363E-03					
51219.703	4.16	0.0383	0.0000	96.34	4.157E-04
4.067E-03					
51529.504	4.14	0.0383	0.0000	96.39	5.758E-04
5.601E-03					
51854.141	4.11	0.0383	0.0000	96.45	7.388E-04
7.136E-03					
52195.703	4.09	0.0383	0.0000	96.51	8.977E-04
8.600E-03					
52557.004	4.06	0.0383	0.0000	96.57	1.054E-03
1.001E-02					
52940.191	4.03	0.0384	0.0000	96.63	1.255E-03
1.181E-02					
53348.004	4.00	0.0384	0.0001	96.78	1.487E-03
1.390E-02					
53782.527	3.97	0.0385	0.0001	96.93	1.706E-03
1.583E-02					
54241.746	3.93	0.0385	0.0001	97.08	1.878E-03
1.727E-02					
54723.410	3.90	0.0386	0.0001	97.23	2.078E-03
1.893E-02					
55225.121	3.86	0.0387	0.0001	97.42	2.313E-03
2.085E-02					
55744.727	3.83	0.0388	0.0001	97.71	2.597E-03
2.316E-02					
56280.246	3.79	0.0389	0.0001	98.00	3.053E-03
2.708E-02					
56849.898	3.75	0.0390	0.0001	98.27	2.985E-03
2.607E-02					

57405.105	3.72	0.0391	0.0001	98.56	3.151E-03
2.707E-02					
57982.855	3.68	0.0393	0.0001	98.88	3.356E-03
2.836E-02					
58571.637	3.64	0.0394	0.0001	99.24	3.541E-03
2.942E-02					
59180.152	3.60	0.0397	0.0003	99.92	3.627E-03
2.967E-02					
59913.441	3.56	0.0397	0.0000	100.00	3.730E-03
2.997E-02					

Report date: 09/21/2020
09/05/2019

Analysis date:

QUANTACHROME CORPORATION
QUANTACHROME POREMASTER FOR WINDOWS® DATA REPORT
VERSION 8.1

SAMPLE ID EMP LK1.2 solid FILE NAME **CC2**
 SAMPLE WEIGHT 0.7002 grams BULK SAMPLE VOLUME 0.3146 cc
 SAMPLE DESCRIPTION solid
 BLANK CELL FILE C:\QCdata\PoroData\BLANKHP.PRM
 COMMENTS
 HG SURFACE TENSION 480.00 erg/cm² HG CONTACT ANGLE
 (I)140.00°, (E)140.00°
 MINIMUM DELTA VOL. 0.000 % FS MOVING POINT AVG. 11 (Scan
 Mode)
 OPERATOR AS Mercury volume normalized by
 sample weight.

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure -dV/d(log d) [PSI] [cc/g]	Pore Diameter [nm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(d) [cc/(nm-g)]
20.424	10444.62	0.0003	0.0003	0.72	5.499E-07
1.366E-02					
21.151	10085.71	0.0013	0.0010	2.92	5.232E-07
1.273E-02					
22.005	9694.34	0.0015	0.0002	3.36	4.933E-07
1.114E-02					
22.967	9288.15	0.0015	0.0001	3.55	4.762E-07
9.902E-03					
23.981	8895.35	0.0016	0.0000	3.66	4.670E-07
8.912E-03					
25.077	8506.69	0.0016	0.0000	3.72	4.636E-07
8.101E-03					
26.150	8157.77	0.0017	0.0001	4.02	5.055E-07
8.101E-03					
27.315	7809.74	0.0017	0.0000	4.02	1.521E-07
2.408E-03					

28.557	7470.14	0.0017	0.0000	4.02	9.200E-08
1.401E-03					
29.897	7135.33	0.0017	0.0000	4.02	6.985E-08
1.003E-03					
31.342	6806.34	0.0017	0.0000	4.02	5.883E-08
7.833E-04					
32.903	6483.38	0.0017	0.0000	4.02	5.318E-08
6.483E-04					
34.610	6163.62	0.0017	0.0000	4.02	0.000E+00
0.000E+00					
36.497	5844.97	0.0017	0.0000	4.02	0.000E+00
0.000E+00					
38.596	5527.02	0.0017	0.0000	4.02	0.000E+00
0.000E+00					
40.957	5208.41	0.0017	0.0000	4.02	0.000E+00
0.000E+00					
43.619	4890.62	0.0017	0.0000	4.02	0.000E+00
0.000E+00					
46.646	4573.17	0.0017	0.0000	4.02	0.000E+00
0.000E+00					
50.134	4255.07	0.0017	0.0000	4.02	1.252E-09
1.984E-05					
54.215	3934.77	0.0017	0.0000	4.02	2.672E-09
3.837E-05					
59.010	3615.02	0.0017	0.0000	4.02	4.338E-09
5.576E-05					
64.705	3296.85	0.0017	0.0000	4.02	6.376E-09
7.237E-05					
71.495	2983.72	0.0017	0.0000	4.02	1.433E-08
1.585E-04					
79.669	2677.62	0.0017	0.0000	4.05	2.458E-08
2.427E-04					
89.456	2384.67	0.0018	0.0000	4.07	3.822E-08
3.258E-04					
101.206	2107.80	0.0018	0.0000	4.09	5.681E-08
4.087E-04					
115.173	1852.19	0.0018	0.0000	4.12	9.519E-08
6.068E-04					
131.737	1619.30	0.0018	0.0001	4.24	1.507E-07
8.190E-04					
151.156	1411.27	0.0019	0.0001	4.37	2.532E-07
1.202E-03					
173.771	1227.60	0.0019	0.0001	4.50	3.833E-07
1.560E-03					
199.791	1067.73	0.0020	0.0001	4.63	5.768E-07
1.982E-03					
229.527	929.40	0.0021	0.0001	4.93	8.546E-07
2.447E-03					
263.066	810.91	0.0023	0.0001	5.25	1.245E-06
2.952E-03					
300.636	709.57	0.0025	0.0002	5.82	1.661E-06
3.327E-03					
342.160	623.46	0.0027	0.0002	6.36	2.211E-06
3.725E-03					
387.762	550.14	0.0030	0.0003	6.96	2.930E-06
4.155E-03					
437.221	487.91	0.0033	0.0003	7.60	3.894E-06
4.695E-03					

490.509	434.90	0.0036	0.0003	8.27	4.791E-06
4.977E-03					
547.379	389.72	0.0038	0.0002	8.83	5.881E-06
5.316E-03					
607.885	350.93	0.0041	0.0002	9.38	6.593E-06
5.245E-03					
671.758	317.56	0.0043	0.0002	9.95	7.424E-06
5.246E-03					
739.005	288.66	0.0046	0.0003	10.61	8.151E-06
5.180E-03					
809.289	263.59	0.0048	0.0002	11.09	8.757E-06
5.048E-03					
882.675	241.68	0.0050	0.0002	11.62	9.254E-06
4.900E-03					
958.865	222.47	0.0051	0.0001	11.90	1.005E-05
4.925E-03					
1038.053	205.50	0.0053	0.0001	12.23	1.097E-05
5.038E-03					
1119.941	190.48	0.0054	0.0001	12.55	1.221E-05
5.357E-03					
1204.700	177.07	0.0055	0.0001	12.83	1.335E-05
5.684E-03					
1292.292	165.07	0.0057	0.0001	13.12	1.538E-05
6.263E-03					
1382.843	154.26	0.0058	0.0002	13.48	1.745E-05
6.794E-03					
1475.921	144.53	0.0060	0.0002	13.91	2.094E-05
7.603E-03					
1571.605	135.74	0.0063	0.0002	14.49	2.485E-05
8.450E-03					
1669.584	127.77	0.0065	0.0003	15.12	2.982E-05
9.498E-03					
1770.075	120.52	0.0068	0.0003	15.81	3.665E-05
1.097E-02					
1872.658	113.91	0.0071	0.0003	16.48	4.575E-05
1.293E-02					
1977.423	107.88	0.0074	0.0003	17.15	5.587E-05
1.489E-02					
2083.791	102.37	0.0077	0.0003	17.86	6.717E-05
1.691E-02					
2191.866	97.32	0.0081	0.0003	18.66	7.755E-05
1.845E-02					
2301.283	92.70	0.0085	0.0004	19.64	8.865E-05
1.996E-02					
2411.937	88.44	0.0090	0.0005	20.85	1.011E-04
2.161E-02					
2523.466	84.54	0.0095	0.0005	22.07	1.152E-04
2.340E-02					
2636.132	80.92	0.0101	0.0005	23.33	1.317E-04
2.547E-02					
2749.557	77.58	0.0106	0.0005	24.43	1.493E-04
2.750E-02					
2863.865	74.49	0.0110	0.0005	25.54	1.674E-04
2.943E-02					
2978.577	71.62	0.0116	0.0005	26.72	1.818E-04
3.055E-02					
3094.006	68.95	0.0121	0.0005	27.92	1.899E-04
3.054E-02					

3209.782	66.46	0.0126	0.0006	29.22	1.966E-04
3.032E-02					
3326.292	64.13	0.0132	0.0006	30.50	2.041E-04
3.032E-02					
3443.272	61.95	0.0137	0.0006	31.78	2.162E-04
3.098E-02					
3560.920	59.91	0.0142	0.0005	32.87	2.264E-04
3.129E-02					
3678.939	57.98	0.0146	0.0004	33.71	2.370E-04
3.171E-02					
3797.584	56.17	0.0149	0.0003	34.49	2.487E-04
3.232E-02					
3916.511	54.47	0.0153	0.0004	35.38	2.596E-04
3.289E-02					
4036.138	52.85	0.0157	0.0004	36.39	2.739E-04
3.391E-02					
4156.161	51.33	0.0161	0.0004	37.29	2.881E-04
3.487E-02					
4276.935	49.88	0.0166	0.0004	38.27	3.126E-04
3.697E-02					
4398.121	48.50	0.0170	0.0005	39.35	3.489E-04
4.016E-02					
4520.049	47.19	0.0175	0.0005	40.48	3.898E-04
4.359E-02					
4642.316	45.95	0.0181	0.0005	41.74	4.233E-04
4.595E-02					
4765.209	44.77	0.0186	0.0005	42.99	4.522E-04
4.768E-02					
4888.424	43.64	0.0192	0.0006	44.41	4.846E-04
4.956E-02					
5012.348	42.56	0.0199	0.0007	45.94	5.081E-04
5.039E-02					
5136.644	41.53	0.0205	0.0007	47.47	5.222E-04
5.021E-02					
5261.705	40.54	0.0211	0.0006	48.79	5.282E-04
4.925E-02					
5387.023	39.60	0.0216	0.0005	50.02	5.191E-04
4.694E-02					
5513.009	38.69	0.0222	0.0005	51.22	5.037E-04
4.416E-02					
5639.300	37.83	0.0226	0.0004	52.20	4.689E-04
3.987E-02					
5766.111	37.00	0.0229	0.0004	53.02	4.199E-04
3.467E-02					
5893.127	36.20	0.0232	0.0003	53.69	3.631E-04
2.916E-02					
6020.713	35.43	0.0234	0.0002	54.15	3.116E-04
2.433E-02					
6148.489	34.70	0.0236	0.0002	54.51	2.586E-04
1.965E-02					
6276.792	33.99	0.0237	0.0001	54.68	2.106E-04
1.570E-02					
6405.302	33.30	0.0237	0.0000	54.75	1.717E-04
1.262E-02					
6534.364	32.65	0.0237	0.0000	54.78	1.468E-04
1.078E-02					
6663.542	32.01	0.0237	0.0000	54.81	1.292E-04
9.536E-03					

6793.239	31.40	0.0237	0.0000	54.83	1.247E-04
9.234E-03					
6923.036	30.81	0.0238	0.0001	54.98	1.401E-04
1.042E-02					
7053.409	30.24	0.0239	0.0001	55.16	1.762E-04
1.296E-02					
7184.113	29.69	0.0240	0.0001	55.46	2.232E-04
1.607E-02					
7315.525	29.16	0.0241	0.0001	55.77	2.776E-04
1.952E-02					
7447.392	28.64	0.0243	0.0001	56.10	3.369E-04
2.311E-02					
7580.132	28.14	0.0245	0.0002	56.63	4.048E-04
2.710E-02					
7713.450	27.66	0.0248	0.0003	57.26	4.612E-04
3.019E-02					
7847.675	27.18	0.0251	0.0003	57.91	5.167E-04
3.306E-02					
7982.469	26.72	0.0253	0.0003	58.59	5.570E-04
3.487E-02					
8118.220	26.28	0.0256	0.0003	59.29	6.001E-04
3.677E-02					
8254.723	25.84	0.0260	0.0003	60.03	6.431E-04
3.858E-02					
8392.327	25.42	0.0263	0.0003	60.73	6.512E-04
3.825E-02					
8530.562	25.01	0.0266	0.0003	61.40	6.442E-04
3.710E-02					
8669.809	24.61	0.0268	0.0003	61.99	6.439E-04
3.644E-02					
8809.658	24.21	0.0271	0.0003	62.60	6.387E-04
3.553E-02					
8950.440	23.83	0.0273	0.0003	63.21	6.278E-04
3.436E-02					
9091.749	23.46	0.0275	0.0002	63.62	6.029E-04
3.249E-02					
9233.925	23.10	0.0277	0.0002	63.99	5.739E-04
3.042E-02					
9376.595	22.75	0.0279	0.0002	64.46	5.425E-04
2.831E-02					
9520.147	22.41	0.0281	0.0002	64.91	5.173E-04
2.655E-02					
9664.253	22.07	0.0283	0.0002	65.33	4.880E-04
2.468E-02					
9809.117	21.75	0.0284	0.0002	65.69	4.634E-04
2.317E-02					
9954.435	21.43	0.0285	0.0001	65.97	4.610E-04
2.272E-02					
10100.644	21.12	0.0287	0.0001	66.24	4.566E-04
2.214E-02					
10247.297	20.82	0.0288	0.0001	66.48	4.224E-04
2.015E-02					
10394.824	20.52	0.0289	0.0001	66.73	3.887E-04
1.827E-02					
10542.797	20.23	0.0290	0.0001	67.04	3.559E-04
1.649E-02					
10691.611	19.95	0.0291	0.0001	67.34	3.308E-04
1.511E-02					

10840.848	19.68	0.0292	0.0001	67.58	3.156E-04
1.420E-02					
10990.915	19.41	0.0293	0.0001	67.69	3.017E-04
1.337E-02					
11141.388	19.15	0.0293	0.0001	67.81	2.904E-04
1.269E-02					
11292.610	18.89	0.0294	0.0001	67.93	2.700E-04
1.162E-02					
11444.303	18.64	0.0294	0.0001	68.05	2.282E-04
9.662E-03					
11596.813	18.39	0.0295	0.0001	68.17	1.850E-04
7.721E-03					
11749.694	18.16	0.0295	0.0001	68.29	1.496E-04
6.157E-03					
11903.440	17.92	0.0296	0.0001	68.41	1.332E-04
5.374E-03					
12057.657	17.69	0.0296	0.0000	68.48	1.268E-04
5.064E-03					
12212.747	17.47	0.0296	0.0000	68.48	1.355E-04
5.420E-03					
12368.284	17.25	0.0296	0.0000	68.48	1.653E-04
6.660E-03					
12524.728	17.03	0.0296	0.0000	68.48	2.051E-04
8.273E-03					
12681.632	16.82	0.0296	0.0000	68.48	2.544E-04
1.022E-02					
12839.501	16.61	0.0296	0.0000	68.55	3.246E-04
1.296E-02					
12997.885	16.41	0.0297	0.0001	68.70	4.113E-04
1.620E-02					
13157.165	16.21	0.0298	0.0001	68.98	5.292E-04
2.050E-02					
13316.891	16.02	0.0300	0.0001	69.30	6.562E-04
2.499E-02					
13477.481	15.83	0.0301	0.0002	69.67	7.953E-04
2.977E-02					
13638.460	15.64	0.0303	0.0002	70.14	9.424E-04
3.468E-02					
13800.249	15.46	0.0305	0.0002	70.62	1.067E-03
3.863E-02					
13962.397	15.28	0.0308	0.0002	71.18	1.157E-03
4.121E-02					
14125.407	15.10	0.0310	0.0002	71.75	1.197E-03
4.196E-02					
14288.835	14.93	0.0313	0.0003	72.36	1.216E-03
4.196E-02					
14453.112	14.76	0.0316	0.0003	72.98	1.215E-03
4.127E-02					
14617.754	14.59	0.0318	0.0002	73.54	1.165E-03
3.898E-02					
14783.237	14.43	0.0320	0.0002	74.00	1.102E-03
3.630E-02					
14949.059	14.27	0.0322	0.0001	74.35	1.004E-03
3.256E-02					
15115.794	14.11	0.0323	0.0001	74.64	8.903E-04
2.845E-02					
15283.034	13.96	0.0324	0.0001	74.90	7.549E-04
2.377E-02					

15451.145	13.81	0.0325	0.0001	75.05	6.073E-04
1.886E-02					
15619.671	13.66	0.0325	0.0001	75.18	4.709E-04
1.443E-02					
15789.095	13.51	0.0325	0.0000	75.25	3.538E-04
1.070E-02					
15958.858	13.37	0.0326	0.0000	75.29	2.649E-04
7.897E-03					
16129.469	13.23	0.0326	0.0000	75.30	1.861E-04
5.474E-03					
16300.470	13.09	0.0326	0.0000	75.30	1.167E-04
3.389E-03					
16472.311	12.95	0.0326	0.0000	75.30	7.408E-05
2.122E-03					
16644.500	12.82	0.0326	0.0000	75.30	3.657E-05
1.035E-03					
16817.570	12.68	0.0326	0.0000	75.30	1.723E-05
4.810E-04					
16990.912	12.56	0.0326	0.0000	75.30	3.800E-06
1.048E-04					
17165.020	12.43	0.0326	0.0000	75.30	0.000E+00
0.000E+00					
17339.516	12.30	0.0326	0.0000	75.30	1.521E-05
4.551E-04					
17514.838	12.18	0.0326	0.0000	75.30	4.198E-05
1.239E-03					
17690.498	12.06	0.0326	0.0000	75.30	6.969E-05
2.026E-03					
17867.016	11.94	0.0326	0.0000	75.30	1.089E-04
3.123E-03					
18043.771	11.82	0.0326	0.0000	75.30	1.591E-04
4.502E-03					
18221.336	11.71	0.0326	0.0000	75.35	2.251E-04
6.288E-03					
18399.156	11.59	0.0326	0.0000	75.44	3.010E-04
8.300E-03					
18577.836	11.48	0.0327	0.0000	75.52	3.810E-04
1.036E-02					
18756.809	11.37	0.0327	0.0001	75.64	4.715E-04
1.266E-02					
18936.617	11.27	0.0328	0.0001	75.78	5.764E-04
1.527E-02					
19116.672	11.16	0.0329	0.0001	75.97	6.924E-04
1.811E-02					
19297.514	11.05	0.0329	0.0001	76.18	7.874E-04
2.035E-02					
19478.574	10.95	0.0330	0.0001	76.39	8.766E-04
2.241E-02					
19660.418	10.85	0.0331	0.0001	76.62	1.003E-03
2.539E-02					
19842.617	10.75	0.0333	0.0001	76.89	1.123E-03
2.814E-02					
20025.725	10.65	0.0334	0.0001	77.18	1.236E-03
3.066E-02					
20209.102	10.56	0.0335	0.0001	77.45	1.323E-03
3.249E-02					
20393.348	10.46	0.0336	0.0001	77.74	1.419E-03
3.452E-02					

20577.855	10.37	0.0338	0.0002	78.11	1.533E-03
3.692E-02					
20763.207	10.27	0.0340	0.0002	78.49	1.642E-03
3.918E-02					
20948.896	10.18	0.0341	0.0002	78.87	1.749E-03
4.138E-02					
21135.475	10.09	0.0343	0.0002	79.23	1.863E-03
4.367E-02					
21322.326	10.00	0.0344	0.0002	79.62	1.983E-03
4.604E-02					
21510.125	9.92	0.0346	0.0002	80.05	2.088E-03
4.800E-02					
21698.314	9.83	0.0348	0.0002	80.49	2.112E-03
4.809E-02					
21887.332	9.75	0.0350	0.0002	80.95	2.117E-03
4.771E-02					
22076.725	9.66	0.0352	0.0002	81.44	2.111E-03
4.709E-02					
22267.096	9.58	0.0354	0.0002	81.92	2.127E-03
4.698E-02					
22457.932	9.50	0.0356	0.0002	82.38	2.104E-03
4.601E-02					
22649.770	9.42	0.0358	0.0002	82.74	2.040E-03
4.418E-02					
22842.023	9.34	0.0359	0.0001	83.06	1.957E-03
4.197E-02					
23035.268	9.26	0.0361	0.0001	83.37	1.841E-03
3.910E-02					
23228.980	9.18	0.0362	0.0001	83.69	1.681E-03
3.538E-02					
23423.725	9.11	0.0363	0.0001	83.97	1.523E-03
3.177E-02					
23618.920	9.03	0.0364	0.0001	84.21	1.380E-03
2.856E-02					
23815.066	8.96	0.0365	0.0001	84.43	1.310E-03
2.693E-02					
24011.658	8.88	0.0366	0.0001	84.61	1.284E-03
2.623E-02					
24209.199	8.81	0.0366	0.0001	84.73	1.284E-03
2.610E-02					
24407.094	8.74	0.0367	0.0001	84.86	1.280E-03
2.588E-02					
24605.836	8.67	0.0368	0.0001	85.01	1.307E-03
2.629E-02					
24804.908	8.60	0.0369	0.0001	85.20	1.400E-03
2.804E-02					
25004.863	8.53	0.0370	0.0001	85.45	1.547E-03
3.080E-02					
25205.143	8.46	0.0371	0.0001	85.73	1.723E-03
3.405E-02					
25406.270	8.40	0.0372	0.0001	86.02	1.952E-03
3.825E-02					
25607.758	8.33	0.0373	0.0001	86.32	2.184E-03
4.239E-02					
25810.088	8.27	0.0375	0.0002	86.70	2.411E-03
4.636E-02					
26012.807	8.20	0.0377	0.0002	87.14	2.574E-03
4.903E-02					

26216.443	8.14	0.0379	0.0002	87.59	2.701E-03
5.095E-02					
26420.426	8.07	0.0381	0.0002	88.07	2.784E-03
5.203E-02					
26625.312	8.01	0.0383	0.0002	88.55	2.838E-03
5.252E-02					
26830.596	7.95	0.0385	0.0002	89.02	2.861E-03
5.243E-02					
27036.779	7.89	0.0387	0.0002	89.43	2.782E-03
5.048E-02					
27243.367	7.83	0.0389	0.0002	89.83	2.620E-03
4.709E-02					
27450.904	7.77	0.0390	0.0002	90.18	2.435E-03
4.335E-02					
27658.842	7.71	0.0391	0.0001	90.50	2.199E-03
3.878E-02					
27867.713	7.65	0.0393	0.0001	90.78	1.942E-03
3.393E-02					
28076.955	7.60	0.0394	0.0001	90.98	1.664E-03
2.880E-02					
28287.049	7.54	0.0394	0.0001	91.12	1.418E-03
2.432E-02					
28497.477	7.49	0.0395	0.0001	91.24	1.162E-03
1.974E-02					
28708.824	7.43	0.0395	0.0000	91.32	9.261E-04
1.559E-02					
28920.580	7.38	0.0395	0.0000	91.38	7.079E-04
1.181E-02					
29133.283	7.32	0.0395	0.0000	91.42	5.090E-04
8.423E-03					
29346.430	7.27	0.0396	0.0000	91.45	3.650E-04
5.989E-03					
29560.545	7.22	0.0396	0.0000	91.46	2.630E-04
4.275E-03					
29775.051	7.16	0.0396	0.0000	91.47	1.754E-04
2.827E-03					
29990.539	7.11	0.0396	0.0000	91.47	1.116E-04
1.782E-03					
30206.355	7.06	0.0396	0.0000	91.47	6.561E-05
1.039E-03					
30423.227	7.01	0.0396	0.0000	91.47	3.906E-05
6.124E-04					
30640.582	6.96	0.0396	0.0000	91.47	1.179E-05
1.835E-04					
30859.020	6.91	0.0396	0.0000	91.47	4.633E-06
7.140E-05					
31077.889	6.86	0.0396	0.0000	91.47	0.000E+00
0.000E+00					
31297.748	6.82	0.0396	0.0000	91.47	0.000E+00
0.000E+00					
31517.986	6.77	0.0396	0.0000	91.47	0.000E+00
0.000E+00					
31739.242	6.72	0.0396	0.0000	91.47	0.000E+00
0.000E+00					
31960.926	6.67	0.0396	0.0000	91.47	0.000E+00
0.000E+00					
32183.586	6.63	0.0396	0.0000	91.47	4.160E-05
6.594E-04					

32406.637	6.58	0.0396	0.0000	91.47	1.452E-04
2.281E-03					
32630.775	6.54	0.0396	0.0000	91.47	2.729E-04
4.246E-03					
32855.266	6.49	0.0396	0.0000	91.47	4.222E-04
6.504E-03					
33080.730	6.45	0.0396	0.0000	91.47	6.158E-04
9.398E-03					
33306.465	6.40	0.0396	0.0000	91.52	8.194E-04
1.238E-02					
33533.262	6.36	0.0396	0.0001	91.64	1.031E-03
1.543E-02					
33760.457	6.32	0.0397	0.0001	91.79	1.265E-03
1.875E-02					
33988.754	6.28	0.0398	0.0001	91.95	1.530E-03
2.247E-02					
34217.414	6.23	0.0399	0.0001	92.17	1.817E-03
2.643E-02					
34447.066	6.19	0.0400	0.0001	92.39	2.111E-03
3.041E-02					
34677.145	6.15	0.0401	0.0001	92.61	2.324E-03
3.318E-02					
34908.254	6.11	0.0402	0.0001	92.86	2.406E-03
3.404E-02					
35139.715	6.07	0.0403	0.0001	93.13	2.449E-03
3.435E-02					
35372.180	6.03	0.0404	0.0001	93.42	2.459E-03
3.420E-02					
35605.016	5.99	0.0405	0.0001	93.70	2.377E-03
3.278E-02					
35838.891	5.95	0.0406	0.0001	93.95	2.292E-03
3.135E-02					
36073.059	5.91	0.0407	0.0001	94.13	2.199E-03
2.983E-02					
36308.215	5.88	0.0408	0.0001	94.29	2.061E-03
2.775E-02					
36543.594	5.84	0.0409	0.0001	94.44	1.863E-03
2.489E-02					
36779.516	5.80	0.0409	0.0000	94.55	1.624E-03
2.154E-02					
37015.422	5.76	0.0409	0.0000	94.66	1.379E-03
1.817E-02					
37251.867	5.73	0.0410	0.0000	94.77	1.163E-03
1.523E-02					
37488.055	5.69	0.0410	0.0000	94.85	1.015E-03
1.321E-02					
37724.641	5.65	0.0411	0.0000	94.91	8.705E-04
1.125E-02					
37961.066	5.62	0.0411	0.0000	94.96	7.258E-04
9.315E-03					
38197.891	5.58	0.0411	0.0000	95.00	6.301E-04
8.025E-03					
38434.512	5.55	0.0411	0.0000	95.03	5.116E-04
6.465E-03					
38671.559	5.52	0.0411	0.0000	95.06	3.938E-04
4.941E-03					
38908.316	5.48	0.0411	0.0000	95.08	2.968E-04
3.698E-03					

39145.613	5.45	0.0411	0.0000	95.09	2.299E-04
2.843E-03					
39383.441	5.42	0.0411	0.0000	95.11	1.818E-04
2.230E-03					
39622.367	5.38	0.0411	0.0000	95.11	1.326E-04
1.614E-03					
39861.832	5.35	0.0411	0.0000	95.11	9.324E-05
1.125E-03					
40102.871	5.32	0.0411	0.0000	95.11	5.594E-05
6.700E-04					
40344.785	5.29	0.0411	0.0000	95.11	3.519E-05
4.218E-04					
40588.125	5.26	0.0411	0.0000	95.11	2.909E-05
3.524E-04					
40832.414	5.22	0.0411	0.0000	95.11	3.490E-05
4.324E-04					
41078.223	5.19	0.0411	0.0000	95.11	6.416E-05
7.889E-04					
41324.941	5.16	0.0411	0.0000	95.11	1.018E-04
1.242E-03					
41573.250	5.13	0.0411	0.0000	95.11	1.403E-04
1.697E-03					
41822.355	5.10	0.0411	0.0000	95.12	1.868E-04
2.241E-03					
42072.691	5.07	0.0411	0.0000	95.14	2.520E-04
3.000E-03					
42323.594	5.04	0.0412	0.0000	95.16	3.420E-04
4.043E-03					
42575.707	5.01	0.0412	0.0000	95.19	4.434E-04
5.203E-03					
42828.090	4.98	0.0412	0.0000	95.22	5.511E-04
6.416E-03					
43081.488	4.95	0.0412	0.0000	95.25	6.503E-04
7.510E-03					
43335.266	4.92	0.0412	0.0000	95.30	7.555E-04
8.658E-03					
43590.020	4.89	0.0413	0.0000	95.37	8.398E-04
9.553E-03					
43845.109	4.87	0.0413	0.0000	95.44	9.244E-04
1.044E-02					
44101.238	4.84	0.0413	0.0000	95.52	1.010E-03
1.133E-02					
44357.715	4.81	0.0413	0.0000	95.60	1.105E-03
1.231E-02					
44615.312	4.78	0.0414	0.0000	95.68	1.189E-03
1.316E-02					
44875.547	4.75	0.0414	0.0000	95.75	1.244E-03
1.367E-02					
45138.883	4.73	0.0415	0.0000	95.83	1.261E-03
1.377E-02					
45404.898	4.70	0.0415	0.0000	95.92	1.271E-03
1.379E-02					
45674.059	4.67	0.0415	0.0000	96.01	1.284E-03
1.385E-02					
45945.887	4.64	0.0416	0.0000	96.10	1.317E-03
1.413E-02					
46220.941	4.62	0.0416	0.0000	96.19	1.340E-03
1.429E-02					

46498.754	4.59	0.0416	0.0000	96.26	1.385E-03
1.468E-02					
46779.754	4.56	0.0417	0.0000	96.34	1.414E-03
1.490E-02					
47063.488	4.53	0.0417	0.0000	96.43	1.430E-03
1.498E-02					
47352.719	4.50	0.0418	0.0000	96.52	1.449E-03
1.509E-02					
47646.793	4.48	0.0418	0.0000	96.62	1.493E-03
1.547E-02					
47941.797	4.45	0.0418	0.0000	96.73	1.561E-03
1.608E-02					
48237.625	4.42	0.0419	0.0000	96.83	1.647E-03
1.687E-02					
48534.387	4.40	0.0419	0.0000	96.92	1.735E-03
1.765E-02					
48834.422	4.37	0.0420	0.0000	97.03	1.824E-03
1.845E-02					
49139.961	4.34	0.0420	0.0001	97.15	1.885E-03
1.895E-02					
49453.188	4.31	0.0421	0.0001	97.28	1.940E-03
1.938E-02					
49776.391	4.29	0.0421	0.0001	97.42	1.981E-03
1.966E-02					
50111.902	4.26	0.0422	0.0001	97.57	2.020E-03
1.990E-02					
50462.039	4.23	0.0423	0.0001	97.73	2.046E-03
1.999E-02					
50824.551	4.20	0.0423	0.0001	97.88	2.037E-03
1.974E-02					
51202.074	4.17	0.0424	0.0001	98.03	1.980E-03
1.902E-02					
51598.934	4.13	0.0425	0.0001	98.19	1.891E-03
1.799E-02					
52017.574	4.10	0.0425	0.0001	98.34	1.778E-03
1.675E-02					
52460.262	4.07	0.0426	0.0001	98.48	1.641E-03
1.530E-02					
52924.836	4.03	0.0426	0.0001	98.60	1.554E-03
1.437E-02					
53409.328	3.99	0.0427	0.0000	98.71	1.471E-03
1.349E-02					
53911.500	3.96	0.0427	0.0000	98.80	1.385E-03
1.260E-02					
54429.371	3.92	0.0428	0.0000	98.87	1.257E-03
1.132E-02					
54960.277	3.88	0.0428	0.0000	98.93	1.172E-03
1.048E-02					
55502.266	3.84	0.0428	0.0001	99.05	1.179E-03
1.049E-02					
56055.574	3.81	0.0429	0.0001	99.17	1.422E-03
1.267E-02					
56639.715	3.77	0.0429	0.0000	99.28	1.323E-03
1.162E-02					
57209.910	3.73	0.0430	0.0000	99.34	1.369E-03
1.184E-02					
57788.277	3.69	0.0430	0.0000	99.43	1.448E-03
1.231E-02					

58375.344	3.65	0.0431	0.0001	99.60	1.572E-03
1.314E-02					
58983.219	3.62	0.0433	0.0002	100.00	1.608E-03
1.324E-02					
59723.762	3.57	0.0433	0.0000	100.00	1.670E-03
1.350E-02					

Report date: 09/21/2020
08/27/2019

Analysis date:

QUANTACHROME CORPORATION
QUANTACHROME POREMASTER FOR WINDOWS® DATA REPORT
VERSION 8.1

SAMPLE ID EMP LK2.1 HIGH FILE NAME **FAC**
 RUN.PRM
 SAMPLE WEIGHT 1.1235 grams BULK SAMPLE VOLUME 0.4626 cc
 SAMPLE DESCRIPTION SOLID MM PARTICLES
 BLANK CELL FILE C:\QCdata\PoroData\BLANKHP.PRM
 COMMENTS
 HG SURFACE TENSION 480.00 erg/cm² HG CONTACT ANGLE
 (I)140.00°, (E)140.00°
 MINIMUM DELTA VOL. 0.000 % FS MOVING POINT AVG. 11 (Scan
 Mode)
 OPERATOR AS Mercury volume normalized by
 sample weight.

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure -dV/d(log d) [PSI] [cc/g]	Pore Diameter [nm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(d) [cc/(nm-g)]
20.200	10560.72	0.0029	0.0029	14.80	5.656E-08
1.396E-03					
20.526	10393.00	0.0030	0.0000	15.03	5.205E-08
1.272E-03					
20.978	10168.96	0.0030	0.0000	15.08	4.730E-08
1.113E-03					
21.428	9955.42	0.0030	0.0000	15.10	4.389E-08
9.895E-04					
21.970	9709.91	0.0030	0.0000	15.11	4.137E-08
8.906E-04					
22.642	9421.72	0.0030	0.0000	15.12	3.974E-08
8.096E-04					
23.271	9166.87	0.0030	0.0000	15.15	4.210E-08
8.096E-04					
23.970	8899.49	0.0030	0.0000	15.15	1.081E-08
2.044E-04					
24.748	8619.61	0.0030	0.0000	15.15	6.321E-09
1.155E-04					
25.597	8333.82	0.0030	0.0000	15.15	4.370E-09
7.640E-05					
26.540	8037.73	0.0030	0.0000	15.15	3.508E-09
5.792E-05					
27.597	7729.84	0.0030	0.0000	15.15	3.131E-09
4.818E-05					
28.761	7417.14	0.0030	0.0000	15.15	0.000E+00
0.000E+00					
30.029	7103.84	0.0030	0.0000	15.15	0.000E+00
0.000E+00					

31.380	6798.06	0.0030	0.0000	15.15	0.000E+00
0.000E+00					
32.831	6497.59	0.0030	0.0000	15.15	0.000E+00
0.000E+00					
34.392	6202.67	0.0030	0.0000	15.15	0.000E+00
0.000E+00					
36.090	5910.79	0.0030	0.0000	15.15	0.000E+00
0.000E+00					
37.937	5623.08	0.0030	0.0000	15.15	0.000E+00
0.000E+00					
39.973	5336.69	0.0030	0.0000	15.15	0.000E+00
0.000E+00					
42.231	5051.29	0.0030	0.0000	15.15	0.000E+00
0.000E+00					
44.749	4767.04	0.0030	0.0000	15.15	0.000E+00
0.000E+00					
47.576	4483.79	0.0030	0.0000	15.15	0.000E+00
0.000E+00					
50.783	4200.69	0.0030	0.0000	15.15	0.000E+00
0.000E+00					
54.483	3915.37	0.0030	0.0000	15.15	0.000E+00
0.000E+00					
58.814	3627.04	0.0030	0.0000	15.15	0.000E+00
0.000E+00					
63.919	3337.36	0.0030	0.0000	15.15	0.000E+00
0.000E+00					
69.960	3049.19	0.0030	0.0000	15.15	1.261E-09
1.594E-05					
77.164	2764.55	0.0030	0.0000	15.15	4.950E-09
5.670E-05					
85.759	2487.46	0.0030	0.0000	15.15	1.170E-08
1.190E-04					
96.044	2221.08	0.0030	0.0000	15.15	2.328E-08
2.074E-04					
108.247	1970.70	0.0030	0.0000	15.15	4.142E-08
3.180E-04					
122.709	1738.44	0.0030	0.0000	15.20	6.944E-08
4.539E-04					
139.694	1527.07	0.0030	0.0000	15.32	1.112E-07
6.109E-04					
159.565	1336.90	0.0031	0.0000	15.53	1.729E-07
7.914E-04					
182.532	1168.68	0.0031	0.0001	15.81	2.654E-07
1.010E-03					
208.902	1021.16	0.0032	0.0001	16.17	3.979E-07
1.252E-03					
238.815	893.25	0.0033	0.0001	16.61	5.862E-07
1.523E-03					
272.521	782.77	0.0034	0.0001	17.12	8.229E-07
1.778E-03					
310.033	688.06	0.0035	0.0001	17.68	1.101E-06
2.000E-03					
351.490	606.91	0.0036	0.0001	18.34	1.422E-06
2.190E-03					
396.761	537.66	0.0038	0.0001	19.05	1.775E-06
2.334E-03					
445.911	478.40	0.0039	0.0002	19.82	2.159E-06
2.444E-03					

498.639	427.81	0.0041	0.0001	20.55	2.556E-06
2.513E-03					
554.991	384.37	0.0042	0.0001	21.23	2.971E-06
2.564E-03					
614.708	347.03	0.0043	0.0001	21.85	3.381E-06
2.584E-03					
677.818	314.72	0.0044	0.0001	22.40	3.698E-06
2.522E-03					
743.978	286.73	0.0045	0.0001	22.90	3.948E-06
2.425E-03					
813.298	262.29	0.0046	0.0001	23.34	4.079E-06
2.284E-03					
885.475	240.91	0.0047	0.0001	23.77	4.173E-06
2.151E-03					
960.627	222.07	0.0048	0.0001	24.16	4.259E-06
2.040E-03					
1038.484	205.42	0.0048	0.0001	24.46	4.364E-06
1.960E-03					
1119.249	190.59	0.0049	0.0001	24.72	4.525E-06
1.916E-03					
1202.699	177.37	0.0049	0.0000	24.95	4.710E-06
1.886E-03					
1289.213	165.47	0.0050	0.0000	25.18	4.948E-06
1.873E-03					
1378.473	154.75	0.0050	0.0000	25.43	5.107E-06
1.827E-03					
1470.548	145.06	0.0051	0.0001	25.70	5.260E-06
1.781E-03					
1565.117	136.30	0.0051	0.0001	25.98	5.660E-06
1.807E-03					
1662.431	128.32	0.0052	0.0001	26.26	6.177E-06
1.859E-03					
1762.052	121.06	0.0052	0.0001	26.53	6.852E-06
1.941E-03					
1864.048	114.44	0.0053	0.0000	26.75	7.574E-06
2.026E-03					
1967.986	108.40	0.0053	0.0000	26.95	8.218E-06
2.074E-03					
2073.982	102.86	0.0054	0.0000	27.18	8.851E-06
2.122E-03					
2181.468	97.79	0.0054	0.0000	27.42	9.395E-06
2.145E-03					
2290.539	93.13	0.0055	0.0000	27.67	1.005E-05
2.195E-03					
2400.599	88.86	0.0055	0.0001	27.93	1.081E-05
2.265E-03					
2511.797	84.93	0.0056	0.0000	28.15	1.194E-05
2.394E-03					
2623.870	81.30	0.0056	0.0000	28.38	1.336E-05
2.565E-03					
2736.965	77.94	0.0056	0.0000	28.59	1.459E-05
2.683E-03					
2850.605	74.83	0.0057	0.0000	28.83	1.580E-05
2.790E-03					
2965.045	71.95	0.0057	0.0000	29.08	1.688E-05
2.860E-03					
3079.955	69.26	0.0058	0.0001	29.35	1.789E-05
2.912E-03					

3195.648	66.75	0.0059	0.0001	29.64	1.933E-05
3.025E-03					
3311.737	64.41	0.0059	0.0001	29.90	2.049E-05
3.081E-03					
3428.634	62.22	0.0060	0.0001	30.15	2.201E-05
3.187E-03					
3545.994	60.16	0.0060	0.0000	30.38	2.323E-05
3.243E-03					
3664.202	58.22	0.0060	0.0000	30.60	2.445E-05
3.299E-03					
3782.938	56.39	0.0061	0.0000	30.84	2.582E-05
3.384E-03					
3902.393	54.66	0.0061	0.0000	31.05	2.729E-05
3.489E-03					
4022.202	53.04	0.0062	0.0000	31.28	2.968E-05
3.706E-03					
4142.744	51.49	0.0062	0.0000	31.49	3.272E-05
3.992E-03					
4263.642	50.03	0.0063	0.0000	31.72	3.702E-05
4.412E-03					
4385.331	48.64	0.0063	0.0001	31.97	4.226E-05
4.913E-03					
4507.350	47.33	0.0064	0.0001	32.26	4.810E-05
5.455E-03					
4630.086	46.07	0.0064	0.0001	32.59	5.534E-05
6.109E-03					
4753.128	44.88	0.0065	0.0001	32.97	6.324E-05
6.795E-03					
4876.813	43.74	0.0066	0.0001	33.40	7.271E-05
7.597E-03					
5000.746	42.66	0.0067	0.0001	33.88	8.336E-05
8.469E-03					
5125.214	41.62	0.0068	0.0001	34.38	9.432E-05
9.320E-03					
5249.929	40.63	0.0069	0.0001	34.92	1.055E-04
1.014E-02					
5375.347	39.69	0.0070	0.0001	35.50	1.165E-04
1.090E-02					
5501.043	38.78	0.0071	0.0001	36.11	1.276E-04
1.163E-02					
5627.352	37.91	0.0073	0.0001	36.77	1.380E-04
1.227E-02					
5753.799	37.08	0.0074	0.0001	37.43	1.480E-04
1.284E-02					
5880.766	36.27	0.0075	0.0001	38.08	1.573E-04
1.332E-02					
6007.866	35.51	0.0077	0.0001	38.75	1.672E-04
1.384E-02					
6135.485	34.77	0.0078	0.0001	39.42	1.760E-04
1.425E-02					
6263.252	34.06	0.0079	0.0001	40.08	1.835E-04
1.453E-02					
6391.474	33.38	0.0080	0.0001	40.74	1.896E-04
1.470E-02					
6519.875	32.72	0.0082	0.0001	41.39	1.950E-04
1.481E-02					
6648.797	32.08	0.0083	0.0001	42.07	2.001E-04
1.489E-02					

6777.753	31.47	0.0084	0.0001	42.73	2.047E-04
1.493E-02					
6907.127	30.88	0.0086	0.0001	43.36	2.089E-04
1.494E-02					
7036.652	30.32	0.0087	0.0001	43.97	2.121E-04
1.488E-02					
7166.729	29.77	0.0088	0.0001	44.57	2.154E-04
1.483E-02					
7297.061	29.23	0.0089	0.0001	45.14	2.188E-04
1.479E-02					
7428.045	28.72	0.0090	0.0001	45.71	2.184E-04
1.449E-02					
7559.334	28.22	0.0091	0.0001	46.28	2.181E-04
1.422E-02					
7691.374	27.74	0.0092	0.0001	46.81	2.187E-04
1.401E-02					
7823.940	27.27	0.0094	0.0001	47.35	2.197E-04
1.383E-02					
7957.365	26.81	0.0095	0.0001	47.88	2.206E-04
1.366E-02					
8091.292	26.36	0.0095	0.0001	48.34	2.221E-04
1.353E-02					
8226.262	25.93	0.0096	0.0001	48.80	2.229E-04
1.336E-02					
8361.946	25.51	0.0097	0.0001	49.27	2.228E-04
1.314E-02					
8498.662	25.10	0.0098	0.0001	49.73	2.244E-04
1.302E-02					
8636.029	24.70	0.0099	0.0001	50.18	2.255E-04
1.289E-02					
8774.469	24.31	0.0100	0.0001	50.64	2.264E-04
1.275E-02					
8913.591	23.93	0.0101	0.0001	51.08	2.324E-04
1.289E-02					
9053.738	23.56	0.0102	0.0001	51.50	2.395E-04
1.308E-02					
9194.470	23.20	0.0103	0.0001	51.93	2.456E-04
1.322E-02					
9336.109	22.85	0.0103	0.0001	52.36	2.521E-04
1.337E-02					
9478.335	22.51	0.0104	0.0001	52.78	2.600E-04
1.359E-02					
9621.450	22.17	0.0105	0.0001	53.25	2.675E-04
1.378E-02					
9764.987	21.85	0.0106	0.0001	53.73	2.773E-04
1.408E-02					
9909.331	21.53	0.0107	0.0001	54.20	2.892E-04
1.447E-02					
10054.071	21.22	0.0108	0.0001	54.66	3.010E-04
1.484E-02					
10199.628	20.91	0.0109	0.0001	55.14	3.130E-04
1.520E-02					
10345.563	20.62	0.0110	0.0001	55.62	3.263E-04
1.562E-02					
10492.275	20.33	0.0111	0.0001	56.11	3.359E-04
1.585E-02					
10639.407	20.05	0.0112	0.0001	56.62	3.455E-04
1.608E-02					

10787.414	19.78	0.0113	0.0001	57.13	3.562E-04
1.634E-02					
10935.816	19.51	0.0114	0.0001	57.63	3.695E-04
1.672E-02					
11084.928	19.24	0.0115	0.0001	58.15	3.816E-04
1.704E-02					
11234.566	18.99	0.0116	0.0001	58.65	3.962E-04
1.746E-02					
11385.088	18.74	0.0117	0.0001	59.15	4.099E-04
1.782E-02					
11536.063	18.49	0.0118	0.0001	59.65	4.239E-04
1.820E-02					
11687.996	18.25	0.0119	0.0001	60.19	4.375E-04
1.854E-02					
11840.473	18.02	0.0120	0.0001	60.72	4.540E-04
1.899E-02					
11993.855	17.79	0.0121	0.0001	61.28	4.708E-04
1.945E-02					
12147.718	17.56	0.0122	0.0001	61.85	4.930E-04
2.012E-02					
12302.504	17.34	0.0123	0.0001	62.42	5.160E-04
2.079E-02					
12457.728	17.12	0.0124	0.0001	62.99	5.398E-04
2.147E-02					
12613.906	16.91	0.0126	0.0001	63.58	5.576E-04
2.189E-02					
12770.671	16.70	0.0127	0.0001	64.19	5.768E-04
2.236E-02					
12928.235	16.50	0.0128	0.0001	64.84	5.934E-04
2.271E-02					
13086.254	16.30	0.0129	0.0001	65.50	6.093E-04
2.302E-02					
13245.115	16.11	0.0131	0.0001	66.16	6.228E-04
2.323E-02					
13404.403	15.91	0.0132	0.0001	66.77	6.385E-04
2.352E-02					
13564.517	15.73	0.0133	0.0001	67.40	6.486E-04
2.359E-02					
13725.025	15.54	0.0134	0.0001	68.01	6.530E-04
2.345E-02					
13886.410	15.36	0.0135	0.0001	68.61	6.485E-04
2.300E-02					
14048.230	15.18	0.0137	0.0001	69.19	6.401E-04
2.242E-02					
14210.909	15.01	0.0138	0.0001	69.80	6.273E-04
2.171E-02					
14373.916	14.84	0.0139	0.0001	70.36	6.188E-04
2.115E-02					
14537.723	14.67	0.0140	0.0001	70.88	6.080E-04
2.054E-02					
14701.985	14.51	0.0141	0.0001	71.35	5.910E-04
1.973E-02					
14867.113	14.35	0.0142	0.0001	71.80	5.723E-04
1.889E-02					
15032.703	14.19	0.0143	0.0001	72.22	5.539E-04
1.807E-02					
15199.126	14.04	0.0143	0.0001	72.64	5.268E-04
1.700E-02					

15365.952	13.88	0.0144	0.0001	73.05	5.026E-04
1.605E-02					
15533.687	13.73	0.0145	0.0001	73.40	4.843E-04
1.530E-02					
15701.856	13.59	0.0146	0.0001	73.73	4.756E-04
1.488E-02					
15870.778	13.44	0.0146	0.0001	74.06	4.709E-04
1.460E-02					
16040.038	13.30	0.0147	0.0001	74.34	4.705E-04
1.445E-02					
16210.254	13.16	0.0147	0.0001	74.62	4.730E-04
1.440E-02					
16380.892	13.02	0.0148	0.0001	74.91	4.723E-04
1.425E-02					
16552.352	12.89	0.0149	0.0001	75.24	4.872E-04
1.457E-02					
16724.211	12.76	0.0149	0.0001	75.58	5.065E-04
1.500E-02					
16896.924	12.62	0.0150	0.0001	75.93	5.268E-04
1.546E-02					
17069.977	12.50	0.0151	0.0001	76.31	5.578E-04
1.620E-02					
17243.789	12.37	0.0151	0.0001	76.65	5.862E-04
1.684E-02					
17417.932	12.25	0.0152	0.0001	77.06	6.125E-04
1.740E-02					
17592.867	12.13	0.0153	0.0001	77.47	6.256E-04
1.757E-02					
17768.262	12.01	0.0154	0.0001	77.89	6.390E-04
1.776E-02					
17944.590	11.89	0.0155	0.0001	78.32	6.481E-04
1.781E-02					
18121.195	11.77	0.0155	0.0001	78.74	6.460E-04
1.756E-02					
18298.629	11.66	0.0156	0.0001	79.14	6.513E-04
1.751E-02					
18476.426	11.55	0.0157	0.0001	79.49	6.389E-04
1.699E-02					
18655.012	11.44	0.0158	0.0001	79.85	6.233E-04
1.640E-02					
18833.920	11.33	0.0158	0.0001	80.19	6.041E-04
1.574E-02					
19013.738	11.22	0.0159	0.0001	80.48	5.846E-04
1.509E-02					
19194.016	11.11	0.0160	0.0001	80.79	5.682E-04
1.454E-02					
19375.160	11.01	0.0160	0.0001	81.05	5.556E-04
1.410E-02					
19556.643	10.91	0.0161	0.0001	81.30	5.553E-04
1.398E-02					
19738.883	10.81	0.0161	0.0000	81.54	5.436E-04
1.357E-02					
19921.404	10.71	0.0162	0.0001	81.80	5.374E-04
1.330E-02					
20104.824	10.61	0.0162	0.0001	82.07	5.401E-04
1.325E-02					
20288.582	10.51	0.0163	0.0001	82.35	5.394E-04
1.312E-02					

20473.189	10.42	0.0163	0.0001	82.65	5.506E-04
1.328E-02					
20658.154	10.33	0.0164	0.0000	82.89	5.573E-04
1.331E-02					
20843.967	10.23	0.0164	0.0001	83.15	5.677E-04
1.343E-02					
21030.082	10.14	0.0165	0.0001	83.41	5.625E-04
1.317E-02					
21217.033	10.05	0.0165	0.0001	83.68	5.546E-04
1.286E-02					
21404.311	9.97	0.0166	0.0001	83.95	5.338E-04
1.225E-02					
21592.498	9.88	0.0166	0.0000	84.20	5.090E-04
1.157E-02					
21781.107	9.79	0.0167	0.0000	84.45	4.982E-04
1.122E-02					
21970.674	9.71	0.0167	0.0000	84.64	4.781E-04
1.066E-02					
22160.607	9.63	0.0168	0.0000	84.82	4.594E-04
1.015E-02					
22351.467	9.54	0.0168	0.0000	84.96	4.334E-04
9.494E-03					
22542.705	9.46	0.0168	0.0000	85.10	3.973E-04
8.628E-03					
22734.893	9.38	0.0168	0.0000	85.26	3.671E-04
7.904E-03					
22927.467	9.30	0.0169	0.0000	85.39	3.378E-04
7.221E-03					
23120.965	9.23	0.0169	0.0000	85.54	3.215E-04
6.822E-03					
23314.818	9.15	0.0169	0.0000	85.65	3.061E-04
6.447E-03					
23509.635	9.07	0.0169	0.0000	85.74	3.000E-04
6.265E-03					
23704.834	9.00	0.0169	0.0000	85.83	2.893E-04
5.990E-03					
23900.955	8.93	0.0170	0.0000	85.93	2.687E-04
5.518E-03					
24097.424	8.85	0.0170	0.0000	86.03	2.544E-04
5.178E-03					
24294.750	8.78	0.0170	0.0000	86.13	2.336E-04
4.718E-03					
24492.395	8.71	0.0170	0.0000	86.23	2.251E-04
4.512E-03					
24690.949	8.64	0.0170	0.0000	86.31	2.311E-04
4.601E-03					
24889.807	8.57	0.0171	0.0000	86.37	2.387E-04
4.721E-03					
25089.555	8.50	0.0171	0.0000	86.42	2.375E-04
4.664E-03					
25289.637	8.44	0.0171	0.0000	86.47	2.401E-04
4.686E-03					
25490.688	8.37	0.0171	0.0000	86.54	2.448E-04
4.749E-03					
25692.023	8.30	0.0171	0.0000	86.64	2.587E-04
4.994E-03					
25894.238	8.24	0.0171	0.0000	86.75	2.828E-04
5.426E-03					

26096.793	8.17	0.0171	0.0000	86.83	3.209E-04
6.116E-03					
26300.195	8.11	0.0172	0.0000	86.93	3.680E-04
6.961E-03					
26503.971	8.05	0.0172	0.0000	87.04	4.184E-04
7.846E-03					
26708.627	7.99	0.0172	0.0000	87.17	4.631E-04
8.611E-03					
26913.625	7.93	0.0172	0.0000	87.33	4.901E-04
9.036E-03					
27119.582	7.87	0.0173	0.0000	87.51	5.173E-04
9.455E-03					
27325.914	7.81	0.0173	0.0000	87.72	5.559E-04
1.007E-02					
27533.145	7.75	0.0174	0.0000	87.93	5.859E-04
1.052E-02					
27740.605	7.69	0.0174	0.0000	88.13	6.176E-04
1.098E-02					
27948.980	7.63	0.0174	0.0000	88.31	6.298E-04
1.110E-02					
28157.680	7.58	0.0175	0.0000	88.48	6.322E-04
1.104E-02					
28367.252	7.52	0.0175	0.0000	88.67	6.162E-04
1.067E-02					
28577.227	7.46	0.0175	0.0000	88.85	5.824E-04
9.999E-03					
28788.102	7.41	0.0176	0.0000	89.03	5.453E-04
9.282E-03					
28999.418	7.36	0.0176	0.0000	89.18	5.030E-04
8.488E-03					
29211.680	7.30	0.0176	0.0000	89.32	4.703E-04
7.867E-03					
29424.262	7.25	0.0177	0.0000	89.43	4.343E-04
7.204E-03					
29637.793	7.20	0.0177	0.0000	89.51	3.894E-04
6.408E-03					
29851.869	7.15	0.0177	0.0000	89.59	3.454E-04
5.638E-03					
30067.064	7.09	0.0177	0.0000	89.64	3.020E-04
4.902E-03					
30282.732	7.04	0.0177	0.0000	89.70	2.688E-04
4.339E-03					
30499.455	6.99	0.0177	0.0000	89.76	2.444E-04
3.929E-03					
30716.670	6.94	0.0177	0.0000	89.80	2.340E-04
3.749E-03					
30934.904	6.90	0.0177	0.0000	89.84	2.332E-04
3.720E-03					
31153.623	6.85	0.0178	0.0000	89.89	2.362E-04
3.748E-03					
31373.373	6.80	0.0178	0.0000	89.94	2.455E-04
3.870E-03					
31593.607	6.75	0.0178	0.0000	90.00	2.646E-04
4.150E-03					
31814.961	6.71	0.0178	0.0000	90.08	2.808E-04
4.376E-03					
32036.805	6.66	0.0178	0.0000	90.15	3.005E-04
4.647E-03					

32259.531	6.61	0.0178	0.0000	90.23	3.230E-04
4.953E-03					
32482.588	6.57	0.0178	0.0000	90.30	3.286E-04
4.995E-03					
32706.668	6.52	0.0179	0.0000	90.40	3.346E-04
5.040E-03					
32931.168	6.48	0.0179	0.0000	90.49	3.284E-04
4.902E-03					
33156.660	6.43	0.0179	0.0000	90.58	3.123E-04
4.620E-03					
33382.535	6.39	0.0179	0.0000	90.66	3.006E-04
4.410E-03					
33609.438	6.35	0.0179	0.0000	90.72	2.958E-04
4.309E-03					
33836.723	6.30	0.0179	0.0000	90.78	2.917E-04
4.222E-03					
34064.996	6.26	0.0179	0.0000	90.81	2.677E-04
3.850E-03					
34293.629	6.22	0.0179	0.0000	90.84	2.543E-04
3.640E-03					
34523.238	6.18	0.0179	0.0000	90.88	2.444E-04
3.484E-03					
34753.316	6.14	0.0180	0.0000	90.93	2.434E-04
3.460E-03					
34984.453	6.10	0.0180	0.0000	90.99	2.609E-04
3.693E-03					
35215.930	6.06	0.0180	0.0000	91.03	2.877E-04
4.057E-03					
35448.398	6.02	0.0180	0.0000	91.08	3.269E-04
4.581E-03					
35681.273	5.98	0.0180	0.0000	91.14	3.734E-04
5.196E-03					
35915.160	5.94	0.0180	0.0000	91.22	4.138E-04
5.717E-03					
36149.379	5.90	0.0180	0.0000	91.31	4.484E-04
6.153E-03					
36384.516	5.86	0.0181	0.0000	91.42	4.894E-04
6.671E-03					
36619.969	5.83	0.0181	0.0000	91.54	5.383E-04
7.280E-03					
36856.328	5.79	0.0181	0.0000	91.66	5.752E-04
7.717E-03					
37092.953	5.75	0.0181	0.0000	91.78	6.072E-04
8.081E-03					
37330.457	5.71	0.0181	0.0000	91.90	6.206E-04
8.194E-03					
37568.160	5.68	0.0182	0.0000	92.03	6.250E-04
8.187E-03					
37806.781	5.64	0.0182	0.0000	92.16	6.125E-04
7.962E-03					
38045.613	5.61	0.0182	0.0000	92.28	5.969E-04
7.704E-03					
38285.215	5.57	0.0182	0.0000	92.39	5.785E-04
7.415E-03					
38524.965	5.54	0.0183	0.0000	92.48	5.619E-04
7.154E-03					
38765.160	5.50	0.0183	0.0000	92.57	5.349E-04
6.763E-03					

39005.254	5.47	0.0183	0.0000	92.64	4.904E-04
6.160E-03					
39245.852	5.44	0.0183	0.0000	92.71	4.561E-04
5.696E-03					
39486.371	5.40	0.0183	0.0000	92.79	4.273E-04
5.307E-03					
39727.379	5.37	0.0183	0.0000	92.86	4.183E-04
5.177E-03					
39970.148	5.34	0.0183	0.0000	92.92	4.240E-04
5.227E-03					
40215.211	5.30	0.0184	0.0000	92.96	4.374E-04
5.370E-03					
40462.125	5.27	0.0184	0.0000	93.01	4.637E-04
5.666E-03					
40711.367	5.24	0.0184	0.0000	93.07	4.821E-04
5.859E-03					
40962.652	5.21	0.0184	0.0000	93.16	5.109E-04
6.177E-03					
41216.441	5.18	0.0184	0.0000	93.26	5.346E-04
6.425E-03					
41473.027	5.14	0.0184	0.0000	93.37	5.648E-04
6.742E-03					
41732.746	5.11	0.0185	0.0000	93.48	6.101E-04
7.227E-03					
41995.234	5.08	0.0185	0.0000	93.59	6.400E-04
7.523E-03					
42260.816	5.05	0.0185	0.0000	93.71	6.693E-04
7.806E-03					
42529.262	5.02	0.0185	0.0000	93.83	6.610E-04
7.647E-03					
42797.148	4.98	0.0186	0.0000	93.93	6.427E-04
7.377E-03					
43064.484	4.95	0.0186	0.0000	94.05	6.136E-04
6.989E-03					
43331.184	4.92	0.0186	0.0000	94.15	5.676E-04
6.414E-03					
43597.312	4.89	0.0186	0.0000	94.25	5.280E-04
5.920E-03					
43862.680	4.86	0.0186	0.0000	94.31	4.666E-04
5.190E-03					
44127.402	4.83	0.0186	0.0000	94.37	4.098E-04
4.523E-03					
44391.000	4.81	0.0186	0.0000	94.42	3.552E-04
3.891E-03					
44653.617	4.78	0.0187	0.0000	94.44	2.902E-04
3.156E-03					
44915.090	4.75	0.0187	0.0000	94.47	2.306E-04
2.490E-03					
45175.641	4.72	0.0187	0.0000	94.48	1.700E-04
1.824E-03					
45435.027	4.70	0.0187	0.0000	94.49	1.344E-04
1.434E-03					
45695.266	4.67	0.0187	0.0000	94.50	1.089E-04
1.160E-03					
45956.008	4.64	0.0187	0.0000	94.51	9.859E-05
1.053E-03					
46217.609	4.62	0.0187	0.0000	94.51	1.073E-04
1.149E-03					

46479.684	4.59	0.0187	0.0000	94.51	1.180E-04
1.265E-03					
46742.641	4.56	0.0187	0.0000	94.52	1.546E-04
1.653E-03					
47006.027	4.54	0.0187	0.0000	94.53	1.919E-04
2.041E-03					
47270.285	4.51	0.0187	0.0000	94.56	2.458E-04
2.599E-03					
47535.008	4.49	0.0187	0.0000	94.60	3.137E-04
3.295E-03					
47800.684	4.46	0.0187	0.0000	94.65	3.885E-04
4.051E-03					
48066.766	4.44	0.0187	0.0000	94.71	4.732E-04
4.897E-03					
48333.734	4.41	0.0187	0.0000	94.77	5.547E-04
5.700E-03					
48601.184	4.39	0.0187	0.0000	94.85	6.408E-04
6.540E-03					
48869.535	4.37	0.0188	0.0000	94.95	7.188E-04
7.288E-03					
49140.766	4.34	0.0188	0.0000	95.05	7.844E-04
7.901E-03					
49415.066	4.32	0.0188	0.0000	95.17	8.552E-04
8.558E-03					
49692.336	4.29	0.0188	0.0000	95.28	8.956E-04
8.902E-03					
49975.129	4.27	0.0188	0.0000	95.42	9.493E-04
9.376E-03					
50265.434	4.24	0.0189	0.0000	95.55	9.718E-04
9.535E-03					
50565.859	4.22	0.0189	0.0000	95.68	9.794E-04
9.546E-03					
50878.371	4.19	0.0189	0.0000	95.83	9.774E-04
9.461E-03					
51205.711	4.17	0.0189	0.0000	95.95	9.598E-04
9.224E-03					
51549.816	4.14	0.0190	0.0000	96.10	9.466E-04
9.034E-03					
51913.410	4.11	0.0190	0.0000	96.24	9.137E-04
8.656E-03					
52298.535	4.08	0.0190	0.0000	96.37	8.730E-04
8.206E-03					
52703.199	4.05	0.0191	0.0000	96.50	8.565E-04
7.994E-03					
53129.949	4.02	0.0191	0.0000	96.62	8.880E-04
8.256E-03					
53580.941	3.98	0.0191	0.0000	96.75	9.451E-04
8.739E-03					
54053.988	3.95	0.0191	0.0000	96.88	9.753E-04
8.963E-03					
54547.023	3.91	0.0192	0.0000	96.99	1.004E-03
9.153E-03					
55057.434	3.87	0.0192	0.0000	97.14	1.087E-03
9.827E-03					
55583.227	3.84	0.0192	0.0001	97.43	1.229E-03
1.103E-02					
56122.250	3.80	0.0193	0.0001	97.73	1.534E-03
1.370E-02					

56693.699	3.76	0.0194	0.0001	98.01	1.533E-03
1.349E-02					
57247.891	3.73	0.0194	0.0000	98.25	1.642E-03
1.420E-02					
57822.160	3.69	0.0195	0.0001	98.59	1.783E-03
1.515E-02					
58407.363	3.65	0.0196	0.0001	99.05	1.927E-03
1.609E-02					
59012.582	3.61	0.0197	0.0002	99.86	2.001E-03
1.645E-02					
59746.609	3.57	0.0197	0.0000	100.00	2.084E-03
1.682E-02					

Report date: 09/21/2020
08/29/2019

Analysis date:

QUANTACHROME CORPORATION
QUANTACHROME POREMASTER FOR WINDOWS« DATA REPORT
VERSION 8.1

SAMPLE ID EMP LK2.2 solid FILE NAME **SCC**
 SAMPLE WEIGHT 0.8179 grams BULK SAMPLE VOLUME 0.3662 cc
 SAMPLE DESCRIPTION solid
 BLANK CELL FILE C:\QCdata\PoroData\BLANKHP.PRM
 COMMENTS
 HG SURFACE TENSION 480.00 erg/cm HG CONTACT ANGLE
 (I)140.00, (E)140.00
 MINIMUM DELTA VOL. 0.000 % FS MOVING POINT AVG. 11 (Scan
 Mode)
 OPERATOR AS Mercury volume normalized by
 sample weight.

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing every data point.

Pressure -dV/d(log d) [PSI] [cc/g]	Pore Diameter [nm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv(d) [cc/(nm-g)]
20.274	10521.74	0.0046	0.0046	10.50	6.946E-08
1.738E-03					
20.979	10168.60	0.0047	0.0001	10.76	6.696E-08
1.641E-03					
21.707	9827.20	0.0047	0.0000	10.82	6.273E-08
1.436E-03					
22.439	9506.87	0.0047	0.0000	10.84	5.964E-08
1.276E-03					
23.222	9186.09	0.0047	0.0000	10.85	5.742E-08
1.149E-03					
24.060	8866.44	0.0047	0.0000	10.86	5.597E-08
1.044E-03					
24.884	8572.72	0.0048	0.0000	10.89	5.998E-08
1.044E-03					
25.745	8286.10	0.0048	0.0000	10.89	2.024E-08
3.494E-04					
26.654	8003.37	0.0048	0.0000	10.89	1.258E-08
2.105E-04					
27.620	7723.53	0.0048	0.0000	10.89	9.330E-09
1.492E-04					
28.659	7443.39	0.0048	0.0000	10.89	7.708E-09
1.163E-04					
29.780	7163.35	0.0048	0.0000	10.89	6.819E-09
9.600E-05					
30.983	6885.06	0.0048	0.0000	10.89	0.000E+00
0.000E+00					
32.273	6609.84	0.0048	0.0000	10.89	0.000E+00
0.000E+00					
33.673	6335.03	0.0048	0.0000	10.89	0.000E+00
0.000E+00					

35.209	6058.76	0.0048	0.0000	10.89	0.000E+00
0.000E+00					
36.919	5778.09	0.0048	0.0000	10.89	0.000E+00
0.000E+00					
38.819	5495.32	0.0048	0.0000	10.89	0.000E+00
0.000E+00					
40.944	5210.04	0.0048	0.0000	10.89	0.000E+00
0.000E+00					
43.352	4920.67	0.0048	0.0000	10.89	0.000E+00
0.000E+00					
46.084	4629.03	0.0048	0.0000	10.89	0.000E+00
0.000E+00					
49.223	4333.76	0.0048	0.0000	10.89	0.000E+00
0.000E+00					
52.878	4034.21	0.0048	0.0000	10.89	0.000E+00
0.000E+00					
57.189	3730.14	0.0048	0.0000	10.89	1.087E-10
1.582E-06					
62.326	3422.67	0.0048	0.0000	10.89	1.404E-09
1.936E-05					
68.451	3116.41	0.0048	0.0000	10.89	5.468E-09
6.941E-05					
75.789	2814.69	0.0048	0.0000	10.89	1.240E-08
1.408E-04					
84.577	2522.22	0.0048	0.0000	10.89	2.309E-08
2.299E-04					
95.136	2242.29	0.0048	0.0000	10.90	3.922E-08
3.373E-04					
107.731	1980.14	0.0048	0.0000	10.92	6.359E-08
4.662E-04					
122.705	1738.50	0.0048	0.0000	10.99	9.991E-08
6.166E-04					
140.351	1519.92	0.0048	0.0000	11.10	1.539E-07
7.917E-04					
161.000	1324.98	0.0049	0.0001	11.23	2.333E-07
9.938E-04					
184.913	1153.64	0.0050	0.0001	11.39	3.483E-07
1.221E-03					
212.366	1004.50	0.0051	0.0001	11.59	5.109E-07
1.472E-03					
243.524	875.98	0.0052	0.0001	11.81	7.186E-07
1.718E-03					
278.605	765.68	0.0053	0.0001	12.07	9.526E-07
1.915E-03					
317.642	671.58	0.0054	0.0001	12.36	1.227E-06
2.091E-03					
360.727	591.37	0.0055	0.0001	12.68	1.548E-06
2.257E-03					
407.756	523.16	0.0057	0.0001	13.01	1.922E-06
2.419E-03					
458.751	465.01	0.0058	0.0001	13.35	2.331E-06
2.551E-03					
513.480	415.44	0.0060	0.0001	13.66	2.777E-06
2.669E-03					
571.941	372.98	0.0061	0.0001	13.95	3.239E-06
2.758E-03					
633.868	336.54	0.0062	0.0001	14.24	3.689E-06
2.805E-03					

699.204	305.09	0.0063	0.0001	14.53	4.115E-06
2.821E-03					
767.681	277.88	0.0065	0.0001	14.79	4.497E-06
2.808E-03					
839.266	254.18	0.0066	0.0001	15.05	4.867E-06
2.790E-03					
913.760	233.46	0.0067	0.0001	15.30	5.331E-06
2.817E-03					
991.233	215.21	0.0068	0.0001	15.52	5.829E-06
2.851E-03					
1071.511	199.09	0.0069	0.0001	15.73	6.304E-06
2.858E-03					
1154.655	184.75	0.0070	0.0001	15.92	6.729E-06
2.840E-03					
1240.480	171.97	0.0070	0.0001	16.12	7.237E-06
2.856E-03					
1329.180	160.49	0.0071	0.0001	16.32	7.712E-06
2.853E-03					
1420.468	150.18	0.0072	0.0001	16.53	8.265E-06
2.876E-03					
1514.456	140.86	0.0073	0.0001	16.71	9.016E-06
2.962E-03					
1610.923	132.42	0.0074	0.0001	16.88	9.958E-06
3.098E-03					
1709.920	124.76	0.0075	0.0001	17.06	1.116E-05
3.295E-03					
1811.182	117.78	0.0075	0.0001	17.23	1.253E-05
3.515E-03					
1914.668	111.41	0.0076	0.0001	17.40	1.394E-05
3.721E-03					
2019.970	105.61	0.0077	0.0001	17.60	1.555E-05
3.956E-03					
2127.027	100.29	0.0078	0.0001	17.81	1.773E-05
4.300E-03					
2235.520	95.42	0.0079	0.0001	18.05	2.047E-05
4.727E-03					
2345.498	90.95	0.0080	0.0001	18.30	2.350E-05
5.176E-03					
2456.490	86.84	0.0081	0.0001	18.54	2.735E-05
5.743E-03					
2568.620	83.05	0.0082	0.0001	18.79	3.167E-05
6.345E-03					
2681.576	79.55	0.0083	0.0001	19.08	3.646E-05
6.985E-03					
2795.380	76.31	0.0085	0.0001	19.38	4.180E-05
7.672E-03					
2909.836	73.31	0.0086	0.0001	19.70	4.768E-05
8.405E-03					
3025.052	70.52	0.0088	0.0002	20.05	5.439E-05
9.215E-03					
3140.802	67.92	0.0089	0.0002	20.42	6.241E-05
1.017E-02					
3257.321	65.49	0.0091	0.0002	20.81	7.169E-05
1.125E-02					
3374.399	63.22	0.0093	0.0002	21.22	8.167E-05
1.236E-02					
3492.163	61.09	0.0095	0.0002	21.66	9.259E-05
1.352E-02					

3610.388	59.09	0.0097	0.0002	22.12	1.049E-04
1.479E-02					
3729.306	57.20	0.0099	0.0002	22.63	1.181E-04
1.611E-02					
3848.670	55.43	0.0101	0.0002	23.18	1.329E-04
1.754E-02					
3968.659	53.75	0.0104	0.0003	23.76	1.485E-04
1.896E-02					
4089.087	52.17	0.0106	0.0003	24.36	1.647E-04
2.037E-02					
4210.092	50.67	0.0109	0.0003	25.00	1.812E-04
2.170E-02					
4331.410	49.25	0.0112	0.0003	25.66	1.984E-04
2.303E-02					
4453.255	47.90	0.0115	0.0003	26.37	2.154E-04
2.425E-02					
4575.299	46.62	0.0118	0.0003	27.07	2.314E-04
2.530E-02					
4697.838	45.41	0.0121	0.0003	27.79	2.473E-04
2.627E-02					
4820.731	44.25	0.0125	0.0003	28.50	2.630E-04
2.717E-02					
4944.062	43.15	0.0128	0.0003	29.21	2.782E-04
2.798E-02					
5067.689	42.09	0.0131	0.0003	29.93	2.924E-04
2.866E-02					
5191.811	41.09	0.0134	0.0003	30.63	3.049E-04
2.915E-02					
5316.246	40.13	0.0137	0.0003	31.33	3.179E-04
2.967E-02					
5441.184	39.21	0.0140	0.0003	32.02	3.307E-04
3.015E-02					
5566.412	38.32	0.0143	0.0003	32.72	3.448E-04
3.073E-02					
5692.142	37.48	0.0146	0.0003	33.41	3.579E-04
3.120E-02					
5818.144	36.66	0.0149	0.0003	34.09	3.708E-04
3.162E-02					
5944.757	35.88	0.0152	0.0003	34.77	3.848E-04
3.211E-02					
6071.609	35.13	0.0155	0.0003	35.45	3.992E-04
3.261E-02					
6198.898	34.41	0.0158	0.0003	36.15	4.128E-04
3.301E-02					
6326.542	33.72	0.0161	0.0003	36.84	4.254E-04
3.332E-02					
6454.655	33.05	0.0164	0.0003	37.51	4.374E-04
3.356E-02					
6583.066	32.40	0.0167	0.0003	38.19	4.495E-04
3.378E-02					
6711.914	31.78	0.0170	0.0003	38.86	4.598E-04
3.386E-02					
6841.066	31.18	0.0173	0.0003	39.52	4.687E-04
3.383E-02					
6970.656	30.60	0.0175	0.0003	40.16	4.752E-04
3.365E-02					
7100.568	30.04	0.0178	0.0003	40.77	4.814E-04
3.345E-02					

7231.033	29.50	0.0181	0.0003	41.38	4.875E-04
3.325E-02					
7361.884	28.98	0.0183	0.0003	41.97	4.922E-04
3.297E-02					
7493.413	28.47	0.0186	0.0002	42.53	4.950E-04
3.258E-02					
7625.419	27.98	0.0188	0.0002	43.09	4.985E-04
3.224E-02					
7758.118	27.50	0.0191	0.0002	43.63	5.026E-04
3.196E-02					
7891.436	27.03	0.0193	0.0002	44.16	5.079E-04
3.176E-02					
8025.496	26.58	0.0195	0.0002	44.69	5.133E-04
3.158E-02					
8160.183	26.14	0.0197	0.0002	45.20	5.207E-04
3.153E-02					
8295.687	25.71	0.0200	0.0002	45.70	5.294E-04
3.154E-02					
8431.981	25.30	0.0202	0.0002	46.21	5.385E-04
3.157E-02					
8569.258	24.89	0.0204	0.0002	46.71	5.486E-04
3.165E-02					
8707.285	24.50	0.0206	0.0002	47.21	5.593E-04
3.177E-02					
8846.145	24.11	0.0209	0.0002	47.72	5.709E-04
3.192E-02					
8985.706	23.74	0.0211	0.0002	48.23	5.855E-04
3.223E-02					
9126.134	23.37	0.0213	0.0002	48.72	6.010E-04
3.258E-02					
9267.203	23.02	0.0215	0.0002	49.22	6.180E-04
3.300E-02					
9409.066	22.67	0.0217	0.0002	49.71	6.347E-04
3.339E-02					
9551.603	22.33	0.0219	0.0002	50.21	6.523E-04
3.380E-02					
9695.008	22.00	0.0222	0.0002	50.71	6.685E-04
3.412E-02					
9838.965	21.68	0.0224	0.0002	51.22	6.854E-04
3.447E-02					
9983.631	21.37	0.0226	0.0002	51.74	7.050E-04
3.494E-02					
10128.824	21.06	0.0228	0.0002	52.26	7.254E-04
3.543E-02					
10274.761	20.76	0.0231	0.0002	52.77	7.466E-04
3.595E-02					
10421.315	20.47	0.0233	0.0002	53.27	7.674E-04
3.642E-02					
10568.629	20.18	0.0235	0.0002	53.78	7.855E-04
3.675E-02					
10716.562	19.91	0.0237	0.0002	54.29	8.006E-04
3.692E-02					
10865.301	19.63	0.0240	0.0002	54.81	8.110E-04
3.687E-02					
11014.595	19.37	0.0242	0.0002	55.34	8.214E-04
3.682E-02					
11164.696	19.11	0.0244	0.0002	55.85	8.295E-04
3.666E-02					

11315.366	18.85	0.0246	0.0002	56.35	8.380E-04
3.652E-02					
11466.926	18.60	0.0248	0.0002	56.84	8.430E-04
3.623E-02					
11619.081	18.36	0.0250	0.0002	57.30	8.435E-04
3.576E-02					
11771.986	18.12	0.0252	0.0002	57.76	8.393E-04
3.510E-02					
11925.494	17.89	0.0254	0.0002	58.20	8.284E-04
3.418E-02					
12079.777	17.66	0.0256	0.0002	58.64	8.161E-04
3.323E-02					
12234.660	17.44	0.0258	0.0002	59.06	8.026E-04
3.226E-02					
12390.345	17.22	0.0260	0.0002	59.46	7.902E-04
3.136E-02					
12546.541	17.00	0.0261	0.0002	59.84	7.823E-04
3.066E-02					
12703.537	16.79	0.0263	0.0002	60.19	7.710E-04
2.985E-02					
12861.003	16.59	0.0265	0.0001	60.53	7.612E-04
2.911E-02					
13019.244	16.39	0.0266	0.0001	60.86	7.465E-04
2.821E-02					
13177.988	16.19	0.0267	0.0001	61.19	7.349E-04
2.745E-02					
13337.493	15.99	0.0269	0.0001	61.51	7.230E-04
2.668E-02					
13497.563	15.80	0.0270	0.0001	61.83	7.139E-04
2.605E-02					
13658.412	15.62	0.0271	0.0001	62.13	7.095E-04
2.558E-02					
13819.804	15.44	0.0273	0.0001	62.42	7.054E-04
2.513E-02					
13981.937	15.26	0.0274	0.0001	62.71	7.020E-04
2.472E-02					
14144.500	15.08	0.0275	0.0001	62.98	6.962E-04
2.423E-02					
14307.869	14.91	0.0276	0.0001	63.25	6.847E-04
2.355E-02					
14471.777	14.74	0.0278	0.0001	63.51	6.759E-04
2.298E-02					
14636.493	14.57	0.0279	0.0001	63.77	6.646E-04
2.234E-02					
14801.688	14.41	0.0280	0.0001	64.02	6.600E-04
2.194E-02					
14967.597	14.25	0.0281	0.0001	64.26	6.508E-04
2.139E-02					
15134.078	14.10	0.0282	0.0001	64.48	6.463E-04
2.101E-02					
15301.293	13.94	0.0283	0.0001	64.70	6.399E-04
2.058E-02					
15469.010	13.79	0.0284	0.0001	64.90	6.367E-04
2.027E-02					
15637.446	13.64	0.0285	0.0001	65.12	6.334E-04
1.996E-02					
15806.332	13.50	0.0285	0.0001	65.32	6.331E-04
1.975E-02					

15976.021	13.35	0.0286	0.0001	65.53	6.378E-04
1.970E-02					
16146.156	13.21	0.0287	0.0001	65.72	6.497E-04
1.987E-02					
16316.947	13.07	0.0288	0.0001	65.93	6.645E-04
2.012E-02					
16488.131	12.94	0.0289	0.0001	66.13	6.848E-04
2.053E-02					
16659.963	12.80	0.0290	0.0001	66.34	7.056E-04
2.095E-02					
16832.289	12.67	0.0291	0.0001	66.56	7.339E-04
2.158E-02					
17005.252	12.54	0.0292	0.0001	66.78	7.614E-04
2.216E-02					
17178.588	12.42	0.0293	0.0001	67.01	7.979E-04
2.300E-02					
17352.514	12.29	0.0294	0.0001	67.24	8.316E-04
2.373E-02					
17526.836	12.17	0.0295	0.0001	67.49	8.694E-04
2.456E-02					
17701.863	12.05	0.0296	0.0001	67.74	9.043E-04
2.528E-02					
17877.258	11.93	0.0297	0.0001	68.00	9.398E-04
2.600E-02					
18053.371	11.82	0.0298	0.0001	68.27	9.731E-04
2.665E-02					
18229.979	11.70	0.0299	0.0001	68.54	1.005E-03
2.724E-02					
18407.352	11.59	0.0301	0.0001	68.81	1.035E-03
2.777E-02					
18585.256	11.48	0.0302	0.0001	69.08	1.058E-03
2.809E-02					
18763.875	11.37	0.0303	0.0001	69.36	1.077E-03
2.831E-02					
18942.982	11.26	0.0304	0.0001	69.63	1.094E-03
2.849E-02					
19122.939	11.16	0.0305	0.0001	69.91	1.100E-03
2.837E-02					
19303.465	11.05	0.0307	0.0001	70.18	1.106E-03
2.824E-02					
19484.822	10.95	0.0308	0.0001	70.44	1.109E-03
2.804E-02					
19666.717	10.85	0.0309	0.0001	70.70	1.118E-03
2.802E-02					
19849.420	10.75	0.0310	0.0001	70.96	1.123E-03
2.788E-02					
20032.602	10.65	0.0311	0.0001	71.20	1.126E-03
2.770E-02					
20216.557	10.55	0.0312	0.0001	71.44	1.124E-03
2.740E-02					
20401.051	10.46	0.0313	0.0001	71.68	1.118E-03
2.701E-02					
20586.342	10.36	0.0314	0.0001	71.93	1.121E-03
2.684E-02					
20772.139	10.27	0.0315	0.0001	72.18	1.120E-03
2.658E-02					
20958.682	10.18	0.0316	0.0001	72.42	1.122E-03
2.637E-02					

21145.674	10.09	0.0317	0.0001	72.65	1.124E-03
2.620E-02					
21333.326	10.00	0.0318	0.0001	72.87	1.127E-03
2.603E-02					
21521.373	9.91	0.0319	0.0001	73.10	1.131E-03
2.588E-02					
21710.096	9.83	0.0320	0.0001	73.31	1.122E-03
2.546E-02					
21899.273	9.74	0.0321	0.0001	73.54	1.117E-03
2.512E-02					
22089.166	9.66	0.0322	0.0001	73.75	1.115E-03
2.487E-02					
22279.432	9.57	0.0323	0.0001	73.96	1.119E-03
2.474E-02					
22470.342	9.49	0.0324	0.0001	74.17	1.128E-03
2.474E-02					
22661.615	9.41	0.0325	0.0001	74.37	1.134E-03
2.466E-02					
22853.578	9.33	0.0326	0.0001	74.56	1.143E-03
2.465E-02					
23045.980	9.26	0.0327	0.0001	74.77	1.148E-03
2.456E-02					
23239.123	9.18	0.0328	0.0001	74.97	1.161E-03
2.463E-02					
23432.820	9.10	0.0328	0.0001	75.18	1.175E-03
2.473E-02					
23627.314	9.03	0.0329	0.0001	75.38	1.189E-03
2.482E-02					
23822.330	8.95	0.0330	0.0001	75.59	1.209E-03
2.504E-02					
24018.148	8.88	0.0331	0.0001	75.79	1.232E-03
2.531E-02					
24214.475	8.81	0.0332	0.0001	76.00	1.256E-03
2.559E-02					
24411.676	8.74	0.0333	0.0001	76.21	1.280E-03
2.586E-02					
24609.467	8.67	0.0334	0.0001	76.41	1.306E-03
2.618E-02					
24808.068	8.60	0.0335	0.0001	76.62	1.331E-03
2.647E-02					
25007.217	8.53	0.0336	0.0001	76.83	1.370E-03
2.704E-02					
25207.213	8.46	0.0337	0.0001	77.04	1.407E-03
2.756E-02					
25407.693	8.40	0.0338	0.0001	77.26	1.445E-03
2.808E-02					
25608.963	8.33	0.0339	0.0001	77.49	1.481E-03
2.856E-02					
25810.742	8.26	0.0340	0.0001	77.71	1.525E-03
2.917E-02					
26013.281	8.20	0.0341	0.0001	77.95	1.565E-03
2.970E-02					
26216.270	8.14	0.0342	0.0001	78.19	1.600E-03
3.012E-02					
26420.076	8.07	0.0343	0.0001	78.43	1.624E-03
3.032E-02					
26624.346	8.01	0.0344	0.0001	78.67	1.645E-03
3.045E-02					

26829.367	7.95	0.0345	0.0001	78.91	1.655E-03
3.040E-02					
27034.906	7.89	0.0346	0.0001	79.15	1.667E-03
3.036E-02					
27241.180	7.83	0.0347	0.0001	79.39	1.649E-03
2.979E-02					
27447.932	7.77	0.0348	0.0001	79.61	1.641E-03
2.941E-02					
27655.500	7.71	0.0349	0.0001	79.83	1.628E-03
2.896E-02					
27863.486	7.66	0.0350	0.0001	80.04	1.617E-03
2.854E-02					
28072.227	7.60	0.0351	0.0001	80.24	1.592E-03
2.789E-02					
28281.455	7.54	0.0351	0.0001	80.43	1.572E-03
2.736E-02					
28491.457	7.49	0.0352	0.0001	80.62	1.555E-03
2.687E-02					
28701.877	7.43	0.0353	0.0001	80.81	1.556E-03
2.670E-02					
28913.092	7.38	0.0354	0.0001	81.01	1.557E-03
2.653E-02					
29124.732	7.32	0.0355	0.0001	81.19	1.562E-03
2.643E-02					
29337.193	7.27	0.0356	0.0001	81.38	1.565E-03
2.630E-02					
29550.201	7.22	0.0356	0.0001	81.56	1.582E-03
2.638E-02					
29763.982	7.17	0.0357	0.0001	81.76	1.595E-03
2.642E-02					
29978.213	7.12	0.0358	0.0001	81.95	1.597E-03
2.624E-02					
30193.404	7.07	0.0359	0.0001	82.15	1.595E-03
2.603E-02					
30409.119	7.02	0.0360	0.0001	82.33	1.598E-03
2.588E-02					
30625.719	6.97	0.0361	0.0001	82.52	1.595E-03
2.563E-02					
30842.887	6.92	0.0361	0.0001	82.70	1.581E-03
2.522E-02					
31060.988	6.87	0.0362	0.0001	82.88	1.542E-03
2.440E-02					
31279.600	6.82	0.0363	0.0001	83.04	1.496E-03
2.350E-02					
31499.193	6.77	0.0364	0.0001	83.21	1.449E-03
2.259E-02					
31719.330	6.73	0.0364	0.0001	83.37	1.400E-03
2.167E-02					
31940.342	6.68	0.0365	0.0001	83.51	1.360E-03
2.091E-02					
32161.967	6.63	0.0365	0.0001	83.64	1.313E-03
2.005E-02					
32384.643	6.59	0.0366	0.0001	83.76	1.283E-03
1.946E-02					
32607.820	6.54	0.0366	0.0001	83.88	1.254E-03
1.891E-02					
32831.957	6.50	0.0367	0.0000	83.99	1.240E-03
1.859E-02					

33056.684	6.45	0.0368	0.0001	84.11	1.234E-03
1.840E-02					
33282.320	6.41	0.0368	0.0001	84.22	1.253E-03
1.857E-02					
33508.512	6.37	0.0369	0.0001	84.34	1.305E-03
1.924E-02					
33735.699	6.32	0.0369	0.0001	84.47	1.376E-03
2.017E-02					
33963.449	6.28	0.0370	0.0001	84.60	1.459E-03
2.124E-02					
34192.062	6.24	0.0370	0.0001	84.74	1.549E-03
2.241E-02					
34421.266	6.20	0.0371	0.0001	84.89	1.637E-03
2.353E-02					
34651.363	6.16	0.0372	0.0001	85.07	1.723E-03
2.459E-02					
34881.797	6.12	0.0372	0.0001	85.25	1.806E-03
2.558E-02					
35113.086	6.08	0.0373	0.0001	85.44	1.881E-03
2.645E-02					
35344.840	6.04	0.0374	0.0001	85.63	1.939E-03
2.706E-02					
35577.449	6.00	0.0375	0.0001	85.82	1.980E-03
2.742E-02					
35810.594	5.96	0.0376	0.0001	86.01	2.000E-03
2.750E-02					
36044.543	5.92	0.0377	0.0001	86.20	1.991E-03
2.717E-02					
36278.941	5.88	0.0377	0.0001	86.37	1.965E-03
2.663E-02					
36514.090	5.84	0.0378	0.0001	86.55	1.922E-03
2.587E-02					
36749.750	5.80	0.0379	0.0001	86.71	1.871E-03
2.502E-02					
36986.160	5.77	0.0380	0.0001	86.86	1.807E-03
2.400E-02					
37222.961	5.73	0.0380	0.0001	87.00	1.756E-03
2.317E-02					
37460.668	5.69	0.0381	0.0001	87.14	1.706E-03
2.237E-02					
37698.777	5.66	0.0381	0.0001	87.27	1.669E-03
2.177E-02					
37937.617	5.62	0.0382	0.0001	87.39	1.635E-03
2.121E-02					
38178.672	5.59	0.0382	0.0001	87.51	1.615E-03
2.083E-02					
38422.035	5.55	0.0383	0.0001	87.63	1.597E-03
2.047E-02					
38667.609	5.52	0.0383	0.0001	87.76	1.589E-03
2.024E-02					
38917.297	5.48	0.0384	0.0001	87.89	1.589E-03
2.013E-02					
39170.898	5.45	0.0385	0.0001	88.03	1.596E-03
2.009E-02					
39428.723	5.41	0.0385	0.0001	88.16	1.614E-03
2.018E-02					
39690.480	5.37	0.0386	0.0001	88.29	1.637E-03
2.032E-02					

39956.578	5.34	0.0386	0.0001	88.43	1.650E-03
2.035E-02					
40226.609	5.30	0.0387	0.0001	88.56	1.651E-03
2.022E-02					
40501.066	5.27	0.0388	0.0001	88.70	1.637E-03
1.990E-02					
40779.598	5.23	0.0388	0.0001	88.84	1.630E-03
1.968E-02					
41058.891	5.20	0.0389	0.0001	88.98	1.617E-03
1.938E-02					
41339.012	5.16	0.0389	0.0001	89.11	1.613E-03
1.920E-02					
41620.074	5.13	0.0390	0.0001	89.24	1.610E-03
1.903E-02					
41898.484	5.09	0.0390	0.0001	89.35	1.593E-03
1.870E-02					
42174.449	5.06	0.0391	0.0001	89.47	1.574E-03
1.835E-02					
42447.555	5.03	0.0391	0.0000	89.58	1.540E-03
1.783E-02					
42718.137	4.99	0.0392	0.0000	89.70	1.510E-03
1.738E-02					
42985.781	4.96	0.0392	0.0000	89.81	1.486E-03
1.700E-02					
43250.887	4.93	0.0393	0.0000	89.91	1.473E-03
1.675E-02					
43513.066	4.90	0.0393	0.0000	90.01	1.480E-03
1.673E-02					
43772.734	4.87	0.0394	0.0000	90.10	1.488E-03
1.673E-02					
44031.273	4.84	0.0394	0.0000	90.19	1.509E-03
1.688E-02					
44288.867	4.82	0.0394	0.0000	90.28	1.530E-03
1.703E-02					
44545.191	4.79	0.0395	0.0000	90.37	1.560E-03
1.728E-02					
44802.273	4.76	0.0395	0.0000	90.47	1.623E-03
1.789E-02					
45059.836	4.73	0.0396	0.0000	90.57	1.708E-03
1.872E-02					
45318.395	4.71	0.0396	0.0000	90.68	1.813E-03
1.976E-02					
45577.547	4.68	0.0397	0.0000	90.79	1.938E-03
2.102E-02					
45837.688	4.65	0.0397	0.0001	90.91	2.076E-03
2.238E-02					
46098.445	4.63	0.0398	0.0001	91.04	2.227E-03
2.388E-02					
46360.141	4.60	0.0398	0.0001	91.19	2.375E-03
2.532E-02					
46622.391	4.58	0.0399	0.0001	91.34	2.531E-03
2.683E-02					
46885.602	4.55	0.0400	0.0001	91.50	2.681E-03
2.825E-02					
47149.398	4.52	0.0401	0.0001	91.67	2.838E-03
2.972E-02					
47414.199	4.50	0.0401	0.0001	91.85	3.001E-03
3.124E-02					

47679.625	4.47	0.0402	0.0001	92.03	3.146E-03
3.256E-02					
47946.012	4.45	0.0403	0.0001	92.23	3.289E-03
3.384E-02					
48212.848	4.42	0.0404	0.0001	92.42	3.427E-03
3.507E-02					
48480.598	4.40	0.0405	0.0001	92.62	3.541E-03
3.602E-02					
48751.188	4.38	0.0406	0.0001	92.82	3.642E-03
3.684E-02					
49024.840	4.35	0.0407	0.0001	93.03	3.738E-03
3.760E-02					
49301.352	4.33	0.0407	0.0001	93.25	3.829E-03
3.830E-02					
49583.285	4.30	0.0408	0.0001	93.48	3.897E-03
3.875E-02					
49872.676	4.28	0.0409	0.0001	93.71	3.957E-03
3.912E-02					
50169.738	4.25	0.0410	0.0001	93.95	4.004E-03
3.935E-02					
50474.289	4.23	0.0412	0.0001	94.19	4.019E-03
3.925E-02					
50788.902	4.20	0.0413	0.0001	94.44	4.015E-03
3.895E-02					
51115.637	4.17	0.0414	0.0001	94.70	3.963E-03
3.819E-02					
51457.191	4.15	0.0415	0.0001	94.95	3.880E-03
3.712E-02					
51815.562	4.12	0.0416	0.0001	95.22	3.801E-03
3.610E-02					
52188.777	4.09	0.0417	0.0001	95.48	3.704E-03
3.491E-02					
52579.246	4.06	0.0418	0.0001	95.73	3.572E-03
3.340E-02					
52989.309	4.03	0.0419	0.0001	95.97	3.446E-03
3.197E-02					
53416.727	3.99	0.0420	0.0001	96.20	3.406E-03
3.137E-02					
53859.477	3.96	0.0421	0.0001	96.43	3.354E-03
3.068E-02					
54320.039	3.93	0.0422	0.0001	96.66	3.286E-03
2.983E-02					
54800.828	3.89	0.0423	0.0001	96.87	3.275E-03
2.951E-02					
55299.184	3.86	0.0424	0.0001	97.10	3.260E-03
2.913E-02					
55813.086	3.82	0.0426	0.0001	97.40	3.339E-03
2.960E-02					
56340.379	3.79	0.0427	0.0001	97.69	3.555E-03
3.128E-02					
56879.160	3.75	0.0428	0.0001	97.97	3.700E-03
3.224E-02					
57397.191	3.72	0.0429	0.0001	98.26	4.034E-03
3.488E-02					
57936.082	3.68	0.0431	0.0001	98.55	4.218E-03
3.593E-02					
58488.066	3.65	0.0432	0.0001	98.89	4.427E-03
3.714E-02					

59044.273	3.61	0.0434	0.0002	99.33	4.554E-03
3.767E-02					
59577.574	3.58	0.0436	0.0002	99.68	4.731E-03
3.858E-02					

