



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ

*Concrete stands
the test of time*



Επιβλέπων :

Ευστράτιος Γ. Μπαδογιάννης | Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Ανθεκτικότητα Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Μαρία Χ. Στρατουρά

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., Μ.Sc.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Δ.Π.Μ.Σ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ

**ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Στρατουρά Χ. Μαρία

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π, M.Sc

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή :

Ευστράτιος Γ. Μπαδογιάννης

Λέκτορας Ε.Μ.Π

(Επιβλέπων)

Σωτήριος Τσιβιλής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Μπατής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

Μαρία Χ. Στρατουρά

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π. MSc

Copyright © Μαρία Χ. Στρατουρά, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου 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 τηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία με τίτλο «Ανθεκτικότητα Ινοπλισμένου Σκυροδέματος» πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών».

Επιβλέπων της, διετέλεσε ο Ευστράτιος Μπαδογιάννης, Λέκτορας της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την καθοδήγησή του και την έμπρακτη βοήθειά του. Η άριστη επιστημονική του κατάρτιση, σε συνδυασμό με την αδιάλειπτη προθυμία να με βοηθήσει με κάθε τρόπο, ήταν πρωταρχικής σημασίας για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστίες οφείλω, επίσης, στα δύο μέλη της Τριμελούς επιτροπής εξέτασης της Μεταπτυχιακής Εργασίας, τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. Σωτήριο Τσιβιλί και τον Καθηγητή του Ε.Μ.Π Γεώργιο Μπατή. Η συνεργασία μου με τον καθένα ξεχωριστά, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου αποτέλεσε ουσιαστική βάση για τον εμπλουτισμό των επιστημονικών μου γνώσεων και την καλλιέργεια των ικανοτήτων μου.

Στην πραγματοποίηση των πειραμάτων, σημαντική ήταν η συμβολή του συμφοιτητή μου Ηλία Κορόζη, τον οποία θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος, για την αδιάκοπη βοήθειά του, την έμπρακτη αλλά και την ηθική υποστήριξη που μου προσέφερε.

Γενικότερα αξίζουν ευχαριστίες στο ερευνητικό προσωπικό του Εργαστηρίου «Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας» της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., αναφερόμενη, φυσικά, στον Κωνσταντίνο Ασπιώτη, που συνέβαλε τα μέγιστα στην εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου που με το δικό τους τρόπο ο καθένας, με ενθάρρυναν και με στήριζαν καθ' όλη την διάρκεια της διεκπεραίωσης της παρούσας εργασίας.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω από την καρδιά μου την οικογένεια μου, η οποία μου συμπαραστάθηκε και με στήριξε στην προσπάθεια μου αυτή με κάθε υλικό και άυλο μέσο, όπως άλλωστε έχουν κάνει όλα αυτά τα χρόνια.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

Στρατουρά Χ. Μαρία

mariastrat@gmail.com

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση της επιρροής των συστατικών οχτώ (8) διαφορετικών συνθέσεων, στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Η σύσταση των συνθέσεων διαφοροποιείται καθώς προστίθεται μετακαολίνη σε ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου 10% κ.β, χαλύβδινες και συνθετικές ίνες δύο ειδών, σε ποσοστά 0.5% και 1.0% κ.ο. Μελετώνται παράμετροι ανθεκτικότητας όπως η υδατοαπορροφητικότητα λόγω τριχοειδούς απορρόφησης, το ανοικτό πορώδες, η διαπερατότητα σε αέρα και η διαπερατότητα σε χλωριόντα, μέσω του υπολογισμού του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης και του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων κατά τα πρότυπα NT BUILD 492 και 443, αντίστοιχα.

Συνοψίζοντας τα πειραματικά αποτελέσματα, δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική μεταβολή του πορώδους ως προς το αμιγές σκυρόδεμα. Η προσθήκη μεταλλικών και συνθετικών ινών είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της τριχοειδούς απορρόφησης. Η προσθήκη συνθετικών ινών κατά περίπτωση επηρέασε θετικά την αντίσταση του σκυροδέματος στη διείσδυση των χλωριόντων. Αναφορικά με το συντελεστή διάχυσης χλωριόντων, το σκυρόδεμα με μετακαολίνη είχε το χαμηλότερο, γεγονός που αποτυπώνεται και από τη μειωμένη συγκέντρωση χλωριόντων σε όλα τα βάθη του σκυροδέματος, όπως αυτή προσδιορίστηκε.

Λέξεις κλειδιά: ανθεκτικότητα, ινοπλισμένο σκυρόδεμα, ίνες χάλυβα, συνθετικές ίνες, μετακαολίνη, πορώδες, τριχοειδής απορρόφηση, διαπερατότητα σε αέρα, διείσδυση χλωριόντων, διάχυση χλωριόντων.

ABSTRACT

The current postgraduate study is aiming to investigate the effect of the composition of 8 different produced mixtures, on the durability of concrete. The composition of the mixture is modified with the addition of metakaolin for substituting 10% of cement, steel and synthetic fibres of two different types in two percentages 0.5%, 1% v.v. Durability parameters were investigated like water absorption due to capillary absorption, porosity, air permeability and concrete resistance to chloride penetration, estimating the non-steady state chloride migration coefficient and the chloride diffusion coefficient, complying to NT BUILD 492 and 443 standards, respectively.

Summarizing the laboratory test results, no substantial change was observed in the porosity of the altered mixture of concrete, compared to the classic cement based concrete. The addition of metallic and synthetic fibers resulted in the reduction of capillary absorption of water. The addition of synthetic fibers, in particular, had a positive influence in the resistance against chloride diffusion. In regards to the chloride diffusion factor, the concrete mixture with metakaolin had the lowest factor (increase in the resistance of concrete against chloride diffusion), a fact that is also shown from the reduced concentration of chlorides in all depths of concrete.

Keywords: durability, fiber reinforced concrete, steel fibers, synthetic fibers, metakaolin, porosity, sorptivity, gas permeability, chloride migration, chloride penetration.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΘΕΜΑΤΑ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Παράγοντες ανθεκτικότητας	2
1.2.1 Διαπερατότητα.....	3
1.2.2 Έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον.....	10
1.2.3 Διείσδυση Χλωριόντων	10
1.3 Κανονιστικό πλαίσιο	20
ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗΣ	24
2.1 Μετακαολίνης.....	24
ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	27
3.1 Εισαγωγή	27
3.1.1 Είδη ινών	27
3.1.2 Πλεονεκτήματα ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	29
3.1.4 Χρήσεις και εφαρμογές	30
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	32
4.1 Εισαγωγή.....	32
4.2 Τρέχουσα ερευνητική δραστηριότητα.....	32
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	44
5.1 Εισαγωγή.....	44
5.2 Υλικά, Σύνθεσεις Σκυροδέματος και δοκίμια	45
5.3 Ανοικτό πορώδες.....	49
5.3.1 Συνοπτική περιγραφή δοκιμής	49
5.4 Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης.....	51

5.4.1	Συνοπτική περιγραφή δοκιμής	51
5.5	Διαπερατότητα σε αέρα.....	54
5.5.1	Συνοπτική περιγραφή δοκιμής	54
5.6	Διαπερατότητα σε χλωριόντα.....	56
5.6.1	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης (non-steady state chloride migration coefficient)	56
5.6.2	Διαχυση χλωριόντων κατά το πρότυπο NT 443	62
ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....		68
6.1	Ανοικτό πορώδες.....	68
6.2	Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης.....	70
6.3	Διαπερατότητα σε αέρα.....	72
6.4	Διαπερατότητα σε χλωριόντα.....	74
6.4.1	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης (non-steady state chloride migration coefficient)	74
6.4.2	Διαχυση χλωριόντων κατά πρότυπο NT 443.....	77
6.5	Σύγκριση Παραμέτρων ανθεκτικότητας.....	79
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		88
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ		88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		90
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....		97
A.1	Ανοικτό πορώδες.....	97
A.2	Διαπερατότητα σε χλωριόντα.....	98
A.2.1	Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης (non-steady state chloride migration coefficient)	98
A.2.2	Διαχυση χλωριόντων κατά πρότυπο NT 443.....	99

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 : Διαβρωτικές δράσεις στο σκυρόδεμα [πηγή: Κόλιας (2011-2012)]	3
Σχήμα 1.2 : Συνολική παρουσίαση της φθοράς του σκυροδέματος.....	3
Σχήμα 1.3 : Επίδραση της ποιότητας του τσιμέντου και του χρόνου συντήρησης στη διαπερατότητα του σκυροδέματος [πήγη: Τσίμας (2006)].....	4
Σχήμα 1.4 : Επίδραση της διάρκειας συντήρησης στη διαπερατότητα [πήγη: Τσίμας (2006)]	5
Σχήμα 1.5: Σχέση διαπερατότητας με λόγο νερού προς τσιμέντο [πηγή : Κόλιας (2011-2012)]	7
Σχήμα 1.6 : Μοντέλο έναρξης – διασποράς διάβρωσης του Tuutti (Initiation-Propagation Model)	16
Σχήμα 1.7 : Διαδικασία διάβρωσης: ρηγμάτωσης και αποφλοΐωσης σκυροδέματος.....	17
Σχήμα 1.8 : Όγκος προϊόντων διάβρωσης [πηγή: ACI 222R (2001)]	18
Σχήμα 2.1 : Μετακαολίνης	26
Σχήμα 3.1 : Είδη τεχνητών ινών και ο συμβολισμός τους [BISFA, (2009)].....	28
Σχήμα 3.2 : Καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα.....	29
Σχήμα 4.1 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (mol/m^3) σε συνάρτηση με το βάθος z (mm) για δείγματα με MKC (αριστερά) και MK (δεξιά) [πηγή: Badogiannis et al (2015)].....	34
Σχήμα 5.1 : Οι τύποι των ινών που χρησιμοποιήθηκαν, (α) ίνες τύπου INOMIX, (β) ίνες τύπου SikaFiber PP940-50 και (γ) τύπου Concrix ES.....	45
Σχήμα 5.2 : Πειραματική διάταξη δοκιμής απορροφητικότητας	51
Σχήμα 5.4 : Τοποθέτηση ελαστικού σωλήνα από καουτσούκ, Το περίβλημα της τριαξονικής κυψέλης και οι φιάλες N2	55
Σχήμα 5.5 : Περιγραφή πειραματικής διάταξης [NordTest Build 492 (1999)].....	57
Σχήμα 5.6 : Πειραματική διάταξη δοκιμής αντίστασης σε χλωρίοντα κατά NordTest Build 492(1999)	58
Σχήμα 5.8 : Μεθοδολογία καταγραφής βάθους διείσδυσης χλωρίοντων από προφίλ δοκιμίου κατόπιν ψεκασμού με νιτρικό άργυρο [πηγή: NordTest Build 492 (1999)].....	59

Σχήμα 5.7 : Τυπικό προφίλ δοκιμίου σκυροδέματος κατόπιν δοκιμής αντίστασης σε χλωριόντα, σύμφωνα με το πρότυπο [NordTest Build 492 (1999)] και ψεκασμού με νιτρικό άργυρο	60
Σχήμα 5.9 : Χρωματικές αλλαγές του διαλύματος μέχρι να χρωματιστεί ερυθροφαίο, κατά την διάρκεια της τιτλοδότησης σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-2	64
Σχήμα 6.1 : Ανοικτό Πορώδες OP (%) για κάθε σύνθεση	69
Σχήμα 6.2 : Τριχοειδής απορρόφηση S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$), ανά σύνθεση	71
Σχήμα 6.3 : Αύξηση βάρους δοκιμίου ανα επιφάνεια λόγω απορρόφησης νερού συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου κατά τη δοκιμή της τριχοειδούς απορρόφησης.....	72
Σχήμα 6.4 : Συντελεστής διαπερατότητα σε αέρα $Kg \cdot 10^{-17} (m^2)$, ανά σύνθεση	73
Σχήμα 6.5 : Συντελεστής Διείσδυσης χλωριόντων, $D_{nssm} (x10^{-12})$ για κάθε σύνθεση	76
Σχήμα 6.6 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (mol/m^3) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων z (mm) όλων των συνθέσεων	77
Σχήμα 6.7 : Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων $D_{nssm} (x10^{-12})$ για κάθε σύνθεση	78
Σχήμα A.1: Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NC [NT Build 492]	99
Σχήμα A.2 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NC-MC [NT Build 492]	99
Σχήμα A.3 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NC.....	100
Σχήμα A.4 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NC-MC	100
Σχήμα A.5 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NCSF-0.5	100
Σχήμα A.6 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NCSF-1	101
Σχήμα A.8 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NCPF-1	101
Σχήμα A.9 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NCPX-0.5	102

Σχήμα A.10 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NCPX-1 102

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 : Παράγοντες που επηρεάζουν τη χημική προσβολή του σκυροδέματος [πηγή: ACI 201.2R (2008)].....	6
Πίνακας 1.2 : Περίπτωση διάβρωσης οπλισμού λόγω χλωριόντων [πηγή: EN 206-1 (2000)]22	
Πίνακας 1.3 : Ταξινόμηση (ενδεικτική) ανθεκτικότητα σκυροδέματος και οριακές τιμές για διαφορετικές (G : γενικός, S : υποκατάστατος δείκτης) παραμέτρους ανθεκτικότητας [πηγή : V. Baroghel-Bouny (2008)].....	23
Πίνακας 4.1 : Διαπερατότητα σε χλωριόντα [πηγή: Poon et al (2006)].....	39
Πίνακας 5.1 : Κύρια χαρακτηριστικά ινών	46
Πίνακας 5.2 : Περιεκτικότητες συστατικών των συνθέσεων (Kg/m^3)	47
Πίνακας 5.3 : Ιδιότητες νεπού σκυροδέματος όλων των συνθέσεων	47
Πίνακας 5.4 : Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμίων σε ηλικία 7 και 28 ημερών, μέση τιμή (M.T) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%) της κάθε σύνθεσης.....	48
Πίνακας 5.5 : Θλιπτική αντοχή κυλινδρικών δοκιμίων σε ηλικία 28 ημερών, μέση τιμή (M.T) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%) της κάθε σύνθεσης	49
Πίνακας 5.6 : Διαφορά δυναμικού και διάρκεια δοκιμής [πηγή: NordTest Build 492 (1999)]	58
Πίνακας 5.7 : Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση του στη διείδυση χλωριόντων, για διάφορες τιμές του συντελεστή διάχυσης [πηγή : Tang (1996)] .61	
Πίνακας 5.8 : Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση του στη διείδυση χλωριόντων, για διάφορες τιμές του συντελεστή διάχυσης [πηγή : Nilsson et all (1998)]	61
Πίνακας 6.1 : Πειραματικά αποτελέσματα ανοικτού πορώδους (OP)%, για κάθε σύνθεση .68	
Πίνακας 6.2 : Πειραματικά αποτελέσματα τριχοειδούς απορρόφησης ($S mm/min^{0.5}$), για κάθε σύνθεση	70

Πίνακας 6.3 : Πειραματικά αποτελέσματα διαπερατότητας σε αέρα $Kg \cdot 10^{-17} (m^2)$, για κάθε σύνθεση	73
Πίνακας 6.4 : Πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση (μέσες τιμές)	74
Πίνακας 6.5 : Πειραματικά αποτελέσματα της συγκέντρωσης των χλωριόντων για τις συνθέσεις NC, NC-MC	75
Πίνακας 6.6 : Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση.....	78
Πίνακας 6.7 : Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραμέτρων ανθεκτικότητας	79
Πίνακας 6.8 : Ερευνητική δραστηριότητα: Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραμέτρων ανθεκτικότητας για 10 % αντικατάσταση τσιμέντου με MK.....	81
Πίνακας 6.9 : Ερευνητική δραστηριότητα: Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραμέτρων ανθεκτικότητας για συμβατικό σκυρόδεμα.....	82
Πίνακας 6.10 : Ερευνητική δραστηριότητα: Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραμέτρων ανθεκτικότητας για ινοπλισμένο σκυρόδεμα	85
Πίνακας 6.11 : Ερευνητική δραστηριότητα: Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραμέτρων ανθεκτικότητας για συμβατικό σκυρόδεμα.....	86
Πίνακας A.1 : Πειραματικά αποτελέσματα ανοικτού πορώδους OP (%) για όλα τα δοκίμια	97
Πίνακας A.2 : Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικών μετρήσεων της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση	98

ΘΕΜΑΤΑ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κοινό χαρακτηριστικό όλων των κατασκευών από σκυρόδεμα είναι η φθορά στο χρόνο. 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 στο οποίο εκτίθεται. Ενδεικτικά, μερικές αιτίες φθοράς είναι η διάβρωση του σιδηροπλισμού, η ψύξη/απόψυξη στα ψυχρά κλίματα και οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ του ενυδατωμένου τσιμέντου και των διαβρωτικών μέσων. Η φθορά εκδηλώνεται με ρωγμές και διογκώσεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος αλλά και με μείωση της μηχανική του αντοχής και απώλεια μάζας.

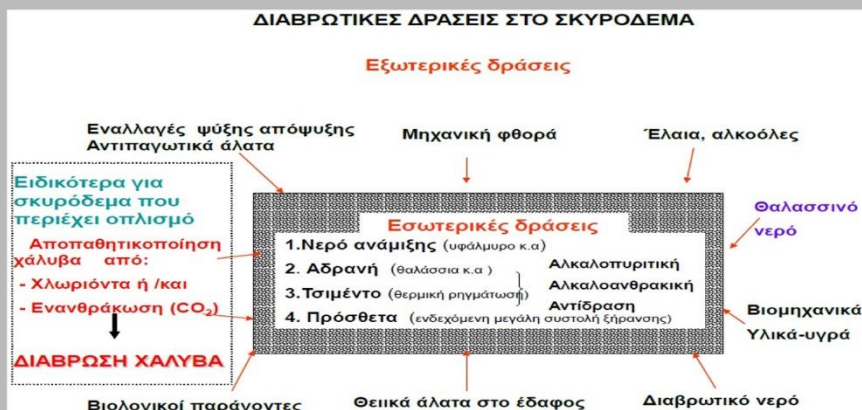
Κοινός στόχος των κατασκευών από σκυρόδεμα είναι η επίτευξη κατά το μέγιστο της σχεδιασμένης διάρκειας ζωής. Ο μεγάλος χρόνος διάρκειας ζωής μιας κατασκευής θεωρείται συνώνυμο της ανθεκτικότητας. Κάθε κατασκευή από σκυρόδεμα οφείλει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις αντοχής και λειτουργικότητας στη σχεδιασμένη διάρκεια ζωής της. Πιο συγκεκριμένα, το σκυρόδεμα πρέπει να ανθίσταται στις περιβαλλοντικές επιδράσεις (φυσικές ή χημικές) που εκτίθεται κατά τη διάρκεια του χρόνου χωρίς να παρουσιάζει απώλειες στην ασφάλεια, στη λειτουργικότητα και στην αισθητική εμφάνιση. Αυτή η ικανότητα του σκυροδέματος ονομάζεται ανθεκτικότητα. Η ανθεκτικότητα αποτελεί μεγάλης αξία ποιοτική έννοια και είναι πλήρως συσχετισμένη με τη βασική ιδιότητα του σκυροδέματος, την αντοχή σε μηχανική καταπόνηση.

Το πρόβλημα της ανθεκτικότητας σε διάρκεια θεωρείται σήμερα από τη διεθνή κοινότητα των μηχανικών σαν το υπ' αριθμόν ένα επιστημονικό και πρακτικό πρόβλημα του σκυροδέματος. Πέρα από τις προφανείς επιδράσεις στην ασφάλεια και το περιβάλλον,

υπάρχει σημαντική οικονομική διάσταση. Ήδη, στις αναπτυγμένες χώρες, το ετήσιο κόστος επισκευών υπερβαίνει κατά πολύ αυτό των νέων κατασκευών. Οι σχεδιαστές των κατασκευών από σκυρόδεμα ενδιαφέρονται ως επί το πλείστον για τα χαρακτηριστικά της αντοχής του υλικού, ωστόσο είναι καιρός να γίνει συνείδηση η σημαντικότητα της ανθεκτικότητας. Ενώ το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται, διαστρώνεται και συντηρείται κατάλληλα μπορεί να είναι ανθεκτικό, κάτω από τις περισσότερες συνθήκες φυσικού και βιομηχανικού περιβάλλοντος.

1.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η ανθεκτικότητα (durability) μιας κατασκευής είναι η ικανότητα της να ανθίσταται στις περιβαλλοντικές επιδράσεις (φυσικές ή χημικές) κατά τη διάρκεια του χρόνου χωρίς να παρουσιάζει απώλεια της επιτελεστικότητάς της κάτω από ένα ανεκτό όριο [Μπαδογιάννης Ε.]. Σύμφωνα με την παρακάτω ανάλυση, παρουσιάζονται τρεις ομάδες παραγόντων που αναφέρονται (i) στην διαπερατότητα, (ii) στις περιβαλλοντικές συνθήκες και (iii) στις φυσικές ή χημικές επιδράσεις. Οι παράγοντες αυτοί πολλές φορές αλληλοκαλύπτονται σε σημείο που η φθορά του σκυροδέματος πολλές φορές να αποδίδεται στην συνδυασμένη δράση τους. Η **διαπερατότητα** (permeability) εξαρτάται από την σύσταση του τσιμέντου, τον λόγο w/c, το πορώδες, τη συμπίκνωση, τη συντήρηση και την ύπαρξη ρωγμών. Οι **περιβαλλοντικές συνθήκες** επηρεάζονται από την διαθέσιμη υγρασία, την παρουσία διαβρωτικών ουσιών στο νερό και την θερμοκρασία, ενώ η τρίτη κατηγορία χωρίζεται στις μηχανικές φυσικές και χημικές επιδράσεις. Στις **μηχανικές επιδράσεις** επιγραμματικά αναφέρονται τα επιβαλλόμενα φορτία και οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις όπως, η διαφορική καθίζηση, η συστολή ξήρανσης, ο ερπυσμός, ο σεισμός, και οι θερμοκρασιακές μικροαλλαγές). Στις **φυσικές επιδράσεις** υπάγονται η μηχανική φθορά (απότριψη, υδροφθορά) και ακραίες θερμοκρασίες (παγετός πυρκαγιά). Τέλος στις **χημικές ή βιολογικές επιδράσεις** αναφέρονται τα οξέα οι βάσεις τα άλατα και τα βακτηρίδια [Τσίμας Σ. (2006)]



Σχήμα 1.1 : Διαβρωτικές δράσεις στο σκυρόδεμα [πηγή: Κόλιας (2011-2012)]

Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται μια ποιοτική συσχέτιση των παραπάνω παραγόντων, που καθορίζουν τη φθορά του σκυροδέματος.



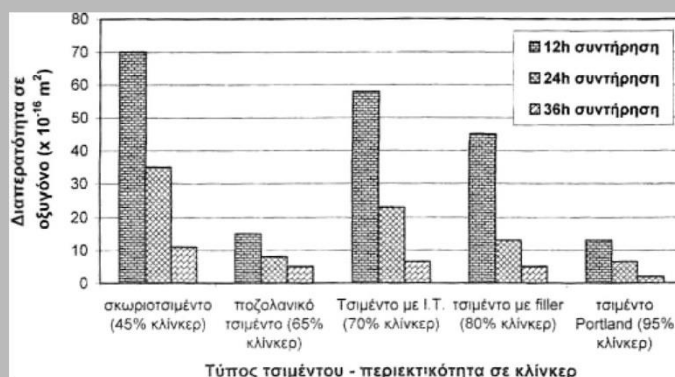
Σχήμα 1.2 : Συνολική παρουσίαση της φθοράς του σκυροδέματος

1.2.1 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Η διαπερατότητα του σκυροδέματος ορίζεται ως η ικανότητα της επιφανειακής ζώνης του σκυροδέματος να μεταφέρει αέρια ή υγρά στην εσωτερική μικροδομή του. Το δίκτυο

πόρων, η δημιουργία του οποίου οφείλεται στην ετερογενή φύση του υλικού, επιτρέπει την μεταφορά των βλαβερών παραγόντων (νερό, άλατα, διοξείδιο του άνθρακα κ.λπ.) μέσω ροής, διάχυσης ή απορρόφησης. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την διαπερατότητα και μέσω αυτής την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, καθώς και ο τρόπος που καθένας δρά επιγραμματικά έχουν ως εξής:

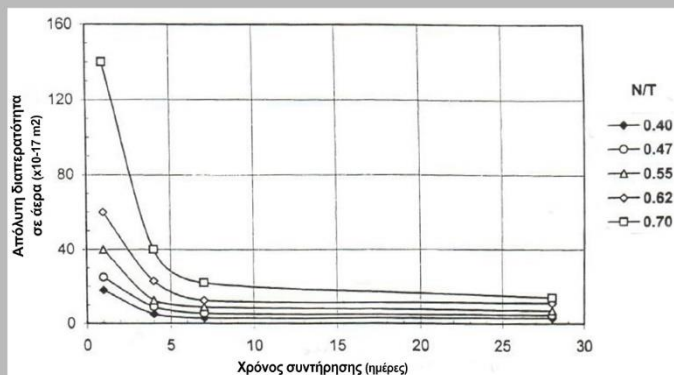
Όταν το σκυροδέμα περιέχει τσιμέντο σε ποσότητα μεγαλύτερη από 300 kg/m^3 και έχει μικρό w/c και έχει γίνει προσεκτική συντήρηση, τότε αναμένεται να έχει μικρή διαπερατότητα. Στο **Σχήμα 1.3** παρουσιάζεται η επίδραση διαφόρων τύπων τσιμέντου στη διαπερατότητα, για διάφορους χρόνους συντήρησης.



Σχήμα 1.3 : Επίδραση της ποιότητας του τσιμέντου και του χρόνου συντήρησης στη διαπερατότητα του σκυροδέματος [πηγή: **Τσίμας (2006)**]

Όταν ο λόγος w/c υπερβεί την τιμή 0.6 τότε υπάρχει δυσανάλογη αύξηση της διαπερατότητας, επειδή αυξάνεται το μέγεθος και ο αριθμός των τριχοειδών πόρων. Το πορώδες (μέγεθος και κατανομή των πόρων), καθώς και η ποσότητα του νερού που περιέχεται στους πόρους, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη διαπερατότητα του σκυροδέματος. Συνήθως, η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε φυσικές και χημικές επιδράσεις μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε τριχοειδείς πόρους. Με τη συμπύκνωση γίνεται προσπάθεια μείωσης των κενών του αέρα στο σκυροδέμα σε περιεκτικότητα μικρότερη από 1%. Για την επίτευξη της συμπύκνωσης εφαρμόζεται δόνηση κατά τη χύτευση. Η συντήρηση του σκυροδέματος συνίσταται στη διατήρηση ευνοϊκών συνθηκών υγρασίας και

θερμοκρασίας, ώστε να προχωρήσουν οι αντιδράσεις ενυδάτωσης. Η συντήρηση γίνεται με σκοπό αφενός για να συγκρατήσει το σκυρόδεμα τη σωστή υγρασία, ώστε να γίνει η ενυδάτωση του τσιμέντου, και αφετέρου για να προστατευθεί το σκυρόδεμα από τις απότομες εναλλαγές της θερμοκρασίας. Στο **Σχήμα 1.4** φαίνεται ενδεικτικά η επίδραση που έχει η χρονική διάρκεια της συντήρησης στη διαπερατότητα, συναρτήσει του λόγου w/c.



Σχήμα 1.4 : Επίδραση της διάρκειας συντήρησης στη διαπερατότητα [πηγή: **Τσίμας (2006)**]

Η ύπαρξη ρωγμών διευκολύνει τη διείσδυση βλαβερών ουσιών στο εσωτερικό της κατασκευής και προς τον οπλισμό του σκυροδέματος. Οι ρωγμές μπορούν να δημιουργηθούν από διάφορες αιτίες, όπως φυσικές (συστελλόμενα αδρανή, καθίζηση σκυροδέματος), χημικές (διάβρωση οπλισμού, αντίδραση αλκαλίων-αδρανών), θερμικές (ψύξη-απόψυξη, εποχιακές μεταβολές της θερμοκρασίας, πρόωρη θερμική μεταβολή) και κατασκευαστικές (υπερφόρτιση ερπυσμός) [**Τσίμας et al (2006)**]

Πίνακας 1.1 : Παράγοντες που επηρεάζουν τη χημική προσβολή του σκυροδέματος [πηγή: **ACI 201.2R (2008)**]

Παράγοντες που επιταχύνουν ή επιδεινώνουν την προσβολή	Παράγοντες που μετριάζουν ή καθυστερούν την προσβολή
Υψηλό πορώδες εξαιτίας : i. Υψηλής υδατοαπορροφητικότητας ii. Διαπερατότητας iii. Κενών εγκλωβ. αέρα	Σκυρόδεμα καλής συμπίκνωσης που επιτυγχάνεται μέσω : i. Κατάλληλων αναλογιών των συστατικών του μίγματος ¹ ii. Μειωμένης περιεκτικότητας σε νερό iii. Αυξημένης περιεκτικότητας σε τσιμεντοειδή iv. Εισαγωγή αερακτικού v. Επαρκούς συμπίκνωσης vi. Αποτελεσματικής συντήρησης ²
Ρωγμές και διαχωρισμοί λόγω : i. Συγκέντρωση τάσεων ii. Θερμοπληξίας	Μείωση των εφελκυστικών φορτίσεων στο σκυρόδεμα μέσω: i. χρήσης εφελκυσμένου οπλισμού κατάλληλης διαμέτρου, και σε κατάλληλη διάταξη ii. προσθήκης ποζολανικών προσθέτων για τον έλεγχο της αύξησης της θερμότητας ενυδάτωσης iii. πρόβλεψης αρμών διαστολής
Διαρροή και διείδυση υγρών λόγω : i. Ροής υγρού ⁴ ii. Συσσώρευσης υγρών (ponding) iii. Υδραυλικής πίεσης	Κατάλληλος δομοστατικός σχεδιασμός, για: i. περιορισμό περιοχών επαφής ή ανακύκλησης ii. χρήση μεμβρανών και προστατευτικών συστημάτων ⁵ για τον περιορισμό της διείδυσης

¹ Τα συστατικά του μίγματος, η αρχική ανάμειξη και η διαδικασία παρασκευής του νωπού σκυροδέματος καθορίζουν την ομοιογένεια και την πυκνότητά του

² Ανεπαρκείς διαδικασίες συντήρησης οδηγούν σε ελαττώματα και ρωγμές

³ Η αντίσταση στη ρηγμάτωση εξαρτάται από την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα

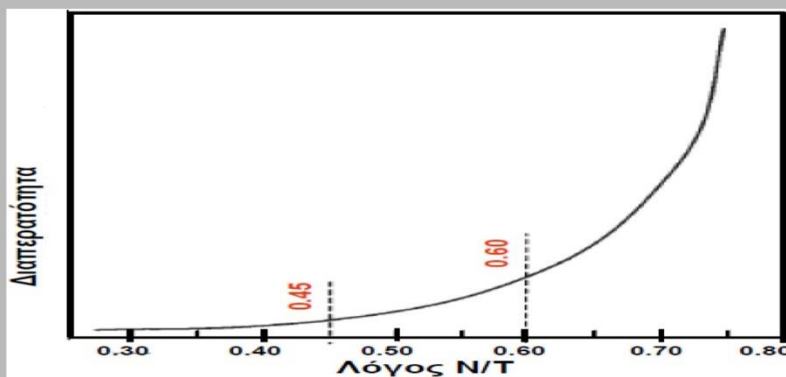
⁴ Η μετακίνηση του νερού που μεταφέρει επιβλαβείς ουσίες αυξάνει τον ρυθμό των αντιδράσεων που εξαρτάται από την συγκέντρωση όσο και την ταχύτητα της ροής

⁵ Το σκυρόδεμα που εκτίθεται συχνά σε χημικά, τα οποία είναι γνωστό ότι προκαλούν ταχεία φθορά, θα πρέπει να προστατεύεται με ένα χημικά ανθεκτικό προστατευτικό σύστημα.

1.2.1.1 ΤΟ ΝΕΡΟ ΩΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΦΘΟΡΑΣ

Το νερό αποτελεί το κυριότερο φυσικό συστατικό και συναντάται στην φύση σε τρεις διαφορετικές φάσεις: υγρό (θαλασσινό νερό, νερό υπεδάφους, βροχής κ.λπ.), αέριο (υδρατμοί), στερεό (πάγος, χιόνι). Είναι γνωστό ότι τα μόρια του νερού έχουν πολύ μικρό μέγεθος και έχουν, συνεπώς, τη δυνατότητα να διεισδύουν εύκολα στις κοιλότητες ή τους

πόρους του σκυροδέματος. Επιπλέον, σε συνδυασμό με την ικανότητα του να διαλύει τις περισσότερες από τις επιθετικές ουσίες του περιβάλλοντος (χλωριούχα άλατα, θειικά άλατα, κ.λπ.), το νερό είναι ικανό να μεταφέρει τους εν λόγω επιθετικούς παράγοντες στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος και να δημιουργεί βλάβες σε τοπικό επίπεδο ή ακόμα και σε μεγαλύτερο βαθμό. Τέλος, η παραμονή του νερού στο δίκτυο πόρων του σκυροδέματος, σε συνδυασμό με έντονες εναλλαγές στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, μπορεί να οδηγήσει σε αυξομειώσεις του όγκου του (μετατροπή από υγρό σε στερεό) και να οδηγήσει σε τοπικές ή ευρείας κλίμακας ρηγματώσεις του σκυροδέματος. Κατά την παραπάνω ανάλυση, κρίνεται αναγκαία η εξασφάλιση της μειωμένης υδατοπερατότητας του σκυροδέματος.



Σχήμα 1.5: Σχέση διαπερατότητας με λόγο νερού προς τσιμέντο [πηγή : Κόλιας (2011-2012)]

1.2.1.1.1 ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΙ ΠΟΡΟΙ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Το σκυροδέμα, 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 [Τσίμας et al (2004)].

Γενικά οι πόροι του σκυροδέματος ανάλογα με την διάμετρο τους μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία πόρων έχει διάμετρο γύρω στα 25\AA και σχηματίζεται στη γέλη του τομπερμορίτη. Στην κατηγορία αυτή ανήκει το 20–40 % των

πόρων. Η διάμετρος των πόρων αυτών είναι ανεξάρτητη από τον λόγο νερού προς τσιμέντο. Η δεύτερη κατηγορία πόρων, είναι οι τριχοειδείς πόροι διαμέτρου 1-10 μm . Το ποσοστό συμμετοχής των πόρων αυτών εξαρτάται από το λόγο w/c και είναι τόσο μικρότερη όσο μικρότερος είναι ο λόγος αυτός. Μεγάλης σημασίας όμως είναι και ο τρόπος σύνδεσης των πόρων. Το νερό το οποίο ευρίσκεται μέσα στις δύο προαναφερθείσες κατηγορίες πόρων έχει διαφορετική ενθαλπία. Μεταβολές στην θερμοκρασία έχουν σαν αποτέλεσμα την μετακίνηση του νερού από την μια κατηγορία πόρων στην άλλη. Τέλος η τρίτη κατηγορία πόρων έχει διάμετρο 0.01-2 mm. Η ύπαρξη των πόρων αυτών οφείλεται στον εγκλεισμό αέρα στο μίγμα του σκυροδέματος. Το ποσοστό της συμμετοχής των πόρων αυτών στο συνολικό πορώδες υπερβαίνει το 10% [Μπατής Γ.(2006)].

Η μεταφορά των ρευστών στο εσωτερικό του σκυροδέματος γίνεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου διαμέσου των πόρων και σχετίζεται με το πορώδες στη μάζα του τσιμεντοπολτού αλλά και στη διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη τσιμεντοπολτού και αδρανών. Η ροή ξεκινά από την επιφάνεια του υλικού και συνεπώς οι πόροι της επιφάνειας του τσιμέντου και της πάστας στη διεπιφάνεια τσιμέντου και αδρανών, καθορίζουν το ρυθμό μεταφοράς μάζας και διαβρωτικών μέσων.

Το πορώδες εκφράζει το συνολικό ποσοστό των πόρων στο συνολικό όγκο και όχι το είδος τους και δεν μπορεί να υπάρξει οποιαδήποτε αναλογική σχέση μεταξύ συνολικού πορώδους και διαπερατότητας. Αυτό δεν μπορεί να συμβεί γιατί η διαπερατότητα αναφέρεται στην ευκολία με την οποία τα ρευστά εισέρχονται μέσα στο σκυρόδεμα και η ροή πραγματοποιείται διαμέσου των πόρων του σκυροδέματος. Η σχέση πορώδους και διαπερατότητας χαρακτηρίζεται ως ποιοτική αφού οι πόροι δεν συντελούν στην αύξηση της διαπερατότητας όταν είναι ασυνεχείς και καλύπτονται από προσροφημένο νερό ή έχουν μικρό άνοιγμα. Ωστόσο, το αυξημένο πορώδες αυξάνει και την πιθανότητα να αποκτήσουν οι πόροι συνέχεια και να δημιουργηθούν «κανάλια ροής» των ρευστών. Αυτό πραγματοποιείται γιατί τόσο η καταπόνηση της κατασκευής όσο και οι θερμοκρασιακές μεταβολές ευνοούν την ανάπτυξη τοπικών τάσεων, οι οποίες διευρύνουν τους πόρους και έχουν ως αποτέλεσμα τη σύνδεση τους. Η σύνδεση των πόρων ευνοείται όταν:

- Υπάρχουν μικρορωγμές στη δομή του τσιμέντου, που προέρχονται είτε από μηχανική καταπόνηση είτε από θερμοκρασιακές μεταβολές

- Λόγω κακής συντήρησης μετά τη διάστρωση του σκυροδέματος ευνοείται το φαινόμενο της εξίδρωσης και η ταυτόχρονη δημιουργία πόρων κατά την άνοδο του νερού στην επιφάνεια
- Παρατηρείται περιορισμένη ομοιογένεια του σκυροδέματος λόγω χαμηλής εργασιμότητας σε συνδυασμό με κακή ή ανεπαρκή μηχανική συμπίκνωση.

Σύμφωνα με τον **Μπατής Γ.(2006)**, μεγάλη σημασία έχουν οι δύο τελευταίες κατηγορίες πόρων, μέσω των οποίων κατά κύριο λόγο γίνεται η μεταφορά νερού και ιόντων, αυτό έχει σαν συνέπεια την διάβρωση του σκυροδέματος και του οπλισμού.

Οι περισσότερες από τις ιδιότητες του σκυροδέματος βελτιώνονται όταν, για το ίδιο ολικό πορώδες, το μέγεθος των πόρων είναι μικρότερο (επομένως το πλήθος των πόρων, για τον ίδιο όγκο, είναι μεγαλύτερο), είναι περισσότερο ομοιόμορφα κατανεμημένοι μέσα στο υλικό και το σχήμα τους πλησιάζει το σφαιρικό [**Τσίμας και Τσιβιλής, (2004)**].

1.2.1.2 ΤΡΙΧΟΕΙΔΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ (SORPTIVITY)

Η τριχοειδής απορρόφηση (capillary suction, capillary absorption) ή απορροφητικότητα (sorptivity) είναι η ιδιότητα ενός πορώδους υλικού, όπως το σκυρόδεμα, να απορροφά και να μεταφέρει νερό και εξαρτάται από την αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία [**Taha et al (2001)**]. Η τριχοειδής απορρόφηση αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό μεταφοράς νερού στο αρηγμάτωτο σκυρόδεμα. Η τριχοειδής απορρόφηση, η φορά της οποίας είναι αντίθετη από τη φορά της βαρύτητας, οφείλεται στις ισχυρές δυνάμεις πρόσφυσης των πολωμένων μορίων νερού, καθώς και στις μεγάλες δυνάμεις συνοχής των μορίων νερού (επιφανειακή τάση) [**Στρογγύλης (2008)**]. Το φαινόμενο εξελίσσεται έως τη στιγμή που οι δυνάμεις λόγω βαρύτητας υπερβούν τις δυνάμεις πρόσφυσης, χρονική στιγμή που σχετίζεται άμεσα με τη διάμετρο των πόρων (μεγαλύτερη διάμετρο πόρων, μεγαλύτερη απορροφημένη ποσότητα νερού, μεγαλύτερες δυνάμεις λόγω βαρύτητας)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αρχική υγρασία του υλικού παίζει σημαντικό ρόλο στην μετρούμενη απορροφητικότητα. Ως εκ τούτου, η προετοιμασία των δοκιμίων οφείλει να

ακολουθεί κάποιους ενιαίους κανόνες, ώστε να περιορίζεται η επίδραση του διαφορετικού βαθμού υγρασίας στο εσωτερικό του σκυροδέματος (πλήρως ή μερικώς κορεσμένο). Πειραματικά αυτό επιτυγχάνεται μέσω ξήρανσης σε σταθερή θερμοκρασία για το (μεταβλητό) διάστημα που απαιτείται, ώστε η διαφορά βάρους σε δύο διαδοχικές ημερήσιες μετρήσεις να μην ξεπερνά το 0,1%. Σε σκυροδέματος υψηλής επιτελεστικότητας το διάστημα αυτό είναι συνήθως αυξημένο [Taha et al(2001)].

1.2.2 ΈΚΘΕΣΗ ΣΕ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Το περιβάλλον μέσα στο οποίο βρίσκεται το σκυρόδεμα είναι ένας από τους προφανείς παράγοντες επιρροής της ανθεκτικότητας του. Ένα επιθετικό περιβάλλον αναμένεται να μειώσει το χρόνο ζωής μίας κατασκευής καθώς θα επιταχύνει τη φθορά της. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, υπάρχει αλληλεξάρτηση μεταξύ των παραγόντων φθοράς.

Συνεπώς, κατά τη μελέτη μίας κατασκευής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλοι οι παράγοντες φθοράς και να πραγματοποιούνται οι κατάλληλες ενέργειες για την αντιμετώπιση τους. Ακόμη, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται και κατά τη φάση της κατασκευής, στις φάσεις της διάστρωσης, της συμπίκνωσης και της συντήρησης.

1.2.3 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ

1.2.3.1 ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ

Η διείσδυση ιόντων χλωρίου (Cl^-) στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος αποτελεί ένα από τα σπουδαιότερα προβλήματα ανθεκτικότητας, καθώς σχετίζεται άμεσα με τον κίνδυνο διάβρωσης του εγκιβωτισμένου οπλισμού. Η μεταφορά των χλωριόντων διαμέσου του δικτύου πόρων οδηγεί στην αποπαθητικοποίηση της προστατευτικής στρώσης οξειδίων του χάλυβα οπλισμού, επιταχύνοντας έτσι τις χημικές αντιδράσεις που σχετίζονται

με το φαινόμενο της διάβρωσης, προκαλώντας τελικώς την απώλεια των μηχανικών αντοχών και της ολκιμότητας του χάλυβα. Δεδομένου ότι οι πηγές χλωριόντων που περιβάλλουν τις συνήθεις κατασκευές είναι αρκετές (παραθαλάσσιο περιβάλλον μέσω άμεση επαφής ή αερομεταφοράς σταγονιδίων, αντιπαγωτικά άλατα προστασίας έναντι χιονοπτώσεων, πυρκαγιά σε χώρους αποθήκευσης υλικών από πολυβινύλιο, κ.λπ.), η ικανότητα του σκυροδέματος να ανθίσταται στη διείσδυση χλωριόντων στο εσωτερικό του, αποτελεί μια ιδιαίτερα ουσιαστική παράμετρο για τη βιωσιμότητα του.

1.2.3.2 ΠΗΓΕΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ

Οι κατασκευές από σκυρόδεμα έρχονται συχνά σε επαφή με πηγές χλωριόντων, όπως το θαλάσσιο περιβάλλον, τα αντιπαγωτικά άλατα, τα άλατα των υπόγειων νερών ή συστατικών υλικών (αδρανή ή νερό ανάμιξης με υψηλές περιεκτικότητες αλάτων). Τα χλωριόντα που επηρεάζουν τις κατασκευές εμπεριέχονται στο θαλασσινό νερό, στα αντιπαγωτικά άλατα και στο υφάλμυρο νερό [Kim et al (2007)]. Η παρουσία τους στο σκυρόδεμα οφείλεται σε πρωτογενή, αλλά και δευτερογενή αίτια [Σίδερης (2010)]. Πιο συγκεκριμένα:

Κατά τη φάση κατασκευής (πρωτογενή αίτια):

- Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του εβδομήντα γινόταν ευρεία (σκόπιμη) χρήση επιταχυντών για γρήγορη και φθηνότερη σκυροδέτηση, που περιείχαν χλωριόντα υπό τη μορφή του χλωριούχου ασβεστίου, $CaCl_2$
- Χρήση μη καθαρών αδρανών υλικών (contaminated aggregates) από παραθαλάσσιες περιοχές, με περιεκτικότητα σε θαλασσινό νερό
- Χρήση μη καθαρού, θαλασσινού ή υφάλμυρου, νερού (contaminated water) κατά την ανάμειξη

Κατά τη φάση λειτουργίας (δευτερογενή αίτια) :

- Υψηλή συγκέντρωση στην υγρασία περιβάλλοντος κοντά σε παραθαλάσσιες περιοχές, αερομεταφερόμενα άλατα (airborne salts)

- Άμεση επαφή ή ανακύκλιση της έκθεσης σε θαλασσινό νερό (παφλασμός κυμάτων, παλίρροια)
- Άμεση επαφή με άλατα που περιέχονται στο υπέδαφος (ground salts)
- Χρήση αντιπαγωτικών αλάτων (de-icing salts) (στο οδικό δίκτυο κατά του χειμερινούς μήνες για την τήξη των πάγων)
- Ειδικές κατασκευές (σιλό αποθήκευσης αλατιού)

1.2.3.3 ΜΟΡΦΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Τα συνολικά χλωριόντα (Cl_{total}) που εμπεριέχονται στο σκυροδέμα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: τα ελεύθερα χλωριόντα (Cl_{free}) που συναντώνται εντός του πορώδους διαλυμένα στο υδατικό διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος και τα δεσμευμένα στη σκληρυμένη φάση του σκυροδέματος χλωριόντα (Cl_{bound}), τα οποία χωρίζονται με τη σειρά τους στα χημικώς δεσμευμένα και τα φυσικώς δεσμευμένα χλωριόντα [Σίδερης (2010)]. Τα συνολικά χλωριόντα (total chlorides) προσδιορίζονται μέσω διάλυσης του δείγματος σε οξέα, διαδικασία που απομακρύνει όλα τα χλωριόντα από το δείγμα με μόνη εξαίρεση τα χλωριόντα που μπορεί να αποτελούν μέρος της χημικής δομής ορισμένων μη όξινων διαλυτών οργανικών πολυμερών [Taylor et al (1999)]. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [RILEM TC 178-TMC (2002)], ως περιεκτικότητα σε ελεύθερα χλωριόντα (free chlorides) ορίζεται η ποσότητα εκείνη των χλωριόντων στο δείγμα σκυροδέματος, η οποία μπορεί να ανακτηθεί μέσω της εφαρμογής υψηλών πιέσεων στο δείγμα σκυροδέματος (π.χ. ACI 222.1 (1996)), ενώ ως περιεκτικότητα σε υδατοδιαλυτά χλωριόντα (water-soluble) ορίζεται η ποσότητα των χλωριόντων που μπορούν να εξαχθούν σε θερμοκρασία δωματίου μέσω της διύλισης με νερό [π.χ. ASTM X1218 (2008)]. Πρέπει να δοθεί προσοχή στο γεγονός ότι η ποσότητα των υδατοδιαλυτών χλωριόντων συχνά συγγέεται εκ παραδρομής με την ποσότητα των χλωριόντων που βρίσκεται στους πόρους του σκυροδέματος, ποσότητα για την οποία δεν υπάρχει μέχρι στιγμής πρότυπη μέθοδος που να την καταγράφει [Taylor et al (1999)]. Είναι γενικά παραδεκτό ότι η σχέση μεταξύ ελεύθερων, συνολικών και υδατοδιαλυτών χλωριόντων δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από την επιλογή του είδους και της

διαβάθμισης των συστατικών του σκυροδέματος, καθώς και από το ιστορικό του δείγματος. Ο λόγος υδατοδιαλυτών προς τα συνολικά χλωριόντα έχει σημαντικό εύρος διακύμανσης.

1.2.3.4 ΕΠΙΤΡΕΠΤΑ ΟΡΙΑ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ

Η έννοια ενός επιτρεπτού ορίου χλωριόντων περιλαμβάνει μία εκτεταμένη αβεβαιότητα σχετικά με την καταλληλότητα της οριακής τιμής για διαφορετικά υλικά ή συνθήκες. Για τον λόγο αυτό η οριακή τιμή δεν πρέπει να ορίζεται μονοσήμαντα, αλλά για κάθε ξεχωριστή περίπτωση (υλικών, συνθηκών) πρέπει να λαμβάνει διαφορετικές τιμές [Taylor et al (1999)]. Η έννοια μία οριακής τιμής διαθέτει δύο ξεχωριστά στάδια. Το πρώτο σχετίζεται με την ικανότητα του τσιμέντου Portland και των πρόσθετων τσιμεντοειδών υλικών (ιπτάμενη τέφρα, πυριτική παιπάλη, σκωρία υψικαμίνων μετακαολίνη, κ.α.) να δεσμεύουν χημικώς τα χλωριόντα, αποκλείοντας τη συμμετοχή τους στην αντίδραση της διάβρωσης [Taylor et al (1999)]. Όσα χλωριόντα δεν δεσμευθούν χημικά, είναι ελεύθερα να συμβάλλουν στην διάβρωση του οπλισμού. Το δεύτερο στάδιο απαιτεί την παρουσία ενός ελάχιστου ποσοστού χλωριόντων, το οποίο ακόμα και σε περιβάλλον υψηλού pH θα καταστεί ικανό να προσπελάσει την παθητική στρώση και να ξεκινήσει την διάβρωση του οπλισμού.

Το εν λόγω ποσοστό χλωριόντων που θα ενεργοποιήσει τους μηχανισμούς διάβρωσης του οπλισμού, δίδεται από τον λόγο χλωριόντων προς τα ιόντα υδροξυλίου. Σύμφωνα με κάποιους ερευνητές [Σίδερης (2010)], η πρώτη προσπάθεια προσδιορισμού του ελάχιστου ικανού ορίου συγκέντρωσης χλωριόντων πραγματοποιήθηκε από τον [Hausmann (1967)], ο οποίος εκτίμησε ως συγκέντρωση έναρξης της διάβρωσης, τη στιγμή όταν η συγκέντρωση των χλωριόντων (Cl) ξεπεράσει το 60% της συγκέντρωσης των ιόντων υδροξυλίου (OH). Τονίζεται ότι το όριο αυτό σχετίζεται άμεσα με το pH, καθώς οποιαδήποτε έστω και μικρή διαφοροποίηση του pH θα οδηγήσει σε σημαντική αλλαγή στα (OH). Η παραπάνω τιμή επηρεάζεται επιπλέον από τη θερμοκρασία και την υγρασία του σκυροδέματος. Σε δομικά στοιχεία που δεν έχουν χάσει την αλκαλικότητά τους ($pH = 12.4$), αυτό συμβαίνει όταν η συνολική περιεκτικότητα σε χλωριόντα (Cl) (πρωτογενής και δευτερογενής) προσεγγίζει το

0,40 % κ.β. του τσιμέντου. Άλλα μοντέλα που συναντώνται στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούν οριακή συγκέντρωση χλωριόντων για έναρξη της διάβρωσης ίση με το 1,00 % κ.β. του τσιμέντου.

1.2.3.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ

Η γνώση των διάφορων μηχανισμών προσβολής από χλωριόντα θεωρείται κρίσιμη για τον σωστό σχεδιασμό των κατασκευών. Η μεταφορά των χλωριόντων περιλαμβάνει τους ακόλουθους τρεις κύριους μηχανισμούς μεταφοράς χλωριόντων στο σκυρόδεμα, οι οποίοι μπορεί να δρουν είτε μεμονωμένα είτε ταυτόχρονα: (i) η διάχυση (diffusion), λόγω της διαφοράς συγκέντρωσης, (ii) η τριχοειδής απορρόφηση (capillary absorption, capillary suction, capillary rise) και (iii) η διείσδυση, λόγω διαφοράς πίεσης, δηλαδή ροή υπό υδροστατική πίεση (permeability, permeation) [ACI 201.2R-08 9 (2008), Stanish et al (1997), Nunes et al (2009), Σίδερής Κ. (2010), Audenaert et al (2010), Lee and Chisholm (2005), Audenaert (2005)]. Επιπλέον, θα πρέπει να αναφερθεί και ένας τέταρτος μηχανισμός μεταφοράς, που αφορά την μετακίνηση των χλωριόντων μετά την έναρξη της διάβρωσης. Ο μηχανισμός αυτός αφορά στη μετακίνηση (migration) των χλωριόντων, η οποία επιβάλλεται μέσω της διαφοράς δυναμικού. Η διαφορά δυναμικού που δημιουργείται μεταξύ διαβρωμένων και μη περιοχών του οπλισμού, προκαλεί τη ροή των αρνητικά φορτισμένα χλωριόντων προς την ήδη διαβρωμένη περιοχή.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [Stanish et al (1997), Sirinivatnanon and Khatri (1999), Audenaert et al (2010)], ο κυριότερος μηχανισμός προσβολής είναι αυτός της **διάχυσης**, ειδικά σε περιπτώσεις κορεσμένου περιβάλλοντος. Γενικά, όταν η επιφάνεια του σκυροδέματος είναι εκτεθειμένη σε χλωριόντα, ο μηχανισμός της διάχυσης ενεργοποιείται λόγω της διαφοράς συγκέντρωσης μεταξύ της επιφάνειας και του εσωτερικού του σκυροδέματος.

Η **τριχοειδής απορρόφηση**, γνωστή και ως προσρόφηση μέσω τριχοειδών πόρων, και ένας από του συνηθέστερους μηχανισμούς προσβολής σε περιπτώσεις κύκλων ύγρανσης και ξήρανσης της επιφάνειας του σκυροδέματος (ειδικά σε περιπτώσεις στεγνών επιφανειών),

δεν μπορεί από μόνη της να δημιουργήσει πρόβλημα στον οπλισμό. Μειώνει όμως την διαθέσιμη απόσταση που χρειάζεται να διανυθεί από τα χλωριόντα ώστε αυτά να φθάσουν τη στάθμη του οπλισμού μέσω διάχυσης. Η διαδικασία της τριχοειδούς απορρόφησης προσεγγίζει το νόμο της διάχυσης.

Ο τρίτος μηχανισμός, που αφορά στη **διείσδυση** χλωριόντων, ενεργοποιείται όταν το σκυρόδεμα εκτίθεται σε μία μονόπλευρη πίεση νερού που περιέχει χλωριόντα. Στην περίπτωση αυτή, η είσοδος των χλωριόντων στο σκυρόδεμα πραγματοποιείται μέσω της ροής νερού, η οποία προκαλείται από τη διαφορά πίεσης μεταξύ των ελευθέρων επιφανειών του σκυροδέματος. Τα χλωριόντα μεταφέρονται και συγκεντρώνονται στην πλευρά μηδενικής πίεσης, ενώ το νερό εξατμίζεται. Αυτό έχει συνέπεια, η μεγαλύτερη συγκέντρωση να παρατηρείται τελικά στην πλευρά μηδενικής πίεσης και όχι στην εκτεθειμένη πλευρά, όπου τα χλωριόντα συνυπάρχουν με νερό και άρα έχουν χαμηλότερη συγκέντρωση.

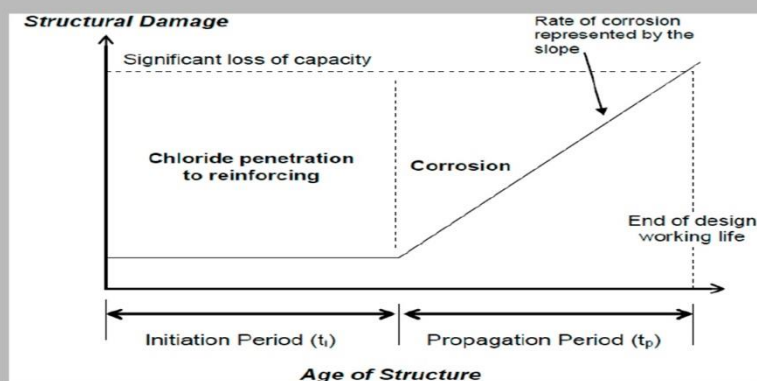
Σημειώνεται ότι οι εν λόγω μηχανισμοί δρουν με σημαντικά αργούς ρυθμούς και κατά συνέπεια, η μελέτη του φυσικού φαινομένου δεν είναι δυνατό να ελέγχει σε πραγματικούς χρόνους παρά μόνο μέσω επιταχυνόμενων μεθόδων, όπως αυτές θα αναλυθούν στην συνέχεια.

1.2.3.6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Ως διάβρωση ορίζεται η ηλεκτροχημική διαδικασία που απαιτεί τη δημιουργία μιας ανόδου, όπου λαμβάνει χώρα η οξειδωση (oxidation) και μίας καθόδου, όπου λαμβάνει χώρα η αναγωγή (reduction). Η διάβρωση ολοκληρώνεται σε τρία βασικά στάδια: (α) έναρξη διάβρωσης (corrosion initiation), (β) εξέλιξη διάβρωσης (corrosion growth), (γ) καταστροφή οπλισμού ή εν γένει απώλεια λειτουργικότητας [ACI 201,2R (2008)].

Μια πολύ καλή απεικόνιση της διαδικασίας σταδιακής απώλειας της λειτουργικότητας και της στατικής επάρκειας των κατασκευών δίδεται στη βιβλιογραφία [Lee and Chishom (2005)], με βάση το μοντέλο έναρξης διασποράς του [Tuutti (1982)] (Initiation-Propagation Model), το οποίο περιγράφεται στο **Σχήμα. 1.6** Κατά τη φάση της έναρξης (initiation), τα

χλωριόντα διεισδύουν στο σκυρόδεμα προς τον οπλισμό και δημιουργούν ικανή συγκέντρωση στη θέση των οπλισμών, η οποία τελικά λαμβάνει χώρα η ενεργός διάβρωση του χάλυβα, ενώ η πίεση διαστολής που ασκείται διαμέσου των σχετικώς ογκοδέστερων προϊόντων της διάβρωσης αποφλοιώνει το περιβάλλον σκυρόδεμα της επικάλυψης. Σε συνδυασμό με την απομείωση της διατομής του χάλυβα, η εν λόγω βλάβη είναι δυνατό να υποβαθμίσει σημαντικά τη λειτουργικότητα και, τελικώς, την στατική επάρκεια της κατασκευής. Το πέρας της φάσης αυτής συνεπάγεται τη διακοπή της λειτουργίας της κατασκευής και απαιτεί της άμεση λήψη διορθωτικών μέτρων (επεμβάσεις, ενισχύσεις).



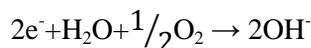
Σχήμα 1.6 : Μοντέλο έναρξης – διασποράς διάβρωσης του Tuutti (Initiation-Propagation Model)

Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί ότι ο χάλυβας δεν κινδυνεύει πάντοτε από διάβρωση, παρά το γεγονός ότι το πορώδες του σκυροδέματος επιτρέπει την απορρόφηση και τη συγκράτηση υγρασίας στο εσωτερικό του. Η προστασία του οπλισμού οφείλεται στην αλκαλικότητα του σκυροδέματος, στην ύπαρξη δηλαδή τριχοειδών πόρων με υψηλά ποσοστά συγκέντρωσης σε οξειδία ασβεστίου, νατρίου και καλίου, τα οποία μέσω της διεισδύουσας υγρασίας σχηματίζουν υδροξείδια. Τα υδροξείδια αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλή αλκαλικότητα και δημιουργούν έντονες αλκαλικές συνθήκες σε τοπικό επίπεδο [Broomfield (1997)].

Κατά την έναρξη της διάβρωσης του χάλυβα, τα προϊόντα της διάβρωσης (ιόντα σιδήρου) διαλύονται στο νερό των πόρων του σκυροδέματος, απελευθερώνοντας ταυτόχρονα ηλεκτρόνια, σύμφωνα με την ανοδική αντίδραση:

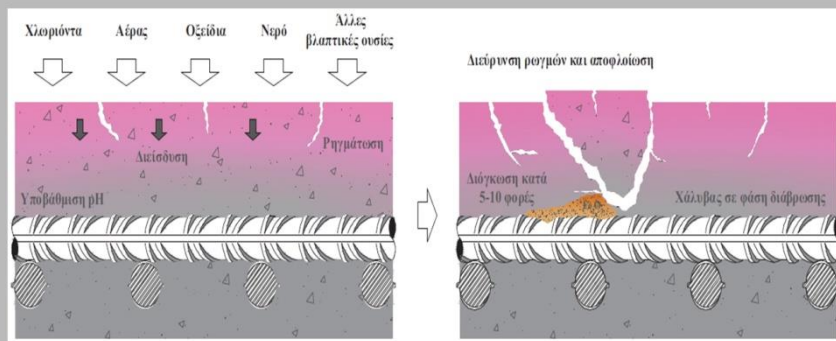
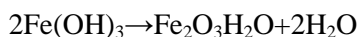
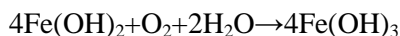
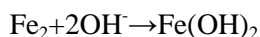


Τα δύο ηλεκτρόνια (e^-) που απελευθερώνονται κατά την ανοδική αντίδραση πρέπει, για λόγους διατήρησης της ηλεκτρικής ουδετερότητας να καταναλωθούν σε κάποιο διαφορετικό σημείο της επιφάνειας του χάλυβα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της καθοδικής αντίδρασης, μόνο με ταυτόχρονη παρουσία νερού και οξυγόνου:



Ο σχηματισμός των ιόντων υδροξυλίου (OH^-) αυξάνουν τοπικά την αλκαλικότητα, ενδυναμώνοντας έτσι την παθητική στρώση και αποτρέποντας τις επιδράσεις της ενανθράκωσης και των χλωριόντων στην κάθοδο.

Η δημιουργία σκωρίας πραγματοποιείται με την ακόλουθη πορεία: υδροξείδιο σιδήρου $Fe(OH)_2 \rightarrow$ σιδηρικό υδροξείδιο $Fe(OH)_3 \rightarrow$ ένυδρο οξείδιο του σιδήρου (σκωρία) $Fe_2O_3 \cdot H_2O$, σύμφωνα με τις αντιδράσεις:

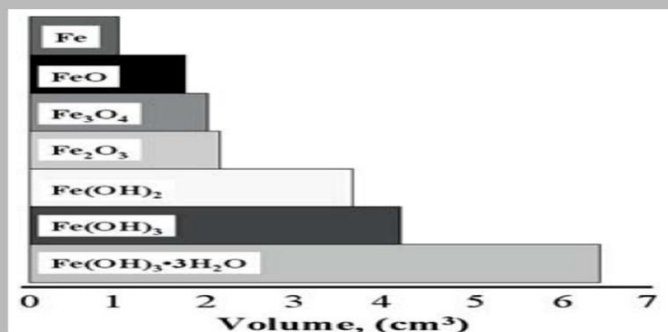


Σχήμα 1.7 : Διαδικασία διάβρωσης: ρηγμάτωσης και αποβλήωσης σκυροδέματος

[πηγές: <http://www.cathodicprotectiontech.com/process.html>, Broomfield (1997)]

Το άνυδρο οξείδιο του σιδήρου Fe_2O_3 έχει διπλάσιο όγκο από τον χάλυβα που αντικαθιστά, όταν ενυδατώνεται μετατρέπεται σε πορώδες με αποτέλεσμα την ακόμα

μεγαλύτερη διόγκωσή του. Η συνολική τοπική αύξηση του όγκου κυμαίνεται μεταξύ δύο και δέκα φορές του αρχικού όγκου [Broomfield (1997), ACI 222R (2001)], με αποτέλεσμα οι αναπτυσσόμενες εσωτερικές τάσεις να οδηγούν σε ρηγμάτωση (cracking) και συχνά σε αποφλοΐωση (spalling) του σκυροδέματος **Σχήμα 1.7**. Για την καλύτερη κατανόηση της μεταβολής του όγκου των προϊόντων των αντιδράσεων, ανηγμένου στον αρχικό (μοναδιαίο) όγκο του σιδήρου παρατίθενται το **Σχήμα 1.8** [ACI 222R (2001)].



Σχήμα 1.8 : Όγκος προϊόντων διάβρωσης [πηγή: ACI 222R (2001)]

Είναι γνωστό ότι ο εγκιβωτισμένος χάλυβας σε μία κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος προστατεύεται παθητικά («παθητική προστασία») από το φαινόμενο διάβρωσης, μέσω ενός λεπτού στρώματος (φιλμ) οξειδίων του σιδήρου, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (γνωστό και ως «παθητική στρώση» γύρω από τον οπλισμό [Broomfield (1997), Lee and Chisholm (2005)], το οποίο δημιουργείται και διατηρείται στην επιφάνεια του λόγω της υψηλής αλκαλικότητας ($\text{pH} \approx 13$) του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Η καταστροφή του προστατευτικού στρώματος, γνωστή και ως αποπαθητικοποίηση του χάλυβα οπλισμού, οδηγεί στην έναρξη του φαινομένου της διάβρωσης.

Κατά την διείσδυση επαρκούς ποσότητας χλωριόντων (αλλά και κατά την ενανθράκωση) στην ζώνη επικάλυψης του οπλισμού, η παθητική αυτή στρώση προσβάλλεται και διαρρηγνύεται, με αποτέλεσμα την τοπική πτώση του pH (και όχι γενικευμένη πτώση όπως συμβαίνει στην περίπτωση της ενανθράκωσης) [Sirivivatnanon and Khatri (1999), Σίδερης (2010)]. Σε συνδυασμό με την περιεχόμενη υγρασία και το οξυγόνο ξεκινά η διαδικασία της διάβρωσης, η οποία παρουσία επαρκούς συγκέντρωσης χλωριόντων

επιταχύνεται (καταλυτική δράση χλωριόντων). Σημειώνεται ότι κατά την διαδικασία της οξειδωσης δεν καταναλώνεται το σύνολο των χλωριόντων, όταν αυτά είναι σε μεγάλες συγκεντρώσεις. Αντίθετα ένα μέρος παραμένει διαθέσιμο και η διαδικασία οξειδωσης του σιδήρου θα επαναληφθεί με την είσοδο νέων χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

Οι δύο κυριότεροι λόγοι που οδηγούν στην αποπαθητικοποίηση του χάλυβα, οι οποίοι δρουν μεμονωμένα ή και συνδυαστικά, συνίστανται αφενός στην διείσδυση χλωριόντων από εξωτερικές πηγές στο εσωτερικό του σκυροδέματος και έως τη στάθμη του οπλισμού μέσω του δικτύου πόρων και αφετέρου στην μείωση της αλκαλικότητας του περιβάλλοντος σκυροδέματος ($\text{pH} \leq 9$). Η μείωση αυτή συντελείται λόγω της διείσδυσης του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) της ατμόσφαιρας και της συνεπακόλουθης αντίδρασης του με το υδροξείδιο του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Σημειώνεται, δε, ότι ο δεύτερος μηχανισμός είναι δυνατό να επιταχύνει την εξέλιξη του πρώτου μηχανισμού διάβρωσης. Ο ρυθμός εξέλιξης του φαινομένου της διάβρωσης εξαρτάται από την συνύπαρξη οξυγόνου (O_2) και νερού (H_2O).

1.2.3.7 ΤΡΟΠΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ / ΟΠΛΙΣΜΟΥ

Οι τρόποι προστασίας του οπλισμού έναντι διαβρώσεως δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, για τον λόγο αυτό αναφέρονται μόνο επιγραμματικά για λόγους πληρότητας. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στην βιβλιογραφία. Οι τρόποι προστασίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες που αφορούν (α) το σκυρόδεμα, ώστε αυτό να καταστεί λιγότερο διαπερατό και περισσότερο ανθεκτικό σε βλαπτικούς παράγοντες που θα οδηγήσουν σε φαινόμενα διάβρωσης του εγκιβωτισμένου οπλισμού και (β) τον χάλυβα, ώστε να έχει τη δυνατότητα να ανθίσταται ή να καθυστερεί σημαντικά τα φαινόμενα διάβρωσης. Πιο συγκεκριμένα:

Μέθοδοι προστασίας οπλισμού:

- Εφαρμογή καθοδικής προστασία (εφαρμογή ηλεκτρικού δυναμικού αντίθετου με το δυναμικό διάβρωσης που καθιστά τον οπλισμό μη οξειδώσιμο).
- Ηλεκτροχημική απομάκρυνση χλωρίου (αφαλάτωση)

- Χρήση ειδικών χαλύβων (ανοξειδωτοι ή με επικάλυψη εποξικής ρητίνης)
- Επιμελής χρήση αναστολέων διάβρωσης (κατά την παρασκευή σκυροδέματος)

Μέθοδοι προστασίας σκυροδέματος:

- Χρήση κατάλληλων τσιμέντων Portland που περιορίζουν την ικανότητα του σκυροδέματος να δεσμεύει χλωριόντα, η οποία εξαρτάται από την περιεκτικότητα αργιλικού άλατος, C_3A^1 .
- Χρήση ποζολανικών υλικών στο μίγμα, τα οποία συμβάλλουν αφενός στην μείωση του πορώδους, με συνέπεια να δυσχεραίνεται η διείσδυση των χλωριόντων, και αφετέρου στη δέσμευση από τις ποζολάνες είτε (α) φυσικά, λόγω της προσρόφησης στα τοιχώματα των μικρότερων πόρων των ποζολανικών μιγμάτων είτε (β) χημικά, μέσω της δέσμευσης των χλωριόντων από δραστικά στοιχεία των ποζολάνων όπως το αργιλικό υλικό. Σημειώνεται ότι η χρήση ποζολάνης απαιτεί επαρκή συντήρηση για την καλή απόδοση των ευεργετικών χαρακτηριστικών στο τελικό προϊόν. Η διάρκεια συντήρησης, λόγω και της αργής ποζολανικής δράσης μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη και να φτάνει έως και 28-90 ημέρες [Guneyisi et al (2009)]
- Επιφανειακή προστασία: πάχος επικάλυψης, πάχος και σύνθεση επιχρίσματος, ειδικές χρωστικές ουσίες (π.χ σιλοξυ-σιλανίων) .

1.3 ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η εφαρμογή του Ευρωπαϊκού Προτύπου Σκυροδέματος **EN 206-1 (2000)** εισήγαγε μία ενιαία, για όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, τεχνική προδιαγραφή για την παραγωγή του σκυροδέματος. Το σκυροδέμα οφείλει να εναρμονιστεί με την **Οδηγία του Συμβουλίου της Ευρώπης 106/CE (1989)** που αφορά τα δομικά υλικά.

¹ Τα αποτελέσματα διαφόρων μελετών αποδεικνύουν ότι το αργιλικό τριασβέστιο (C_3A) του τσιμέντου παίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση της διάβρωσης του χάλυβα, όταν το τσιμέντο εκτίθεται σε μέσα, που περιέχουν χλωριόντα ή θειικά ιόντα. Έχει βρεθεί ότι υπάρχει γενικά καλή συσχέτιση μεταξύ της περιεκτικότητας σε (C_3A) και της ικανότητας δέσμευσης των χλωριόντων. [Sakr K.(2005), Dhir et al. (1996)]. Όπως προαναφέρθηκε, η φάση (C_3A) στα ενυδατωμένα τσιμέντα Portland (PC) δεσμεύει τα χλωριόντα, κατά την αντίδρασή της με αυτά, προς παραγωγή της χλωριοαργιλικής φάσης $AFm C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (ή $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) ή αλλιώς του άλατος του Friedel [Dhir et al. (1996), Reddy et al. (2002), Suryavanshi et al. (1995, 1998)]

Η προτυποποίηση των υλικών (τσιμέντο, αδρανή, πρόσθετα, πρόσμικτα), ο υποχρεωτικός έλεγχος συμμόρφωσης αντοχών και λοιπών ιδιοτήτων με βάση αυστηρά κριτήρια συμμόρφωσης, αλλά και η υποχρέωση του παραγωγού για διαρκή έλεγχο της παραγωγής σκυροδέματος με βάση τις αρχές του Προτύπου Ποιότητας **ISO 9001 (2008)** είναι δυνατό να διασφαλίσουν την αναγκαία στάθμη επιτελεστικότητας που θα απαιτούσε η παραγωγή σκυροδέματος.

Πέραν της σημαντικής καινοτομίας που αφορά στον προαναφερθέντα έλεγχο παραγωγής, τον έλεγχο συμμόρφωσης και την αξιολόγηση της συμμόρφωσης, η πρώτη και πλέον αξιόλογη καινοτομία του νέου Ευρωπαϊκού Προτύπου Σκυροδέματος αποτελεί η υιοθέτηση κατηγοριών έκθεσης στο εξωτερικό περιβάλλον [**Σακελλαρίου (2008)**]. Η προσβολή του σκυροδέματος από περιβαλλοντικές δράσεις ταξινομείται σε κατηγορίες έκθεσης [**EN 206-1 (2000)**]. Συνοπτικά, οι κατηγορίες έκθεσης είναι οι ακόλουθες:

- Κίνδυνος διάβρωσης οπλισμού λόγω ενανθράκωση (XCi)
- Κίνδυνος διάβρωσης οπλισμού λόγω χλωριόντων που προέρχονται από το θαλασσινό νερό (XD_i)
- Κίνδυνος διάβρωσης οπλισμού λόγω χλωριόντων που προέρχονται από θαλασσινό νερό (XS_i)
- Προσβολή από ψύξη-απόψυξη με ή χωρίς αντιπαγωτικά άλατα (XF_i)
- Χημική προσβολή (XA_i)

Ελλείπει ευρωπαϊκών ή εθνικών προτύπων που να περιλαμβάνουν ειδικές μεθόδους σχεδιασμού για ανθεκτικότητα για κάθε διαφορετική κατηγορία δράσης, το νέο Ευρωπαϊκό Πρότυπο Σκυροδέματος περιορίζεται στο να αντιμετωπίζει τους παραπάνω κινδύνους μέσω περιοριστικών τιμών στη σύνθεση (μέγιστο λόγος w/c, ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, ελάχιστη κατηγορία αντοχής, ελάχιστη περιεκτικότητα σε αέρα) που βασίζονται σε μακροχρόνια εμπειρία και, προφανώς, σχετίζονται ταυτόχρονα με τον επιθυμητό χρόνο ζωής της κατασκευής (**Πίνακας 1.2**).

Πίνακας 1.2 : Περίπτωση διάβρωσης οπλισμού λόγω χλωριόντων [πηγή: **EN 206-1 (2000)**]

Απαιτήσεις σκυροδέματος	Κατηγορία έκθεσης διάβρωση λόγω χλωριόντων					
	Χλωριόντα που προέρχονται από θαλασσινό νερό			Χλωριόντα που δεν προέρχονται από θαλασσινό νερό		
	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3
Μέγιστος λόγος w/c	0.50	0.45	0.45	0.55	0.55	0.45
Ελάχιστη κατηγορία αντοχής	C 30/37	C 35/45	C 35/45	C 30/37	C 30/37	C 35/45
Ελάχιστη περιεκτικότητα Τσιμέντου (kg/m ³)	300	320	340	300	300	320
Ελάχιστο πάχος επικάλυψης (mm)	40	40	50	35	40	50

Οι κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα, ενώ συχνά βρίσκονται σε επιθετικό περιβάλλον, έχουν προσδόκιμη διάρκεια ζωής, ανάλογα με τη σπουδαιότητά τους, από 50 έτη έως και περισσότερα από 100 έτη, με μικρές ή και καθόλου επεμβάσεις. Για τον λόγο αυτό απαιτείται οι κατασκευές αυτές να είναι ανθεκτικές. Ειδικά για παραθαλάσσιες κατασκευές είναι η διείσδυση χλωριόντων, η οποία οδηγεί σε διάβρωση που περιεχόμενου οπλισμού και, ως συνεπακόλουθο, τη μείωση της αντοχής, της λειτουργικότητας και της αισθητικής της κατασκευής. Όπως θα αναλυθεί διεξοδικότερα σε επόμενη παράγραφο, οι οπλισμοί που είναι ενσωματωμένοι στο σκυρόδεμα αποπαθητικοποιούνται όταν μια συγκεκριμένη ποσότητα χλωριόντων συγκεντρώνεται στην περιβάλλουσα περιοχή, αυξάνοντας τον κίνδυνο διάβρωσης που σχετίζεται με την περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε χλωριόντα. Η αποπαθητικοποίηση του χάλυβα οδηγεί σε πρόωμη ανάγκη επισκευής.

Είναι γνωστό ότι ορισμένοι από τους προαναφερθέντες προαπαιτούμενους παράγοντες και, συγκεκριμένα, η διάστρωση και η συμπύκνωση του σκυροδέματος αποτελούν τα «ασθενή» σημεία μιας κατασκευής, καθώς συχνά δεν πραγματοποιούνται από εξειδικευμένο και έμπειρο προσωπικό. Ως εκ τούτου, το σκυρόδεμα που τελικά εφαρμόζεται είναι πιθανό να έχει υποδεέστερη ποιότητα και να είναι λιγότερο ανθεκτικό από αυτό που σχεδιάστηκε.

Στο **Πίνακα 1.3** που ακολουθεί, δίνεται η ταξινόμηση την ανθεκτικότητας σκυροδέματος με βάση τους δείκτες για διαφορετικές παραμέτρους ανθεκτικότητας σύμφωνα με την γαλλική βιομηχανία σκυροδέματος, οι οποίες βασίζονται σε εκτεταμένες πειραματικές έρευνες [**V. Baroghel-Bouny (2008)**].

Πίνακας 1.3 : Ταξινόμηση (ενδεικτική) ανθεκτικότητα σκυροδέματος και οριακές τιμές για διαφορετικές (G : γενικός, S : υποκατάστατος δείκτης) παραμέτρους ανθεκτικότητας [πηγή : **V. Baroghel-Bouny (2008)**]

	Παράμετροι ανθεκτικότητας	Ταξινόμηση και οριακές τιμές				
		Πολύ χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ υψηλή
G	Πορώδες, διαπερατότητα σε νερό (%)	>16	14-16	9-12	9-12	6-9
S	Πορώδες μετρούμενο με πορομετρία υδραργύρου P_{Hg} (%)		13-16	9-13	6-9	3-6
S	Ηλεκτρική αντίσταση (Ohm·m)	<50	50-100	100-250	250-1000	1000
	Συντελεστής διάχυσης D_{eff} ($10^{-12} m^2/s$)	>8	2-8	1-2	0.1-1	<0.1
G	Συντελεστής διάχυσης $D_{nssm(mig)}$ ($10^{-12} m^2/s$)	>50	10-50	5-10	1-5	<1
G	Συντελεστής διάχυσης $D_{nssm(diff)}$ ($10^{-12} m^2/s$)				<5	
G	Διαπερατότητα σε αέρα K_{gas} ($10^{-18} m^2$)	>1000	300-1000	100-300	10-100	<10
G	Υδατοπερατότητα μετά από πλήρη κορεσμό K_{liq} ($10^{-18} m^2$)	>10	1-10	0.1-1	0.01-0.1	<0.01
	Ενδεικτική κατηγορία σκυροδέματος (EC2)		C25-30	C30-60	C55-80	>C80

2.1 ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗΣ

Ο μετακαολίνης ($2\cdot SiO_2\cdot Al_2O_3$) αποτελεί ένα άμορφο χαλαζιακό υλικό υψηλής ποζολανικότητας, με κόκκους γωνιώδους πλακοειδούς μορφής, το οποίο παράγεται από έψηση (calcination), καθαρού ή επεξεργασμένου καολίνη ($2\cdot SiO_2\cdot Al_2O_3\cdot 2H_2O$) σε θερμοκρασίες από 650 έως και 850 °C, ακολουθούμενης από άλεση για την επίτευξη πολύ μεγάλης λεπτότητας μεταξύ 700 και 900 m²/kg .

Ο καολίνης είναι μία μαλακή άργιλος λευκού χρώματος με ειδικό βάρος 2.20-2.60 g/cm³, που προέρχεται από αστριούς (τηκτοπυριτικά ορυκτά) και άλλα μεταλλικά ορυκτά [Advanced Concrete Technology (2005)]. Η συνήθης χρήση του καολίνη αφορά στην κατασκευή πορσελάνης, ενώ συναντάται ως πληρωτικό υλικό στην βιομηχανία χάρτου και υφασμάτων κ.α.

Σε ένα πέτρωμα καολίνη, μαζί με τον καολινίτη συνυπάρχουν συνήθως και προσμίξεις άλλων ορυκτών όπως χαλαζίας ή χριστοβαλίτης, ανάτασης ή ρουτίλιο, αλουνίτης, σιδηροπυρίτης, λειμωνίτης, μοντμοριλλονίτης, άστριοι, μαρμαρυγίες, μοσχοβίτης ή βιοτίτης, λεπιδόλιθος και οξείδια του σιδήρου.

Οι φυσικές ιδιότητες του μετακαολίνη εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των πρωτογενών υλικών την θερμοκρασία έψησης και τις διαδικασίες ολοκλήρωσης της παρασκευής του [Advanced Concrete Technology (2005)]. Η πυκνότητα (ειδικό βάρος) του μετακαολίνη είναι χαμηλότερη από του τσιμέντου (3,15 t/m³) και είναι περίπου 2,40 t/m³, με αποτέλεσμα ο όγκος των τσιμεντοειδών υλικών να αυξάνεται όταν το τσιμέντο αντικαθίσταται από μετακαολίνη. Αυτό προτείνεται [Shirvill (1992) κατά Advanced Concrete Technology (2005)] ότι μπορεί να αντιμετωπιστεί, μειώνοντας την περιεκτικότητα

της άμμου κατά 5% για κάθε 10% τσιμέντου που αντικαθίσταται από πυριτική παιπάλη. Επιπλέον, η προσθήκη μετακαολίνη αυξάνει την απαίτηση σε νερό, η οποία όμως μπορεί να εξισορροπηθεί μέσω κατάλληλης ποσότητας ρευστοποιητή.

Λόγω της άμορφης δομής του, ο μετακαολίνης αντιδρά με πολύ μεγάλη ταχύτητα με το παραγόμενο από την ενυδάτωση του τσιμέντου υδροξείδιο του ασβεστίου ($Ca(OH)_2$). Συγκριτικά με την πυριτική παιπάλη, έχει αποδειχθεί πειραματικά [**Largent (1978)** κατά **Advanced Concrete Technology (2005)**] ότι η ποζολανική δραστηκότητα του μετακαολίνης (κατανάλωση $Ca(OH)_2$ ανά γραμμάριο μετακαολίνης) είναι περίπου 2.5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη δραστηκότητας της πυριτικής παιπάλης.

Όπως και στην περίπτωση της πυριτικής παιπάλης, ο μετακαολίνης συνεισφέρει σημαντικά στη συνεκτικότητα του μίγματος, ενώ περιορίζει το φαινόμενο της εξίδρωσης. Επιπλέον, η υψηλή περιεκτικότητα λεπτόκοκκων τσιμεντοειδών υλικών έχει ως αποτέλεσμα την ιδιαίτερα βελτιωμένη τελική επιφάνεια του σκυροδέματος.

Η βασικότερη δράση του μετακαολίνης αφορά στη βελτίωση της ανθεκτικότητας, μέσω της μείωσης της περατότητας σε εξωγενείς επιθετικούς παράγοντες (χλωριόντα, διοξείδιο του άνθρακα, κτλ). Ο μετακαολίνης δρα στις διεπιφάνειες μεταξύ του ενυδατωμένου τσιμέντου και των υπόλοιπων συστατικών του σκυροδέματος, που αποτελούν αδύναμες περιοχές της μικροδομής του σκυροδέματος. Στις περιοχές αυτές συσσωρεύονται προσανατολισμένοι κρύσταλλοι CH και νερού, με αποτέλεσμα τη δημιουργία πόρων και μικρορωγμών. Ο μετακαολίνης αντιδρά ποζολανικά με το CH , μειώνοντας έτσι την περιεκτικότητα και τη συγκέντρωση του στις διεπιφάνειες και παράγοντας, παράλληλα, ένυδρο πυριτικό ασβέστιο ($C-S-H$). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της συνεκτικότητας και τη μείωση του πορώδους. Η συμπαγής δομή βελτιώνεται ακόμα περισσότερο από την παρουσία των υπόλοιπων κρυσταλλικών ενώσεων που παράγονται κατά την ποζολανική αντίδραση. Οι ενώσεις αυτές έχουν ως χαρακτηριστικό τον μικρό τους όγκο, που τους δίνει τη δυνατότητα να εισέρχονται στους πόρους, μειώνοντας έτσι το εύρος τους (<20 nm) ή ακόμα και εξαλείφοντάς μετακαολίνη, κατά την οποία οι λεπτότεροι κόκκοι δρουν ως πληρωτικό μέσο. Συμπληρωματικές πληροφορίες που αφορούν στο μηχανισμό δράσης, αλλά και μια πλήρης βιβλιογραφική ανασκόπηση μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία [**Siddique and Klaus (2009)**, **Badogiannis et al (2005)**, **Sabir et al (2001)**].

Επομένως η χρήση του μετακαολίνης στην παρασκευή σκυροδέματος βελτιώνει σημαντικά το πορώδες αλλά και την κατανομή του στη μάζα του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της διαπερατότητάς του. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος που περιλαμβάνει μετακαολίνη έχει διερευνηθεί εκτενώς, οδηγώντας σε αντιφατικά συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία [**Advanced Concrete Technology (2005)**] μέρος των ερευνητικών εργασιών έδειξαν ότι η αντοχή μένει ανεπηρέαστη, ενώ άλλοι ερευνητές απέδειξαν τη θετική επίδραση του μετακαολίνης στην αντοχή. Οι διαφορές αποδόθηκαν στην σειρά ανάμιξης των υλικών, στη μελέτη σύνθεσης, τη σύσταση του τσιμέντου και την ποιότητα του μετακαολίνης. Η βέλτιστη ποσότητα μετακαολίνης ως υλικού αντικατάσταση του τσιμέντου βρέθηκε [**Gold and Shirvill (1992)** κατά **Advanced Concrete Technology (2005)**] μεταξύ 5 και 10%, ενώ μεγαλύτερα ποσοστά δεν φάνηκε να επηρεάζουν περαιτέρω τη θλιπτική αντοχή, εύρημα, πάντως, που ανατράπηκε από μεταγενέστερες μελέτες [**Poon et al (2006), Guneyisi et al (2008), Hassan et al (2010, 2012), Madandoust and Mousavi (2012), Ramezianipour and Bahrami Jovein (2012)**]

Πέραν των θετικών δράσεων στην απόδοση του σκυροδέματος, η χρήση του μετακαολίνης, έχει σημαντική περιβαλλοντική αξία, υπό την έννοια ότι ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου, συνεισφέρει στη μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που συνοδεύονται από την παρασκευή του τσιμέντου. Επιπροσθέτως, η χρήση του για την κατασκευή ανθεκτικότερων κτηρίων και υποδομών, με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και περιορισμένη ανάγκη επισκευών και συντήρησης, μπορεί να έχει σημαντικά οφέλη στην οικονομία και το περιβάλλον.



Σχήμα 2.1 : Μετακαολίνης

ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ήδη από τους ιστορικούς χρόνους πραγματοποιήθηκαν προσπάθειες για τη βελτίωση των ψαθυρών δομικών υλικών με την προσθήκη ινών. Για παράδειγμα, τούβλα και επιχρίσματα οροφών ενισχύονταν με ίνες από άχυρο ή με μαλλί ζώων. Τότε, όπως και τώρα, αποσκοπούσαν στην αποφυγή δημιουργίας ρωγμών στο υλικό και στη δημιουργία παραμένουσας φέρουσας ικανότητας στην περίπτωση δημιουργίας ρωγμών. Δεν είναι λοιπόν περίεργο που τη σημερινή εκτεταμένη χρήση του σκυροδέματος ακολουθεί η έντονη αναζήτηση μεθόδων βελτίωσης της ψαθυρής συμπεριφοράς του με τη χρήση ινών.

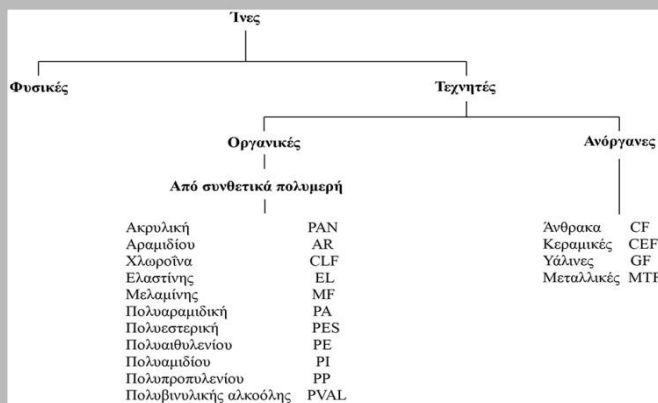
Ως ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Fiber Reinforced concrete ή FRC) ορίζεται το σκυρόδεμα το οποίο περιέχει ίνες σε διασπορά, με τυχαίο προσανατολισμό [**Αμερικάνικο Ινστιτούτο σκυροδέματος, ACI 116R**]. Παράγεται όταν στα συστατικά του συμβατικού σκυροδέματος, δηλαδή το τσιμέντο, τα αδρανή και το νερό, προστίθενται ίνες.

3.1.1 ΕΙΔΗ ΙΝΩΝ

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται κατηγοριοποιούνται είτε ανάλογα με το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται είτε από το σχήμα και το μέγεθος τους.

Όσον αφορά το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται συνήθως χρησιμοποιούνται ίνες γάλυβα. Ωστόσο, παράγονται ίνες και από άλλα υλικά όπως η ύαλος, ο άνθρακας, ο αμίαντος, καθώς και συνθετικά ή κεραμικά υλικά. Για τον οπλισμό του σκυροδέματος οι

συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες ίνες είναι οι χαλύβδινες, αν και η χρήση υάλινων ή ανθρακικών αρχίζει να γίνεται πιο συχνή. Αρκετά διαδεδομένες είναι οι ίνες πολυπροπυλενίου, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους και της χημικής τους αδράνειας.



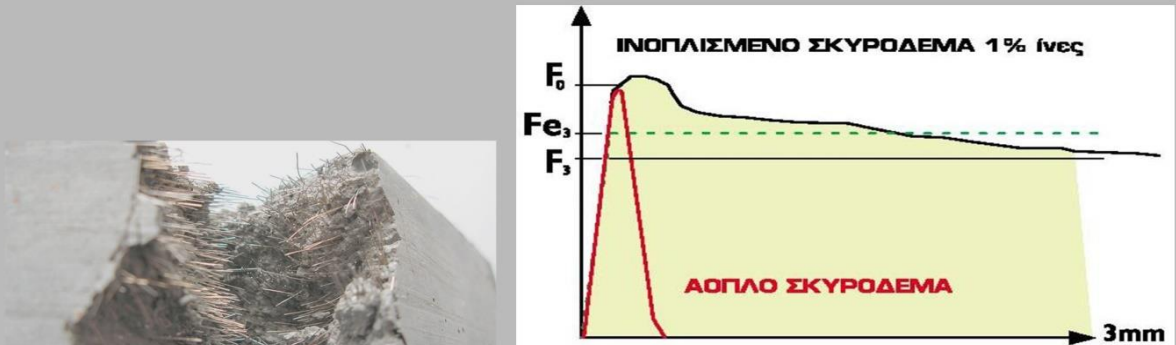
Σχήμα 3.1 : Είδη τεχνητών ινών και ο συμβολισμός τους [BISFA, (2009)]

Οι ίνες έχουν διάσταση λίγων εκατοστών και διαμέτρου που είναι συνήθως κλάσμα χιλιοστού, διασκορπίζονται στη μάζα του υλικού κατά την ανάμιξη των συστατικών του σε ποσοστό της τάξης του 1-3% του συνολικού όγκου. Ο βασικός ρόλος των ινών στο σκυρόδεμα είναι η αύξηση της παραμόρφωσης του υλικού κατά την αστοχία και γενικά ο περιορισμός της ρηγμάτωσης, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται και αύξηση της αντοχής. Αποτέλεσμα είναι κυρίως η αύξηση της δισθραυστότητας του υλικού δηλαδή της ικανότητάς του να απορροφά ενέργεια κατά την παραμόρφωση. Γραφικά αντιπροσωπεύεται από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης. Το εμβαδόν αυτό είναι συχνά 10-40 φορές μεγαλύτερο για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα από ότι για το άοπλο.

3.1.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η χρήση των ινών στο σκυρόδεμα προσφέρει πολλά συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι του συμβατικού οπλισμού χωρίς να μπορεί γενικά να τον αντικαταστήσει. Τα πλεονεκτήματα χρήσης τους μπορούν να συνοψιστούν ως εξής [Παπακόστα Α. και Τσιάρα Α.(2015)]:

- Οι ίνες προσδίδουν στο σκυρόδεμα πλάσטיμη συμπεριφορά έναντι της ψαθυρής που θα έχει χωρίς τον οπλισμό. Αυτό οφείλεται στη σταδιακή ενεργοποίηση των ινών λόγω της φόρτισης, με άμεσο αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας πριν από το στάδιο της αστοχίας. Οι ίνες απορροφούν την ενέργεια, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα οδηγούσε σε αστοχία του δοκιμίου και παραμορφώνονται προφυλάσσοντας το δοκίμιο. Οι ίνες εξακολουθούν να παραλαμβάνουν εφελκυστικά φορτία ακόμη και μετά την αστοχία ενισχύοντας την πλαστική πλέον φύση του (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2 : Καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα

- Οι ίνες εμποδίζουν τη διεύρυνση των ρωγμών και των επιπτώσεων της συστολής ξήρανσης και της θερμοκρασίας, λόγω της πρόσφυσης μεταξύ των ινών και του σκυροδέματος και της πυκνότητας των ινών. Λειτουργούν σαν «γέφυρες» που μεταβιβάζουν τις εφελκυστικές τάσεις από επιφάνεια σε επιφάνεια της ρωγμής.
- Οι ίνες λειτουργούν επίσης περιοριστικά έναντι της διάγκωσης του υπό φόρτιση σκυροδέματος.

- Επιπλέον, βελτιώνουν τη συμπεριφορά του σκυροδέματος στην στρέψη.
- Η τυχαία διάταξη των ινών στον όγκο του εκάστοτε δοκιμίου του προσδίδει ομοιογένεια και ισοτροπία.
- Σημαντική βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του τελικού προϊόντος. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει -όχι μόνο καλύτερες πρώιμες αντοχές- αλλά και μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη, σε κρούση, σε διάτμηση και σε κόπωση, ενώ έχει και αυξημένη δυσθραυστότητα. Επίσης, αναπτύσσει μεγαλύτερη δύναμη συνάφειας στην επιφάνεια που διαστρώνεται σε σχέση με το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Μπορούν να συνδυαστούν με συμβατικό οπλισμό, παίζοντας το ρόλο της επικουρικής ενίσχυσης.
- Οι ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εργασίες επισκευών προϋπαρχουσών κατασκευών. Επιπλέον, αν μια επένδυση ινοπλισμένου σκυροδέματος χρειαστεί επισκευή ή ενίσχυση αυτή πραγματοποιείται ευκολότερα σε σχέση με μια επένδυση με συμβατικό οπλισμό.
- Η τυχόν διάβρωση των ινών χάλυβα είναι μόνο επιφανειακή και χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις, επειδή η διάμετρος των ινών είναι μικρή και επομένως οι τάσεις λόγω διόγκωσης που προκαλούν τα οξείδια σιδήρου είναι αμελητέες.
- Αντίσταση στο φαινόμενο της αποφλοίωσης λόγω απουσίας επικάλυψης.

3.1.4 ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα χάρη στα πολλά πλεονεκτήματα που έχει έναντι του συμβατικά οπλισμένου έχει εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος έργων όπως είναι τα εξής [Παπακώστα Α. και Τσιάρα Α.(2015)] :

- Τελική επένδυση σηράγγων, μόνιμη ή προσωρινή υποστήριξη
- Σταθεροποίηση και επένδυση πρανών
- Μεταλλεία, κυρίως για έργα ανάπτυξης
- Στοές διερεύνησης, αποστράγγισης και αποχέτευσης
- Επενδύσεις υδραυλικών έργων και πισίνες
- Υποστήριξη θεμελιώσεων

- Πάσσαλοι θεμελιώσεως
- Κατασκευή υλικών ανθεκτικών σε κρουστικές φορτίσεις και εκρήξεις
- Προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος
- Βιομηχανικά, λιμενικά δάπεδα, φράγματα, κανάλια
- Επισκευές έργων από σκυρόδεμα

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανθεκτικότητα είναι ένα θέμα που ενδιαφέρει ιδιαίτερος τους μηχανικούς τα τελευταία χρόνια. Σε παγκόσμιο επίπεδο, καθημερινά πραγματοποιείται σημαντική έρευνα σχετικά με τους παράγοντες που την επηρεάζουν, με απώτερο στόχο την διατήρηση της αντοχής και της λειτουργικότητας των κατασκευών στη σχεδιασμένη διάρκεια ζωής τους.

Επίσης τα τελευταία χρόνια, πραγματοποιήθηκε εντατικότερη χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε αρκετές κατηγορίες έργων. Αυτό το γεγονός συνετέλεσε στην προσπάθεια μελέτης και ενίσχυσης της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος με την προσθήκη ινών.

Ακολουθεί μία παρουσίαση των βασικών στοιχείων, αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων κάποιων από τις πρόσφατες μελέτες και ερευνητικές εργασίες, που αφορούν την τριχοειδή απορρόφηση, το πορώδες, τη διαπερατότητα σε αέρα και την αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων σε δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος, είτε με ίνες χάλυβα είτε με ίνες από άλλο υλικό.

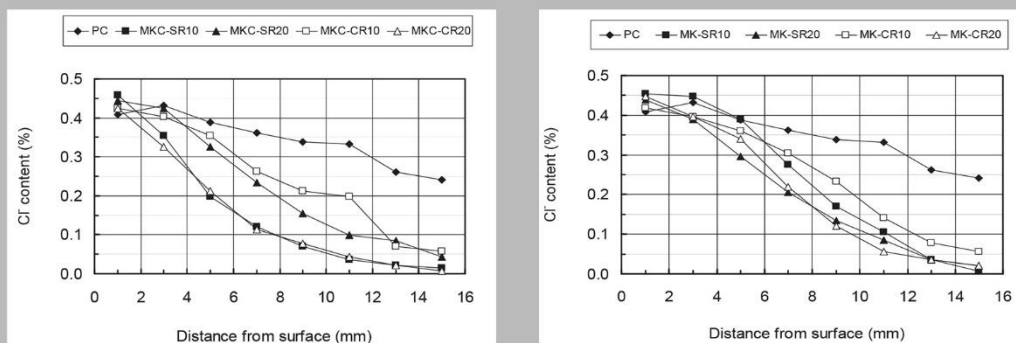
4.2 ΤΡΕΧΟΥΣΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Οι **Badogiannis et al. (2015)**, ασχολήθηκαν με την μελέτη των ιδιοτήτων ανθεκτικότητας μιγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ), τα οποία περιέχουν μετακαολίνη. Συνολικά εξετάστηκαν εννέα (9) διαφορετικές συνθέσεις ΑΣΣ (4 στις οποίες έγινε αντικατάσταση τσιμέντου με μετακαολίνη σε διάφορα ποσοστά, 4 στις οποίες έγινε

αντικατάσταση φίλερ με μετακαολίνη σε διάφορα ποσοστά και μια χωρίς την προσθήκη μετακαολίνη), καθώς και 2 συνθέσεις συμβατικού σκυροδέματος, σε δοκίμια ηλικίας 360 ημερών. Οι παράμετροι ανθεκτικότητας που μελετήθηκαν αφορούν στην υδατοαπορροφητικότητα, στην τριχοειδής απορρόφηση, στην διαπερατότητα σε αέρα και στην διαπερατότητα σε χλωριόντα. Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, προέκυψε πως ανεξάρτητα από το ποσοστό αντικατάστασης, η προσθήκη μετακαολίνη ως πρόσθετο συστατικό του ΑΣΣ, οδήγησε σε σημαντική μείωση της τριχοειδούς απορρόφησης, βελτιώνοντας την υδατοαπορροφητικότητα του σκυροδέματος. Καταγράφεται βελτίωση στο ανοιχτό πορώδες για τις δυο περιπτώσεις αντικατάστασης, (14 και 28% αντίστοιχα). Η διαπερατότητα σε αέρα σε σχέση με το δείγμα αναφοράς συμβατικού σκυροδέματος ήταν γενικά χαμηλότερη και τέλος, η σταδιακή αύξηση του ποσοστού σε μετακαολίνη οδηγεί σε εκθετική μείωση του συντελεστή διαπερατότητας χλωριόντων.

Οι **E. Badogiannis, S. Tsivilis (2009)**, μελέτησαν την ανθεκτικότητα σκυροδέματος με μετακαολίνη. Οι ιδιότητες ανθεκτικότητας που μετρήθηκαν ήταν η αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων, η διαπερατότητα σε αέρα, η τριχοειδής απορρόφηση και το πορώδες. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι μετακαολίνη, ένας μεγάλης λεπτότητας προερχόμενος από θερμική επεξεργασία ελληνικού καολίνη και ένας εμπορικός μεγάλης καθαρότητας. Παρασκευάστηκαν 8 διαφορετικά μίγματα με αντικατάσταση είτε τσιμέντου είτε άμμου με μετακαολίνη, σε ποσοστά 10% και 20% κατά βάρος τσιμέντου. Τα δοκίμια για τις δοκιμές ανθεκτικότητας ήταν κυλινδρικά με διάμετρο 100 mm και ύψος 200 mm και συντηρήθηκαν για 90 μέρες σε κορεσμένο με υδράβεστο νερό, θερμοκρασίας 20° C. Η δοκιμή για την μέτρηση της αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων έγινε κατά το πρότυπο AASHTO T277 και έδειξε μείωση της διάχυσης των χλωριόντων με την προσθήκη μετακαολίνη. Επίσης, παρατηρήθηκαν μικρότερες τιμές στη διαπερατότητα σε αέρα και στην τριχοειδή απορρόφηση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα βέλτιστα ποσοστά αντικατάστασης ήταν: 10% αντικατάσταση της άμμου για την αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων, 10% αντικατάσταση του τσιμέντου για την διαπερατότητα σε αέρα και 20% αντικατάσταση της άμμου για την τριχοειδή απορρόφηση. Ακόμη, αποδείχτηκε ότι η προσθήκη μετακαολίνη οδήγησε σε βελτίωση του πορώδους προκαλώντας μειωμένες τιμές μεγέθους πόρου και μεγαλύτερη ομοιομορφία κατανομής του μεγέθους των πόρων. Τέλος, προέκυψε παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος του μετακαολίνη του εμπορίου και του μετακαολίνη που προερχόταν από ελληνικό καολίνη.

Η έρευνα των **Badogiannis et al. (2015)**, αφορούσε στην αντίσταση σε διάχυση χλωριόντων οχτώ συνθέσεων, όπου ο μετακαολίνης σε ποσοστά 10% ή 20% κ.β. αντικατέστησε τσιμέντο ή άμμο. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος καθώς και παράγοντες ανθεκτικότητας όπως η διαπερατότητα σε νερό, η τριχοειδής απορρόφηση, η διαπερατότητα σε αέρα και τέλος η αντίσταση σε χλωριόντα. Στη διάχυση τα δείγματα τοποθετήθηκαν για 90 ημέρες σε διάλυμα *NaCl* και ακολούθως υπολογίστηκε η συγκέντρωση συνολικών και ελευθέρων χλωριόντων. Τα αποτελέσματα της εργασίας κατέδειξαν πως στα δοκίμια, όπου τσιμέντο αντικαταστάθηκε με μετακαολίνη, είχαν καλύτερες τιμές παραμέτρων ανθεκτικότητας, πλην όμως του πορώδους, όπου δε παρουσιάστηκε μεγάλη μεταβολή. Στην περίπτωση της αντίστασης σε διάχυση χλωριόντων το σκυρόδεμα με μετακαολίνη είχε μεγαλύτερη αντίσταση για όλα τα βάθη (**Σχήμα 4.1**).



Σχήμα 4.1 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (mol/m^3) σε συνάρτηση με το βάθος z (mm) για δείγματα με MKC (αριστερά) και MK (δεξιά) [πηγή: **Badogiannis et al (2015)**]

Οι **Gruber et al (2001)** διερεύνησαν τη βελτίωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος που περιέχει μετακαολίνη υψηλής δραστηριότητας. Μετρήθηκε η αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων και η διόγκωση λόγω αλκαλιοπυριτικής αντίδρασης. Παρασκευάστηκαν 6 διαφορετικά μίγματα και εξετάστηκαν τρία ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου από μετακαολίνη (0%, 8%, 12% κατά βάρος τσιμέντου) και δύο διαφορετικοί λόγοι νερό προς τσιμέντο (0.3 και 0.4). Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η αντικατάσταση του τσιμέντου από υψηλής δραστηριότητας μετακαολίνη οδήγησε σε μείωση της διάχυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Πιο συγκεκριμένα, για ποσοστά

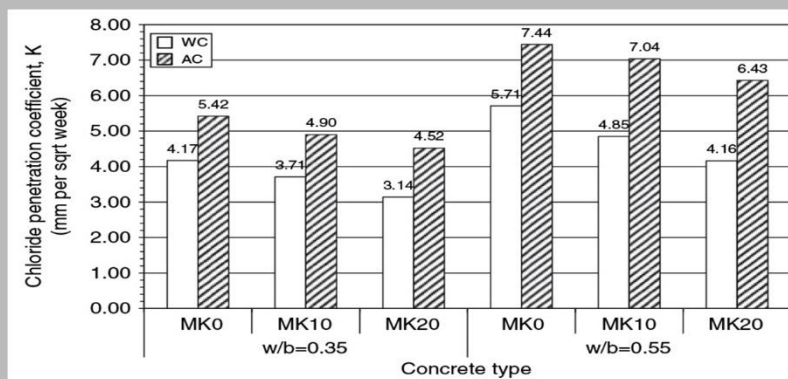
αντικατάστασης 8% και 12% κατά βάρος τσιμέντου προέκυψε μείωση της διάχυσης των χλωριόντων σε ποσοστά 50% και 60% αντίστοιχα. Ακόμη, καταγράφηκε περαιτέρω βελτίωση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος για τα δύο αυτά ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου από μετακαολίνη, όσο μειώνεται ο λόγος νερό προς τσιμέντο. Για τη δοκιμή διόγκωσης λόγω αλκαλιοπυριτικής αντίδρασης χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι αδρανών (πυριτικός ασβεστόλιθος και γραουβάκης). Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM C1293 και CSA A23.2-14A. Παρασκευάστηκαν πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 75x75x300 mm με τσιμέντο υψηλής αλκαλικότητας, και χρησιμοποιήθηκε *NaOH* για την παρασκευή αλακαλικού διαλύματος έκθεσης. Δημιουργήθηκαν πέντε μίγματα με ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου από μετακαολίνη (0%, 5%, 10%, 15%, 20%). Τα αποτελέσματα της δοκιμής απέδειξαν ότι η χρήση μετακαολίνη μείωσε τη διόγκωση και ότι το ποσοστό αντικατάστασης 10% ήταν το βέλτιστο για την αποφυγή της.

Η έρευνα των **Siddique και Kaur (2011)**, επικεντρώθηκε στην επίδραση του μετακαολίνη στα χαρακτηριστικά του επιφανειακού στρώματος του σκυροδέματος, αντικαθιστώντας ποσοστά τσιμέντου 5, 10 και 15 %. Παρασκευάστηκε σκυρόδεμα αναφοράς που περιείχε 450 kg/m³ τσιμέντο με λόγο w/c ίσο με 0.45. Διεξήχθησαν δοκιμές για την αρχική επιφανειακή απορρόφηση (ISAT), την υδατοαπορροφητικότητα, την τριχοειδή απορρόφηση και τέλος την αντοχή σε θλίψη στις 35, 56 και 84 ημέρες. Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας έδειξαν πως με την αύξηση του ποσοστού προσθήκης του μετακαολίνη από 5 σε 15%, υπήρξε μια μείωση στην αρχική επιφανειακή απορροφητικότητα (ISAT) και μείωση της τριχοειδούς απορρόφησης μέχρι το 10% προσθήκης MK, ενώ για ποσοστό προσθήκης 15% παρατηρήθηκε αύξηση της τριχοειδούς απορρόφησης. Όλες οι συνθέσεις έδειξαν χαμηλές τιμές τριχοειδούς απορρόφησης με ολική εμβάπτιση, μικρότερες από 10% (από 7.0 έως 7.9%). Παράλληλα, καταγράφηκε μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση της αντοχής με την τριχοειδή απορρόφηση. Για ποσοστά προσθήκης MK μεγαλύτερα από 15% δεν καταγράφεται βελτίωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος παρά το γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά της στο επιφανειακό στρώμα του σκυροδέματος βελτιώνονται.

Οι **A.A. Ramezianpour, H. Bahrami Jovein (2012)**, διερεύνησαν την επιρροή του μετακαολίνη ως συμπληρωματικό τσιμεντοειδές υλικό στην αντοχή και στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα αποτελούνταν από τσιμέντο Portland κατά ASTM C 150, μετακαολίνη σε ποσοστά αντικατάστασης 0%, 10%, 12,5% και 15% κατά βάρος, φυσική

άμμο και θρυμματισμένο ασβεστόλιθο ως αδρανές, νερό και υπερπλαστικοποιητή βασισμένο σε πολυκαρβοξυλικό οξύ. Συνολικά παρασκευάστηκαν 12 μίγματα και εξετάστηκαν τέσσερα ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη (0%, 10%, 12.5%, 15% κατά βάρος) και τρεις λόγοι νερό προς κονία (0.3, 0.4 και 0.5) διατηρώντας σταθερή ολική περιεκτικότητα κονιάς στα 400 kg/m³. Οι ιδιότητες ανθεκτικότητας που μετρήθηκαν ήταν η διείσδυση του νερού, η τριχοειδής απορρόφηση, η αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων, η διείσδυση Cl και η ηλεκτρική αντίσταση. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι ο μετακαολίνης οδηγούσε σε μείωση του βάθους διείσδυσης του νερού. Ακόμη, αποδείχτηκε ότι η αντικατάσταση του τσιμέντου σε ποσοστό 10% είχε την πιο αποτελεσματική επίδραση στην τριχοειδή απορρόφηση του νερού ανεξαρτήτως της τιμής του λόγου νερού προς κονία και της ηλικίας του δοκιμίου. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη μετακαολίνης βελτίωνε την αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων και ότι η βελτίωση ήταν μεγαλύτερη όσο αυξανόταν το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου από μετακαολίνη. Τέλος, ο μετακαολίνης είχε ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της ηλεκτρικής αντίστασης του σκυροδέματος και σε ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου 15% η ηλεκτρική αντίσταση ήταν 2-4 φορές υψηλότερη της αντίστοιχης του συμβατικού σκυροδέματος.

Οι **Guneyisi and Mermenrdas (2007)** πραγματοποίησαν μία συγκριτική μελέτη σε μίγματα συμβατικού σκυροδέματος με μετακαολίνη, τα οποία είχαν συντηρηθεί είτε στον αέρα είτε σε νερό. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν η θλιπτική αντοχή, η απορροφητικότητα και η διείσδυση χλωριόντων. Ο μετακαολίνης, χρησιμοποιήθηκε ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου, σε ποσοστά από 0 έως 20%, ενώ χρησιμοποιήθηκαν δύο λόγοι νερού προς κονία (w/c), 0.35 και 0.55. Παρατηρήθηκε ότι η ενσωμάτωση μετακαολίνης αύξησε σημαντικά τη θλιπτική αντοχή, ενώ μείωσε οριακά την απορροφητικότητα και τη διαπερατότητα σε χλωριόντα (**Σχήμα 4.2**). Διαπιστώθηκε ότι τα μεγέθη εξαρτώνται από το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου, τον λόγο w/c, τις συνθήκες συντήρησης και, ειδικά για την περίπτωση της διαπερατότητας σε χλωριόντα, την διάρκεια έκθεσης. Σε συνθήκες ανεπαρκούς ή κακής συντήρησης, σημειώθηκε η σημαντικότερη απώλεια αντοχής και ανθεκτικότητας στα μίγματα μετακαολίνης.



Σχήμα 4.2 : Επιρροή των διαφορετικών ποσοστών αντικατάστασης τσιμέντου από μετακαολίνη, του λόγου w/c και της μεθόδου συντήρησης στον συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων [πηγή: **Guneyisi and Mermenrdas (2007)**]

Μέσω της προσθήκης μετακαολίνη σε μίγματα σκυροδέματος, ως υλικού αντικατάστασης του τσιμέντου, οι **Guneyisi et al (2008)** πέτυχαν τη βελτίωση της αντοχής, της συστολής ξήρανσης και της δομής του πορώδους. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκαν δύο ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου από μετακαολίνη, 10 και 20% σε μίγματα με δύο λόγους νερού προς τσιμεντοειδή υλικά (w/c), 0.35 και 0.55. Τα μεγέθη που εξετάστηκαν περιλάμβαναν τη θλιπτική και την έμμεση πολυκαρβοξυλικό οξύ., την υδατοραπορροφητικότητα, τη συστολή ξήρανσης και το πορώδες. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ηλικίες έως 120 ημέρες. Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η ενσωμάτωση μετακαολίνη μειώνει σημαντικά τη συστολή ξήρανσης, ενώ αυξάνει τις αντοχές έως και 30% σε σχέση προς το μίγμα αναφοράς (χωρίς μετακαολίνη). Η εν λόγω αύξηση εξαρτάται από το ποσοστό αντικατάστασης, τον λόγο w/c και την ηλικία. Παράλληλα, η δομή του πορώδους βελτιώνεται σημαντικά, καθώς μειώνεται ο όγκος των μεγάλων πόρων, αλλά και το συνολικό πορώδες, καθιστώντας το σκυρόδεμα λιγότερο διαπερατό, ειδικά για το ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου 20%.

Οι **Kim et al (2007)** μελέτησαν και σύγκριναν τις μηχανικές ιδιότητες (αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε εφελκυσμό και καμπτική εφελκυστική αντοχή. Στο πλαίσιο της αξιολόγησης, μελετήθηκαν μίγματα σκυροδέματος με μετακαολίνη και πυριτική παιπάλη,

όσον αφορά στην επίδραση της προσθήκης τους στις ιδιότητες ανθεκτικότητας (διάχυση χλωριόντων, χημική προσβολή οξέως, ψύξη και απόψυξη και ενανθράκωση). Οι δοκιμές αντοχής έδειξαν ότι οι υψηλότερες αντοχές προέκυψαν για αντικατάσταση με μετακαολίνη σε ένα εύρος ποσοστών μεταξύ 10 και 15%. Η βελτίωση ωστόσο στην αντοχή που παρατηρήθηκε για αύξηση του ποσοστού του μετακαολίνη από 10 σε 15% κρίθηκε αμελητέα και επομένως προτάθηκε σαν αποδοτικότερο ποσοστό αντικατάστασης το 10%, δεδομένου του κόστους του μετακαολίνη. Επιπρόσθετα παρατηρήθηκε ότι η διάχυση των χλωριόντων μειωνόταν σημαντικά, καθώς αυξανόταν η αναλογία της πυριτικής παιπάλης και του μετακαολίνη στη σύνθεση, τα οποία χάρη στις ποζολανικές αλλά και πληρωτικές τους ιδιότητες επιτρέπουν την ανάπτυξη μιας πιο πυκνής και με μικρότερο πορώδες δομής, οι ιδιότητες της οποίας βελτιώνονται συνεχώς με το χρόνο, εξαιτίας της ποζολανικής αντίδρασης. Η αντοχή σε κύκλους ψύξης-απόψυξης παρουσιάστηκε αυξημένη στα μίγματα με μετακαολίνη συγκριτικά με τα μίγματα με πυριτική παιπάλη. Από τις δοκιμές προέκυψε ότι το βάθος ενανθράκωσης αυξανόταν με αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης (αύξηση 100-370% για ποσοστά αντικατάστασης 15 και 20%, ανεξάρτητα από την ηλικία του σκυροδέματος), γεγονός που οφείλεται στο ότι η αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη ή πυριτική παιπάλη μειώνει το ποσοστό του πορτλαντίτη- $Ca(OH)_2$ στα προϊόντα ενυδάτωσης εξαιτίας της ποζολανικής αντίδρασης. Τέλος, προέκυψε σαν γενικό συμπέρασμα ότι ο μετακαολίνης αποτελεί ένα υψηλά υποσχόμενο υλικό, τόσο για τη βελτίωση της μηχανικής αντοχής όσο και για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας, το οποίο μπορεί να αντικαταστήσει την πιο ακριβή πυριτική παιπάλη.

Οι **Poon et al (2006)**, μελέτησαν τις μηχανικές ιδιότητες της αντοχής σε θλίψη σκυροδέματος με μετακαολίνη σε ποσοστά αντικατάστασης 5,10 και 20% κατά βάρος και λόγων νερού προς τσιμέντο 0.3 και 0.5. Επίσης εξεταστήκαν και κάποιες παράμετροι ανθεκτικότητας όπως η κατανομή του μεγέθους των πόρων, το πορώδες και η αντίσταση σε χλωριόντα. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν πως με την χρήση MK, η αντοχή σε θλίψη των δοκιμών ήταν αυξημένη. Το πορώδες του σκυροδέματος με MK, εξαιτίας της βελτίωσης της μικροδομής στην διεπιφάνεια πάστας αδρανών ήταν μικρότερο σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Τέλος, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 4.1**, τα δοκίμια με 10% MK και λόγο w/c ίσο με 0.3, είχαν την χαμηλότερη συνολική διείσδυση χλωριόντων, όπως και η σύνθεση με ποσοστό αντικατάστασης 20% MK και w/c ίσο με 0.3.

Πίνακας 4.1 : Διαπερατότητα σε χλωριόντα [πηγή: **Poon et al (2006)**]

w/b	Κωδικός Σύνθεσης	Συνολικά χλωριόντα (Coulombs)			
		3 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες	90 ημέρες
0.3	Control	2461	2151	1035	931
	5% MK	1327	1244	862	646
	10% MK	417	347	199	435
	20% MK	406	395	240	124
0.5	Control	5312	4054	2971	2789
	5% MK	4215	3765	2079	1065
	10% MK	1580	1247	918	752
	20% MK	751	740	640	580

Οι **Soylev και Ozturan (2014)**, μελέτησαν την ανθεκτικότητα ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες από χάλυβα, ίνες πολυπροπυλενίου και ίνες γυαλιού. Οι παράμετροι ανθεκτικότητας που εξεταστήκαν αφορούν σε διαφορετικές ιδιότητες συμπεριλαμβανομένων στην απορρόφηση νερού, την ηλεκτρική αντίσταση, την διαπερατότητα σε αέρα, την τριχοειδή απορρόφηση, το βάθος διείσδυσης χλωριόντων καθώς επίσης προσδιορίστηκαν οι αντοχές σε θλίψη, εφελκυσμό, κάμψη και τέλος η αντοχή σε θραύση. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά (100x200 mm) και πρισματικά (320x320x100) δοκίμια τα οποία μελετήθηκαν για δυο διαφορετικούς λόγους w/c (0.65 και 0.45) και δυο μεθόδους συντήρησης (εκτιθέμενα στον αέρα, νερό). Συμπερασματικά, κατέληξαν πως η χρήση των ινών χάλυβα, πολυπροπυλενίου και γυαλιού στο σκυρόδεμα για w/c 0.45 και 0.65 μείωσε την εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος και κρίθηκε αναγκαία η χρήση κατάλληλης ποσότητας υπερρευστοποιητή. Η προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα αύξησε την περιεκτικότητα του αέρα, με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με το λόγο w/c και το είδος των ινών. Η επίδραση της υγρής συντήρησης έγινε περισσότερο αισθητή στην αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό. Η αντοχή σε κάμψη ινοπλισμένου σκυροδέματος στην περίπτωση της υγρής συντήρησης ήταν μεγαλύτερη σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς πλην της περίπτωσης του σκυροδέματος με ίνες πολυπροπυλενίου. Το σκυρόδεμα με ίνες γυαλιού είχε το μεγαλύτερο ποσοστό διείσδυσης χλωριόντων. Σημαντική διαφορά μεταξύ του ρυθμού της διάβρωσης για λόγο w/c ίσο με 0.65 δεν παρατηρήθηκε. Η διάβρωση αναπτύχθηκε γρήγορα λόγω κακής ποιότητας του σκυροδέματος. Όσον αφορά τις μικρές ηλικίες έκθεσης σε διάλυμα χλωριόντων δεν υπήρχε σημαντική διαφορά, ωστόσο μακροπρόθεσμα παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στην διάβρωση του οπλισμού για λόγο w/c ίσο με 0.45 και για τα διαφορετικά είδη ινών. Μεγαλύτερο ποσοστό διάβρωσης είχε το σκυρόδεμα με ίνες πολυπροπυλενίου και γυαλιού.

Εν κατακλείδι η προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την αντίσταση έναντι της διάβρωσης, παράγοντας που συμβάλει καθοριστικά στην διάρκεια ζωής του σκυροδέματος.

Οι **Frazão et al (2015)** διερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες και τις παραμέτρους ανθεκτικότητας ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα, αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος σε σύγκριση με άοπλο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα ίδιας κατηγορίας αντοχής. Το σκυρόδεμα που μελέτησαν περιείχε τσιμέντο Portland CEM-I-42.5R, ασβεστολιθικό filler, λεπτή και χονδρή ποταμίσια άμμο, θρυμματισμένο γρανίτη, υπερπλαστικοποιητή και χαλύβδινες ίνες με γαντζωτά άκρα. Οι παράμετροι ανθεκτικότητας που μελετήθηκαν ήταν η τριχοειδής απορρόφηση νερού, το πορώδες, η διαπερατότητα σε αέρα και ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων. Η μέτρηση της τριχοειδούς απορρόφησης έγινε σύμφωνα με τις πορτογαλικές προδιαγραφές LNEC 394, LNEC 393 που βασίζονται στο πρότυπο RILEM CPC11.2 και τα αποτελέσματα έδειξαν μικρή επιρροή των χαλύβδινων ινών, καθώς το μέγεθος πόρου δεν άλλαξε ουσιαστικά. Επίσης, η προσθήκη ινών δεν είχε μεγάλη επιρροή στην αντίσταση στη διείσδυση του αέρα, ενώ παρατηρήθηκε πολύ μικρή αύξηση του ανοικτού πορώδους. Η μέτρηση της αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων πραγματοποιήθηκε με επιταχυνόμενη μη σταθερής κατάστασης δοκιμή διείσδυσης σύμφωνα με τις πορτογαλικές προδιαγραφές LNEC E463. Εκτιμήθηκε ότι δεν ήταν εφικτός ο προσδιορισμός του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων γιατί η δοκιμή προκαλούσε τοπική συγκέντρωση χλωριόντων στις χαλύβδινες ίνες και διάβρωση. Η μέτρηση της αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων αξιολογήθηκε επίσης με φυσική διάχυση σύμφωνα με τις πορτογαλικές προδιαγραφές LNEC E390 και αποδείχτηκε ότι ο προσδιορισμός του συντελεστή διάχυσης των χλωριόντων ήταν εφικτός, ωστόσο τα αποτελέσματα στα δύο σκυροδέματα ήταν παρόμοια.

Οι **Anastasiou et al (2014)** μελέτησαν τη συμπεριφορά ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα, αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με σκωρία μεταλλουργικής καμίνου ως filler. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποίησαν στα πειράματα τους περιείχε τσιμέντο Portland CEM-I-42.5N, σκωρία μεταλλουργικής καμίνου σε ποσότητες 60, 90 και 120 kg/m³, πολυκαρβοξυλικό υπερπλαστικοποιητή, υδατοδιαλυτό πολυμερές για ρύθμιση ιξώδους (VMI), θρυμματισμένο ασβεστόλιθο και χαλύβδινες ίνες με γαντζωτά άκρα σε ποσοστά 0%, 0.4%, 0.7% κ.ο. Η μέτρηση της αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων έγινε σύμφωνα με το

πρότυπο Nordtest NT Build 443 και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση της ποσότητας της σκωρίας αυξάνει την αντίσταση έναντι διείσδυσης χλωριόντων. Αντίθετα, η αύξηση του ποσοστού των χαλύβδινων ινών έχει ασήμαντη επιρροή στο βάθος διείσδυσης των χλωριόντων.

Η έρευνα των **Ganesan et al (2015)** παρουσιάζει τα αποτελέσματα μιας πειραματικής μελέτης που πραγματοποιήθηκε για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών αντοχής ινοπλισμένου γεωπολυμερικού σκυροδέματος δοκιμίων και σύγκρισή τους με συμβατικό σκυρόδεμα. Οι παράμετροι ανθεκτικότητας που εξεταστήκαν περιλαμβάνουν το ανοικτό πορώδες, την τριχοειδή απορρόφηση, τη μέτρηση της αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων με το πρότυπο ASTM C 1202-97, τη διάχυση χλωριόντων και τέλος την αντίσταση σε θειικά. Τα αποτελέσματα της έρευνας κατέδειξαν ότι το ινοπλισμένο και το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα αυξάνουν τα χαρακτηριστικά αντοχής από το συμβατικό σκυρόδεμα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τόσο το αμιγές όσο και το οπλισμένο γεωπολυμερικό σκυρόδεμα παρουσιάζουν βελτιωμένες ιδιότητες ανθεκτικότητας σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα.

Οι **A.P. Singh, Dharendra Singhal, (2011)** σε μελέτη τους, σύγκριναν τις μεταβολές της υδατοπερατότητας ινοπλισμένου σκυροδέματος για διάφορα ποσοστά ινών. Το σκυρόδεμα το οποίο χρησιμοποιήσαν περιείχε τσιμέντο Portland, ήταν αντοχής 43 MPa και περιείχε χαλύβδινες κυματοειδείς ίνες σε ποσοστά 1%, 2%, 4% κατά βάρος τσιμέντου. Η δοκιμή για τη μέτρηση της υδατοπερατότητας έγινε σύμφωνα με το πρότυπο IS: 3085- 1965 για ηλικίες σκυροδέματος 7, 14, 28 και 60 ημερών. Τα αποτελέσματα της δοκιμής έδειξαν ότι για όλες τις ηλικίες σκυροδέματος, η προσθήκη ινών μείωσε σημαντικά την υδατοπερατότητα του σκυροδέματος και ότι η μείωση ήταν μεγαλύτερη όσο αυξανόταν το ποσοστό των ινών. Η συγκεκριμένη μείωση της υδατοπερατότητας αποδόθηκε στον περιορισμό της εσωτερικής ρηγμάτωσης και τη διακοπή της συνέχειας των πόρων.

Οι **Kosmas K. Sideris και Nikolaos S. Anagnostopoulos (2013)**, διερεύνησαν τις ιδιότητες ανθεκτικότητας αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος μεσαίας κατηγορίας αντοχής σε σύγκριση με συμβατικό σκυρόδεμα ίδιας αντοχής. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε περιείχε σύνθετο τσιμέντο CEM II/A-M(P-S-W) 42.5N, θρυμματισμένους πυριτικούς βράχους ως χονδρόκοκκα αδρανή, θρυμματισμένη ασβεστολιθική και ποταμίσια πυριτική άμμο διαφορετικής προέλευσης και διαβάθμισης, ασβεστολιθικό filler και μίγμα νερού για τη μείωση του πολυμερούς καρβοξυλικού αιθέρα. Παρασκευάστηκαν 8 διαφορετικά μίγματα

αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος αντοχής C20/25, C25/30, C30/37, C35/45. Οι ιδιότητες ανθεκτικότητας που μετρήθηκαν ήταν η τριχοειδής απορρόφηση, η αντίσταση στην ενανθράκωση και η αντίσταση στη διάχυση των χλωριόντων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η τριχοειδής απορρόφηση νερού, το βάθος ενανθράκωσης και η διείσδυση χλωριόντων παρουσίασαν μικρότερες τιμές για τα μίγματα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, υποδηλώνοντας βελτιωμένη ανθεκτικότητα. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι για μεγαλύτερες τιμές του λόγου νερό προς τσιμέντο τα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είχαν καλύτερες τιμές, ενώ για μείωση του λόγου νερό προς τσιμέντο είχαν παρόμοιες τιμές με το συμβατικό σκυρόδεμα. Ακόμη, εξακριβώθηκε ότι το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα διαθέτει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής έναντι ενανθράκωσης και διείσδυσης χλωριόντων. Τέλος, καταγράφηκε ότι η διαφορά κόστους του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με το συμβατικό μειώνεται όσο αυξάνει η κατηγορία αντοχής, και ότι το ετήσιο κόστος συντήρησης της κατασκευής μειώνεται ή γίνεται παρόμοιο ή μικρότερο από αυτό συμβατικού σκυροδέματος ίδιας αντοχής.

Οι **Cengiz Duran Atiş, Okan Karahan (2009)**, διερεύνησαν τις ιδιότητες σκυροδέματος με ιπτάμενη τέφρα και ίνες χάλυβα. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε παρασκευάστηκε με τσιμέντο Portland CEM I 42,5R, ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου 0%, 15% και 30% κατά βάρος τσιμέντου, φυσικά ποταμίσια αδρανή (άμμος και χαλίκια), χαλύβδινες ίνες με γαντζωτά άκρα, με ποσοστό προσθήκης ινών 0%, 0.25%, 0.5%, 1% και 1.5% κατά όγκο. και πλαστικοποιητή καρβοξυλικού τύπου. Συνολικά δημιουργήθηκαν 15 μίγματα και εξετάστηκαν 3 ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα, 5 ποσοστά ινών χάλυβα. Οι ιδιότητες ανθεκτικότητας που εξετάστηκαν ήταν η τριχοειδής απορρόφηση, η συστολή ξήρανσης και η αντίσταση σε ψύξη-απόψυξη. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης αυξήθηκε με την αύξηση του ποσοστού περιεκτικότητας σε ιπτάμενη τέφρα και σε χαλύβδινες ίνες. Αυτό αποδόθηκε στην κατανομή των χαλύβδινων ινών, στην αύξηση του πορώδους στην περιοχή επαφής του σκυροδέματος με τις ίνες και στη βραδύτερη δράση των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας, κατά την ενυδάτωση. Ακόμη, προέκυψε μείωση της συστολής ξήρανσης είτε με την ταυτόχρονη παρουσία ιπτάμενης τέφρας και ινών, είτε με την προσθήκη καθενός συστατικού ξεχωριστά. Τέλος, με την προσθήκη των ινών παρατηρήθηκε αύξηση της αντίστασης σε κύκλους ψύξης-απόψυξης.

Οι **Okan Karahan, Cengiz Duran Atiş (2011)**, μελέτησαν τις ιδιότητες ανθεκτικότητας σκυροδέματος με ιπτάμενη τέφρα και ίνες πολυπροπυλενίου. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από τσιμέντο Portland CEM I 42,5R, ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου 0%, 15%, 30% κατά βάρος τσιμέντου, φυσικά ποταμίσια αδρανή (άμμος και χαλίκια), ίνες πολυπροπυλενίου αντοχής 400-600 MPa σε ποσοστά προσθήκης κ.ο. 0%, 0.05%, 0.1%, 0.2% και πλαστικοποιητή καρβοξυλικού τύπου. Συνολικά παρασκευάστηκαν 12 συνθέσεις. Οι ιδιότητες ανθεκτικότητας που εξετάστηκαν ήταν το πορώδες, η απορρόφηση νερού, η τριχοειδής απορρόφηση, η συστολή ξήρανσης και η αντίσταση σε ψύξη-απόψυξη. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι οι τιμές των συντελεστών για το πορώδες, την απορρόφηση νερού και την τριχοειδή απορρόφηση αυξήθηκαν με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ιπτάμενη τέφρα και του ποσοστού των ιών πολυπροπυλενίου. Επίσης, αποδείχτηκε ότι η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας επηρέασε τον συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης περισσότερο από την προσθήκη των ιών. Ακόμη, προέκυψε μείωση της συστολής ξήρανσης είτε με την ταυτόχρονη παρουσία ιπτάμενης τέφρας και ιών είτε με την προσθήκη καθενός ξεχωριστά. Η προσθήκη της ιπτάμενης τέφρας και των ιών πολυπροπυλενίου οδήγησαν στις χαμηλότερες τιμές της συστολής ξήρανσης. Τέλος, παρατηρήθηκε αύξηση της αντίστασης σε ψύξη-απόψυξη τόσο με την προσθήκη των ιών όσο και με την προσθήκη της ιπτάμενης τέφρας, ωστόσο η προσθήκη της ιπτάμενης τέφρας φάνηκε να έχει μεγαλύτερη θετική επίδραση.

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται διερεύνηση της επιρροής των χαρακτηριστικών 8 διαφορετικών συνθέσεων σε θέματα ανθεκτικότητας σκυροδέματος. Οι συνθέσεις αυτές είχαν παρασκευαστεί στο πλαίσιο προηγούμενης Μεταπτυχιακής Εργασίας των [Οικονόμου και Κομνηνού (2015)].

Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επιρροή σε μεγέθη που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος: (α) της χρήσης του μετακαολίνης, (β) της προσθήκης των διαφόρων τύπων και ποσοστών ινών στα μίγματα ινοπλισμένου σκυροδέματος.

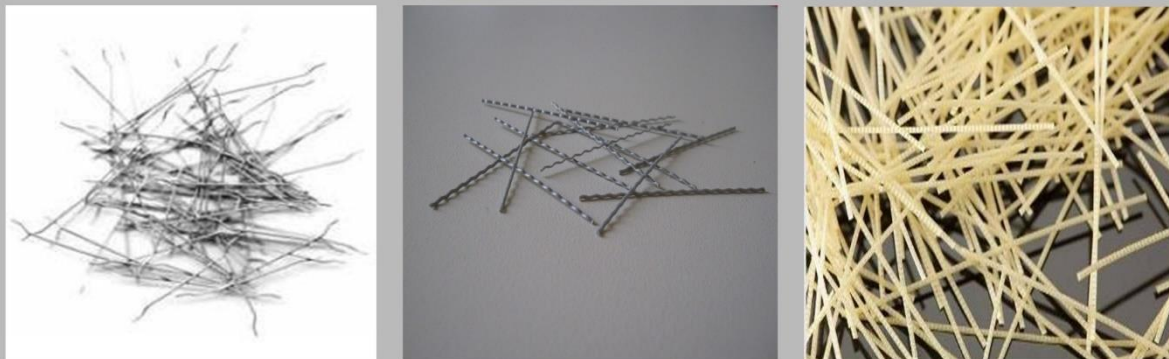
Ειδικότερα, τα θέματα ανθεκτικότητας που εξετάζονται αφορούν στην εκτίμηση: (α) της διαπερατότητας σε νερό μέσω του υπολογισμού (i) τριχοειδής απορρόφησης και (ii) του ανοικτού πορώδους (β) της διαπερατότητας σε αέρα και (γ) της διαπερατότητας σε χλωρίοντα μέσω του υπολογισμού (i) του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης και (ii) τη διάχυση χλωριόντων με το πρότυπο **NT BUILD 443**.

Ακολούθως περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία και η μεθοδολογία ανάλυσης των αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό του πορώδους (OP) της τριχοειδούς απορρόφησης (S) της διαπερατότητας σε αέρα και της διάχυσης και διείσδυση χλωριόντων. Η πειραματική διερεύνηση έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και στο Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

5.2 ΥΛΙΚΑ, ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΙΑ

Παράχθηκαν οχτώ (8) συνθέσεις και συγκεκριμένα, μία (1) σύνθεση αναφοράς με άοπλο συμβατικό σκυρόδεμα NC, μία (1) σύνθεση με πρόσθετο υλικό τον μετακαολίνη NC-MC, δύο (2) συνθέσεις με μεταλλικές ίνες και τέσσερις (4) συνθέσεις με συνθετικές ίνες.

Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μεταλλικές και συνθετικές δύο ειδών. Οι μεταλλικές ίνες ήταν τύπου INOMIX της εταιρείας ΣΙΑΕΝΟΡ Α.Ε. και για τις ανάγκες της μεταπτυχιακής εργασίας κωδικοποιούνται ως SF. Οι συνθετικές ίνες, με ποσοστό 0.5% και 1.0% κ.ο, που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: (α) τύπου μακροίνες SikaFiber PP 940-50 της εταιρίας SIKA Α.Ε. και για τις ανάγκες της μεταπτυχιακής εργασίας κωδικοποιούνται ως PF και (β) τύπου Concrìx ES της εταιρίας BRUGGCONTECAG CH-8590 Romanshorn και για τις ανάγκες της μεταπτυχιακής εργασίας κωδικοποιούνται ως PX. Στον **Πίνακα 5.1** δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε ίνας και στο **Σχήμα 5.1** απεικονίζονται οι ίνες. Τέλος, σε μία σύνθεση χρησιμοποιήθηκε μετακαολίνης σαν πρόσθετο υλικό σκυροδέματος.



Σχήμα 5.1 : Οι τύποι των ιών που χρησιμοποιήθηκαν, (α) ίνες τύπου INOMIX, (β) ίνες τύπου SikaFiber PP940-50 και (γ) τύπου Concrìx ES

Πίνακας 5.1 : Κύρια χαρακτηριστικά ινών

Είδος	Χαλύβδινες ίνες (SF)	Συνθετικές ίνες (PF)	Συνθετικές ίνες (PX)
Υλικό	Σύρμα χάλυβα ψυχρής όλκησης με υψηλή αντοχή min 1.100 MPa	Πολυολεφίνη με εφελκυστική αντοχή 400 MPa και μέτρο ελαστικότητας E=7 GPa	Πολυολεφίνη με θλιπτική αντοχή 510 MPa και μέτρο ελαστικότητας E>10 GPa
Μορφή	Ευθύγραμμες με αγκύρια στα άκρα, κυματοειδείς	Μακροΐνες, μονόινες, συνεχούς παραμόρφωσης (κυματοειδούς μορφής), χρώματος γκρί	Μακροΐνες, ευθύγραμμες με αυλακώσεις κατά μήκος και αγκύρια στις δύο άκρες, κατασκευαστικές, χρώματος κίτρινου
Διαστάσεις	Μήκος 30 mm Διάμετρος 0.75 mm	Μήκος 50 mm Διάμετρος 0.75 mm	Μήκος 50 mm Διάμετρος 0.75 mm
Λόγος Μορφής (l/d)	40	66.67	100
Πρότυπα	ASTM A820 TYPE 1, EN 10016	ASTM C/1116/C 1116M TYPE III Fiber R.C, EN 14889-2:2006 Ίνες για Σκυροδέμα, Μέρος 2: Τάξη II (Φέρουν σήμανση CE)	EN 14889-2

Για κάθε σύνθεση και με σκοπό την εκτέλεση των δοκιμών που αφορούσαν τις ιδιότητες ανθεκτικότητας παρασκευάστηκαν τρία (3) κυβικά δοκίμια διαστάσεων 100x100x100 mm, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του ανοικτού πορώδους και της τριχοειδούς απορρόφησης ενώ τα κυλινδρικά, ύψους H=200 mm με διάμετρο D=100 mm, χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας σε αέρα και της αντίστασης σε διείδυση χλωριόντων.

Και στις οχτώ (8) συνθέσεις σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM II/-A-M (P-LL-W) 42.5, δηλαδή τσιμέντο Portland τύπου II με κύριο συστατικό, πλην του κλίνκερ, φυσική ποζολάνη (P), λεπτοαλεσμένο ασβεστόλιθο (LL) και ιπτάμενη τέφρα (W). Τα ασβεστολιθικά αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν ήταν άμμος 0-4 mm και γαρμπίλι 8-16 mm. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής Sika Viscocrete.

Οι σκυροδετήσεις ήταν των 40lt εκάστη με σταθερό λόγο νερού προς τσιμέντο, ποσότητα αδρανών και κ.ο. ποσοστό ινών. Η μόνη διαφορά ήταν στην ποσότητα του ρευστοποιητή. Στην σύνθεση με τον μετακαολίνη, με σκοπό να διατηρηθεί ο λόγος νερού προς συνδετική κονία (binder) σταθερός, μειώθηκε ελαφρώς η ποσότητα του τσιμέντου. Οι συνθέσεις παρέμειναν κατά τα άλλα αμετάβλητες, ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να είναι μεταξύ τους συγκρίσιμα. Στον **Πίνακα 5.2**, αναγράφονται αναλυτικά οι συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Πίνακας 5.2 : Περιεκτικότητες συστατικών των συνθέσεων (Kg/m³)

Υλικά(kg/m ³)	NC	NC-MC	NCSF-0.5	NCSF-1.0	NCPF-0.5	NCPF-1.0	NCPX-0.5	NCPX-1.0
Τσιμέντο	400	360	400	400	400	400	400	400
Μετακαολίνης	0	40	0	0	0	0	0	0
Άμμος	900	900	900	900	900	900	900	900
Γαρπίλι	700	700	700	700	700	700	700	700
Λόγος w/c	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Συνολικό νερό	228	228	228	228	228	228	228	228
Μεταλλικές ίνες (SF)	0	0	40	80	0	0	0	0
Συνθετικές ίνες (PF)	0	0	0	0	4.5	9	0	0
Συνθετικές ίνες (PX)	0	0	0	0	0	0	4.5	9
Ρευστοποιητής	0.87	3.25	1.06	1.00	0.90	1.33	0.90	1.33

Στον **Πίνακα 5.3** παρουσιάζονται οι ιδιότητες του νοπού σκυροδέματος για όλες τις συνθέσεις όπως προέκυψαν πειραματικά στη Μεταπτυχιακή Εργασία των [**Κομνηνού και Οικονόμου (2015)**].

Πίνακας 5.3 : Ιδιότητες νοπού σκυροδέματος όλων των συνθέσεων

Συνθέσεις	NC	NC-MC	NCSF-0.5	NCSF-1.0	NCPF-0.5	NCPF-1.0	NCPX-0.5	NCPX-1.0
Κάθιση (mm)	150	130	145	165	145	100	140	100
Περιεκτικότητα σε αέρα (%)	1.8	2.4	2.5	3.6	2.2	1.6	2.1	2.2
Μοναδιαίο βάρος (Kg/m ³)	2318	2303	2342	2326	2302	2305	2295	2293

Στον **Πίνακα 5.4** παρουσιάζονται οι θλιπτικές αντοχές των κυβικών δοκιμών σε ηλικία 7 και 28 ημερών, καθώς και η μέση τιμή και ο συντελεστής διακύμανσης κάθε σύνθεσης όπως προέκυψαν πειραματικά στη Μεταπτυχιακή Εργασία των **[Κομνηνού και Οικονόμου (2015)]**.

Πίνακας 5.4 : Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμών σε ηλικία 7 και 28 ημερών, μέση τιμή (Μ.Τ) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%) της κάθε σύνθεσης

Κωδικός Σύνθεσης	7 Ημέρες			28 Ημέρες			
	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Μ.Τ. (MPa)	cv(%)	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Μ.Τ. (MPa)	cv(%)	
NC	A	41.80		48.30			
	B	41.00	41.80	1.91	50.40	49.67	2.39
	Γ	42.60		50.30			
NC-MC	A	56.00		63.90			
	B	56.20	55.27	2.62	66.80	64.57	3.08
	Γ	53.60		63.00			
NCSF-0.5	A	38.40		47.40			
	B	37.80	38.17	0.84	45.00	46.20	2.60
	Γ	38.30		46.20			
NCSF-1.0	A	39.40		47.70			
	B	40.70	39.60	2.56	47.40	47.47	0.44
	Γ	38.70		47.30			
NCPF-0.5	A	40.90		48.50			
	B	41.2	27.90	2.45	52.60	51.23	4.62
	Γ	42.80		52.60			
NCPF-1.0	A	44.50		51.70			
	B	42.70	41.93	2.40	50.70	50.93	1.34
	Γ	38.60		50.40			
NCPX-0.5	A	38.60		45.70			
	B	38.80	38.37	1.53	46.80	46.97	2.89
	Γ	37.70		48.40			
NCPX-1.0	A	41.60		48.90			
	B	41.00	41.07	1.23	49.80	48.57	2.94
	Γ	40.60		47.00			

Στον **Πίνακα 5.5** παρουσιάζονται οι θλιπτικές αντοχές των κυλινδρικών δοκιμών σε ηλικία 28 ημερών, καθώς και η μέση τιμή και ο συντελεστής διακύμανσης κάθε σύνθεσης

όπως προέκυψαν πειραματικά στη Μεταπτυχιακή Εργασία των [Κομνηνού και Οικονόμου (2015)].

Πίνακας 5.5 : Θλιπτική αντοχή κυλινδρικών δοκιμίων σε ηλικία 28 ημερών, μέση τιμή (Μ.Τ) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%) της κάθε σύνθεσης

Κωδικός Σύνθεσης		Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Μ.Τ. (MPa)	cv(%)
NC	A	38.85		
	B	38.57	38.71	0.36
NC-MC	A	46.47		
	B	52.91	48.83	7.28
	Γ	47.10		
NCSF-0.5	A	38.55		
	B	38.20	36.13	10.75
	Γ	31.65		
NCSF-1.0	A	36.81		
	B	35.26	37.00	4.98
	Γ	38.93		
NCPF-0.5	A	35.39		
	B	41.68	38.54	8.17
	Γ	0.00		
NCPF-1.0	A	38.43		
	B	41.47	39.95	3.80
NCPX-0.5	A	35.39		
	B	44.11	41.12	12.08
	Γ	43.86		
NCPX-1.0	A	43.33		
	B	41.28	42.95	3.54
	Γ	44.25		

5.3 ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ

5.3.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΗΣ

Το ανοιχτό πορώδες (open porosity), *OP* (%), του σκυροδέματος ελέγχθηκε σε πρότυπο κυβικό δοκίμιο, ακμής 100 mm, σύμφωνα με το αμερικανικό πρότυπο **ASTM C 642 (1997)**.

Κατά την ηλικία ελέγχου και μεθόδου συντήρησης αποκλειστικά σε δεξαμενή νερού, το δοκίμιο ζυγίστηκε με δύο τρόπους: (i) σε νερό υπό άνωση (μάζα υπό άνωση) και (ii) σε αέρα (μάζα κορεσμένου δοκιμίου). Αν και στο πλαίσιο των δοκιμών του ανοικτού πορώδους όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν αποκλειστικά σε δεξαμενή νερού, αξίζει να σημειωθεί ότι, εάν η συντήρηση δεν πραγματοποιείται σε δεξαμενή νερού, το δοκίμιο πρέπει να έρθει σε κατάσταση πλήρους κορεσμού και έτσι, πριν τη διεξαγωγή της δοκιμής, να παραμείνει εμβαπτισμένο σε νερό για κατάλληλο χρονικό διάστημα ή αυτό να επιτευχθεί με κατάλληλη τεχνική (π.χ. βρασμός).

Στη συνέχεια, το δοκίμιο ξηράθηκε σε φούρνο ξηράσεως (πυριαντήριο) υπο σταθερή θερμοκρασία 105 °C μέχρι σταθεροποίησης του βάρους του. Μετά την ξήρασή του, το δοκίμιο ζυγίστηκε ξανά σε αέρα (μάζα ξηρού δοκιμίου). Από τον συνδυασμό των τριών μαζών προέκυψε η τιμή του ανοικτού πορώδους, σύμφωνα με τις **Εξισώσεις (1) έως (4)**, όπου ρ το ειδικό βάρος του νερού σε συνήθη θερμοκρασία (18 °C), το οποίο για τους υπολογισμούς ελήφθη ίσο με 1000 kg.m³.

$$\text{Απορρόφηση μετά την εμβάπτιση και επί ξήρο\%} = \frac{C-A}{A} \cdot 100 \quad [1]$$

$$\text{Πυκνότητα επι ξηρό} = \frac{A}{C-D} \cdot \rho = g_1 \quad [2]$$

$$\text{Φαινόμενη πυκνότητα} = \frac{A}{A-D} \cdot \rho = g_2 \quad [3]$$

$$\text{Ανοικτό πορώδες \%} = \frac{g_2 - g_1}{g_2} \cdot 100 \quad [4]$$

Όπου,

A : μάζα δοκιμίου επί ξηρό (g)

C : μάζα δοκιμίου πλήρες κορεσμένο επιφανειακά στεγνό (g)

D : φαινόμενη μάζα του δοκιμίου επί ξηρό (g)

g_1 : πυκνότητα του δοκιμίου επί ξηρό (Mg/m³)

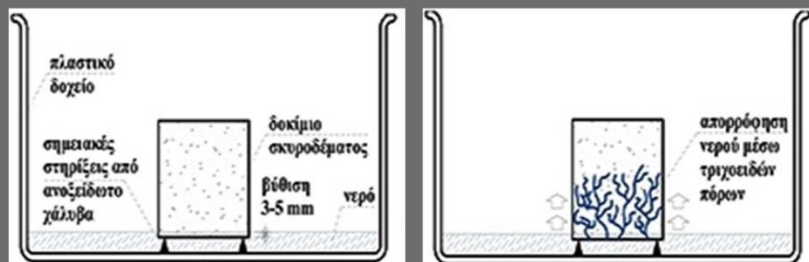
g_2 : φαινόμενη πυκνότητα (Mg/m³)

ρ : πυκνότητα νερού (Mg/m³)

5.4 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

5.4.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΗΣ

Ο προσδιορισμός της τριχοειδούς απορρόφησης (capillary suction η capillary absorption), με σκοπό την εκτίμηση της απορροφητικότητας (sorptivity) μέσω τριχοειδών πόρων, S ($mm/min^{0.5}$) του σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την οδηγία **RILEM TC 116 PCD (1999)**. Σύμφωνα με αυτή, προσδιορίζεται η μεταβολή του βάρους του υπό έλεγχο δοκιμίου, λόγω της απορρόφησης νερού διαμέσου των τριχοειδών πόρων του (τριχοειδής απορρόφηση, capillary suction, capillary absorption). Πριν τον έλεγχο, το δοκίμιο ξηράνθηκε σε φούρνο ξηράνσεως (πυριαντήριο) υπό σταθερή θερμοκρασία 105 °C μέχρι σταθεροποίησης του βάρους του, η οποία επιτυγχάνεται συμβατικά όταν η μεταβολή του βάρους του δοκιμίου μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων σε διάστημα 24±3 ωρών, υπολογίζεται μικρότερη από 0.1%. Στη συνέχεια, και αφού το δοκίμιο παρέμεινε σε συνθήκες περιβάλλοντος για ικανό διάστημα περίπου μίας έως δύο ωρών για την εξίσωση της θερμοκρασίας του με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, πραγματοποιήθηκε η δοκιμή απορροφητικότητας.



Σχήμα 5.2 : Πειραματική διάταξη δοκιμής απορροφητικότητας

Για την εκτέλεση της δοκιμής χρησιμοποιήθηκε πλαστικό δοχείο. Κατά την έναρξη της δοκιμής, η επιφάνεια του δοκιμίου τοποθετούταν πάνω σε μεταλλικές στηρίξεις από

ανοξειδωτο χάλυβα, σε οριακή επαφή με δεξαμενή νερού (βάθος εμβάπτισης 3 mm), και καταγραφόταν το βάρος του δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές (**Σχήμα 5.2**). Σε κάθε χρονική στιγμή καταγραφής, το δοκίμιο αφαιρούνταν από τη δεξαμενή, σκουπιζόταν ελαφρά η επιφάνεια που ερχόταν σε επαφή με το νερό έτσι ώστε να είναι επιφανειακά στεγνό και ζυγιζόταν. Παράλληλα, περιοδικά συμπληρωνόταν η δεξαμενή με νερό, για να διατηρηθεί σταθερή η στάθμη του νερού. Για τον περιορισμό της πλευρικής εισροής ύδατος στο σκυρόδεμα, περιμετρικά του δοκιμίου έγινε εφαρμογή στεγανοποιητικής ταινίας (**Σχήμα 5.3**).



Σχήμα 5.3 : (α) Εκτέλεση δοκιμής σε πρότυπα κυβικά δοκίμια (100x100x100 mm) που φέρουν πλευρική στεγάνωση και (β) Τα δοκίμια μετά το πέρας του πειράματος τριχοειδούς απορρόφησης

Έχει ήδη αποδειχθεί [**Hall and Tse (1986), Hall and Yau (1987)**] ότι, συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, $T^{0.5}$ (T σε min), η μεταβολή του βάρους του δοκιμίου, ανηγμένου στην επιφάνεια έκθεσης σε νερό (αγνοώντας την πλευρική έκθεση), $i=DW/A$ (kg/m^2), ακολουθεί τη γραμμική **Εξίσωση (5)**, με μικρή ή καθόλου διακριτή καμπυλότητα για τις πρώτες ώρες επαφής με το νερό (τουλάχιστον έως 4h). Ως απορροφητικότητα ορίζεται η κλίση της ευθείας, S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$).

$$i = \frac{\Delta w}{A} = ST^{0.5} + i_0 \quad [5]$$

όπου,

i : η αύξηση στη μάζα σε g/mm^2 από την έναρξη της δοκιμής για κάθε μονάδα εμβαδού που έρχεται σε επαφή με το νερό εφόσον η αύξηση στη μάζα οφείλεται στη διείσδυση του νερού, 1 g ισοδυναμεί με 1 mm^3 , οπότε το i μπορεί να εκφραστεί σε mm

Δm : η μάζα του απορροφημένου νερού (g)

A : το εμβαδόν της επιφάνειας που είναι σε επαφή με το νερό (mm^2)

t : ο χρόνος σε min στον οποίο καταγράφεται η αύξηση της μάζας

S : η τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity), σε $\text{mm/min}^{0.5}$

i_0 : η αρχική απορρόφηση

Η γραμμικότητα ελέγχεται μέσω της τιμής του συντελεστή συσχέτισης, R^2 , της γραμμικής παλινδρόμησης. Σύμφωνα με του [Reda Taha et al (2001)], η ροή κατά τη δοκιμή απορροφητικότητας διαφόρων πορωδών τεχνικών υλικών, μεταξύ των οποίων και του σκυροδέματος, φαίνεται να είναι γενικώς μονοδιάστατη και οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης πρέπει να ξεπερνούν το 0.96 για δεδομένα που λαμβάνονται τουλάχιστον έως τις πρώτες οκτώ ώρες της δοκιμής. Επομένως, τιμές του συντελεστή συσχέτισης μικρότερες από 0.96 συνεπάγονται μη επαρκή γραμμικότητα της καμπύλης και η τιμή της απορροφητικότητας θα πρέπει να απορρίπτεται και να επανελέγχεται.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο αρχικός ρυθμός απορρόφησης είναι αρκετά υψηλός και αποδίδεται στο φυσικό φαινόμενο της πλήρωσης του ανοιχτού πορώδους στην επιφάνεια επαφής του δοκιμίου με το νερό [Hall and Yau (1987)]. Ο εν λόγω υψηλός ρυθμός απορρόφησης έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή καθυστέρηση στην έναρξη του χρονομέτρου να οδηγεί στη δημιουργία μιας αρχικής αρνητικής τεταγμένης A στον άξονα της τριχοειδούς απορρόφησης. Από την άλλη πλευρά, εάν ο χρόνος μέτρησης ξεκινήσει νωρίτερα, τότε η τεταγμένη θα έχει θετική πλευρά [Wilson et al (1999)]. Στην δημιουργία της αρχικής τεταγμένης συνεισφέρουν και οι ενδιάμεσες διακοπές της διαδικασίας απορρόφησης κατά τις περιόδους εξαγωγής και ζύγισης του δοκιμίου, οι οποίες για πρακτικούς λόγους δε συνοδεύονται από προσωρινές διακοπές του χρόνου μέτρησης. Γενικά, πάντως, οι τιμές της αρχικής τεταγμένης είναι σχετικά χαμηλές.

5.5 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΕ ΑΕΡΑ

5.5.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΗΣ

Για τη μέτρηση της διαπερατότητας σε αέρα (N_2), μετρήθηκε ο ρυθμός της ροής του αζώτου υπό εγκάρσια πίεση στο δοκίμιο του σκυροδέματος, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μέτρησης και υπολογίστηκε, σύμφωνα με την οδηγία **RILEM TC 116 PCD (1999)**.

Το δοκίμιο είχε διάμετρο $d=100$ mm και ύψος h =περίπου 50 mm (κυμαινόταν από 45 έως 48 mm). Πριν τον έλεγχο, το δοκίμιο ξηράνθηκε σε φούρνο ξηράνσεως (πυριαντήριο) υπό σταθερή θερμοκρασία 105 °C μέχρι σταθεροποίησης του βάρους του. Η διαδικασία ξήρανσης διήρκησε από 5 έως 8 ημέρες.

Για την εκτέλεση της δοκιμής χρησιμοποιήθηκε μια τροποποιημένη τριαξονική κυψέλη μέγιστης πίεσης στα 1.7 N/mm² για δοκίμια διαμέτρου 100 mm. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν δύο φιάλες αερίου (N_2), η πρώτη για την εφαρμογή της πίεσης στην κυψέλη και συνεπώς ανάλογης πλευρικής υδραυλικής στο δοκίμιο και η δεύτερη για την εισαγωγή του αερίου υπό πίεση, εγκάρσια στο δοκίμιο του σκυροδέματος. Έτσι δημιουργήθηκε ένα εξωτερικό δίκτυο αγωγών για την τροφοδότηση της κυψέλης με νερό και με τη χρήση μανόμετρων γίνεται έλεγχος και η εισαγωγή του αερίου υπό πίεση (**Σχήμα 5.4**).

Απαραίτητος είναι ένας ελαστικός σωλήνας από καουτσούκ, για την πλευρική μόνωση του δοκιμίου του σκυροδέματος, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η εγκάρσια ροή του αερίου και η στεγανοποίηση από το νερό της κυψέλης, χρειάζονται τέσσερις ελαστικοί δακτύλιοι, οι οποίοι συνεισφέρουν στη στεγανοποίηση μέσω του ελαστικού σωλήνα γύρω από το δοκίμιο και τους πορόλιθους (διαμέτρου) $d=100$ mm και ύψους $h=150$ mm, οι οποίοι τοποθετούνται εκατέρωθεν του δοκιμίου. Τέλος, μια πλαστική λεκάνη, ογκομετρικοί σωλήνες και χρονόμετρο για τη μέτρηση της ροής του αερίου, μέσω της πτώσης της στάθμης του νερού εντός του ογκομετρικού σωλήνα, σε σχέση με το χρόνο

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος, περιγράφεται αναλυτικά στην Μεταπτυχιακή Εργασία [**Βούκια Δ.(2013)**].



Σχήμα 5.4 : Τοποθέτηση ελαστικού σωλήνα από καουτσούκ, Το περίβλημα της τριαξονικής κυψέλης και οι φιάλες N2

Ο συντελεστής διαπερατότητας K_g , υπολογίζεται από την **Εξίσωση (6)**. Ως συντελεστής διαπερατότητας ορίζεται η κλίση, K_g (m^2), της ευθείας.

$$K_g = \frac{2Q \cdot P_o \cdot L \cdot \eta}{A \cdot (P^2 - P_a^2)} \quad [6]$$

Όπου,

Q : ο ρυθμός ροής του όγκου του αερίου σε συνθήκες περιβάλλοντος (m^3/s)

P_o : η πίεση σε κανονικές συνθήκες (N/m^2)

L : το πάχος του δοκιμίου (m)

η : το δυναμικό ιξώδες του αερίου (Ns/m^2)

A : το εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου που είναι κάθετη στη ροή (m^2)

P : η πίεση σε συνθήκες περιβάλλοντος-πίεση εισόδου (N/m^2)

P_a : η πίεση εξόδου (N/m^2)

5.6 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΕ ΧΛΩΡΙΟΝΤΑ

Στη βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν πολλές διαφορετικές δοκιμές που μπορούν να εκτιμήσουν την διαπερατότητα του σκυροδέματος σε χλωρίοντα. Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας εφαρμόστηκαν δυο διαφορετικές μέθοδοι.

- Προσδιορισμός συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης (non-steady state chloride migration coefficient), D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m²/s), σύμφωνα με την πρότυπη επιταχυνόμενη μέθοδο **NordTest Build 492 (1999)**.
- Προσδιορισμός συντελεστή διάχυσης χλωριόντων μέσω διάχυσης, (chloride diffusion coefficient) D_{sm} ($\times 10^{-12}$ m²/s), σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο **NordTest Build 443 (1995)** και βάσει του προτύπου **ΕΛΟΤ EN 196-2**.

Ο τρόπος εκτέλεσης των αντίστοιχων δοκιμών, καθώς και η μεθοδολογία αξιολόγησης των αποτελεσμάτων τους περιγράφονται αναλυτικά στις παραγράφους που ακολουθούν.

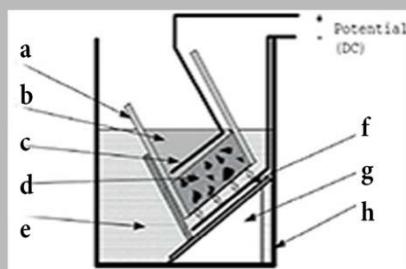
5.6.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (NON-STEADY STATE CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT)

5.6.1.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΗΣ

Για την εκτίμηση της ικανότητας του σκυροδέματος να ανθίσταται στα χλωρίοντα επιλέχθηκε η επιταχυνόμενη δοκιμή **NordTest Build 492 (1999)** η οποία βασίζεται σε μέθοδο που είχαν αναπτύξει προγενέστερα οι **Tang and Nilsson (1991)**. Παρά το γεγονός ότι η εν λόγω μέθοδος χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρικό πεδίο για την επιτάχυνση της διείσδυσης χλωριόντων, το οποίο δεν υφίσταται σε πραγματικές κατασκευές, έχει αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα της συσχετίζονται πολύ καλά με άλλες μεθόδους (π.χ. Salt Ponding Test, Bulk Diffusion Test), που προσομοιώνουν πιο ρεαλιστικές συνθήκες [**Audenaert (2005, Audenaert (2007))**].

Στα πειράματα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου ($Ca(OH)_2$). Λόγω έλλειψης της κατάλληλης διάταξης τα δοκίμια εν συνεχεία δεν συντηρήθηκαν σε αντλία κενού (vacuum treatment) πριν τον έλεγχο τους. Όπως αναφέρουν οι [Stanish et al (2007)] η συντήρηση σε υδροξειδίου του ασβεστίου συνεισφέρει στην αποφυγή του φαινομένου αρχικής απορρόφησης κατά την εισαγωγή του διαλύματος χλωριόντων. Ομοίως, όπως αναφέρεται από τον [Nawy (1996)], η συντήρηση σε αντλία κενού αυξάνει την αντίσταση των επιφανειών σκυροδέματος σε ταχεία ροή υγρών. Ως συνέπεια των ανωτέρω, στην παρούσα εργασία, η αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων αναμένεται να προσδιοριστεί ελαφρώς μειωμένη, για όλα τα δοκίμια.

Η επιταχυνόμενη δοκιμή NordTest Build 492 (1999) είναι μια ποσοτική δοκιμή που συνίσταται στον προσδιορισμό του συντελεστή μεταφοράς των χλωριόντων (chloride migration coefficient) στο σκυροδέμα, μέσω πειραμάτων μη σταθερής κατάστασης (non-steady state). Η μεταφορά των χλωριόντων επιτυγχάνεται με την εξαναγκασμένη επιταχυνόμενη κίνηση των χλωριόντων, διαμέσου κυλινδρικού δοκιμίου σκυροδέματος, και μέσω κατάλληλης διάταξης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.5.



- a: πλαστική σωλήνα
- b: διάλυμα ανόδου
- c: ηλεκτρόδιο ανόδου
- d: δοκίμιο σκυροδέματος
- e: διάλυμα καθόδου
- f: ηλεκτρόδιο καθόδου
- g: βάση στήριξης
- h: πλαστικό δοχείο

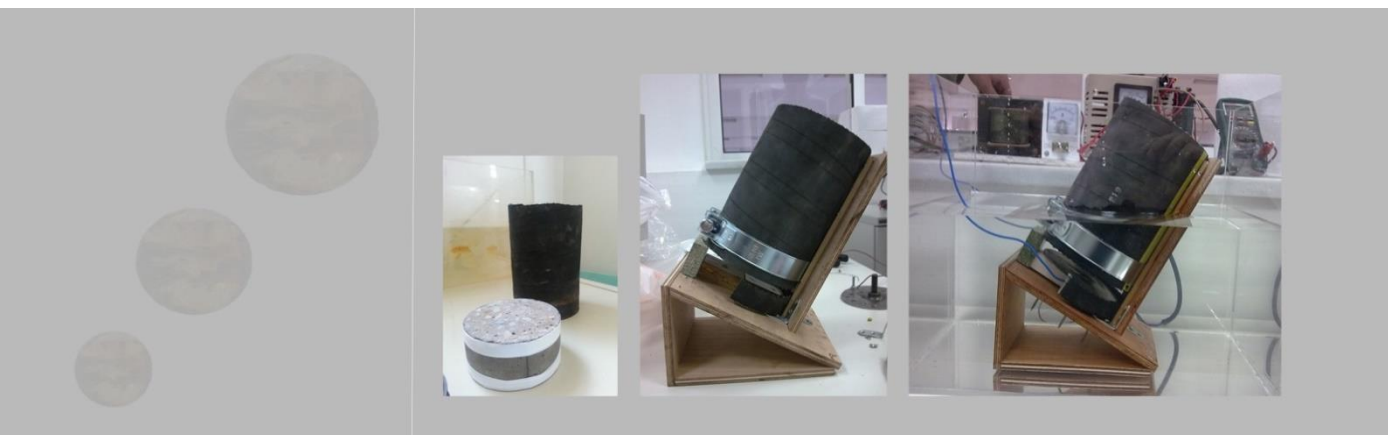
Σχήμα 5.5 : Περιγραφή πειραματικής διάταξης [NordTest Build 492 (1999)]

Ένα τμήμα κυλινδρικού δοκιμίου ($D = 100$ mm, $L = 50$ mm) παραμένει, μέσω κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων, υπό σταθερή διαφορά δυναμικού, από 10 έως 60 V DC (συνηθέστερα μεταξύ 10 και 30 V DC), για μία περίοδο μεταξύ 6 έως 96 ωρών (συνηθέστερα 24 ωρών). Η επιλογή της διαφορά δυναμικού, και της διάρκειας της δοκιμής γίνεται με βάση

το αρχικώς διερχόμενο ρεύμα για δοκιμαστική διαφορά δυναμικού ίση με 30 V DC **Πίνακας 5.6.**

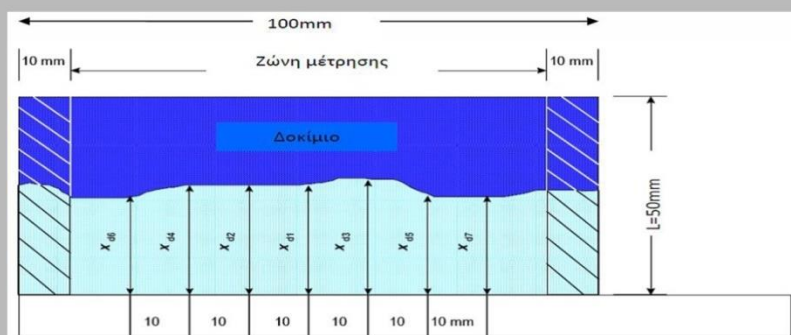
Πίνακας 5.6 : Διαφορά δυναμικού και διάρκεια δοκιμής [πηγή: **NordTest Build 492 (1999)**]

Αρχικό ρεύμα υπό σταθερή διαφορά δυναμικού 30 V DC mA	Επιβαλλόμενη διαφορά δυναμικού (κατόπιν ρύθμισης) V	Πιθανό νέο ρεύμα I ₀ mA	Διάρκεια δοκιμής t h
I ₀ < 5	60	I ₀ < 10	96
5 ≤ I ₀ < 10	60	10 ≤ I ₀ < 20	48
10 ≤ I ₀ < 15	60	20 ≤ I ₀ < 30	24
15 ≤ I ₀ < 20	50	25 ≤ I ₀ < 35	24
20 ≤ I ₀ < 30	40	25 ≤ I ₀ < 40	24
30 ≤ I ₀ < 40	35	35 ≤ I ₀ < 50	24
40 ≤ I ₀ < 60	30	40 ≤ I ₀ < 60	24
60 ≤ I ₀ < 90	25	50 ≤ I ₀ < 75	24
90 ≤ I ₀ < 120	20	50 ≤ I ₀ < 80	24
120 ≤ I ₀ < 180	15	60 ≤ I ₀ < 90	24
180 ≤ I ₀ < 360	10	60 ≤ I ₀ < 120	24
360 ≤ I ₀	10	120 ≤ I ₀	6



Σχήμα 5.6 : Πειραματική διάταξη δοκιμής αντίστασης σε χλωριόντα κατά **NordTest Build 492(1999)**

Το διάλυμα καθόδου αποτελείται από 10 % κ.β. χλωριούχο νάτριο $NaCl$, (1333.33 gr $NaCl$ σε 12 lt νερό βρύσης) , ενώ το διάλυμα ανόδου αποτελείται από 0.3 N υδροξείδιο του νατρίου $NaOH$ (4.84 gr $NaOH$ σε 365 ml απιονισμένο νερό). Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της μεθόδου, κατά την έναρξη και τη λήξη της δοκιμής καταγράφονται το διερχόμενο ρεύμα, η θερμοκρασία του διαλύματος ανόδου και η ηλεκτρική αντίσταση του δοκιμίου. Η πειραματική διάταξη όπως κατασκευάστηκε στο ΕΩΣ/Ε.Μ.Π., παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.6**



Σχήμα 5.8 : Μεθοδολογία καταγραφής βάθους διείσδυσης χλωριόντων από προφίλ δοκιμίου κατόπιν ψεκασμού με νιτρικό άργυρο [πηγή: **NordTest Build 492 (1999)**]

Για τον προσδιορισμό του βάθους διείσδυσης χλωριόντων εφαρμόζεται μια χρωματογραφική μέθοδος, ο μηχανισμός της οποίας μπορεί να αναζητηθεί στην βιβλιογραφία [**Kim et al (2007)**, **Stanish et al (1997)**, **Otsuki et al (1993)**]. Συγκεκριμένα, μετά την λήξη της δοκιμής, το δοκίμιο διαχωρίζεται αξονικά σε δύο τεμάχια (μέσω διάρρηξης) και μια εκ των δύο θραυσμένων επιφανειών ψεκάζεται με διάλυμα 0,1 M νιτρικού αργύρου $AgNO_3$. Το βάθος διείσδυσης χλωριόντων προσδιορίζεται από τη χρωματική μεταβολή στην περιοχή, όπου η παρουσία χλωριόντων οδηγεί μέσω χημικών αντιδράσεων σε σχηματισμό χλωριούχου αργύρου $AgCl$. Στο **Σχήμα 5.7** και στο **Σχήμα 5.8** παρουσιάζονται, αντιστοίχως, ο τρόπος μέτρησης του βάθους διείσδυσης και ένα βάθος διείσδυσης Cl^- και ένα τυπικό δοκίμιο, μετά τον ψεκασμό.



Σχήμα 5.7 : Τυπικό προφίλ δοκιμίου σκυροδέματος κατόπιν δοκιμής αντίστασης σε χλωριόντα, σύμφωνα με το πρότυπο [NordTest Build 492 (1999)] και ψεκασμού με νιτρικό άργυρο

Η μέση τιμή των παραπάνω μετρήσεων, x_d (mm) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων, D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m/s²). Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται οι **Εξισώσεις (7) έως (9)** που ακολουθούν:

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - a\sqrt{x_d}}{t} \quad [7]$$

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad [8]$$

$$a = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad [9]$$

Όπου,

D_{nssm} : συντελεστής διάχυσης χλωριόντων ($\times 10^{-12}$ m²/s)

F : σταθερά του Faraday, $F = 9.648 \cdot 10^4$ J/(V mol)

U : απόλυτη τιμή της εφαρμοσμένης τάσης (V)

T : μέση τιμή αρχικής και τελικής θερμοκρασίας του διαλύματος ανόδου (°C)

L : πάχος δοκιμίου (mm)

x_d : μέση τιμή των βαθών διείσδυσης των χλωριόντων (mm)

t : διάρκεια του πειράματος (h)

c_d : συγκέντρωση χλωριόντων στην οποία το χρώμα αλλάζει, $c_d = 0.07 \text{ N}$

c_0 : συγκέντρωση χλωριόντων στο διάλυμα καθόδου, $c_0 = 2\text{N}$

Ο Πίνακας 5.7 περιλαμβάνει τον χαρακτηρισμό του σκυροδέματος ανάλογα με τον εκτιμηθέντα συντελεστή διάχυσης D_{nssm} , σύμφωνα με τον [Tang (1996)]. Άλλες παρεμφερείς ταξινομήσεις μπορούν να βρεθούν στην βιβλιογραφία [Nilsson et al (1998)] κατά τον [Gjorv (2009)], Πίνακας 5.8. Στους Πίνακες αναφέρονται συμπληρωματικώς και οι πρότυποι αγγλικοί περιγραφικοί όροι που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό του σκυροδέματος.

Πίνακας 5.7 : Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση του στη διείσδυση χλωριόντων, για διάφορες τιμές του συντελεστή διάχυσης [πηγή : Tang (1996)]

Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων $D_{nssm} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων	
>16	Ακατάλληλο για επιθετικό περιβάλλον	Not suitable for aggressive environment
8-16	Μετρία	Moderate
2-8	Καλή	Good
<2	Πολύ Καλή	Very good

Πίνακας 5.8 : Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση του στη διείσδυση χλωριόντων, για διάφορες τιμές του συντελεστή διάχυσης [πηγή : Nilsson et al (1998)]

Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων $D_{nssm} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων	
>15	Χαμηλή	Low
10-15	Μέτρια	Moderate
5-10	Υψηλή	High
2.5-5	Πολύ υψηλή	Very high
<2.5	Εξαιρετικά υψηλή	Extremely high

5.6.2 ΔΙΑΧΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ NT 443

5.6.2.1 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΗΣ

Για την εκτίμηση της ικανότητας του σκυροδέματος να ανθίσταται στα χλωριόντα επιλέχθηκε επίσης η δοκιμή **NordTest Build 443 (1995)**. Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των Cl έγινε με βάση το πρότυπο **ΕΛΟΤ EN 196-2**. Χρησιμοποιήθηκαν 8 δοκίμια, 1 για κάθε σύνθεση. Τα δοκίμια μονώθηκαν σε όλες τις πλευρές, εκτός από μία, με σκοπό η διάχυση των χλωριόντων να γίνεται από την ελεύθερη επιφάνεια του κάθε δοκιμίου, δεδομένου εμβαδού.

Για τη μόνωση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο στεγανοποιητικό υλικό (Dryproof Masonry waterproofer). Η επίστρωση των δοκιμών έγινε σε δυο στάδια, διαφοράς 2 h περίπου. Σε κάθε στάδιο χρησιμοποιήθηκαν περίπου 1 kg στεγανοποιητικού υλικού. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε διάλυμα $NaCl$ 16.5% το οποίο παρασκευάστηκε αναμειγνύοντας 11.1 L απιονισμένο νερό και 1870g αλατιού σύμφωνα με το πρότυπο **Nordest Test Build 443**.

Ελήφθη μέριμνα ώστε ο λόγος του όγκου του νερού προς τον όγκο των δοκιμών να είναι μεγαλύτερος από 4. Για την παρασκευή των διαλυμάτων χρησιμοποιήθηκε $NaCl$ του εμπορίου. Τα δοκίμια παρέμειναν στο υδατικό περιβάλλον του χλωριούχου νατρίου για πενήντα (50) ημέρες προκειμένου να λάβει χώρα η διάχυση των χλωριόντων στο εσωτερικό των δοκιμών. Μετά το πέρας των έξι πρώτων εβδομάδων, το διάλυμα ανανεώθηκε διατηρώντας την ίδια περιεκτικότητα του υδατικού διαλύματος σε $NaCl$ (16.5% w/w).

Μετά τη συμπλήρωση 50 ημερών από την τοποθέτηση των δοκιμών στο διάλυμα $NaCl$ τα δοκίμια αφήθηκαν να στεγνώσουν στο περιβάλλον, προκειμένου να προσδιοριστεί η συγκέντρωση των συνολικών χλωριόντων που περιέχονταν σε αυτά. Κατόπιν, υπολογίστηκαν οι συντελεστές διάχυσης όλων των δοκιμών με προσαρμογή του προφίλ διάχυσης των χλωριόντων στο 2° νόμο του **Fick**. Για το σκοπό αυτό τα δοκίμια με την χρήση

ειδικού δράπανου «Profile Grinder»² έγινε άλεση σε ομοκέντρους κύκλους. Τα διαφορετικά βάθη προσαύξησης: 0-2 mm, 2-4 mm, 4-6 mm, 6-8 mm, 8-10 mm, 10-12mm, 12-14mm και 14-16 mm, επιλέχθηκαν με βάση το πρότυπο **Nordest Test Build 443**³. Πριν τη λήψη των δειγμάτων σκόνης, οι επιφάνειες των δοκιμών τρίφτηκαν με γυαλόχαρτο για την απομάκρυνση εναπομένουσας ποσότητας αλατιού. Στο τέλος, συγκεντρώθηκαν τα δείγματα των δοκιμών από κάθε βάθος και έγινε γενική ανάλυση για τον προσδιορισμό των συνολικών χλωριόντων.

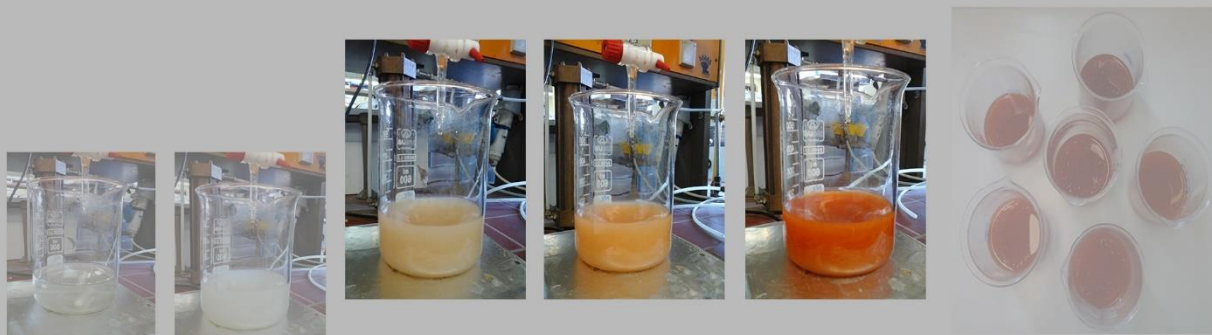
5.6.2.1.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΩΝ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ

Αρχικά, ζυγίστηκε η μάζα των δειγμάτων με ακρίβεια ± 0.0001 g. Η ποσότητα αυτή ήταν της τάξης των 5 g σε όλα τα τσιμεντοκονιάματα. Η αρχική αυτή μάζα του κάθε δείγματος διαλυτοποιήθηκε υπό σύγχρονη ανάδευση με μαγνητικό αναδευτήρα, σε ποτήρι ζέσεως των 250 με 50 ml απιονισμένου νερού και εν συνεχεία, προστέθηκαν άλλα 50 ml αραιού νιτρικού οξέος 1:2. Το διάλυμα θερμάνθηκε μέχρι βρασμού, υπό ανάδευση κατά διαστήματα. Ο βρασμός συνεχίστηκε για 1 min. Ακολούθησε προσθήκη, ανάλογα με το δείγμα, μιας ποσότητας διαλύματος $AgNO_3$ 0.1 M. Όσον αφορά τα δοκίμια, για τα 2 πρώτα βάθη έως και τα 10 mm προστέθηκαν 15 ml $AgNO_3$, ενώ για τα υπόλοιπα 2 βάθη 10 ml $AgNO_3$. Ο βρασμός συνεχίστηκε για 1 min ακόμα και το διάλυμα διηθήθηκε σε ποτήρι ζέσεως των 500 ml με ηθμό, ο οποίος προηγουμένως έχει πλυθεί με αραιό νιτρικό οξύ 1:100. Έπειτα πλύθηκαν το ποτήρι, η υάλινη ράβδος και ο ηθμός με αραιό νιτρικό οξύ 1:100 μέχρι τα υγρά διήθησης και έκπλυσης να φθάσουν τον όγκο των 200 ml. Τα υγρά αυτά ψύχθηκαν σε θερμοκρασία μικρότερη των 25°C. Ακολούθησε προσθήκη 5 ml διαλύματος δεικτή στυπτηρίας ($H_4FeNO_8S_2 \cdot 12H_2O$ ή $NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) και ογκομέτρηση με διάλυμα NH_4SCN 0,1 M υπό ισχυρή ανάδευση. Από την παραπάνω δόκιμη καταγράφηκαν τρεις μετρήσεις που αφορούν στην (α) αλλαγή του χρώματος του διαλύματος, (β) ενδιάμεση τιμή

² Η άλεση επιτυγχάνεται με την περιστροφή του μοχλού μέσα στην πλάκα λείανσης, έτσι ώστε να αφαιρείται ένα κυκλικό τμήμα της επιφάνειας. Η περιοχή άλεσης είναι 73mm με διάμετρο και το μέγιστο βάθος είναι 40 mm. Μια πλήρης περιστροφή (360°), του μοχλού αντιστοιχεί σε 2mm βάθος. Σε κάθε βήμα ο μοχλός μετακινείται κατά 0.5 mm (90°) έως ότου επιτευχθεί το επιθυμητό βάθος. Η σκόνη για κάθε βάθος προσαύξησης συλλέγεται σε πλαστικό σακουλάκι που συνδέεται με την πλάκα λείανσης.

³ Άλεση και συλλογή σκυροδέματος σε σκόνη από λεπτές στρώσεις σκυροδέματος (≤ 2 mm)

χρωματισμού του και (γ) μέχρι το διάλυμα να χρωματιστεί ερυθροφαίο (Σχήμα 5.9). Σημειώθηκε ο όγκος V_{NH_4SCN} , που απαιτήθηκε για να επέλθει η αλλαγή χρώματος στο διάλυμα.



Σχήμα 5.9 : Χρωματικές αλλαγές του διαλύματος μέχρι να χρωματιστεί ερυθροφαίο, κατά την διάρκεια της τιτλοδότησης σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-2

Ο υπολογισμός των περιεχόμενων χλωριόντων έγινε με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\% Cl^- = \Delta V \cdot 0.01 \left(\frac{AB_{Cl}}{m_{\text{δείγματος}}} \right) \quad [10]$$

Όπου,

ΔV : $V_{AgNO_3} - V_{NH_4SCN}$ (ml)

AB_{Cl} : 35.545 (g)

$M_{\text{δείγμ.}}$: η μάζα του δείγματος από το κάθε βάθος (gr)

5.6.2.1.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ

Μετά τον προσδιορισμό των συνολικών Cl που διείσδυσαν στο εσωτερικό των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε προσαρμογή των προφίλ των χλωριόντων στο **2^ο νόμο του Fick**, επιτρέποντας τον υπολογισμό των συντελεστών διάχυσης των δοκιμίων για κάθε σύνθεση.

Όπως είναι γνωστό ο 2ος νόμος του Fick διέπει το φαινόμενο της μεταφοράς μάζας λόγω διάχυσης και είναι αντίστοιχος του νόμου του Newton για το ιξώδες και του νόμου του Fourier στην αγωγή θερμότητας. Ο νόμος του Fick, όπως και οι δύο άλλοι προαναφερθέντες νόμοι, είναι φαινομενολογικός, δηλαδή βασίζεται σε παρατηρήσεις και όχι σε κάποια φυσική αρχή διατήρησης. Δέχεται μια γραμμική σχέση μεταξύ της βαθμίδας συγκέντρωσης και του ρυθμού διάχυσης και υπολογίζει το ρυθμό μεταφοράς σε σχέση με παρατηρητή, που κινείται με τη μέση ταχύτητα του ρευστού. Αυτή η μέση ταχύτητα θα προσδιορίζεται από την κίνηση όλων των συστατικών ενός μίγματος.

Για ένα διμερές μίγμα A και B ο ρυθμός γραμμομοριακής διάχυσης σε κάποια κατεύθυνση z είναι ανάλογος της βαθμίδας συγκέντρωσης στην κατεύθυνση αυτή:

$$J_{A,z} = -D_{A,z} \frac{dc_A}{dz} \quad [11]$$

Ο συντελεστής αναλογίας D_{AB} ονομάζεται συντελεστής διάχυσης του συστατικού A στο συστατικό B. Στο σύστημα μονάδων S.I. έχει διαστάσεις $m^2 \cdot s^{-1}$, τις ίδιες με το κινηματικό ιξώδες ν και το συντελεστή θερμικής διαχυτότητας α . Η **Εξίσωση (12)** ισχύει για σύστημα που βρίσκεται σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση, που έχει δηλαδή σταθερή ολική συγκέντρωση. Μια γενικότερη μορφή της εξίσωσης Fick χωρίς αυτόν τον περιορισμό είναι:

$$J_{A,z} = -cD_{A,B} \frac{dx_A}{dz} \quad [12]$$

Όπου, x_A είναι το μοριακό κλάσμα και c η ολική συγκέντρωση.

Χαρακτηριστικό της διάχυσης σε στερεά είναι η μικρή τιμή του συντελεστή διάχυσης και οι μεγάλες διαφορές, που παρατηρούνται, ανάλογα με το είδος του στερεού και το μέγεθος του διαχεόμενου συστατικού. Ανάλογα με το είδος του στερεού και της διαχεόμενης

ουσίας διακρίνονται τρεις βασικοί μηχανισμοί διάχυσης στα στερεά: (α) διάχυση σε κρυσταλλικό στερεό, δηλαδή η διάχυση γίνεται σε μία στερεή φάση, (β) διάχυση ενός αερίου ή υγρού μέσα από τους πόρους ενός στερεού, όπου το διαχεόμενο ρευστό διατηρείται σε ξεχωριστή φάση από το στερεό και (γ) διάχυση σε άμορφο στερεό (π.χ. σε πλαστικό πολυμερές).

Η περίπτωση της διάχυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα είναι εκείνη της διάχυσης υγρού σε πορώδες στερεό. Όταν οι πόροι του στερεού, μέσα από το οποίο περνάει το ρευστό, είναι μεγαλύτεροι από τη μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων, τότε η διάχυση ακολουθεί το νόμο του Fick, δηλαδή το ρευστό μίγμα περνάει μέσα από τους πόρους, όπως θα περνούσε μέσα από ένα λεπτό σωλήνα. Πρέπει να σημειωθεί, ότι ο συντελεστής διάχυσης δίνει το ρυθμό μεταφοράς ανά m^2 επιφάνειας στερεού (και όχι της ελεύθερης διατομής των πόρων) ως συνάρτηση της βαθμίδας συγκέντρωσης που εφαρμόζεται στο στερεό (και όχι κατά μήκος των διόδων). Η συνήθης τακτική για την εκτίμηση του ρυθμού διείσδυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα είναι μέσω του υπολογισμού των τιμών του συντελεστή διάχυσης των χλωριόντων (D). Για το σκοπό αυτό γίνεται προσαρμογή των προφίλ διάχυσης των χλωριόντων στο 2ο νόμο του Fick. Για συνθήκες μη μόνιμης κατάστασης και μονοαξονική ροή κατά την κατεύθυνση x .

ο 2ος νόμος του Fick είναι:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad [13]$$

όπου:

$C(x,t)$: η περιεκτικότητα (%) σε Cl σε βάθος x , μετά απο χρόνο t

Θεωρώντας ότι ο συντελεστής διάχυσης D παραμένει σταθερός, καθώς και τις παρακάτω οριακές συνθήκες:

$$\text{αρχική συνθήκη: } C_{(x,0)} = C_s \quad \text{και οριακή συνθήκη: } C_{(x,0)} = C_s, t \geq 0$$

η λύση του προβλήματος οριακών τιμών είναι:

$$C_{(x,t)} = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad [14]$$

Όπου,

$C(x,t)$: η περιεκτικότητα (%) σε Cl σε βάθος x , μετά από χρόνο t

C_s : η περιεκτικότητα (%) σε Cl στην επιφάνεια του δοκιμίου

x : το βάθος (m)

erf : η συνάρτηση σφάλματος (error function)

D : ο συντελεστής διάχυσης (m^2/s)

t : ο χρόνος έκθεσης του δοκιμίου στο διάλυμα $NaCl$ (s)

ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

6.1 ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ

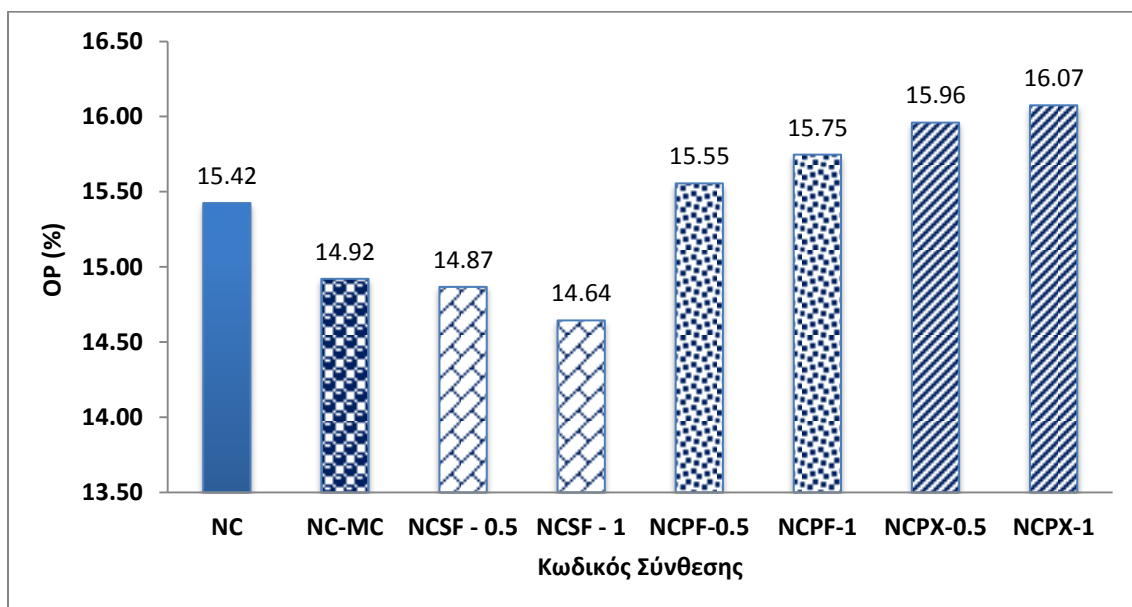
Στον **Πίνακα 6.1** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προσδιορισμού του ανοικτού πορώδους (OP) συνολικά για όλες τις συνθέσεις, ως μέση τιμή των μετρήσεων των 3 δοκιμίων για κάθε τύπο σύνθεσης. Επίσης δίνεται η ποσοστιαία μεταβολή της μ.τ. του ανοικτού πορώδους σε σχέση με το αμιγές μείγμα σκυροδέματος.

Πίνακας 6.1 : Πειραματικά αποτελέσματα ανοικτού πορώδους (OP%), για κάθε σύνθεση

Κωδικός Σύνθεσης	Ανοικτό πορώδες % (Μ.Ο. 3 δοκιμίων)	% Μεταβολή ως προς το αμιγές σκυρόδεμα
NC	15.42	-
NC-MC	14.92	-3.27
NCSF-0.5	14.87	-3.62
NCSF-1	14.64	-5.06
NCPF-0.5	15.55	0.85
NCPF-1.0	15.75	2.09
NCPX-0.5	15.96	3.47
NCPX-1.0	16.07	4.22

Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 6.1** και στο διάγραμμα του **Σχήματος 6.1** παρατηρείται ότι η προσθήκη μετακαολίνη οδήγησε σε μικρή βελτίωση του ανοικτού πορώδους όπως και η προσθήκη μεταλλικών ινών. Αντίθετα, η προσθήκη συνθετικών ινών είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του ανοικτού πορώδους.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις που περιείχαν ίνες, παρατηρούμε ότι η προσθήκη μεταλλικών ινών φαίνεται να οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές του ανοικτού πορώδους σε σχέση με την προσθήκη συνθετικών ινών. Ακόμη, φαίνεται ότι η αύξηση του ποσοστού των συνθετικών ινών οδηγεί σε αύξηση του ανοικτού πορώδους ενώ ή αύξηση του ποσοστού των μεταλλικών ινών οδηγεί σε μείωση του ανοικτού πορώδους. Η μέγιστη τιμή του πορώδους παρατηρείται για τη σύνθεση NCPX με ίνες τύπου Concrix με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο. και είναι 16.07% ενώ η ελάχιστη τιμή για τη σύνθεση NCSF με μεταλλικές ίνες με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο. και είναι 14.64%.



Σχήμα 6.1 : Ανοικτό Πορώδες OP (%) για κάθε σύνθεση

6.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Ο υπολογισμός του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης S ($mm/min^{0.5}$) πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την οδηγία **RILEM TC 116 PCD (1999)** με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 5.4**

Στον **Πίνακα 6.2** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων της τριχοειδούς απορρόφησης S ($mm/min^{0.5}$), καθώς και η μεταβολή του σε σχέση με το αμιγές δείγμα αναφοράς που είναι η σύνθεση NC.

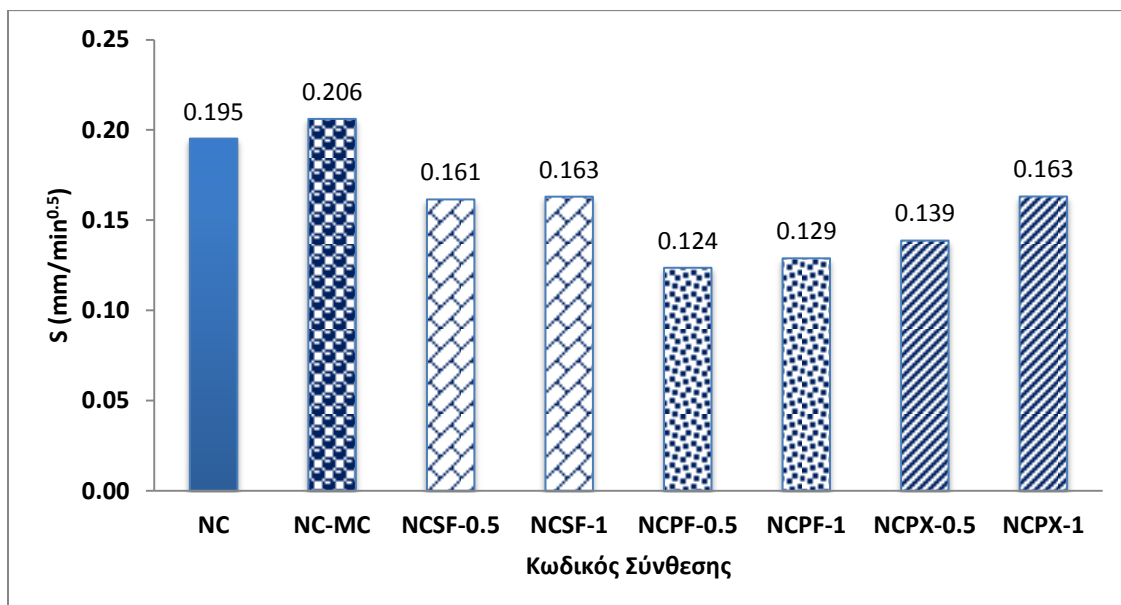
Πίνακας 6.2 : Πειραματικά αποτελέσματα τριχοειδούς απορρόφησης (S $mm/min^{0.5}$), για κάθε σύνθεση

Κωδικός Σύνθεσης	Τριχοειδής απορρόφηση S (Μ.Ο. 3 δοκιμίων)	% Μεταβολή ως προς το αμιγές σκυρόδεμα	R^2
NC	0.195	-	0.99
NC-MC	0.206	5.64	0.99
NCSF-0.5	0.161	-17.44	0.98
NCSF-1	0.163	-16.41	0.99
NCPF-0.5	0.124	-36.41	0.98
NCPF-1.0	0.129	-33.85	0.99
NCPX-0.5	0.139	-28.72	0.98
NCPX-1.0	0.163	-16.41	0.99

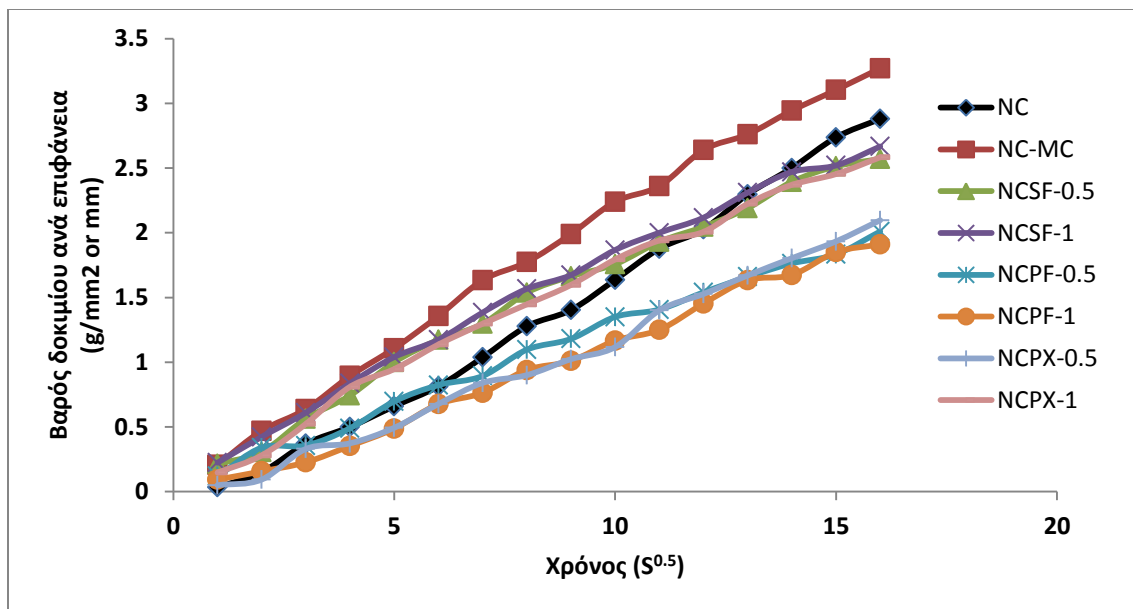
Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 6.2** και στο διάγραμμα του **Σχήματος 6.2** παρατηρείται ότι, όλες οι συνθέσεις έχουν υψηλό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης (R^2) της τάξης του 0.98-0.99, όπως απαιτείται από το πρότυπο. Παρατηρείται ότι η προσθήκη μετακαολίνη οδήγησε σε μικρή αύξηση της τριχοειδούς απορρόφησης, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με προηγούμενες βιβλιογραφικές αναφορές [**Badogiannis et al (2015)**]. Αντίθετα με την προσθήκη μεταλλικών και συνθετικών ινών είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της τριχοειδούς απορρόφησης. Σε αντίστοιχα συμπεράσματα αναφορικά με τις μεταλλικές ίνες, είχαν καταλήξει και άλλοι ερευνητές [**Soylev, Ozturan (2014)**]

Συγκρίνοντας, τις συνθέσεις που περιείχαν ίνες, παρατηρούμε ότι η προσθήκη συνθετικών ινών φαίνεται να οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές τριχοειδούς απορρόφησης σε σχέση με την προσθήκη μεταλλικών ινών, πλην της περίπτωσης προσθήκης συνθετικών ινών SikaFiber σε ποσοστό 1.0% κ.ο. (NCPF-1) που έχει την ίδια τιμή ($0.163 \text{ mm}/\text{min}^{0.5}$), με την σύνθεση (NCSF-1). Επίσης, φαίνεται ότι η αύξηση του ποσοστού των συνθετικών ινών τύπου Concrix οδηγεί σε αύξηση της τριχοειδούς απορρόφησης ενώ ή αύξηση του ποσοστού των μεταλλικών και συνθετικών ινών τύπου SikaFiber δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή του συντελεστή S . Η μέγιστη τιμή του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης (S) παρατηρείται για τη σύνθεση NC-MC και είναι $0.206 \text{ mm}/\text{min}^{0.5}$ ενώ η ελάχιστη τιμή για τη σύνθεση NCPF με συνθετικές ίνες τύπου SikaFiber ς ίνες με ποσοστό ινών 0.5% κ.ο. και είναι $0.124 \text{ mm}/\text{min}^{0.5}$.

Οι πλήρες καμπύλες απορρόφησης συναρτήσεως της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου t ($s^{0.5}$) για όλα τα δείγματα δίνονται στο **Σχήμα 6.3**. Με τη βοήθεια του διαγράμματος, παρατηρείται ότι με προσθήκη μετακαολίνης, η αύξηση της μάζας των δοκιμίων, λόγω της απορρόφησης του νερού, είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των δοκιμίων σκυροδέματος αναφοράς.



Σχήμα 6.2 : Τριχοειδής απορρόφηση S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$), ανά σύνθεση



Σχήμα 6.3 : Αύξηση βάρους δοκιμίου ανά επιφάνεια λόγω απορρόφησης νερού συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, κατά τη δοκιμή της τριχοειδούς απορρόφησης

6.3 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΕ ΑΕΡΑ

Ο υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας σε αέρα, $Kg \cdot 10^{-17} (m^2)$ πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την οδηγία **RILEM TC 116 PCD (1999)** με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 5.5.1**.

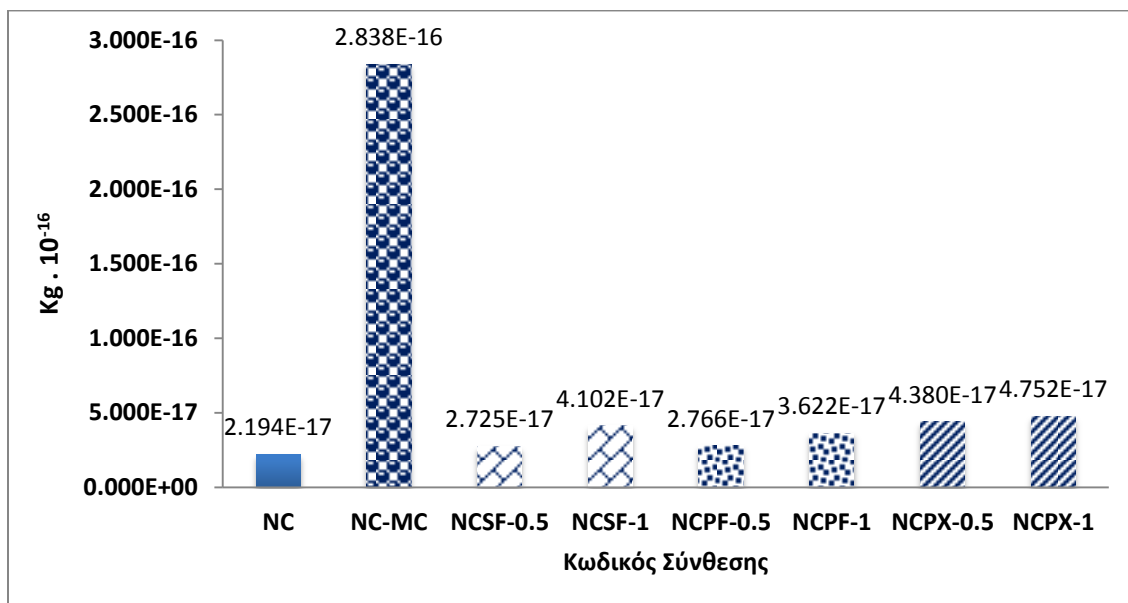
Στον **Πίνακα 6.3** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων της διαπερατότητας σε αέρα, καθώς και η μεταβολή του σε σχέση με το αμιγές δείγμα αναφοράς που είναι η σύνθεση NC.

Όπως φαίνεται τόσο στον **Πίνακα 6.3** όσο και στο διάγραμμα του **Σχήματος 6.4**, η προσθήκη ιών δεν φαίνεται να επηρεάζει θετικά τη διαπερατότητα σε αέρα, αντιθέτως παρουσιάζεται μια μικρή άνοδος, κυρίως όταν αυξάνει το ποσοστό ιών. Η διακύμανση, ωστόσο, είναι της τάξης μεγέθους του σφάλματος δοκιμής, δεδομένου ότι τα αποτελέσματα αυτής συνήθως έχουν μεγάλη διασπορά [**Fraza et al(2015)**]. Η προσθήκη του μετακαολίνης

επίσης φαίνεται να ευνοεί τη διαπερατότητα σε αέρα, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με αντίστοιχα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας [Badogiannis E., Tsivilis S., (2009)].

Πίνακας 6.3 : Πειραματικά αποτελέσματα διαπερατότητας σε αέρα $Kg \cdot 10^{-17} (m^2)$, για κάθε σύνθεση

Κωδικός Σύνθεσης	Συντελεστής διαπερατότητας σε αέρα $Kg \cdot 10^{-17} (m^2)$	% Μεταβολή ως προς το αμιγές σκυρόδεμα	R ²
NC-A	2.194E-17	-	0.94
NC-MC-B	2.838E-16	579.80	0.89
NCSF-0.5-A	2.725E-17	24.19	0.71
NCSF-1-B	4.102E-17	86.90	0.89
NCPF-0.5-A	2.766E-17	26.02	0.80
NCPF-1.0-B	3.622E-17	65.07	0.59
NCPX-0.5-A	4.380E-17	99.59	0.48
NCPX-1.0-A	4.752E-17	116.53	0.47



Σχήμα 6.4 : Συντελεστής διαπερατότητα σε αέρα $Kg \cdot 10^{-17} (m^2)$, ανά σύνθεση

6.4 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΕ ΧΛΩΡΙΟΝΤΑ

6.4.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (NON-STEADY STATE CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT)

6.4.1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ο υπολογισμός του συντελεστή διείσδυσης των χλωριόντων D_{nssm} πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο **NT BUILD 492** με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 5.6.1**.

Στον **Πίνακα 6.4** παρουσιάζεται ο συντελεστής διείσδυσης D_{nssm} (m^2/s) συνολικά για κάθε σύνθεση καθώς και η μεταβολή του σε σχέση με το αμιγές δείγμα αναφοράς που είναι η σύνθεση NC. Για την ταξινόμηση των μιγμάτων σε κατηγορίες αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων, ανάλογα με τον εκτιμηθέντα συντελεστή διάχυσης χλωριόντων, D_{nssm} ($\times 10^{-12}$) χρησιμοποιήθηκε η κατάταξη κατά [Nilsson et al (1998)] (**Πίνακας 5.8**).

Πίνακας 6.4 : Πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση (μέσες τιμές)

Κωδικός Σύνθεσης	Συντελεστής διείσδυσης D_{nssm} (m^2/s) $\cdot 10^{-12}$	% Ποσοστό μεταβολής ως προς το αμιγές σκυρόδεμα	Κατηγορία αντίστασης
NC	7.53	-	Υψηλή
NC-MC	9.85	30.90	Υψηλή
NCSF-0.5	18.60	147.06	Χαμηλή
NCSF-1	19.05	153.10	Χαμηλή
NCPF-0.5	9.04	20.12	Υψηλή
NCPF-1.0	5.98	-20.61	Υψηλή
NCPX-0.5	6.56	-12.89	Υψηλή
NCPX-1.0	14.33	90.37	Μέτρια

Όπως φαίνεται τόσο στον **Πίνακα 6.4** όσο και στο διάγραμμα του **Σχήματος 6.5**, η προσθήκη χαλύβδινων ιών ενισχύει τη διείσδυση των χλωριόντων. Το γεγονός αυτό

θεωρείται αναμενόμενο καθώς η παρουσία των ιών φαίνεται να αυξάνει την αγωγιμότητα του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος και συνεπώς την διείσδυση των χλωριόντων. Η προσθήκη του μετακαολίνης επίσης φαίνεται να ευνοεί τη διείσδυση των χλωριόντων, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με αντίστοιχα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας [Ramezani pour A.A, Bahrami Jovein H., (2012), Badogiannis E., Tsivilis S., (2009), Gruber K.A. et al, (2001)]. Η προσθήκη συνθετικών ιών κατά περίπτωση επηρεάζει θετικά τη αντίσταση του σκυροδέματος στη διείσδυση των χλωριόντων. Στη σύνθεση NCPF παρατηρείται μείωση της διείσδυσης με αύξηση του ποσοστού των ιών ενώ στην σύνθεση NCPX παρατηρείται αύξηση της διείσδυσης με αύξηση του ποσοστού των ιών. Η σύνθεση NCPF με ποσοστό ιών 1 % κ.ο. (NCPF-1) παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά με υψηλή αντίσταση στη διείσδυση των χλωριόντων. Αντίθετα, η σύνθεση με το υψηλό ποσοστό χαλύβδινων ιών (NCSF-1) έχει τη χειρότερη συμπεριφορά με χαμηλή αντίσταση στη διείσδυση.

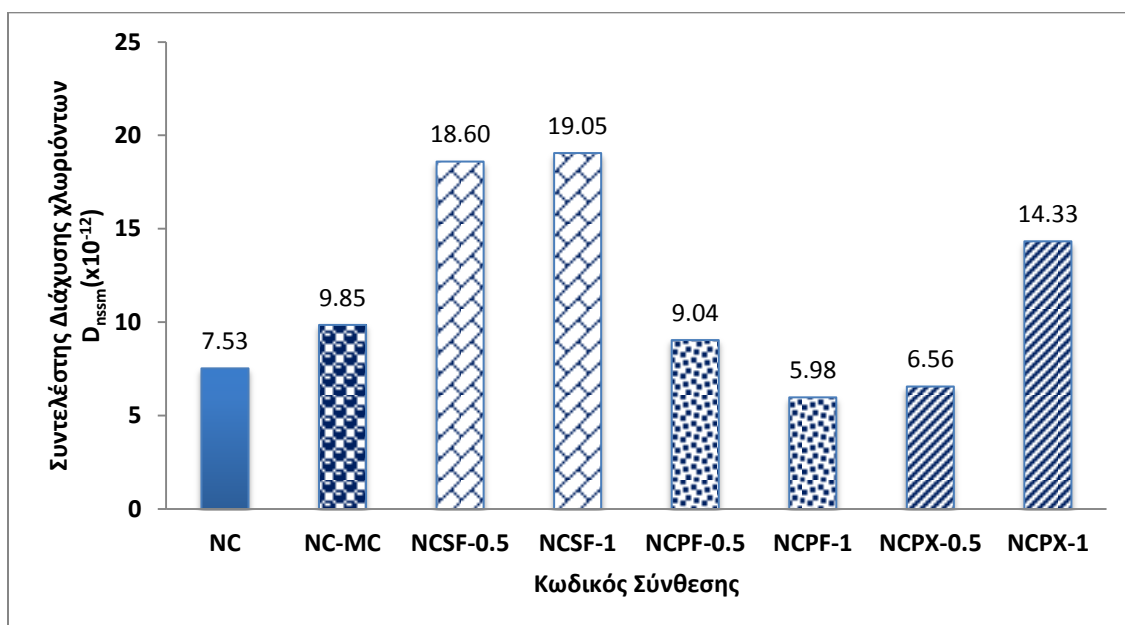
Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο η συμπεριφορά του σκυροδέματος με MK, όσο και του ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες, ανέδειξε την ανάγκη της πειραματικής διερεύνησης της αντίστασης του σκυροδέματος στη διείσδυση χλωριόντων, μέσω διάχυσης, κατά το **NT BUILD 443**.

Πίνακας 6.5 : Πειραματικά αποτελέσματα της συγκέντρωσης των χλωριόντων για τις συνθέσεις NC, NC-MC

Κωδικός Σύνθεσης		NC	NC-MC
Βάθος (mm)	Μέσο Βάθος (mm)	Συγκέντρωση (mol/m ³)	
0-5	2.50	463.60	448.91
5-10	7.50	397.56	281.30
10-15	12.50	244.55	206.59
15-20	17.50	205.97	202.69
20-25	22.50	175.24	172.16
25-30	27.50	136.01	96.15
30-40	35.00	45.12	31.18

Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που αφορούν στον συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων, D_{nssm} ($\times 10^{-12}$), όλων των μειγμάτων σκυροδέματος.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός της συγκέντρωσης των χλωριόντων για τις συνθέσεις NC και NC-MC σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 5.6.2. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.5 και στα Σχήματα Α.1 και Α.2 (Παράρτημα Α'), η συγκέντρωση των χλωριόντων στη σύνθεση με την προσθήκη μετακαολίνη (NC-MC) είναι μικρότερη σε όλα τα βάθη παρότι τα πειραματικά αποτελέσματα της επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων, έδειξαν χειρότερη συμπεριφορά έναντι του δείγματος αναφοράς.



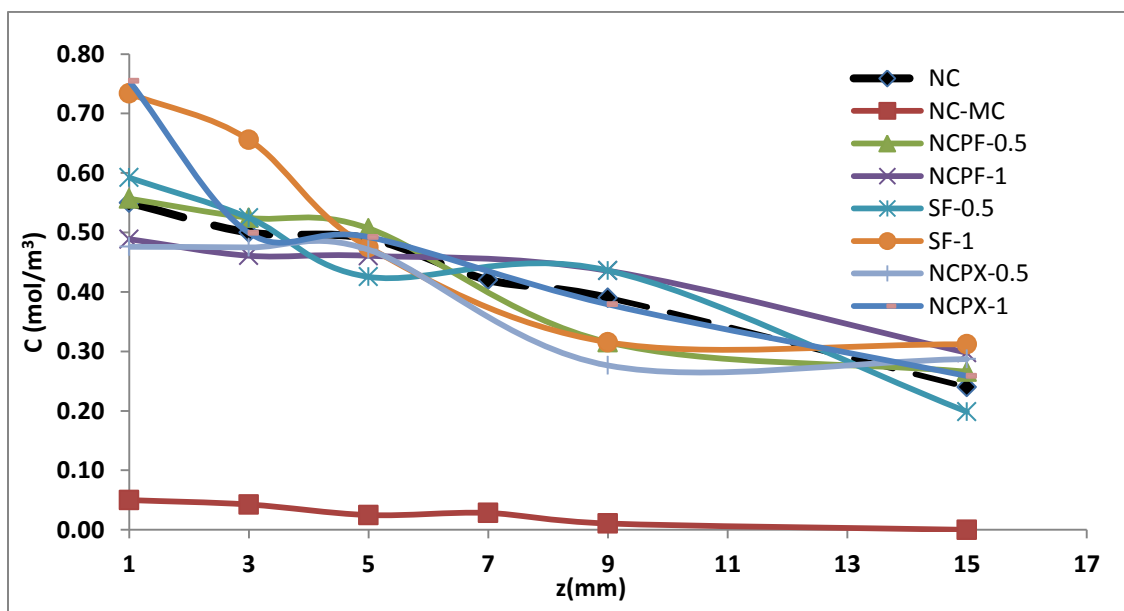
Σχήμα 6.5 : Συντελεστής Διείσδυσης χλωριόντων, D_{nssm} ($\times 10^{-12}$) για κάθε σύνθεση

6.4.2 ΔΙΑΧΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΚΑΤΑ ΠΡΟΤΥΠΟ NT 443

6.4.2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ο υπολογισμός του συντελεστή διάχυσης D_{sm} ($\times 10^{-12}$), των χλωριόντων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο NT BUILD 443 με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 5.6.2**.

Για όλες τις συνθέσεις πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός της συγκέντρωσης χλωριόντων. Στο παράρτημα δίνονται οι πειραματικές τιμές προσδιορισμού της συγκέντρωσης χλωριόντων για όλα τα μείγματα και στα διάφορα βάθη οι οποίες αναπαρίστανται διαγραμματικά στο **Σχήμα 6.6**.



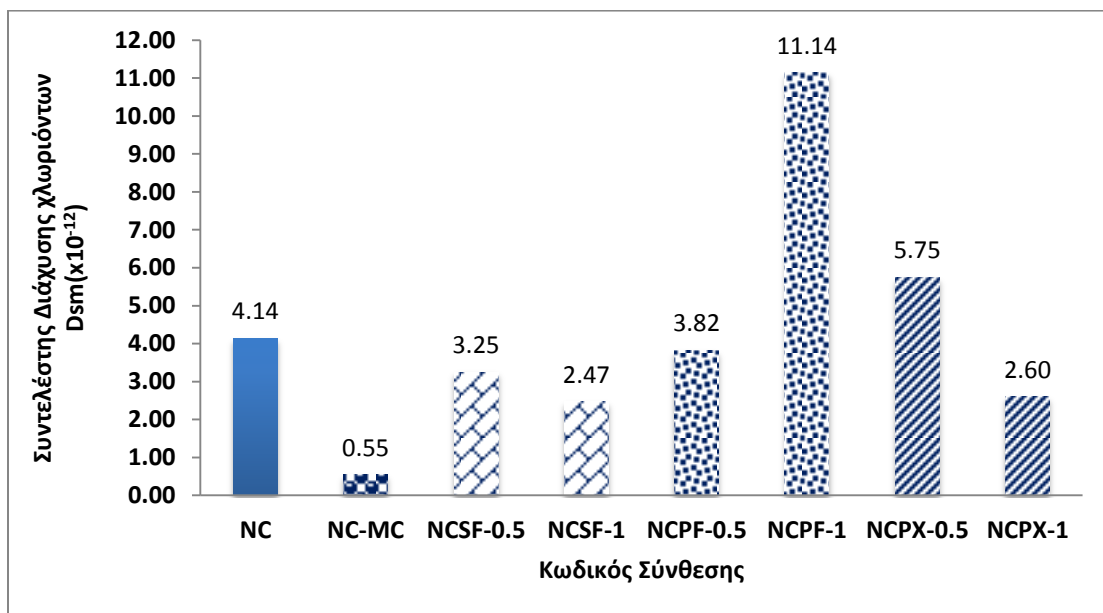
Σχήμα 6.6 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (mol/m^3) σε συνάρτηση με το βάθος διεύθυνσης των χλωριόντων z (mm) όλων των συνθέσεων

Στον **Πίνακα 6.6** δίνονται οι τιμές για τον συντελεστή διάχυσης D_{sm} (m^2/s) για κάθε σύνθεση, καθώς και η μεταβολή του σε σχέση με το αμιγές δείγμα αναφοράς. Οι τιμές αυτές

αναπαρίστανται γραφικά στο **Σχήμα 6.7**. Σε όλες τις συνθέσεις η συγκέντρωση των χλωριόντων φθίνει όσο αυξάνεται το βάθος.

Πίνακας 6.6 : Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση

Κωδικός Σύνθεσης	Συντελεστής διάχυσης $D_{sm} (m^2/s) \cdot 10^{-11}$	% Ποσοστό Μεταβολής ως προς το αμιγές σκυρόδεμα
NC	4.14	-
NC-MC	0.55	-86.80
NCSF-0.5	3.25	-21.50
NCSF-1	2.47	-40.30
NCPF-0.5	3.82	-7.73
NCPF-1.0	11.14	169.00
NCPX-0.5	5.75	38.90
NCPX-1.0	2.60	-37.20



Σχήμα 6.7 : Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων $D_{nssm} (x10^{-12})$ για κάθε σύνθεση

Όπως φαίνεται τόσο στον **Πίνακα 6.6** όσο και στο **Σχήμα 6.7** οι συνθετικές ίνες ευνοούν τη διάχυση σε αντίθεση με τις μεταλλικές όπου παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά. Η σύνθεση NCPF με ποσοστό ιών 1.0% κ.ο. (NCPF-1) έχει την χειρότερη συμπεριφορά καθώς η τιμή του συντελεστή διάχυσης είναι σχεδόν τριπλάσια αυτής του συμβατικού

σκυροδέματος. Αντίθετα η σύνθεση με την προσθήκη του μετακαολίνη έχει τα καλύτερα αποτελέσματα αφού ο συντελεστής διάχυσης είναι σχεδόν 8 φορές μικρότερος αυτού του δείγματος αναφοράς. Στις μεταλλικές και στις συνθετικές ίνες της σύνθεσης NCPX παρατηρείται μείωση της διάχυσης με αύξηση του ποσοστού των ινών.

6.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Στο σημείο αυτό επιχειρείται σύγκριση μεταξύ των τιμών που καταγράφηκαν στην διεθνή βιβλιογραφία, κατά την βιβλιογραφική ανασκόπηση (**Κεφάλαιο 4**) και των τιμών που βρέθηκαν στην παρούσα ερευνητική εργασία, για τις διάφορες παραμέτρους ανθεκτικότητας και την αντοχή. Η σύγκριση εστιάζει διακριτά στην προσθήκη MK και ινών.

Ο **Πίνακας 6.7** συνοψίζει τις τιμές όλων των παραμέτρων ανθεκτικότητας που μελετήθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία καθώς και οι θλιπτικές αντοχές των δοκιμίων σε ηλικία 28 ημερών, όπως προέκυψαν πειραματικά στη Μεταπτυχιακή Εργασία των [**Κομνηνού και Οικονόμου (2015)**].

Πίνακας 6.7 : Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραμέτρων ανθεκτικότητας

Κωδικός Σύνθεσης	Θλιπτική Αντοχή(MPa) (Μ.Ο. 3 Κυβικών δοκιμίων)	Θλιπτική Αντοχή(MPa) (Μ.Ο. 3 Κυλινδρικών δοκιμίων)	Ανοικτό πορώδες% (Μ.Ο. 3 δοκιμίων)	Τριχοειδής απορρόφιση % (Μ.Ο. 3 δοκιμίων)	Συντελεστής διαπερατότητας σε αέρα $\text{Kg}\cdot 10^{-17} (\text{m}^2)$	Συντελεστής διείσδυσης $D_{\text{nssm}} (\text{m}^2/\text{s})\cdot 10^{-12}$	Συντελεστής διάχυσης $D_{\text{sm}} (\text{m}^2/\text{s})\cdot 10^{-11}$
NC	49.67	38.71	15.42	0.195	2.194E-17	7.53	4.14
NC-MC	64.57	48.83	14.92	0.206	2.838E-16	9.85	0.55
NCSF-0.5	46.20	36.13	14.87	0.161	2.725E-17	18.60	3.25
NCSF-1	47.47	37.00	14.64	0.163	4.102E-17	19.05	2.47
NCPF-0.5	51.23	38.54	15.55	0.124	2.766E-17	9.04	3.82
NCPF-1.0	50.93	39.95	15.75	0.129	3.622E-17	5.98	11.14
NCPX-0.5	46.47	41.12	15.96	0.139	4.380E-17	6.56	5.75
NCPX-1.0	48.57	42.95	16.07	0.163	4.752E-17	14.33	2.60

Στους Πίνακες 6.8 έως 6.11 συνοψίζονται οι τιμές όλων των παραμέτρων ανθεκτικότητας που μελετήθηκαν σε προγενέστερες ερευνητικές εργασίες όπως περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4 με μετακαολίνη για ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου 10%, ινοπλισμένου και συμβατικού σκυροδέματος αντίστοιχα.

Από τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων (Πίνακες 6.8 - 6.9) για μετακαολίνη, σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα αναφοράς, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

Θλιπτική αντοχή

Η προσθήκη μετακαολίνη, για διαφορετικούς λόγους w/c, οδηγεί σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα αναφοράς, κυρίως για τα δοκίμια που έχουν συντηρηθεί στο νερό [Guneyisi and Mermerdas (2007)]. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία οι μηχανισμοί με τους οποίους γενικά θεωρείται ότι η προσθήκη του MK συμβάλει ως προς την θλιπτική αντοχή είναι (α) η επίδραση πλήρωσης (the filling effect) (β) η αραίωση του κλίνκερ, αποτέλεσμα της αντικατάστασης μέρους του τσιμέντου από την ίδια ποσότητα μετακαολίνη (the dilution effect), και (γ) η ποζολανική αντίδραση του MK με CH (the pozzolanic reaction of MK with CH) [Wild et al (1996), Ramezaniapour A, Jovein H (2012)].

Ανοικτό Πορώδες

Το πορώδες του σκυροδέματος με MK, γενικά βελτιώνεται σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, εξαιτίας της βελτίωσης της μικροδομής στην διεπιφάνεια πάστας αδρανών. Οι τιμές της παρούσας εργασίας σε σχέση με προγενέστερες εμφανίζονται υψηλότερες τόσο για το συμβατικό όσο και για το σκυρόδεμα με MK, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με προηγούμενες βιβλιογραφικές αναφορές [Badogiannis et al (2015)].

Συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης

Παρατηρείται μείωση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης με προσθήκη μετακαολίνη σε σχέση με το αμιγές σκυρόδεμα, αυτή η μείωση αποδίδεται σε μια πιο βελτιωμένη δομή του πορώδους του σκυροδέματος, που του προσδίδει πολύ υψηλή αντοχή σε επιθετικούς εξωγενείς παράγοντες. Διαπιστώθηκε ότι η σκλήρυνση των δοκιμίων σε αέρα

Πίνακας 6.8 : Ερευνητική δραστηριότητα: Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραμέτρων ανθεκτικότητας για 10 % αντικατάσταση τσιμέντου με MK.

Ερευνητική δραστηριότητα	έτος	Κωδικός Σύνθεσης	w/c	Θλιπτική Αντοχή ³ (MPa)	Ανοικτό πορώδες %	Τριχοειδής απορρόφηση S mm/min ^{0.5}	Συντελεστής διαπερατότητας σε αέρα Kg·10 ⁻¹⁶ (m ²)	Συντελεστής διείσδυσης D _{nssm} (m ² /s)·10 ⁻¹²	Συντελεστής διάχυσης D _{sm} (m ² /s)·10 ⁻¹²
Badogiannis and Tsivilis	2015	MKC-CR10	0.56	74.00	11.00	0.097	1.680E-16	-	0.19
		MK-CR10	0.56	79.90	7.20	0.080	1.350E-16	-	0.64
Siddique and Kaur	2011	M3	0.45	45.00	7.30	0.050	-	-	-
Ramezaniapour and Jovein	2012	MK10	0.50	41.00	-	0.044	-	-	18.89 ⁴
		MK10	0.40	54.80	-	0.017	-	-	7.21 ⁴
		MK10	0.35	67.00	-	0.016	-	-	-
Guneyisi and Mermerdas	2007	MK 10 ¹	0.35	78.00	-	0.070	-	-	1.74 - 3.34 ⁵
		MK 10 ¹	0.55	51.00	-	0.090	-	-	
		MK 10 ²	0.35	60.00	-	0.080	-	-	0.94 - 1.91 ⁵
		MK 10 ²	0.55	30.00	-	0.157	-	-	
Τρέχουσα ερευνητική εργασία	2015	NC-MC	0.50	64.57	14.92	0.206	2.838E-16	9.85	5.5

¹ air curing

² water curing

³ Θλιπτική αντοχή στις 28 ημέρες

⁴ Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε άφορα στο ASTM C 1543 (salt ponding test), γι' αυτό και παρατηρείται απόκλιση πειραματικών αποτελεσμάτων (μια τάξη μεγέθους).

⁵ Οι τιμές αυτές προκύπτουν ενδεικτικά, από την σχέση $X_D=4\sqrt{D}\cdot t$, σύμφωνα με το ASTM C 1556-04 και το εύρος διείσδυσης για τα διαφορετικά βάθη που δίδονται στην έρευνα των [Guneyisi and Mermerdas (2009)] για 90 ημέρες από την τοποθέτηση των δοκιμίων στο διάλυμα NaCl.

Πίνακας 6.9 : Ερευνητική δραστηριότητα: Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραμέτρων ανθεκτικότητας για συμβατικό σκυρόδεμα

Ερευνητική δραστηριότητα	Έτος	Κωδικός Σύνθεσης	w/c	Θλιπτική Αντοχή ³ (MPa)	Ανοικτό πορώδες %	Τριχοειδής απορρόφηση S mm/min ^{0.5}	Συντελεστής διαπερατότητας σε αέρα Kg·10 ⁻¹⁶ (m ²)	Συντελεστής διείσδυσης D _{nssm} (m ² /s)·10 ⁻¹²	Συντελεστής διάχυσης D _{sm} (m ² /s)·10 ⁻¹²
Badogiannis and Tsivilis	2015	PC	0.50	55.80	11.10	0.114	2.940	-	0.97
Siddique and Kaur	2011	M1	0.45	34.00	7.40	0.120	-	-	-
Ramezaniapour and Jovein	2012	OPC	0.50	35.50	-	0.061	-	-	24.27 ⁴
		OPC	0.40	33.00	-	0.023	-	-	15.77 ⁴
		OPC	0.35	59.00	-	0.020	-	-	-
Guneyisi and Mermerdas	2007	MK0 ¹	0.35	70.00	-	0.082	-	-	2.43 - 3.96 ⁵
		MK0 ¹	0.55	50.00	-	0.118	-	-	-
		MK0 ²	0.35	58.00	-	0.100	-	-	1.34 - 2.35 ⁵
		MK0 ²	0.55	39.00	-	0.158	-	-	-
Τρέχουσα ερευνητική εργασία	2015	NC	0.50	49.67	15.42	0.195	0.219	7.53	41.40

¹ air curing

² water curing

³ Θλιπτική αντοχή στις 28 ημέρες

⁴ Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε άφορα στο ASTM C 1543 (salt ponding test), γι' αυτό και παρατηρείται απόκλιση πειραματικών αποτελεσμάτων (μια τάξη μεγέθους).

⁵ Οι τιμές αυτές προκύπτουν ενδεικτικά, από την σχέση $X_D=4\sqrt{D}\cdot t$, σύμφωνα με το ASTM C 1556-04 και το εύρος διείσδυσης για τα διαφορετικά βάθη που δίδονται στην έρευνα των [Guneyisi and Mermerdas (2009)] για 90 ημέρες από την τοποθέτηση των δοκιμίων στο διάλυμα NaCl.

και η αύξηση του λόγου w/c προκαλούν σημαντική αύξηση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης [Guneyisi and Mermerdas (2007)]. Γενικά, το ποσοστό 10% αντικατάστασης τσιμέντου με μετακαολίνη θεωρείται ως το πιο αποδοτικό [Siddique and Klaus (2009), Ramezaniapour A, Jovein H (2012)]. Οι τιμές του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης, στην παρούσα εργασία σε σχέση με αυτές της βιβλιογραφίας, καταγράφονται αυξημένες για το συμβατικό σκυρόδεμα και παραπλήσιες για το συμβατικό.

Συντελεστής διαπερατότητας σε αέρα

Σύμφωνα με τον Πίνακα 1.3 που αφορά στην ταξινόμηση που δίδεται από την γαλλική βιομηχανία [V. Baroghel-Bouny (2008)] προκύπτει «χαμηλή» διαπερατότητα σε αέρα στην έρευνα των Badogiannis and Tsvivilis (2015) και «μετρία» στην τρέχουσα ερευνητική δραστηριότητα.

Γενικά παρατηρείται επιδείνωση της διαπερατότητας σε αέρα με την προσθήκη μετακαολίνη σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, στην παρούσα έρευνα. Ωστόσο σε σχέση με τιμές της βιβλιογραφίας, το σκυρόδεμα με MK παρουσιάζει αντίστοιχη συμπεριφορά, ενώ το συμβατικό πολύ καλύτερη (μια τάξη μεγέθους χαμηλότερη).

Πρέπει να αναφερθεί ότι η διαπερατότητα του αέρα είναι πολύ ευαίσθητη τόσο στην παρουσία της μακρορηγματώσης, όσο και στην ύπαρξη μικρο-ρωγμών που υπάρχουν στο σκυρόδεμα [Wang et al (2014)]. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα έχουν μεγάλη διασπορά [Frazao et al(2015)].

Διάχυση χλωριόντων σύμφωνα με την πρότυπη δοκιμή NT BUILD 443

Τόσο στην παρούσα μελέτη όσο και γενικότερα, προκύπτει ότι η προσθήκη μετακαολίνη βελτιώνει την αντίσταση στη διάχυση χλωριόντων σε σχέση με το αμιγές σκυρόδεμα. Η αυξημένη ικανότητα του μετακαολίνη να δεσμεύει χλωριόντα μπορεί να αποδοθεί μεταξύ άλλων στην υψηλή περιεκτικότητας του σε οξείδιο του αργιλίου [Badogiannis et al (2015)].

Παρόλα αυτά, σύμφωνα με τον Πίνακα 1.3 που αφορά στην ταξινόμηση ανθεκτικότητας σκυροδέματος, που δίδεται από την γαλλική βιομηχανία [V. Baroghel-Bouny (2008)] χαρακτηρίζονται ως «πολύ υψηλές» τις τιμές που καταγράφονται στην έρευνα των [Badogiannis and Tsvivilis (2015), Guneyisi and Mermerdas (2007)].

Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την παρούσα έρευνα ο συντελεστής διάχυσης Cl προέκυψε για συντομότερο χρονικό διάστημα (50 ημ.), γεγονός που αναμένεται να επηρεάζει τις τιμές που εκτιμήθηκαν.

Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης (non-steady state chloride migration coefficient)

Στην βιβλιογραφική ανασκόπηση αυτής της εργασίας δεν καταγράφονται σχετικά αποτελέσματα.

Αν επιχειρηθεί μια σύγκριση μεταξύ των τιμών της επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων με την εφαρμογή διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού με τις τιμές των συντελεστών διείσδυσης που υπολογίζονται με το πείραμα της απλής διάχυσης, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές. Αυτό αποδίδεται αφενός σε μειονεκτήματα της επιταχυνόμενης διείσδυσης των χλωριόντων όπως η θερμότητα που εκλύεται κατά την δοκιμή, που αλλάζει τα χαρακτηριστικά της ροής των ιόντων. Επίσης στην περίπτωση της επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων, μετράται η αγωγιμότητα όλων των ιόντων που βρίσκονται στο διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος, όπως το OH , Cl , Na^+ , K^+ , SO_4^{2+} και Ca^{2+} , οι συγκεντρώσεις των οποίων ποικίλλουν για διαφορετικούς τύπους προσθέτου σκυροδέματος, όπως ο μετακαολίνης. Η μέθοδος αυτή αποτελεί ουσιαστικά δοκιμή αντίστασης στην διείσδυση χλωριόντων και όχι δοκιμή διαπερατότητας, καθότι δεν υπάρχουν προϋποθέσεις σταθερής κατάστασης. Ωστόσο χρησιμοποιείται χάριν της απλότητας και της ταχύτητας της [Gowripalan N, Mohamed H.M. (1998), Ozyildirim C (1994), Sharfuddin et al (2008)].

Από τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων (Πίνακες 6.10 - 6.11) για ινοπλισμένο σκυρόδεμα, σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, προέκυψαν τα εξής γενικά συμπεράσματα:

Θλιπτική αντοχή

Γενικά παρατηρείται μια οριακή αύξηση της τάξης τους 10%, στην αντοχή σε θλίψη (fc) του σκυροδέματος με την προσθήκη χαλύβδινων και συνθετικών ινών σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. [Cengiz Duran Atis, Okan Karahan (2007), Soylev T.A, Ozturan T (2014)]. Κατά τη θλίψη, όταν εμφανίζονται μικρορωγμές εξαιτίας εγκάρσιων εφελκυστικών

Πίνακας 6.10 : Ερευνητική δραστηριότητα: Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραμέτρων ανθεκτικότητας για ινοπλισμένο σκυρόδεμα

Ερευνητική δραστηριότητα	έτος	Κωδικός Σύνθεσης	w/c	Θλιπτική Αντοχή ³ (MPa)	Ανοικτό πορώδες %	Τριχοειδής απορρόφηση S mm/min ^{0.5}	Συντελεστής διαπερατότητας σε αέρα Kg·10 ⁻¹⁷ (m ²)	Συντελεστής διείσδυσης Dnssm (m ² /s)·10 ⁻¹²	Συντελεστής διάχυσης Dnssm (m ² /s)·10 ⁻¹²	
Χαλύβδινες ίνες	Ganesan et al	2006	SFRC2 5%	0.53	35.00	17.80	0.068	-	-	12.60
	Soylev T.A, Ozturan T	2014	SFC	0.65 ¹	30.40	6.90	0.011	-	-	63.10
				0.65 ²	37.20	6.50	0.006	-		
				0.45 ¹	48.80	4.90	0.004	-		
				0.45 ²	55.60	4.60	0.003	-		
	Cengiz Duran Atis, Okan Karahan	2009	A2 0.25%	0.54	79.40	-	0.002	-	-	-
				A3 0.5%	78.20	-	0.004	-		
				A4 1%	80.50	-	0.004	-		
				A4 1.5%	81.00	-	0.005	-		
	Τρέχουσα ερευνητική εργασία	2015	NCSF-0.5 NCSF-1.0	0.50	46.20	14.87	0.161	2.730E-17	18.60	32.50
47.47					14.64	0.163	4.100E-17	19.05	24.70	
Συνθετικές ίνες	Soylev T.A, Ozturan T	2014	PFC	0.65 ¹	30.40	7.00	0.010	-	-	34.60
				0.65 ²	32.30	6.60	0.008	-		
				0.45 ¹	41.61	5.20	0.005	-		
				0.45 ²	55.50	4.70	0.003	-		
	Τρέχουσα ερευνητική εργασία	2015	NCPF-0.5 NCPF-1.0	0.50	51.23	15.55	0.124	2.770E-17	9.04	38.20
					50.93	15.75	0.129	3.620E-17	5.98	11.14

Πίνακας 6.11 : Ερευνητική δραστηριότητα: Συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραμέτρων ανθεκτικότητας για συμβατικό σκυρόδεμα.

Ερευνητική δραστηριότητα	έτος	Κωδικός Σύνθεσης	w/c	Θλιπτική Αντοχή ³ (MPa)	Ανοικτό πορώδες %	Τριχοειδής απορρόφηση S mm/min ^{0.5}	Συντελεστής διαπερατότητας σε αέρα Kg·10 ⁻¹⁷ (m ²)	Συντελεστής διείσδυσης Dnssm (m ² /s)·10 ⁻¹²	Συντελεστής διάχυσης Dnssm (m ² /s)·10 ⁻¹²
Ganesan et al	2006	CC	0.53	39.50	19.30	0.077	-	-	12.80
Soylev T.A, Ozturan T	2014	CC	0.65 ¹	29.80	6.90	0.013	-	-	44.00
			0.65 ²	29.80	6.50	0.006	-	-	-
			0.45 ¹	44.50	4.70	0.006	-	-	11.50
			0.45 ²	48.50	4.50	0.004	-	-	-
Cengiz Duran Atis, Okan Karahan	2009	A1 0%	0.54	77.1		0.002	-	-	-
Τρέχουσα ερευνητική εργασία	2015	NC	0.50	49.67	15.42	0.195	2.190E-17	7.53E-12	41.40

¹ air curing

² water curing

³ Θλιπτική αντοχή στις 28 ημέρες

τάσεων, οι ίνες αναπτύσσουν δυνάμεις που αντιστέκονται στη διεύρυνση των ρωγμών. Αφ' ετέρου όμως αν η ανάμιξη των ινών στο σκυρόδεμα επηρεάζει αρνητικά το πορώδες, παρατηρείται η μείωση της θλιπτικής αντοχής. Για σκυρόδεμα, το οποίο έχει συντηρηθεί στο νερό και λόγο w/c ίσο με 0.45, παρατηρείται μια μεγαλύτερη αύξηση της θλιπτικής αντοχής [Soylev T.A, Ozturan T (2014)].

Ανοικτό Πορώδες

Πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο στην παρούσα εργασία, όσο και γενικότερα η προσθήκη χαλύβδινων και συνθετικών ινών δεν φαίνεται να επηρεάζει το ανοικτό πορώδες, αφού δεν παρατηρείται να υπάρχει ουσιαστική μεταβολή ως προς το αμιγές σκυρόδεμα.

Συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης

Παρατηρείται μείωση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης με προσθήκη χαλύβδινων και συνθετικών ινών σε σχέση με το αμιγές σκυρόδεμα. Σε αντίστοιχα συμπεράσματα είχαν καταλήξει και άλλοι ερευνητές [Soylev, Ozturan (2014)]. Η διαπερατότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες λόγω της διακοπής της συνέχειας των τριχοειδών καναλιών ροής [Frazao et al (2015)]

Διάχυση χλωριόντων σύμφωνα με την πρότυπη δοκιμή NT BUILD 443

Η προσθήκη χαλύβδινων ινών βελτιώνουν την αντίσταση στη διάχυση χλωριόντων ενώ για την προσθήκη συνθετικών ινών το αποτέλεσμα εξαρτάται από το ποσοστό των ινών. Αύξηση του λόγου w/c παρουσιάζει μειωμένη αντίσταση στην διάχυση χλωριόντων. Επίσης η έρευνα των **Soylev, Ozturan (2014)**, καταδεικνύει αυξημένη διάχυση χλωριόντων έως και τις 28 ημέρες. Σύμφωνα με τον **Πίνακα 1.3** που αφορά στην ταξινόμηση ανθεκτικότητας σκυροδέματος, που δίδεται από την γαλλική βιομηχανία [V. Baroghel-Bouny (2008)], οι τιμές που προκύπτουν για τον συντελεστή διάχυσης, χαρακτηρίζουν, κατά μέσο όρο, ως «χαμηλές».

Ωστόσο, σε σύγκριση με τις τιμές της βιβλιογραφίας παρατηρούνται παραπλήσιες τιμές.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Μετά από μελέτη και επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

Ανοικτό Πορώδες

Η προσθήκη μετακαολίνη και η προσθήκη χαλύβδινων ινών οδήγησαν σε μικρή μείωση του πορώδους σε αντίθεση με την προσθήκη συνθετικών ινών που είχε ως αποτέλεσμα μικρή αύξηση του ανοικτού πορώδους. Παρατηρείται μεταβολή ως προς το αμιγές σκυρόδεμα περίπου $\pm 5\%$, δηλαδή δεν υπήρξε ουσιαστική μεταβολή του ανοικτού πορώδους.

Συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης

Η προσθήκη μετακαολίνη οδήγησε σε μικρή αύξηση της τριχοειδούς απορρόφησης, ενώ η προσθήκη μεταλλικών και συνθετικών ινών είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της τριχοειδούς απορρόφησης.

Συντελεστής διαπερατότητας σε αέρα

Η προσθήκη του μετακαολίνη φαίνεται να ευνοεί τη διαπερατότητα σε αέρα, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με αντίστοιχα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας [**Badogiannis E., Tsvivilis S., (2009), Siddique and Klaus (2009), Ramezani pour A, Jovein H (2012)**].

Η προσθήκη ινών δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τη διαπερατότητα σε αέρα. Ωστόσο καταγράφεται μια μικρή αύξηση, του K_g , κυρίως όταν αυξάνει το ποσοστό ινών.

Συντελεστής μεταφοράς χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης (non-steady state chloride migration coefficient)

Η προσθήκη συνθετικών ιών κατά περίπτωση επηρέασε θετικά την αντίσταση του σκυροδέματος στη διείσδυση των χλωριόντων.

Διάχυση χλωριόντων σύμφωνα με την πρότυπη δοκιμή NT BUILD 443

Ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων, στο σκυρόδεμα με μετακαολίνη είχε τη χαμηλότερη τιμή, γεγονός που αποτυπώνεται και από τη μειωμένη συγκέντρωση χλωριόντων σε όλα τα βάθη του σκυροδέματος, όπως αυτή προσδιορίστηκε.

Συνολικά θα μπορούσε να εξαχθεί ως γενικό συμπέρασμα ότι η προσθήκη μετακαολίνη και η προσθήκη χαλύβδινων ιών βελτιώνουν την αντίσταση στη διάχυση χλωριόντων ενώ για την προσθήκη συνθετικών ιών το αποτέλεσμα εξαρτάται από το ποσοστό των ιών.

1. RILEM TC 178-TMC. (2002). *RILEM Technical Recommendation: Testing and Modelling Chloride Penetration In Concrete: Analysis of total chloride content in concrete*. Materials and Structures.
2. ACI 116R. (2005). *Cement and Concrete Terminology*. American Concrete Institute.
3. ACI 201.2R. (2008). *Guide to Durable Concrete*. American Concrete Institute.
4. ACI 222.1. (1996). *Provisional Standard Test Method for Water-Soluble Chloride Available for Corrosion of Embedded Steel in Mortar and Concrete Using the Soxhlet Extractor*. American Concrete Institute.
5. ACI 222R. (2010). *Protection of Metals in Concrete Against Corrosion*. American Concrete Institute.
6. Advanced Concrete Technology . (2003). *Advanced Concrete Technology: Constituent Materials*. (John Newman, & Bang Seng Choo, Eds.) Butterworth-Heinemann. Elsevier.
7. Anastasiou E, Papayianni I, & Papachristoforou M. (2014). Behavior of self compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement. *Materials and Design*, 59, pp. 454-460.
8. ASTM C 1218/C 1218M. (2008). *Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*. United States: ASTM International.
9. ASTM C 1585. (2004). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. United States: ASTM International.
10. ASTM C 642. (1997). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. United States: ASTM International.
11. Atis C.D, & Karahan O. (2009). Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 23, pp. 392-399.
12. Audenaert K, & De Schutter G. (August 17-20, 2003). *Chloride penetration in self compacting concrete*. 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Reykjavik.
13. Audenaert K, Boel V, & De Schutter G. (2005). *Chloride penetration in self compacting concrete by cyclic immersion*. 1st International Symposium On Design, Performance And Use Of Self-Consolidating Concrete.

14. Audenaert K, Boel V, & De Schutter G. (June 4-6, 2007). *Chloride Migration in Self Compacting Concrete*. Tours, France: 5th International Conference ConSec'07.
15. Audenaert K, Yuan Q, & De Schutter G. (2010). On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete. *Construction and Building Materials*, 24, pp. 396-402.
16. Badogiannis E, & Tsivilis S. (2009). Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete. *Cement & Concrete Composites*, 31, pp. 128-133.
17. Badogiannis E, Aggeli E, Papadakis V.G, & Tsivilis S. (2015). Evaluation of chloride-penetration resistance of metakaolin concrete by means of a diffusion e Binding model and of the k-value concept. *Cement and Concrete Composites*, 63, pp. 1-7.
18. Badogiannis E, Sfikas I, Voukia D, & Trezos K. (2015). Durability of metakaolin Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 82, pp. 131-141.
19. Baroghel-Bouny V. (2004). *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages—Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction*. Bangeux: Scientific and Technical Report of French Civil Engineering Association, AFGC.
20. Broomfield. (2006). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, investigation and repair*. 2nd Edition. CRC Press.
21. EN 196-2. (2013). *Method of testing cement - Part 2 Q Chemical analysis of cement*. Brussels: European committee for standardization.
22. Frazão C, Camões A, Barros J, & Gonçalves D. (2015). Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 80, pp. 155-166.
23. Ganesan N, Abraham R, & Deepa Raj S. (2015). Durability characteristics of steel fibre reinforced geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 93, pp. 471-476. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.06.014
24. Gold S.J, & Shirvill A.J. (1992). Effects of metakaolin on concrete strength. Laboratory Report 22 RMC. In Newman J, & Seng Choo B, *Advanced Concrete Technology* (p. 3/52). Oxford: Elsevier Ltd.
25. Gowripalan N, & Mohamed H.M. (1998). Chloride-ion included corrosion of galvanized and ordinary steel reinforcement in high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 28, σσ. 1119-1131.

26. Gruber K.A, Ramlochan T, Boddy A, Hooton R.D, & Thoms M.D.A. (2001). Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin. *Cement & Concrete Composites*, 23, pp. 479-484.
27. Guneyisi E, & Mermerdas K. (2007). Comparative study on strength, sorptivity, and chloride ingress characteristics of air-cured and water-cured concretes modified with metakaolin. *Materials and Structures*, 40, pp. 1161-1171. doi:10.1617/s11527-007-9258-5
28. Guneyisi E, Gesoglu M, & Mermerdas K. (2007, September 12). Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin. *Materials and Structures*, 41, pp. 937-949. doi:10.1617/s11527-007-9296-z
29. Guneyisi E, Gesoglu M, Özturan T, & Özbay E. (2009). Estimation of chloride permeability of concretes by empirical modeling: Considering effects of cement type, curing condition and age. *Construction and Building Materials*, 23, pp. 469-481.
30. Hall C, & Tse TKM. (1986). *Water Movement in Porous Building Materials - VII. The Sorptivity of Mortars*. Building and Environment.
31. Hall C, & Yau MHR. (1987). *Water Movement in Porous Building Materials - IX. The Water Absorption and Sorptivity of Concretes*. Building and Environment.
32. Hassan AAA, Lachemi M, & Hossain KMA. (2010). Effect of Metakaolin on the Rheology of Self-Consolidating Concrete, In Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete (Eds: K.H. Khayat and D. Feys). In Kamal Henri K, & Dimitri F (Eds.), *Design, production and placement of self-consolidating concrete* (pp. 108-117). Canada: RILEM Bookseries 1.
33. Hausmann DA. (1967). Steel corrosion in concrete. How does it occur? *Materials Protection*.
34. Karahan O, & Atis C.D. (2011). The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials and Design*, 32, pp. 1044-1049.
35. Kim Hong-Sam, Lee Sang-Ho, & Moon Han-Young. (2007). Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin. *Construction and Building Material*, 21, pp. 1229-1237.
36. Kim MY, Yang EI, & Yi ST. (2007). *Evaluation of Chloride Penetration Characteristics using a Colorimetric Method in Concrete Structures*. Toronto: SMiRT 19.
37. Lee N.P, & Chisholm D.H. (2005). *Durability of Reinforced Concrete Structures Under Marine Exposure in New Zealand* (Study Report SR 145 ed.). New Zealand: BRANZ Ltd.

38. Madandoust R, & Mousavi Y. (2012). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, 35, pp. 752-760.
39. Nabil M. Al-Akhras. (2006). Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 36, pp. 1727-1734.
40. Neville A. (2004). The confused world of sulfate attack on concrete. In *Pergamon* (pp. 1275 – 1296). London: Cement and Concrete Research.
41. Nilsson L, Ngo MH, & Gjrv OE. (1998). *High-performance Repair Materials for Concrete Structures in the Port of Gothenburg Proceedings Vol. 2, 2nd International Conference on Concrete Under Severe Conditions: Environment and Loading*. (O.E. Gjrv, K. Sakai, & N. Banthia, Eds.) London and New York: E & FN Spon.
42. NT Build 208. (1996). *Concrete, Hardened: Chloride content by volhard titration*. Finland: Nordtest.
43. NT Build 443. (1995). *Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration*. Finland: Nordtest.
44. NT Build 492. (1999). *Concrete, mortar and cement-based materials: Chloride migration coefficient from non-steady state migration experiment*. Finland: Nordtest.
45. Nunes S, Figueiras H, Sousa Coutinho J, & Figueiras J. (2009). SCC and conventional concrete on site: Property assessment (Caracterizao das propriedades do beto em elementos produzidos com BAC e beto convencional). *REVISTA IBRACON DE ESTRURURAS E MATERIAIS*, 2, 25-36.
46. Otsuki N, Nagataki S, & Nakashita K. (1993). *Evaluation of the AgNO₃ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials*. Construction & Building Materials.
47. Ozyildirim C. (1994). Durability of Concrete. Στο *Third Int. Con.* (σ. 503). Nice, France: ACI SP145.
48. Papadakis VG. (2000). Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement and Concrete Research*, 30, pp. 291-299.
49. Papadakis VG. (January 1999). *Supplementary cementing materials in concrete- Activity, durability and planning*. Taastrup: Final Report to European Commission, Project No. ERBFMBICT961387. Danish Technological Institute.

50. Poon CS, Kou SC, & Lam L. (2006). Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials*, 20, pp. 858-865.
51. Ramezaniyanpour A.A, & Jovein H.B. (2012). Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes. *Construction and Building Materials*, 30, pp. 470-479.
52. RILEM TC 116-PCD. (1999). RILEM Technical Recommendation: Determination of the capillary absorption of water of hardened concrete. In *Materials and Structures* (Vol. 32, pp. 178-179).
53. RILEM TC 178-TMC. (2002). *RILEM Technical Recommendation: Testing and Modelling Chloride Penetration In Concrete: Analysis of total chloride content in concrete*. Materials and Structures.
54. Sharfuddin Ahmed M, Kayali O, & Anderson W. (2008). Chloride penetration in binary and ternary blended cement concretes as measured by two different rapid methods. *Cement & Concrete Composites*, 30, pp. 576-582. doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.02.005
55. Shirvill AJ. (1992). *Mix design of metakaolin concrete, an interim report. Laboratory Report 23 RMC*. Readymix Limited.
56. Siddique R, & Kaur A. (2011). Effect of metakaolin on the near surface characteristics of concrete. *Materials and Structures*, 44, pp. 77-88. doi:10.1617/s11527-010-9610-z
57. Siddique R, & Klaus J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*, 43, 392-400.
58. Sideris K, & Anagnostopoulos N. (2013). Durability of normal strength self-compacting concretes and their impact on service life of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, 41, pp. 491-497.
59. Singh A.P, & Singhal D. (2011). Permeability of Steel Fibre Reinforced Concrete Influence of Fibre Parameters. *Procedia Engineering*, 14, pp. 2823-2829.
60. Sirivivatnanon V, & Khatri RP. (1999). *Characterising chloride penetration resistance of concrete*. Australia: CSIRO Division of Building, Construction and Engineering.
61. Söylev T.A, & Özturan T. (2014). Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction. *Construction and Building Materials*, 73, pp. 67-75.

62. Stanish KD, Hooton RD, & Thomas MDA. (1997). *Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review*. Toronto: FHWA Contract DTFH61-97-R-00022 Prediction of Chloride Penetration in Concrete.
63. Taha Reda MM, El-Dieb AS, & Shrive NG. (2001). Sorptivity: a reliable measurement for surface absorption of masonry brick units. *Materials and Structure*, 34, pp. 438-445. doi:10.1007/BF02482291
64. Tang L, & Nilsson L-O. (1991). *Chloride Diffusivity in High Strength Concrete*. Nordic Concrete Research.
65. Taylor PC, Whiting DA, & Nagi MA. (1999). *Threshold Chloride Content for Corrosion of Steel in Concrete: A Literature Review* (R&D Serial Number ed.). Portland Cement Association.
66. Tuutti K. (1982). *Corrosion of Steel in Concrete* (ISSN 0346-6906 ed.). Stockholm: CBI forskning research No.4.82.
67. Wang W, Liu J, Agostini F, Davy C.A, Skoczylas F, & Corvez D. (2014). Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) under progressive aging. *Cement and Concrete Research*, 55, pp. 1-13.
68. Wild S, Khatib J.M, & Jones A. (1996). Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*, 26, σσ. 1537-1544.
69. Wilson MA, Carter MA, & Hoff WD. (1999). *British Standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation*. Materials and Structures.
70. Αποστολόπουλος Χ, Παπαδάκης ΕΓ, & Δεμής Σ. (21-23 Οκτωβρίου 2009). Διερεύνηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα και της επακόλουθης υποβάθμισης λόγω διάβρωσης οπλισμού από τη δράση χλωριόντων. *16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ*. Πάφος, Κύπρος.
71. Ασπρογέρακας Α. (2013). *Συγκριτική αξιολόγηση της ανθεκτικότητας γεωπολυμερών από ιπτάμενη τέφρα και τσιμεντοκονιαμάτων*. Αθήνα.
72. Κόλιας Στ. (2010). *Προχωρημένη Τεχνολογία Σκυροδέματος*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
73. Κομνηνού Ε, & Οικονόμου Π. (2015). *Συγκριτική αξιολόγηση μηχανικών χαρακτηριστικών και μηχανική συμπεριφοράς σκυροδέματος ινοπλισμένου με μεταλλικές και συνθετικές ίνες*. Αθήνα.

74. Μπάτης Γ. (2006). *Φθορά και προστασία οπλισμένου σκυροδέματος*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
75. Παπακώστα Α, & Τσιάρα Α. (2015). *Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου - με ίνες χάλυβα σκυροδέματος σε περιβάλλον θεικών*. Αθήνα.
76. Σίδερης Κ. (2010). *Ανθεκτικότητα Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος* (ISBN: 978-960-8257-60-3 ed.). Τεκδοτική, ΣΕΛΚΑ - 4Μ ΕΠΕ.
77. Στρογγύλης Χ. (2008). *Οδηγός στεγανοποίησης: τριχοειδής απορρόφηση και εξήγηση του μηχανισμού ανιούσας υγρασίας*. Ανάκτηση από http://monosimacon.blogspot.gr/2008_11_01_archive.html.
78. Σφήκας Ι. (2014). *Διερεύνηση Ιδιοτήτων Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος*. Αθήνα.
79. Τσίμας Σ. (2006). *Τεχνολογία Δομικών Υλικών*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
80. Τσίμας Σ, & Τσιβιλής Σ. (2000). *Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Α.1 ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ

Στον Πίνακα Α.1 παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ανοικτού πορώδους.

Πίνακας Α.1 : Πειραματικά αποτελέσματα ανοικτού πορώδους OP (%) για όλα τα δοκίμια

Κωδικός Σύνθεσης		Μέτρηση βάρους ξηρών δοκιμίων (g)	Μέτρηση βάρους κορεσμένων δοκιμίων (g)	Μέτρηση ειδικού βάρους υπό άνωση (g)	Ανοικτό πορώδες (%)
NC	A	2187.80	2333.50	1334.20	14.58
	B	2184.40	2334.50	1335.30	15.02
	Γ	2116.30	2282.50	1285.50	16.67
NC-MC	A	2245.90	2384.60	1368.10	13.64
	B	2222.90	2378.00	1366.60	15.34
	Γ	2206.80	2366.70	1353.40	15.78
NCSF-0.5	A	2198.00	2348.50	1350.30	15.08
	B	2207.30	2354.60	1354.10	14.72
	Γ	2204.80	2353.00	1351.60	14.80
NCSF-1.0	A	2199.50	2345.80	1347.80	14.66
	B	2247.00	2396.40	1382.70	14.74
	Γ	2244.80	2391.90	1379.70	14.53
NCPF-0.5	A	2239.50	2400.60	1375.00	15.71
	B	2231.50	2384.50	1367.70	15.05
	Γ	2185.20	2345.60	1337.40	15.91
NCPF-1	A	2216.40	2377.00	1363.40	15.84
	B	2217.10	2378.70	1362.90	15.91
	Γ	2201.20	2357.20	1349.80	15.49
NCPX-0.5	A	2176.30	2340.00	1338.40	16.34
	B	2186.60	2344.80	1340.30	15.75
	Γ	2182.10	2340.70	1335.90	15.78
NCPX-1	A	2169.00	2327.90	1324.40	15.83
	B	2178.20	2340.20	1333.30	16.09
	Γ	2168.50	2332.70	1325.30	16.30

A.2 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΣΕ ΧΛΩΡΙΟΝΤΑ

A.2.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (NON-STEADY STATE CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT)

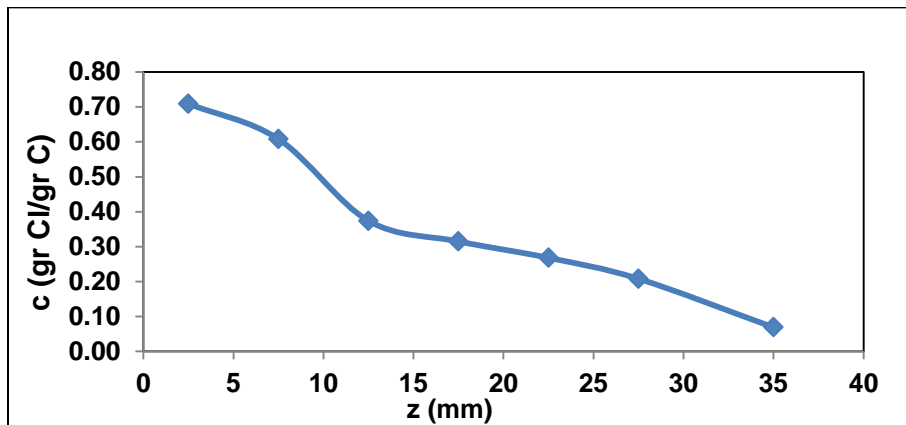
Στον Πίνακα A.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα βασικά πρωτογενή δεδομένα για όλα τα δοκίμια

Πίνακας A.2 : Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικών μετρήσεων της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση

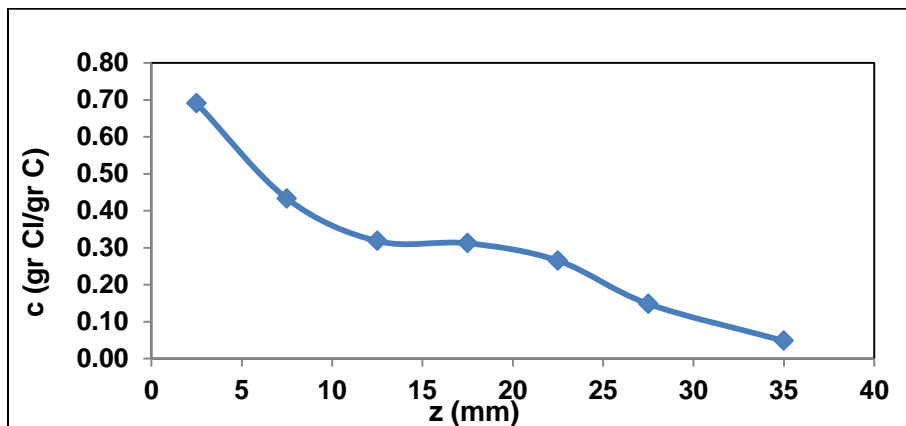
Κωδικός Σύνθεσης	Δοκ. Τάση (V)	Δοκ. Ένταση (A)	Αρχική τάση (V)	Αρχική ένταση (A)	Τελική τάση (V)	Τελική ένταση (A)	Μέσο πάχος (mm)	Διάρκεια δοκιμής (h)	Μέση θερμοκρασία (°C)	Μέση διείσδυση (mm)
NC	30	0.107	20.3	0.070	20	0.087	47.33	24.1	27.5	12.07
NC-MC	30	0.051	30	0.052	29.4	0.070	45.67	24.17	29.5	22.71
NCSF-0.5	30	0.118	20.1	0.072	19.5	0.111	45	24	31.5	28.14
NCSF-1	30	0.184	9.9	0.038	10	0.048	46.33	24	33	14.5
NCPF-0.5	30.8	.126	14.8	0.56	15.1	0.072	45.67	24	32.5	10.93
NCPF-1	29.7	0.106	20.1	0.072	19.3	0.097	47.33	24	33.5	9.57
NCPX-0.5	30	0.109	20.1	0.070	19.4	0.117	48.33	24.03	31.5	10.29
NCPX-1	30	0.123	15.2	0.056	14.7	0.070	45.67	24	32.5	16.79

A.2.2 ΔΙΑΧΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΚΑΤΑ ΠΡΟΤΥΠΟ NT 443

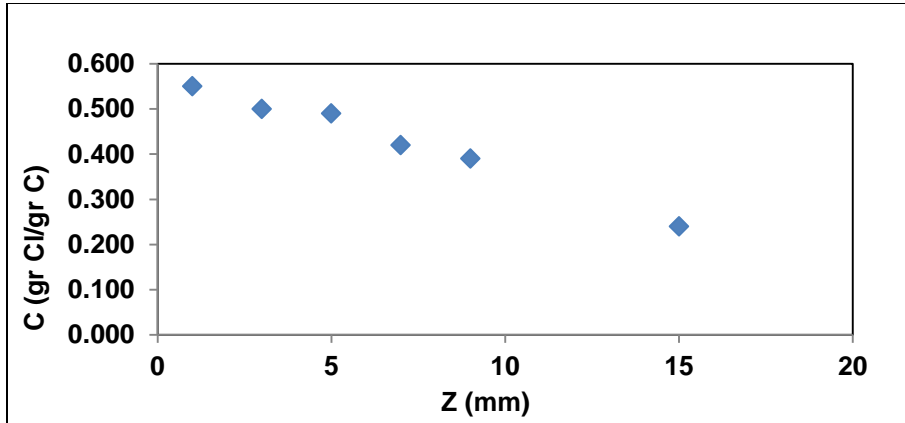
Στα Σχήματα A.1 - A.10 παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές προσδιορισμού της συγκέντρωσης χλωριόντων για όλα τα μείγματα και στα διάφορα βάθη.



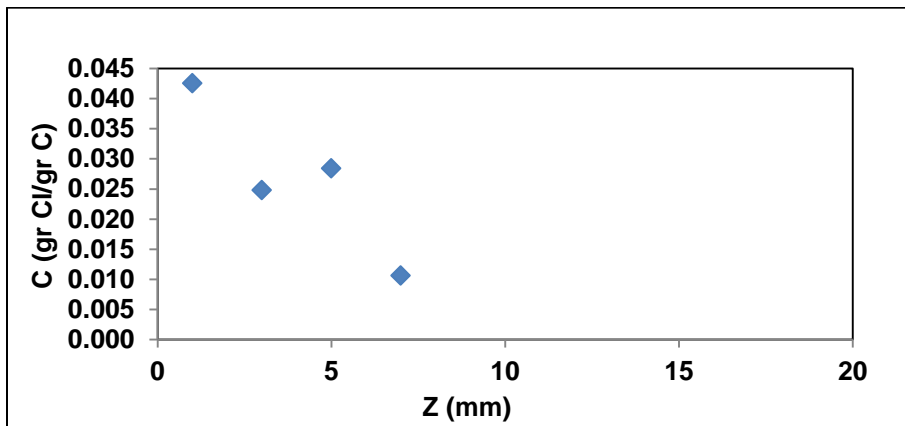
Σχήμα A.1: Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NC [NT Build 492]



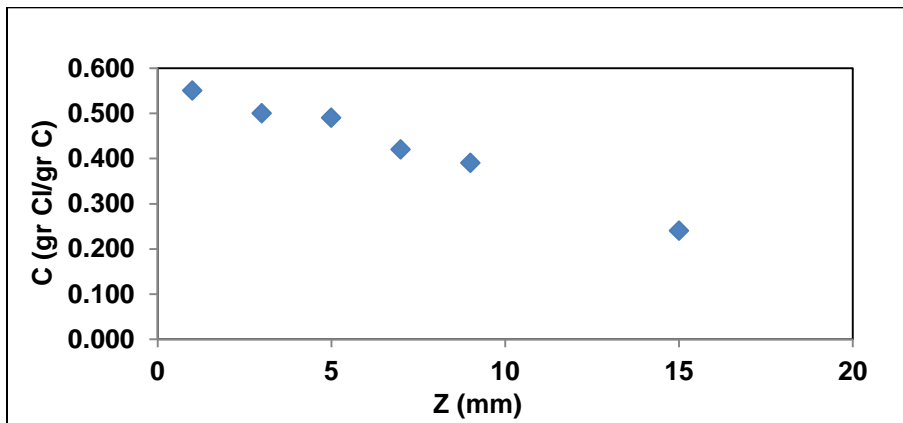
Σχήμα A.2 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NC-MC [NT Build 492]



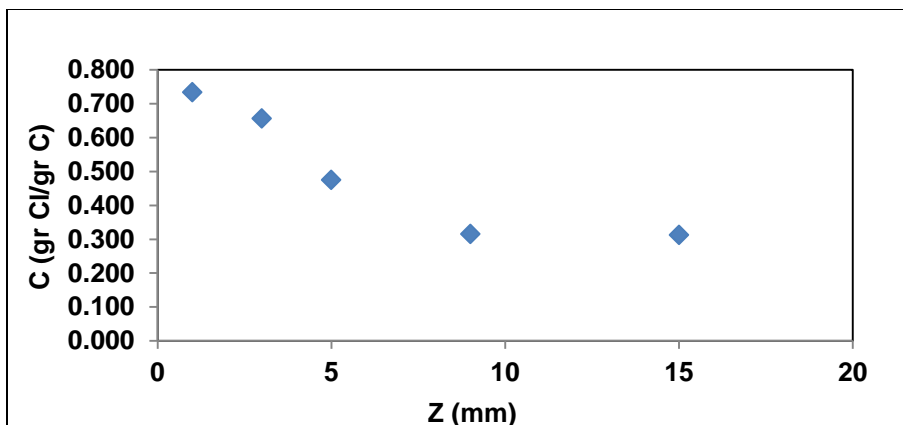
Σχήμα Α.3 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NC



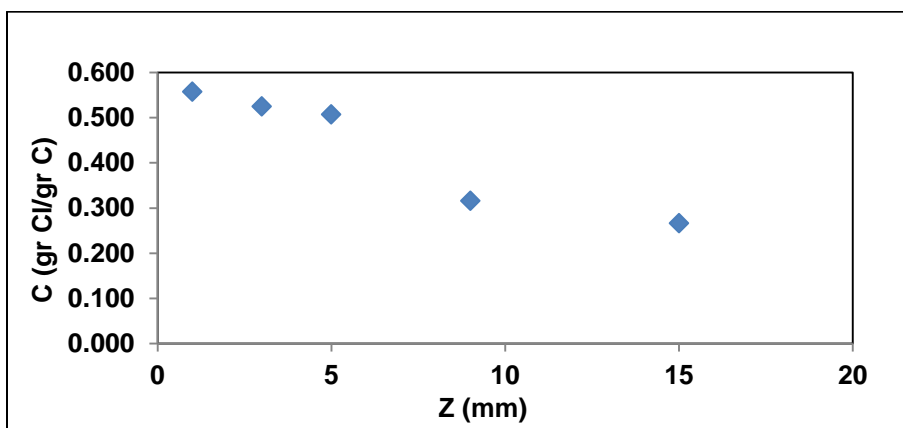
Σχήμα Α.4 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NC-MC



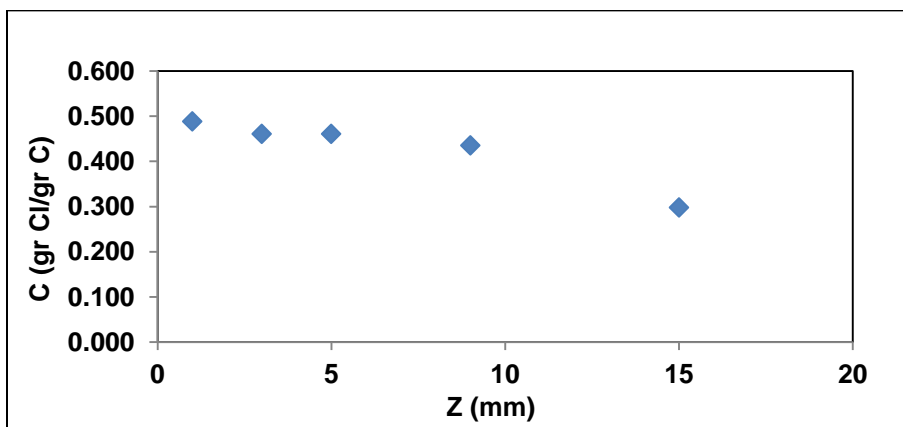
Σχήμα Α.5 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NCSF-0.5



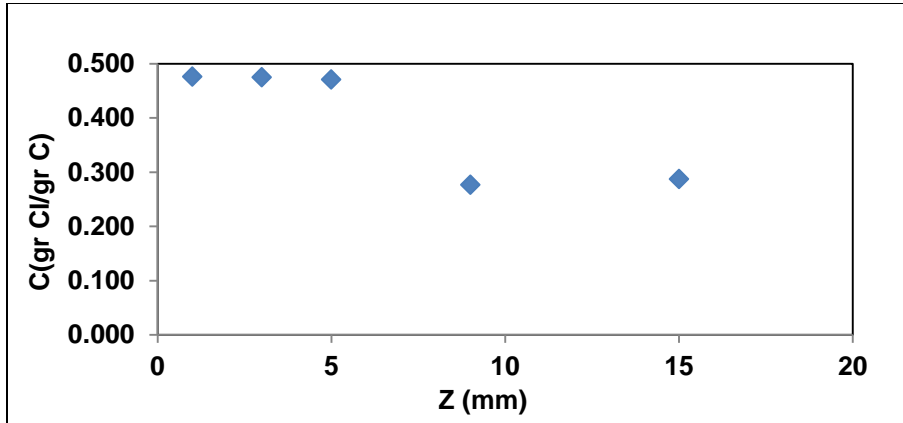
Σχήμα Α.6 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NCSF-1



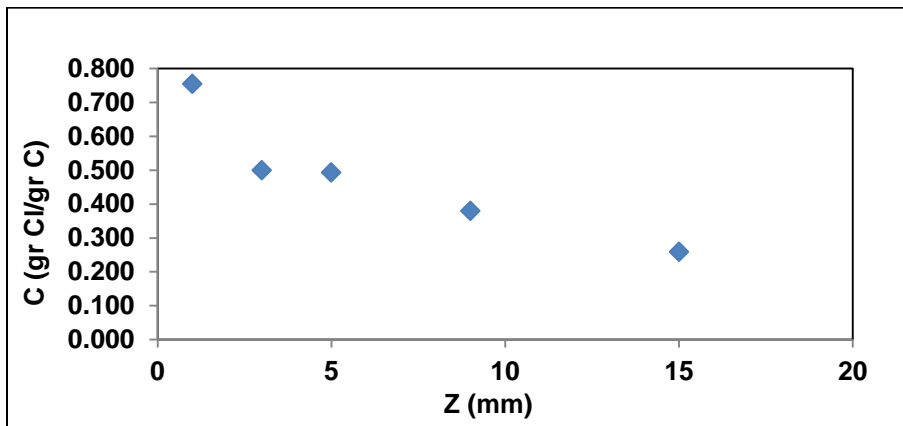
Σχήμα Α.7 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NCPF-0.5



Σχήμα Α.8 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NCPF-1



Σχήμα Α.9 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NCPX-0.5



Σχήμα Α.10 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NCPX-1