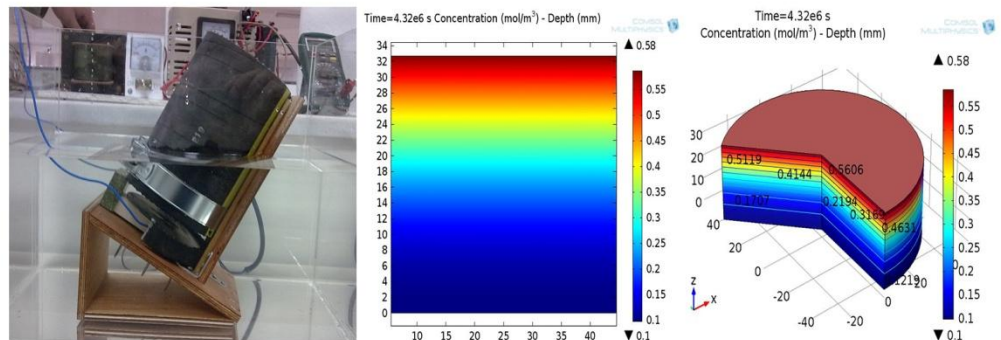




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



# Μοντελοποίηση της διάχυσης χλωριόντων σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα

Κορόζης Ηλίας  
Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων :

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

Αθήνα,  
Οκτώβριος 2015



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**«ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**

# **Μοντελοποίηση της διάχυσης χλωριόντων σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα**

**Μεταπτυχιακή Εργασία**

του

**Κορόζη Ηλία**

Διπλ. Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

---

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:**

**ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ Γ. ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ | ΛΕΚΤΟΡΑΣ Ε.Μ.Π.**

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**Ε.Γ.ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ**

**Σ. ΚΟΛΛΙΑΣ**

**Ν. ΛΑΓΑΡΟΣ**

**ΛΕΚΤΟΡΑΣ Ε.Μ.Π.**

**ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
Ε.Μ.Π.**

**ΛΕΚΤΟΡΑΣ Ε.Μ.Π.**

**Αθήνα, Οκτώβριος 2015**



## **Ευχαριστίες**

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με στήριξαν και με βοήθησαν σε αυτήν την πορεία.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα κ. Μπαδογιάννη Ευστράτιο, Λέκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την αμέριστη βοήθεια και την πολύτιμη καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής.

Ευχαριστίες οφείλω επίσης στο διδακτικό και ερευνητικό προσωπικό του Εργαστηρίου «Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας» της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και ιδιαίτερα στον Ασιώτη Κωνσταντίνο υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την υλικοτεχνική υποστήριξή τους κατά τη διεξαγωγή τμήματος των πειραμάτων, στην κ. Κορωνάκη Ελένη (ΕΔΙΠ) της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την πολύτιμη βοήθεια της στη χρήση του λογισμικού Comsol Multiphysics 4.4, στους μεταπτυχιακούς σπουδαστές Κομνηνού Ελένη και Οικονόμου Παναγιώτη για τη σκυροδέτηση των δοκιμίων των πειραμάτων, καθώς και στη μεταπτυχιακή σπουδάστρια Στρατουρά Μαρία για την αδιαμφισβήτητης σημασίας συνδρομή της στη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη στήριξη της και τους φίλους μου Εύη, Εβίτα και Δημήτρη για τη φιλοξενία κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Κορόζης Ηλίας

E-mail: [ilias.korozis@gmail.com](mailto:ilias.korozis@gmail.com)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση και η μοντελοποίηση της διείσδυσης των χλωριόντων στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Εξετάστηκαν τρεις συνθέσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος διαφορετικού τύπου ινών, μία σύνθεση με χαλύβδινες ίνες και δύο συνθέσεις με συνθετικές ίνες τύπου Concrix και SikaFiber αντίστοιχα. Ακόμη, εξετάστηκαν δύο διαφορετικά ποσοστά προσθήκης ινών για κάθε σύνθεση, 0.5 % και 1 % κ.ο σκυροδέματος. Επίσης, εξετάστηκε μία σύνθεση συμβατικού σκυροδέματος καθώς και μία σύνθεση με προσθήκη μετακαολίνη σε ποσοστό 10% αντικατάστασης του τσιμέντου. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η διείσδυση των χλωριόντων σύμφωνα με τα πρότυπα NordTest Build 492 και 443 με σκοπό τον υπολογισμό της αντίστασης στη διείσδυση χλωριόντων, καθώς και το ανοικτό πορώδες (OP). Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Comsol Multiphysics 4.4 των φαινομένων της διάχυσης των χλωριόντων και της επιταχυνόμενης διείσδυσης των χλωριόντων με την εφαρμογή διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού, με σκοπό τη συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών και των αναλυτικών αποτελεσμάτων αλλά και τη συσχέτιση των τιμών των διαφορετικών συντελεστών διείσδυσης των δύο πειραμάτων. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική μεταβολή του πορώδους ως προς το αμιγές σκυρόδεμα. Ακόμη, η δοκιμή διάχυσης σύμφωνα με το πρότυπο NT Build 443 έδειξε μείωση της διείσδυσης με την προσθήκη μετακαολίνη και την προσθήκη χαλύβδινων ινών ενώ η προσθήκη συνθετικών ινών επηρέασε τη διείσδυση θετικά κατά περίπτωση ανάλογα με το ποσοστό των ινών. Παρατηρήθηκε αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, όσον αφορά στις συγκεντρώσεις των χλωριόντων σε διάφορα βάθη. Ειδικότερα, στη δοκιμή διάχυσης υπήρξε αρκετά καλή σύγκλιση, ενώ στη δοκιμή επιταχυνόμενης διείσδυσης, η σύγκλιση επιτεύχθηκε μετά την υιοθέτηση διαφορετικών από τους πειραματικούς, συντελεστών διείσδυσης.

## **ABSTRACT**

The subject of this thesis is the experimental investigation and modeling of the chloride ingress in fiber-reinforced concrete. Three fiber-reinforced concrete mixtures of different types of fibers were examined, a mixture with steel fibers and two mixtures of synthetic fibers, one Concrifix type and the other SikaFiber type. Furthermore, two different fiber contents were examined for each mixture, 0.5% and 1% per volume of concrete. There were also examined a mixture of natural concrete and a mixture by adding metakaolin as a replacement of cement in rate of 10%. Specifically, the chloride penetration according to standards NordTest Build 492 and 443 was investigated in order to calculate the resistance to chloride ingress, and also the open porosity (OP). Additionally, the phenomena of chloride diffusion and accelerated chloride penetration by applying an electric potential difference were simulated with finite element software Comsol Multiphysics 4.4 in order to achieve correlation between the experimental and the analytical results and the values of the penetration coefficients of the two experiments. According to the experimental results, no substantial change in porosity was observed as to the neat concrete. Furthermore, the diffusion test in accordance with standard NT Build 443 showed reduced infiltration adding metakaolin and adding steel fibers and the addition of synthetic fibers influenced the penetration positively case on the proportion of the fibers. There was fairly good agreement between analytical and experimental results, in terms of concentrations of chlorides at various depths. In particular, the diffusion test showed quite good convergence, while in the accelerated penetration test, the convergence was achieved by adopting different penetration coefficients.

# 1 Περιεχόμενα

1.	ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	1
1.1	Γενικά.....	1
1.2	Παράγοντες ανθεκτικότητας.....	2
1.2.1	Το νερό ως παράγοντας φθοράς.....	3
1.2.2	Συνδεδεμένοι πόροι στο σκυρόδεμα.....	4
1.2.3	Έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον.....	6
1.3	Διείσδυση Χλωριόντων.....	6
1.3.1	Σπουδαιότητα Χλωριόντων.....	6
1.3.2	Πηγές Χλωριόντων.....	7
1.3.3	Μορφή Χλωριόντων στο σκυρόδεμα.....	7
1.3.4	Επιτρεπτά Όρια.....	8
1.3.5	Μηχανισμοί Προσβολής.....	9
1.3.6	Μηχανισμός Διάβρωσης.....	10
1.3.7	Τρόποι Προστασίας Οπλισμένου Σκυροδέματος.....	13
1.3.8	ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	14
2	ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗΣ.....	17
3	ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	20
3.1	Γενικά.....	20
3.2	Είδη ινών.....	20
3.3	Πλεονεκτήματα ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	22
3.4	Χρήσεις και εφαρμογές.....	22
4	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	23
5	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	34
5.1	Εισαγωγή.....	34
5.2	Υλικά, Συνθέσεις σκυροδέματος, Δοκίμια και Ιδιότητες.....	34
5.3	Ανοικτό πορώδες.....	39
5.4	Αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων.....	40
5.4.1	Συντελεστής Διείσδυσης χλωριόντων - NT BUILD 492.....	40
5.4.2	Συντελεστής Διάχυσης χλωριόντων - NT 443.....	47
5.4.2.1	Προσδιορισμός συνολικών χλωριόντων.....	48
5.4.2.2	Προσδιορισμός συντελεστή διάχυσης χλωριόντων.....	50
6	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COMSOL MULTIPHYSICS 4.4.....	52
6.1	Εισαγωγή.....	52
6.2	Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	53

6.3	Μοντελοποίηση με το COMSOL MULTIPHYSICS 4.4 της διάχυσης των χλωριόντων .....	54
6.4	Μοντελοποίηση της επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων, εξαιτίας της εφαρμογής διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού.....	59
7	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	63
7.1	Ανοικτό Πορώδες OP.....	63
7.2	Αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων.....	64
7.2.1	Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων - NT BUILD 492 .....	64
7.2.2	Συντελεστής Διάχυσης χλωριόντων - NT BUILD 443 .....	67
7.3	Μοντελοποίηση διάχυσης χλωριόντων .....	70
7.4	Μοντελοποίηση διείσδυσης χλωριόντων .....	74
7.5	Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων .....	77
7.5.1	Διάχυση χλωριόντων .....	77
7.5.2	Διείσδυση χλωριόντων .....	81
7.6	Σύγκριση συντελεστών διείσδυσης & διάχυσης χλωριόντων .....	83
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	84
9	Προτάσεις Μετεξέλιξης Ερευνητικής Εργασίας.....	86
10	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	87
11	Παράρτημα .....	92
11.1	Ανοικτό Πορώδες.....	92
11.2	Αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων.....	92
11.2.1	Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων κατά το πρότυπο NT BUILD 492.....	92
11.2.2	Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων με το πρότυπο NT 443.....	93



## Σχήματα

Σχήμα 1: Διαβρωτικές δράσεις στο σκυρόδεμα (Κόλιας 2011-2012).....	2
Σχήμα 2: Παράγοντες ανθεκτικότητας (Κόλιας 2011-2012) .....	3
Σχήμα 3: Σχέση διαπερατότητας με λόγο νερού προς τσιμέντο (Κόλιας 2011-2012) .....	4
Σχήμα 4: Εξέλιξη διάβρωσης οπλισμού από χλωριόντα.....	10
Σχήμα 5: Είδη τεχνητών ιών και ο συμβολισμός τους (BISFA, 2009) .....	21
Σχήμα 6: Καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα.....	21
Σχήμα 7: Η διάταξη της δοκιμής NT492.....	41
Σχήμα 8: Υπόδειγμα μέτρησης βάθους διείσδυσης χλωριόντων .....	45
Σχήμα 9: Η διάταξη της δοκιμής Nordtest 443. ....	48
Σχήμα 10: Μεταβολή της τιμής του ανοικτού πορώδους ανά σύνθεση. ....	64
Σχήμα 11: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων $D_{nssm}$ ( $m^2/s$ ) για κάθε σύνθεση. ....	65
Σχήμα 12: Διάγραμμα της συγκέντρωσης $c$ ( $gr\ Cl/gr\ C$ ) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων $z$ ( $mm$ ) για τη σύνθεση NC. ....	66
Σχήμα 13: Διάγραμμα της συγκέντρωσης $c$ ( $gr\ Cl/gr\ C$ ) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων $z$ ( $mm$ ) για τη σύνθεση NC-MC.....	67
Σχήμα 14: Συγκεντρωτικό διάγραμμα της συγκέντρωσης $c$ ( $gr\ Cl/gr\ C$ ) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων $z$ ( $mm$ ) για όλες τις συνθέσεις.....	68
Σχήμα 15: Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων $D$ ( $m^2/s$ ) για κάθε σύνθεση. ....	69
Σχήμα 16: Διάγραμμα της συγκέντρωσης $c$ ( $gr\ Cl/gr\ C$ ) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων $z$ ( $mm$ ) για τη σύνθεση NC. ....	70
Σχήμα 17: Διάγραμμα της συγκέντρωσης $c$ ( $gr\ Cl/gr\ C$ ) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων $z$ ( $mm$ ) για τη σύνθεση NC-MC.....	70
Σχήμα 18: Διάγραμμα της συγκέντρωσης $c$ ( $gr\ Cl/gr\ C$ ) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων $z$ ( $mm$ ) για τη σύνθεση NCPPF-0.9.....	71
Σχήμα 19: Διάγραμμα της συγκέντρωσης $c$ ( $gr\ Cl/gr\ C$ ) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων $z$ ( $mm$ ) για τη σύνθεση NCPPF-0.45.....	71
Σχήμα 20: Διάγραμμα της συγκέντρωσης $c$ ( $gr\ Cl/gr\ C$ ) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων $z$ ( $mm$ ) για τη σύνθεση SF-1. ....	71
Σχήμα 21: Διάγραμμα της συγκέντρωσης $c$ ( $gr\ Cl/gr\ C$ ) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων $z$ ( $mm$ ) για τη σύνθεση SF-0.5. ....	72
Σχήμα 22: Διάγραμμα της συγκέντρωσης $c$ ( $gr\ Cl/gr\ C$ ) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων $z$ ( $mm$ ) για τη σύνθεση NCPCX-0.9. ....	72
Σχήμα 23: Διάγραμμα της συγκέντρωσης $c$ ( $gr\ Cl/gr\ C$ ) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων $z$ ( $mm$ ) για τη σύνθεση NCPCX-0.45. ....	72
Σχήμα 24: Συγκεντρωτικό διάγραμμα της συγκέντρωσης $c$ ( $gr\ Cl/gr\ C$ ) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων $z$ ( $mm$ ) για όλες τις συνθέσεις.....	74
Σχήμα 25: Διάγραμμα της συγκέντρωσης $c$ ( $gr\ Cl/gr\ C$ ) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων $z$ ( $mm$ ) για τη σύνθεση NC .....	74

Σχήμα 26: Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NC-MC.....	75
Σχήμα 27: Συγκενρωτικό διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τις 2 συνθέσεις.....	75
Σχήμα 28: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NC.....	77
Σχήμα 29: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NC-MC. ....	77
Σχήμα 30: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης SF-0.5. ....	78
Σχήμα 31: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης SF-1. ....	78
Σχήμα 32: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NCPPF-0.45.....	79
Σχήμα 33: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NCPPF-0.9.....	79
Σχήμα 34: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NCPCX-0.45.....	80
Σχήμα 35: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NCPCX-0.9.....	80
Σχήμα 36: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NC.....	81
Σχήμα 37: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NC-MC. ....	82
Σχήμα 38 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NC. ....	93
Σχήμα 39 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NC-MC.....	94
Σχήμα 40: Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση SF-0.5. ....	94
Σχήμα 41 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση SF-1. ....	94
Σχήμα 42 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NCPPF-0.45.....	95
Σχήμα 43 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NCPPF-0.9.....	95
Σχήμα 44 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NCPCX-0.45. ....	95
Σχήμα 45: Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση NCPCX-0.9. ....	96

## Εικόνες

Εικόνα 1: Μετακαολίνης.....	17
Εικόνα 2: Οι τύποι των ινών που χρησιμοποιήθηκαν. Στα αριστερά, ίνες τύπου INOMIX, στη μέση ίνες τύπου SikaFiber PP940-50 και στα δεξιά ίνες τύπου Concrifix ES. ....	36
Εικόνα 3: Η διάταξη της δοκιμής NT492.....	43
Εικόνα 4: Οι διάφορες συσκευές του κυκλώματος. ....	43
Εικόνα 5: Τυπικό προφίλ δοκιμίου σκυροδέματος κατόπιν δοκιμής αντίστασης σε χλωριόντα, σύμφωνα με το πρότυπο [NordTest Build 492 (1999)] και ψεκασμού με νιτρικό άργυρο. ....	44
Εικόνα 6: Θραύση του δοκιμίου σε διάρρηξη.....	44
Εικόνα 7: Δοκίμια με χρωματισμένες επιφάνειες για τη μέτρηση του βάθους διείσδυσης χλωριόντων. ....	45
Εικόνα 8: Η διάταξη της δοκιμής Nordtest 443. ....	48
Εικόνα 9 : Χρωματικές αλλαγές του διαλύματος μέχρι να χρωματιστεί ερυθροφαιό, κατά την διάρκεια της τιτλοδότησης σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-2.....	49
Εικόνα 10: Στα αριστερά η εισαγωγή των διαστάσεων και των συντεταγμένων θέσης του ορθογωνίου και η εντολή Build Selected και στα δεξιά ο κánaβος με τη γεωμετρία που δημιουργήθηκε για τη σύνθεση NC....	55
Εικόνα 11: Η συνοριακή συνθήκη καμίας ροής στην δεξιά και στην κάτω πλευρά.....	58
Εικόνα 12: Η συνοριακή συνθήκη για την επιφανειακή συγκέντρωση στην πάνω πλευρά για τη σύνθεση NC. ....	58

## Πίνακες

Πίνακας 1: Περίπτωση διάβρωσης οπλισμού λόγω χλωριόντων [πηγή: EN 206-1 (2000)].....	15
Πίνακας 2: Κύρια χαρακτηριστικά ινών .....	35
Πίνακας 3: Οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν.....	36
Πίνακας 4: Ποσότητες των υλικών ανά σύνθεση (kg/m <sup>3</sup> ).....	37
Πίνακας 5: Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος όλων των συνθέσεων.....	37
Πίνακας 6: Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμίων σε ηλικία 7 και 28 ημερών, μέση τιμή (M.T) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%) της κάθε σύνθεσης.....	38
Πίνακας 7: Θλιπτική αντοχή κυλινδρικών δοκιμίων σε ηλικία 28 ημερών, μέση τιμή (M.T) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%) της κάθε σύνθεσης.....	39
Πίνακας 8: Διαφορά δυναμικού και διάρκεια δοκιμής [πηγή: NordTest Build 492 (1999)] .....	42
Πίνακας 9: Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση του στη διείσδυση χλωριόντων, για διάφορες τιμές του συντελεστή διάχυσης [πηγή : Tang (1996)] .....	46
Πίνακας 10: Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση του στη διείσδυση χλωριόντων, για διάφορες τιμές του συντελεστή διάχυσης [Nilsson et all (1998)] .....	46
Πίνακας 11: Οι παράμετροι που ορίστηκαν για τις 8 συνθέσεις.....	55
Πίνακας 12: Οι ιδιότητες που ορίστηκαν για τις 8 συνθέσεις.....	56
Πίνακας 13: Οι συγκεντρώσεις στην επιφάνεια που τέθηκαν ως συνοριακές συνθήκες για κάθε σύνθεση.....	58
Πίνακας 14: Οι παράμετροι που τοποθετήθηκαν για τις 2 συνθέσεις.....	60
Πίνακας 15: Οι ιδιότητες που ορίστηκαν για τις 2 συνθέσεις.....	60
Πίνακας 16: Οι συγκεντρώσεις στην επιφάνεια που τέθηκαν ως συνοριακές συνθήκες για τις 2 συνθέσεις ..	62
Πίνακας 17: Πειραματικά αποτελέσματα ανοικτού πορώδους (OP) % για κάθε σύνθεση.....	63
Πίνακας 18: Πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση (μέσες τιμές) .....	64
Πίνακας 19: Πειραματικά αποτελέσματα της συγκέντρωσης των χλωριόντων για τις συνθέσεις NC, NC-MC. .....	66
Πίνακας 20: Πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής διάχυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση.....	68
Πίνακας 21: Πειραματικά αποτελέσματα της συγκέντρωσης των χλωριόντων για όλες τις συνθέσεις.....	69
Πίνακας 22: Αναλυτικά αποτελέσματα της συγκέντρωσης των χλωριόντων σε σχέση με το βάθος για κάθε σύνθεση.....	73
Πίνακας 23: Αναλυτικά αποτελέσματα της συγκέντρωσης των χλωριόντων σε σχέση με το βάθος για κάθε σύνθεση.....	76
Πίνακας 24: Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ πειράματος και ανάλυσης για το συντελεστή διείσδυσης με τη μέθοδο NT BUILD 492.....	82
Πίνακας 25: Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ όλων των συντελεστών διείσδυσης χλωριόντων που προέκυψαν από τα πειράματα και τις αναλύσεις.....	83
Πίνακας 26 : Πειραματικά αποτελέσματα ανοικτού πορώδους OP (%) για όλα τα δοκίμια .....	92

Πίνακας 27 : Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικών μετρήσεων της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση .....	93
---	----



# 1. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

## 1.1 Γενικά

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 στην αναμενόμενη 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 εξαρτώμενη 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, για μια σειρά από λόγους, και έτσι 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 εμφανίζονται συχνά και περιπτώσεις πρόωμης φθοράς των κατασκευών από σκυρόδεμα, και παρέχουν πολύτιμα μαθήματα για τον έλεγχο των παραγόντων που είναι υπεύθυνοι για την έλλειψη ανθεκτικότητας.

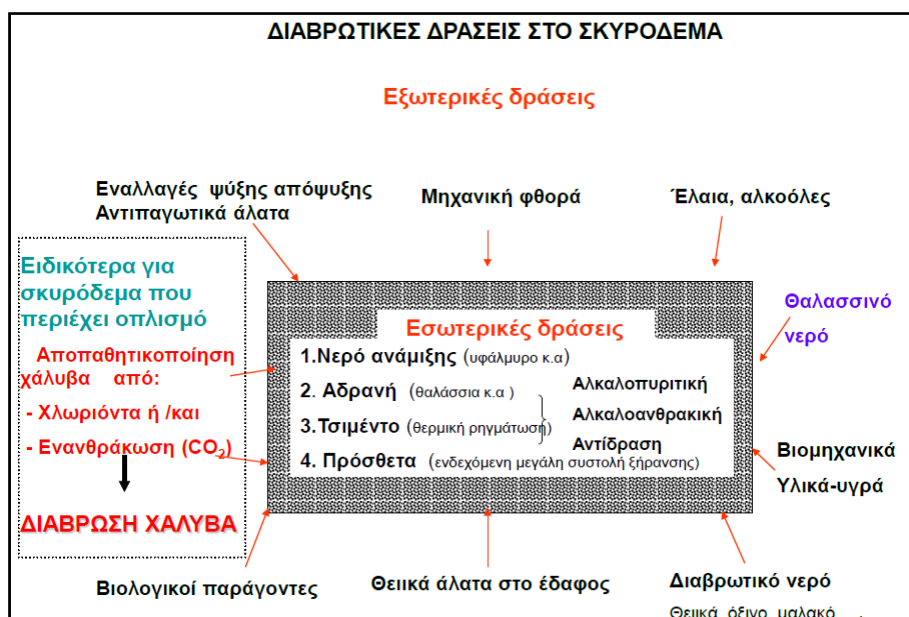
## 1.2 Παράγοντες ανθεκτικότητας

Οι βασικές αιτίες μείωσης της ανθεκτικότητας μιας κατασκευής από σκυρόδεμα μπορεί να οφείλονται είτε σε εξωτερικούς είτε σε εσωτερικούς παράγοντες και μπορεί να είναι φυσικές, χημικές ή μηχανικές (Σχήμα 1).

Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σχετίζεται άμεσα με τρεις κατηγορίες ρευστών:

- Το νερό (με τα διαβρωτικά μέσα που περιέχει)
- Ο ατμοσφαιρικός αέρας ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ )
- Το ειδικό περιβάλλον που μπορεί να βρίσκεται το σκυρόδεμα ( $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{Cl}^-$ , αλκάλια)

Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος εξαρτάται από την ευκολία με την οποία τα ρευστά αυτά εισέρχονται και μεταφέρονται στο σκυρόδεμα, δηλαδή από τη διαπερατότητα του σκυροδέματος (permeability). Η κίνηση των ρευστών μέσα στο σκυρόδεμα μπορεί να πραγματοποιηθεί διαμέσου ροής σε πορώδες μέσο, μέσω διάχυσης και μέσω απορρόφησης.



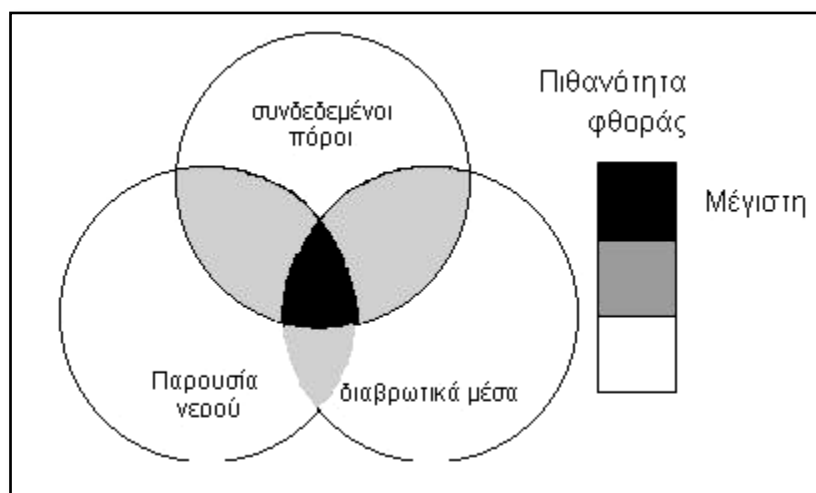
Σχήμα 1: Διαβρωτικές δράσεις στο σκυρόδεμα (Κόλιας 2011-2012)

Οι 3 παράγοντες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος είναι:

- Η παρουσία νερού
- Η παρουσία συνδεδεμένων πόρων



- Η έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον



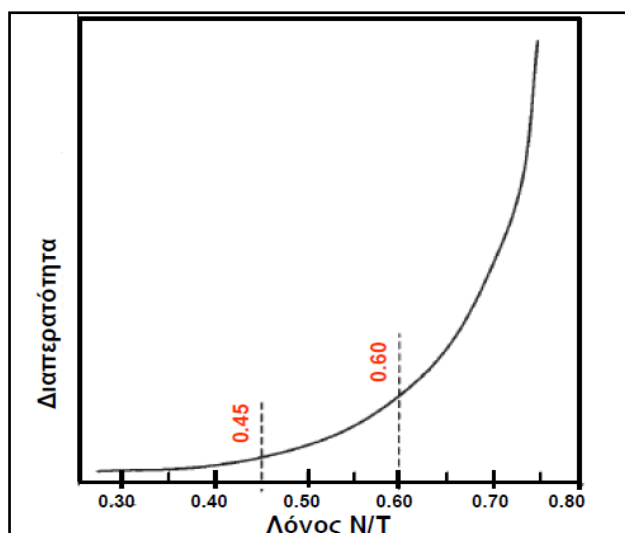
**Σχήμα 2:** Παράγοντες ανθεκτικότητας (Κόλιας 2011-2012)

Κάθε ένας παράγοντας από τους παραπάνω έχει το ρόλο του στη διάρκεια ζωής του υλικού. Η παρουσία, όμως, συνολικά και των τριών μπορεί να προκαλέσει ταχείες επιπτώσεις στην ανθεκτικότητά του, αφού δρουν κατά συνεργιστικό τρόπο και έτσι ο κίνδυνος φθοράς μεγιστοποιείται όπως φαίνεται και στο σχήμα.

### 1.2.1 Το νερό ως παράγοντας φθοράς

Ο πιο καθοριστικός παράγοντας για την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος είναι το νερό. Το σκυρόδεμα είναι ευαίσθητο στις φυσικές και χημικές διαδικασίες φθοράς που σχετίζονται με το νερό λόγω της ικανότητας διείσδυσης του νερού ακόμα και σε εξαιρετικά μικρούς πόρους και κοιλότητες.

Το νερό επηρεάζει το πορώδες καθώς υψηλοί λόγοι νερού προς τσιμέντο αυξάνουν την παρουσία τριχοειδών πόρων. Επομένως αυξάνεται η διαπερατότητα και μειώνεται σημαντικά η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.



**Σχήμα 3:** Σχέση διαπερατότητας με λόγο νερού προς τσιμέντο (Κόλιας 2011-2012)

Ακόμη, αποτελεί το μέσο διάχυσης των διαβρωτικών συστατικών στους πόρους του σκυροδέματος. Βέβαια ο βαθμός φθοράς εξαρτάται από το αν η προσβολή των χημικών ουσιών είναι επιφανειακή ή πραγματοποιείται στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Επίσης, το νερό συμμετέχει στην αντίδραση διάβρωσης του οπλισμού και στην καταστροφή της παθητικής του προστασίας τόσο στο συμβατικό οπλισμένο σκυρόδεμα όσο και στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Τέλος, το νερό συμμετέχει στην αλκαλοπυριτική αντίδραση και στην ενανθράκωση.

Εκτός από τις παραπάνω περιπτώσεις, το νερό είναι ο βασικός παράγοντας που διαμορφώνει την αντοχή του σκυροδέματος στη δοκιμή ψύξης-απόψυξης και σε έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές. Ειδικότερα, στο μηχανισμό φθοράς του σκυροδέματος από τους κύκλους ψύξης-απόψυξης το νερό μετατρέπεται σε πάγο και διογκώνεται. Η αύξηση του όγκου του νερού προκαλεί τάσεις στο εσωτερικό του σκυροδέματος που έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία εσωτερικών ρωγμών και κενών μειώνοντας την αντοχή του υλικού.

### 1.2.2 Συνδεδεμένοι πόροι στο σκυρόδεμα

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

Ως πορώδες του σκυροδέματος ορίζεται ο λόγος του όγκου των πόρων που υπάρχουν στο υλικό προς το συνολικό φαινόμενο όγκο και εκφράζεται επί τις εκατό (%). Οι πόροι αυτοί δημιουργούνται από το νερό της σύνθεσης και τον περιεχόμενο αέρα, κατά τη διάρκεια του

μηχανισμούς σκλήρυνσης του σκυροδέματος, που πραγματοποιείται με την ενυδάτωση του τσιμέντου.

$$p = \frac{V_{\kappa}}{V} = \frac{\rho - \rho_{\phi}}{\rho}$$

όπου:

- $p$ : ολικό πορώδες του υλικού,
- $V_{\kappa}$ : ο όγκος των πόρων (κενών)
- $V$ : ο φαινόμενος όγκος του υλικού
- $\rho_{\phi}$ : το φαινόμενο ειδικό βάρος του υλικού
- $\rho$ : το ειδικό βάρος του υλικού

Το πορώδες διακρίνεται ως προς τη μορφή του σε:

- Κλειστό
- Ανοικτό (διαμπερές)
- Ανοικτό από το ένα άκρο

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.

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)

### **1.2.3 Έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον**

Το περιβάλλον μέσα στο οποίο βρίσκεται το σκυρόδεμα είναι ένας από τους προφανείς παράγοντες επιρροής της ανθεκτικότητας του. Ένα βλαβερό 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 αντιμετώπισή τους. Ακόμη, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται και κατά τη φάση της κατασκευής, στις φάσεις της διάστρωσης, της συμπίκνωσης και της συντήρησης.

## **1.3 Διείσδυση Χλωριόντων**

### **1.3.1 Σπουδαιότητα Χλωριόντων**

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.

### 1.3.2 Πηγές Χλωριόντων

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, τα αντιπαγωτικά άλατα και το 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 ανάμιξη

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) (χρήση στο οδικό δίκτυο κατά του χειμερινούς μήνες για τήξη πάγων)
- Ειδικές κατασκευές (σιλό αποθήκευσης αλατιού)

### 1.3.3 Μορφή Χλωριόντων στο σκυρόδεμα

Τα συνολικά χλωριόντα ( $CI_{total}$ ) που εμπεριέχονται στο σκυρόδεμα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: τα ελεύθερα χλωριόντα ( $CI_{free}$ ) 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)).

#### 1.3.4 Επιτρεπτά Όρια

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 δεσμευτούν 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 στιγμή 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 αλκαλικότητα τους (pH

12.4), αυτό συμβαίνει όταν η συνολική περιεκτικότητα σε χλωριόντα (*CI*) (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.

### 1.3.5 Μηχανισμοί Προσβολής

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 an 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 ang 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.

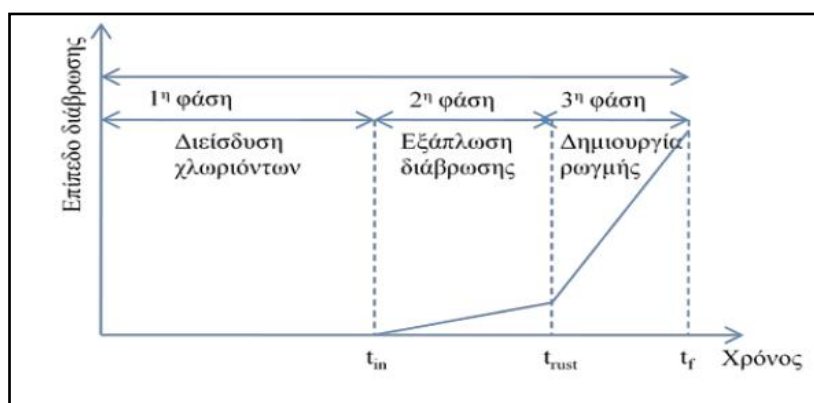
Ο τρίτος μηχανισμός, που αφορά στη **διείσδυση** χλωριόντων, ενεργοποιείται όταν το σκυρόδεμα εκτίθεται σε μία μονόπλευρη πίεση νερού που περιέχει χλωριόντα. Στην περίπτωση αυτή, η είσοδος των χλωριόντων στο σκυρόδεμα πραγματοποιείται μέσω της ροής νερού, η οποία

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.

### 1.3.6 Μηχανισμός Διάβρωσης

Ως διάβρωση ορίζεται η ηλεκτροχημική διαδικασία που απαιτεί τη δημιουργία μιας ανόδου, όπου λαμβάνει χώρα η οξείδωση (oxidation), και μίας καθόδου, όπου λαμβάνει χώρα η αναγωγή (reduction). Η διάβρωση ολοκληρώνεται σε τρία βασικά στάδια: (1<sup>η</sup> φάση) διείσδυση χλωριόντων (chloride penetration), (2<sup>η</sup> φάση) εξάπλωση διάβρωσης (corrosion expansion), (3<sup>η</sup> φάση) δημιουργία ρωγμής (crack creation).



Σχήμα 4: Εξέλιξη διάβρωσης οπλισμού από χλωριόντα

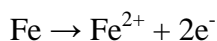
Μια πολύ καλή απεικόνιση της διαδικασίας σταδιακής απώλειας της λειτουργικότητας και της στατικής επάρκειας των κατασκευών δίδεται στη βιβλιογραφία [Lee and Chishom (2005)], με βάση το μοντέλο έναρξης διασποράς του [Tuutti (1982)] (Initiation-Propagation Model. Κατά τη φάση της έναρξης (initiation),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



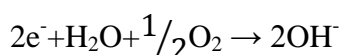
με την απομείωση της διατομής του χάλυβα, η εν λόγω βλάβη είναι δυνατό να υποβαθμίσει σημαντικά τη λειτουργικότητα και, τελικώς, την στατική επάρκεια της κατασκευής. Το πέρας της φάσης αυτής συνεπάγεται τη διακοπή της λειτουργίας της κατασκευής και απαιτεί της άμεση λήψη διορθωτικών μέτρων (επεμβάσεις, ενισχύσεις).

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 οξείδια 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:

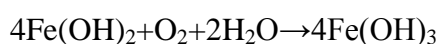
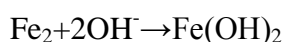


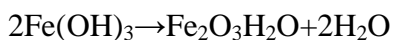
Τα δύο ηλεκτρόνια ( $\text{e}^{-}$ ) που απελευθερώνονται κατά την ανοδική αντίδραση πρέπει, για λόγους διατήρησης της ηλεκτρικής ουδετερότητας να καταναλωθούν σε κάποιο διαφορετικό σημείο της επιφάνειας του χάλυβα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της καθοδικής αντίδρασης, μόνο με ταυτόχρονη παρουσία νερού και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



Ο σχηματισμός των ιόντων υδροξυλίου ( $\text{OH}^{-}$ ) 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  $\text{Fe}(\text{OH})_2 \rightarrow$  σιδηρικό υδροξείδιο  $\text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow$  ένυδρο οξείδιο του σιδήρου (σκωρία)  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , σύμφωνα με τις αντιδράσεις:





Το άνυδρο οξειδίο του σιδήρου  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  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 αποφλοίωση (spalling) του σκυροδέματος.

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 διείδυση 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  $\text{pH}$  (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 οξείδωσης δεν καταναλώνεται το σύνολο των χλωριόντων, όταν αυτά είναι σε μεγάλες συγκεντρώσεις. Αντίθετα ένα μέρος παραμένει διαθέσιμο και η διαδικασία οξείδωσης του σιδήρου θα επαναληφθεί με την είσοδο νέων χλωριόντων στο σκυροδέμα.

Οι δύο κυριότεροι λόγοι που οδηγούν στην αποπαθητικοποίηση του χάλυβα, οι οποίοι δρουν μεμονωμένα ή και συνδυαστικά, συνίστανται αφενός στην διείδυση 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 διείδυσης του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) 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 ( $\text{O}_2$ ) και νερού ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Το κρίσιμο όριο έναρξης της αποπαθητικοποίησης του χάλυβα έχει κατά το παρελθόν οριστεί ως ποσοστό συνολικής συγκέντρωσης χλωριόντων επί του βάρους του τσιμέντου και ίσο με 0,4 % για τσιμέντα τύπου Portland και έως 1.0% για ποζολανικά τσιμέντα [Papadakis (1999), Papadakis (2000)], όπως αναφέρονται από τους [Αποστολόπουλος κ.α. (2009)]. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί ότι, σε αντίθεση με τα ελεύθερα χλωριόντα που εισέρχονται μέσω των πόρων στην μάζα του σκυροδέματος, τα χημικώς δεσμευμένα χλωριόντα που υπάρχουν στον τσιμεντοπολτό δεν εγκυμονούν κινδύνους για το οπλισμένο σκυρόδεμα.

### 1.3.7 Τρόποι Προστασίας Οπλισμένου Σκυροδέματος

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 στη 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 σκυροδέματος:

- Χρήση κατάλληλων τσιμέντων Portland που περιορίζουν την ικανότητα του σκυροδέματος να δεσμεύει χλωριόντα, η οποία εξαρτάται από την περιεκτικότητα αργλικού άλατος,  $C_3A$ .
- 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 αργλικό 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).

### **Μέθοδοι προστασίας οπλισμού:**

- Εφαρμογή καθοδικής προστασίας (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)

### **1.3.8 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.

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 ενός περισσότερο «ευαίσθητου» σκυροδέματος. Υπενθυμίζεται εδώ ότι η ευαισθησία αυτή οφείλεται στην ανάγκη αξιόπιστου σχεδιασμού μίγματος, ώστε να επιτευχθούν οι ελάχιστες απαιτούμενες ή επιθυμητές κατηγορίες ρευστότητας ανάλογα με το επίπεδο επιτελεστικότητας.

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 ενανθράκωσης (XCi)
- Κίνδυνος διάβρωσης οπλισμού λόγω χλωριόντων που δεν προέρχονται από το θαλασσινό νερό (XD<sub>i</sub>)

- Κίνδυνος διάβρωσης οπλισμού λόγω χλωριόντων που προέρχονται από θαλασσινό νερό (XSi)
- Προσβολή από ψύξη-απόψυξη με ή χωρίς αντιπαγωτικά άλατα (XFi)
- Χημική προσβολή (XAi)

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**).

**Πίνακας 1:** 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		
	<b>XS1</b>	<b>XS2</b>	<b>XS3</b>	<b>XD1</b>	<b>XD2</b>	<b>XD3</b>
<b>Μέγιστος λόγος w/c</b>	0.50	0.45	0.45	0.55	0.55	0.45
<b>Ελάχιστη κατηγορία αντοχής</b>	C 30/37	C 35/45	C 35/45	C 30/37	C 30/37	C 35/45
<b>Ελάχιστη περιεκτικότητα Τσιμέντου (kg/m<sup>3</sup>)</b>	300	320	340	300	300	320
<b>Πάχος επικάλυψης (mm)</b>	40	40	50	35	40	50

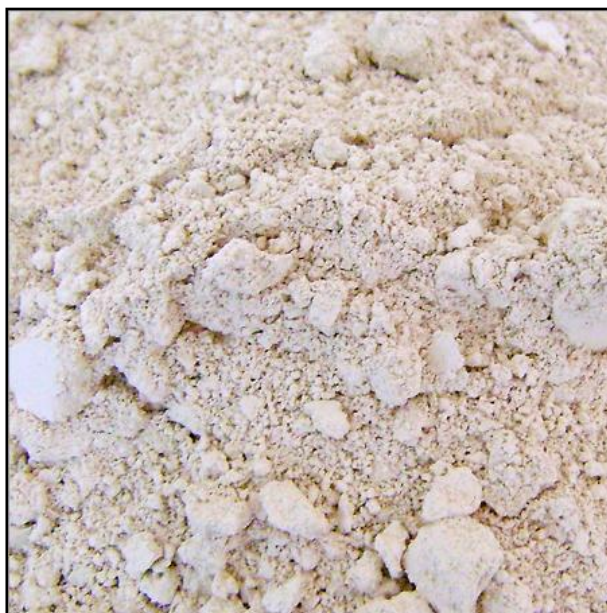
Οι κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα, ενώ συχνά βρίσκονται σε επιθετικό περιβάλλον, έχουν προσδόκιμη διάρκεια ζωής, ανάλογα με τη σπουδαιότητά τους, από 50 έτη έως και περισσότερα από 100 έτη, με μικρές ή και καθόλου επεμβάσεις. Για τον λόγο αυτό απαιτείται οι κατασκευές αυτές να είναι ανθεκτικές. Ειδικά για παραθαλάσσιες κατασκευές είναι η διείδυση

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.

## 2 ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗΣ

Ο μετακαολίνης (ΜΚ) είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται ως πρόσμικτο στην παρασκευή σκυροδέματος. Πρόκειται για υλικό με αξιόλογη ποζολανική δραστηριότητα που προκύπτει από τη θερμική κατεργασία του καολινίτη (κύριο συστατικό του καολίνη) σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 450°C. Ο καολινίτης έχει θεωρητική χημική σύσταση 46.54 %  $SiO_2$ , 39.5 %  $Al_2O_3$  και 13.96%  $H_2O$  κ.β.



**Εικόνα 1:** Μετακαολίνης

Ο καολίνης είναι ένα αργιλικό πέτρωμα λευκού χρώματος με ειδικό βάρος 2.2-2.6 g/cm<sup>3</sup>. 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. Το πυρίτιο και το αργίλιο με τη μορφή υδροξειδίου μπορεί να απαντηθούν ως επιφανειακά στον καολινίτη.

Ως ποζολανικά χαρακτηρίζονται φυσικά ή τεχνητά, πυριτικά ή αργιλοπυριτικά υλικά, η χαρακτηριστική ιδιότητα των οποίων είναι ότι σε λεπτότατο καταμερισμό και με παρουσία υγρασίας, ενώνονται χημικά με την υδράβεστο  $Ca(OH)_2$ , στη συνήθη θερμοκρασία και σχηματίζουν υδραυλικές ενώσεις αντίστοιχες με αυτές που σχηματίζονται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου. Το υδροξείδιο του ασβεστίου  $Ca(OH)_2$  είναι το κύριο προϊόν της αντίδρασης του

τσιμέντου, το οποίο είναι επιθυμητό να καταναλώνεται μέσω της ποζολανικής αντίδρασης, καθώς βελτιώνονται οι ιδιότητες του σκυροδέματος.

Ο μετακαολίνη αποτελεί ένα υλικό με πολύ μεγάλη λεπτότητα (κατόπιν της άλεσης του) το οποίο είναι ισχυρά ποζολανικό. Η συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά του μετακαολίνη προσομοιάζουν το τσιμέντο και για αυτό το λόγο μπορεί να θεωρηθεί τσιμεντοειδές υλικό. Η χρήση του μετακαολίνη στο σκυρόδεμα επιδρά σημαντικά στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος, επηρεάζοντας τη μηχανική αντοχή και την ανθεκτικότητα. Στην ουσία, ο μετακαολίνη οδηγεί σε μείωση της διαπερατότητας και στην αύξηση της μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος. Αυτό το πετυχαίνει λόγω της δράσης του στις διεπιφάνειες μεταξύ του ενυδατωμένου τσιμέντου και των συστατικών του, καθώς αυτές αποτελούν τα αδύναμα σημεία του σκυροδέματος. Στις διεπιφάνειες αυτές υπάρχει χώρος για συσσώρευση κρυστάλλων CH και νερού που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κενών και μικρορωγμών. Η προσθήκη μετακαολίνη κάνει το σκυρόδεμα πιο συμπαγές και πιο συνεκτικό. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η ποζολανική αντίδραση του με το CH, που έχει ως συνέπεια τη μείωση της συγκέντρωσης του στις διεπιφάνειες αφενός, αλλά και την παραγωγή σημαντικής ποσότητας ένυδρου πυριτικού ασβεστίου CSH αφετέρου. Στην επίτευξη συμπαγούς δομής χαμηλού πορώδους συντελεί σημαντικά η παρουσία και των υπόλοιπων κρυσταλλικών ενώσεων που παράγονται κατά τη ποζολανική αντίδραση, οι οποίες έχουν το κύριο χαρακτηριστικό του πολύ μικρού όγκου. Οι κρυσταλλικές αυτές ενώσεις διαθέτουν πολύ μικρό όγκο και λόγω αυτού, μπορούν να εισχωρήσουν αποτελεσματικά στους πόρους και στα κενά της δομής του σκυροδέματος τόσο στη διεπιφάνεια αδρανών-ενυδατωμένου τσιμέντου όσο και στο ίδιο το ενυδατωμένο τσιμέντο. Ακόμη, μειώνουν το ποσοστό των μεγάλων τριχοειδών πόρων αμβλύνοντας το εύρος τους (<20nm), συντελώντας έτσι στη μείωση της διαπερατότητας.

Η μείωση της διαπερατότητας μαζί με την κατανάλωση CH έχουν διπλό όφελος, καθώς οδηγούν στην αύξηση της ανθεκτικότητας σε περιβάλλον θεικών αλλά και σε μείωση του συντελεστή διάχυσης των χλωριόντων στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Επίσης η υδατοαπορροφητικότητα του σκυροδέματος και ο ρυθμός απορρόφησης νερού παρουσιάζουν σημαντική μείωση.

Ακόμη, τα μικρά σωματίδια του μετακαολίνη δρουν ως φυσικά πληρωτικά μέσα. Αυτό έχει ως συνέπεια τη δημιουργία μιας συμπαγούς δομής σκυροδέματος χαμηλού πορώδους, ειδικά στη διεπιφάνεια αδρανών-τσιμέντου. Για το λόγο αυτό, τα αδρανή συμμετέχουν αποτελεσματικότερα στη μηχανική αντοχή και έτσι η μηχανική αντοχή του σκυροδέματος αυξάνεται.



Επομένως η χρήση του μετακαολίνη στην παρασκευή σκυροδέματος οδηγεί σε αύξηση της ανθεκτικότητας μέσω των εξής θετικών επιδράσεων:

- Βελτίωση πορώδους σκυροδέματος
- Μείωση διαπερατότητας σε νερό
- Δυσχέρεια διάχυσης χλωριόντων

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η χρήση μετακαολίνη είναι φιλική ως προς το περιβάλλον για δύο λόγους. Πρώτον, η παραγωγή του μετακαολίνη, κατόπιν θερμικής κατεργασίας του καολινίτη, δε συνοδεύεται από εκπομπές διεργασίας CO<sub>2</sub>. Δεύτερον, η χρήση του στην παρασκευή σκυροδέματος σε ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου, οδηγεί στη μείωση του απαιτούμενου τσιμέντου Portland και συνεπώς στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

### **3 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

#### **3.1 Γενικά**

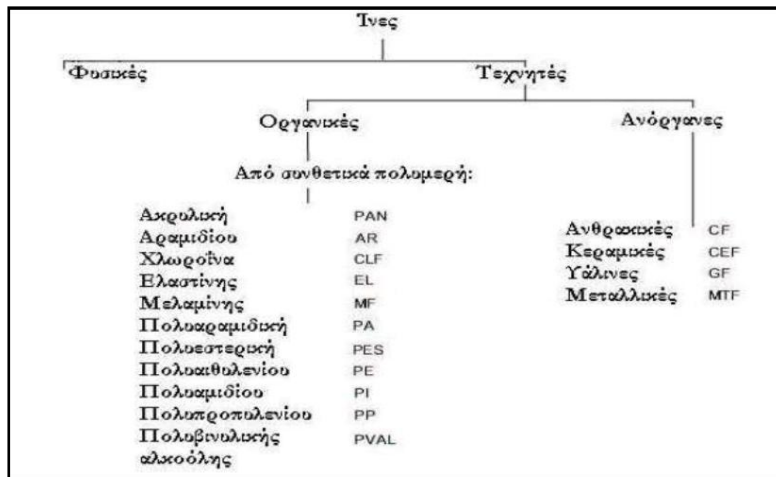
Ήδη από τους ιστορικούς χρόνους πραγματοποιήθηκαν προσπάθειες για τη βελτίωση των ψαθυρών δομικών υλικών με την προσθήκη ινών. Για παράδειγμα, τούβλα και επιχρίσματα οροφών ενισχύονταν με ίνες από άχυρο ή με μαλλί ζώων. Τότε, όπως και τώρα, αποσκοπούσαν στην αποφυγή δημιουργίας ρωγμών στο υλικό και στη 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 βοήθεια ινών.

Ως ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Fiber Reinforced Shotcrete ή FRC) ονομάζεται το σκυρόδεμα το οποίο περιέχει ίνες σε διασπορά, με τυχαίο προσανατολισμό. (Αμερικάνικο Ινστιτούτο σκυροδέματος, ACI 116R). Αποτελείται από τα συστατικά του συμβατικού σκυροδέματος, δηλαδή από τσιμέντο, αδρανή, νερό και πρόσθετα με την προσθήκη ινών.

#### **3.2 Είδη ινών**

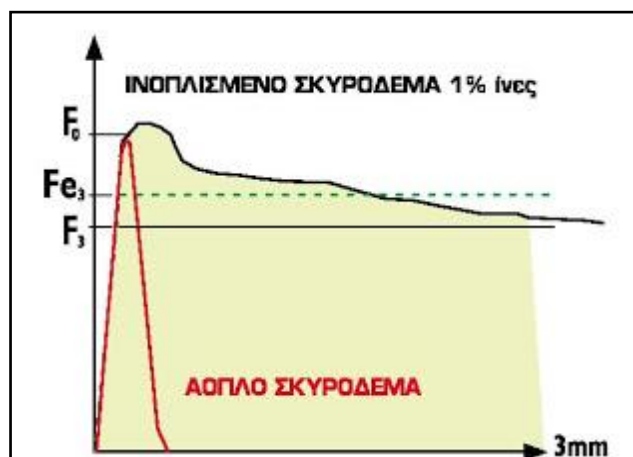
Οι ίνες που χρησιμοποιούνται κατηγοριοποιούνται είτε ανάλογα με το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται είτε από το σχήμα και το μέγεθος τους.

Όσον αφορά το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται συνήθως χρησιμοποιούνται ίνες χάλυβα. Ωστόσο, παράγονται ίνες και από άλλα υλικά όπως η ύαλος, ο άνθρακας, ο αμιάντος, 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 5:** 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 στο άοπλο.



**Σχήμα 6:** Καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα.

### **3.3 Πλεονεκτήματα ινοπλισμένου σκυροδέματος**

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει σε σχέση με το άοπλο τις παρακάτω ιδιότητες:

- Μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη
- Αντίσταση στη δημιουργία και στην εξάπλωση των ρωγμών
- Αυξημένη αντοχή στην κρούση
- Αυξημένη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες
- Αντίσταση στο φαινόμενο της αποφλοΐωσης
- Μεγαλύτερη δυσθραυστότητα
- Οικονομία στη συντήρηση και μεγαλύτερη διάρκεια χρήσης του έργου
- Μεγαλύτερη αντοχή σε φορτία μετά την θραύση

### **3.4 Χρήσεις και εφαρμογές**

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα χάρη στα πολλά πλεονεκτήματα που έχει έναντι του συμβατικά οπλισμένου έχει εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος έργων όπως είναι τα εξής:

- 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 δυναμικές φορτίσεις και ανατινάξεις
- Προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος
- Βιομηχανικά, λιμενικά δάπεδα, φράγματα, κανάλια
- Επισκευές έργων από σκυρόδεμα

## 4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 4.1 Γενικά

Η ανθεκτικότητα είναι ένα θέμα που ενδιαφέρει ιδιαίτερω 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 Τρέχουσα ερευνητική εργασία

Οι **C. Andrade et al.**, το 1994 παρουσίασαν μία λύση για το πρόβλημα της διείσδυσης χλωριόντων υπό μη-σταθερές συνθήκες πραγματοποιώντας κάποιες απλοποιητικές παραδοχές. Αναφέρεται ότι η μεταφορά μάζας όταν επιβάλλεται ηλεκτρικό πεδίο οφείλεται σε τρεις μηχανισμούς, τη διάχυση, τη διείσδυση και τη μεταγωγή. Η βασική παραδοχή που έγινε ήταν ότι η συμβολή της διάχυσης είναι αμελητέα όταν εφαρμόζεται υψηλό ηλεκτρικό πεδίο στο σκυρόδεμα. Επίσης, η μεταγωγή δεν συμβαίνει μέσα στο σκυρόδεμα και έτσι η εξίσωση του **Nerst-Planck**, που αφορά τη μεταφορά μάζας σε ηλεκτρολύτες, περιλαμβάνει μόνο τον όρο της διείσδυσης. Με αυτόν τον τρόπο κατέληξαν στη λύση μίας διαφορικής εξίσωσης για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των χλωριόντων, παρόμοια με αυτή του δεύτερου νόμου του Fick για τη διάχυση, όπου ο συντελεστής διείσδυσης  $D$  πολλαπλασιάζεται με τον όρο  $(z \cdot F \cdot \Delta E / R \cdot T)$  ο οποίος θεωρείται σταθερός για κάθε ηλεκτρικό δυναμικό που εφαρμόζεται. Ο όρος περιέχει την απόλυτη τιμή του σθένους του χλωρίου  $z$ , τη σταθερά του Faraday  $F$ , τη διαφορά δυναμικού  $\Delta E$  στον αριθμητή και τη σταθερά του αερίου  $R$  και τη θερμοκρασία  $T$  στον παρονομαστή. Για την εξακρίβωση της εγκυρότητας της εξίσωσης, πραγματοποίησαν πειράματα επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων υπό την εφαρμογή ηλεκτρικού δυναμικού και σύγκριναν τους προκύπτοντες συντελεστές διάχυσης με αυτούς της εξίσωσης και αυτούς που προέκυψαν από πειράματα διάχυσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπήρξε αρκετά καλή συμφωνία στις τιμές της εξίσωσης και του πειράματος της επιταχυνόμενης διείσδυσης.

Αντιθέτως, προέκυψαν σημαντικές διαφορές στις τιμές του συντελεστή διείσδυσης που προέκυπτε από την εξίσωση και του συντελεστή διάχυσης από τα πειράματα διάχυσης. Αυτές οι διαφορές αποδόθηκαν στο φαινόμενο της δέσμευσης των χλωριόντων, στην παρουσία ή απουσία αντίστοιχα του ηλεκτρικού πεδίου και σε πιθανά λάθη κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η απλοποιημένη εξίσωση για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των χλωριόντων, σε μη-σταθερές συνθήκες.

Οι **E. Bastidas-Arteaga et al.**, το 2011 διερεύνησαν τη διείσδυση των χλωριόντων σε μη κορεσμένο σκυρόδεμα λαμβάνοντας υπόψη τους και τη μεταγωγή (convection) ως μηχανισμό διείσδυσης των χλωριόντων. Πιο συγκεκριμένα, δημιούργησαν ένα σύνθετο αριθμητικό μοντέλο όπου οι εξισώσεις επιλύονται με σύζευξη των μεθόδων των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών. Το μοντέλο περιλαμβάνει την ικανότητα δέσμευσης των χλωριόντων, το χρονικά μεταβαλλόμενο χαρακτήρα της θερμοκρασίας, της υγρασίας και της επιφανειακής συγκέντρωσης των χλωριόντων, τη γήρανση του σκυροδέματος και τη ροή των χλωριόντων σε μη κορεσμένες συνθήκες. Ουσιαστικά, εξετάζει την αλληλεπίδραση της διείσδυσης των χλωριόντων σε μη κορεσμένο σκυρόδεμα με τη μεταφορά της υγρασίας και τη διάδοση της θερμότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη όρου μεταγωγής στο νόμο του **Fick** για τη διάχυση και την επίλυση τριών μερικών διαφορικών εξισώσεων όπου κάθε μία αντιπροσωπεύει ένα από τα παραπάνω φαινόμενα. Με αυτόν τον τρόπο, πραγματοποιήθηκε η λύση του μοντέλου και έγινε σύγκριση με τη συνάρτηση σφάλματος του δεύτερου νόμου του **Fick** για τη διάχυση. Τέλος, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όταν λαμβάνονται υπόψη οι τυχαίες μεταβολές της υγρασίας, της θερμοκρασίας, της επιφανειακής συγκέντρωσης και της μεταγωγής ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης μειώνεται. Αντίθετα, όταν συμπεριλαμβάνεται η δέσμευση των χλωριόντων, ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης αυξάνεται. Για αυτούς τους λόγους θεωρείται σημαντική η συνεκτίμηση αυτών των παραγόντων κατά τη μελέτη της διείσδυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα. .

Οι **M.M.R. Boutz et al.**, το 2008 μελέτησαν τη διείσδυση των χλωριόντων σε κατασκευές από σκυρόδεμα εκτεθειμένες σε διάφορους κλιματολογικούς παράγοντες. Ανέπτυξαν ένα ανώτερο μοντέλο για την προσομοίωση της μεταφοράς της υγρασίας στο σκυρόδεμα και έλαβαν υπόψη τη δέσμευση των χλωριόντων. Ειδικότερα, χώρισαν το μοντέλο τους σε δύο περιοχές, μία κορεσμένη και μία μη-κορεσμένη και επέβαλαν συνοριακή συνθήκη απορρόφησης υγρασίας στο βρεγμένο άκρο. Ακόμη, χρησιμοποίησαν την ισόθερμη τύπου **Langmuir** για τη συσχέτιση των ελεύθερων και των δεσμευμένων χλωριόντων. Επίσης, πραγματοποίησαν δοκιμές για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και προσομοιώθηκαν με αυτό το μοντέλο δύο διαφορετικοί τρόποι επισκευής δοκών γέφυρων από σκυρόδεμα στον Περσικό Κόλπο. Ο πρώτος τρόπος ήταν η

αντικατάσταση του επιβαρυσμένου με χλωριόντα σκυροδέματος με νέο σκυρόδεμα 20 mm και ο δεύτερος τρόπος ήταν η εφαρμογή υδρόφοβης επικάλυψης. Αποδείχτηκε ότι το μοντέλο υπολογίζει ακριβέστερα τη διείσδυση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα σε σχέση με άλλα υπάρχοντα μοντέλα. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο είναι ικανό να προβλέψει το αποτέλεσμα των ενεργειών συντήρησης στη διάρκεια ζωής της κατασκευής.

Οι **Tang Luping, Joost Gulikers**, το 2007 ανέπτυξαν ένα βελτιωμένο μαθηματικό μοντέλο για την διείσδυση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα χρησιμοποιώντας συντελεστή διάχυσης εξαρτώμενο από το χρόνο για τη λύση του δεύτερου νόμου του **Fick** για τη διάχυση. Εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της συνάρτησης σφάλματος και του βελτιωμένου μοντέλου για τη διείσδυση των χλωριόντων με την πάροδο του χρόνου. Διαπιστώθηκε ότι το βελτιωμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλο χρόνο έκθεσης χωρίς σημαντικά σφάλματα, ενώ είναι ακατάλληλο για μικρό χρόνο έκθεσης γιατί υπερεκτιμά τον φαινόμενο συντελεστή διάχυσης. Ακόμη, εξακριβώθηκαν σφάλματα στην εκτίμηση της διάρκειας ζωής και του πάχους της επικάλυψης του σκυροδέματος λόγω της εφαρμογής υπεραπλοποιημένων μοντέλων που βασίζονται στη συνάρτηση σφάλματος. Τέλος, προέκυψε ότι τόσο το βελτιωμένο μοντέλο όσο και το υπεραπλοποιημένο προβλέπουν αρκετά καλά τη διείσδυση των χλωριόντων σε 10 χρόνια έκθεσης αλλά το υπεραπλοποιημένο υποεκτιμά τη διείσδυση των χλωριόντων σε σκυρόδεμα με ιπτάμενη τέφρα.

Οι **M. Kalimur Rahman<sup>1</sup> et al.**, το 2012 διερεύνησαν την επιρροή της βλάβης που προκαλείται από θλιπτική τάση στη μεταφορά των χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Πραγματοποίησαν πειραματικές δοκιμές σύμφωνα με το πρότυπο NT BUILD 492 σε 12 κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 75 mm και ύψους 150 mm. Τα δοκίμια μετά τη συντήρησή τους για 56 ημέρες υποβλήθηκαν σε 4 επίπεδα θλιπτικής τάσης για να προκληθεί βλάβη και μετά αποφορτίστηκαν. Τα 4 επίπεδα θλιπτικής τάσης που εφαρμόστηκαν αντιστοιχούσαν στο 0%, 40%, 75% και 90% αντίστοιχα της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων. Ακόμη, πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση του πειράματος του προτύπου NT BUILD 492 με το λογισμικό Comsol Multiphysics. Χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση των Nernst-Planck για την προσομοίωση της ροής των χλωριόντων σε πλήρως κορεσμένα δοκίμια σκυροδέματος εφαρμοζόμενη σε ένα φαινομενικώς φθαρμένο μοντέλο σε συνδυασμό με μία ισόθερμη γραμμικής δέσμευσης χλωριόντων. Αποδείχτηκε ότι υπήρξε αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν σημαντική αύξηση του συντελεστή διάχυσης με την αύξηση της επιβαλλόμενης θλιπτικής τάσης. Τέλος, στα αναλυτικά αποτελέσματα εξακριβώθηκε ότι η δέσμευση

των χλωριόντων αντιτίθεται στη μεταφορά τους και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή διάχυσης σε βαθμό περίπου 20%.

Οι **Long-yuan Li et al.**, το 2015 ανέπτυξαν ένα νέο μοντέλο μεταφοράς για την περιγραφή της διείσδυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Το μοντέλο εφαρμόστηκε για να εξετάσει πως διεισδύουν τα ιόντα χλωρίου σε σκυρόδεμα με διαφορετικό πορώδες λόγω διαφορετικού μεγέθους πόρων και πως τα ιόντα χλωρίου διαφορετικών πόρων αλληλεπιδρούν μεταξύ τους όταν βρίσκονται υπό την εφαρμογή ηλεκτρικού δυναμικού. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης επαληθεύτηκαν με πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από δοκιμές επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων (RCM Tests). Η ανάλυση έδειξε ότι η χρήση δύο πορωδών λόγω διαφορετικού μεγέθους πόρου συνοδευόμενη από τη θεώρηση της ανταλλαγής ιόντων μεταξύ των δύο πορωδών, αντιπροσωπεύει την επιρροή της κατανομής μεγέθους των πόρων στη μεταφορά των ιόντων χλωρίου σε ένα πορώδες υλικό. Ακόμη, αποδείχτηκε ότι η δέσμευση των ιόντων χλωρίου είναι ιδιαίτερα σημαντική στη μεταφορά των χλωριόντων. Επίσης, η χρήση συνοριακών συνθηκών στην εκτεθειμένη επιφάνεια, ροής ιόντων αντί για συγκέντρωσης ιόντων, αντιπροσωπεύει καλύτερα τη μείωση της συγκέντρωσης στην εν λόγω επιφάνεια. Τέλος, η σύγκριση με τα πειράματα έδειξε καλή συμφωνία στα αποτελέσματα και ενίσχυσε την εγκυρότητα του μοντέλου.

Οι **J.J Zheng, X. Z. Zhou**, το 2007 διερεύνησαν τη διείσδυση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μέσω της προσομοίωσης του σκυροδέματος ως ένα υλικό τριών φάσεων σε μεσοσκοπικό επίπεδο. Ειδικότερα, ανέπτυξαν ένα σύνθετο μοντέλο τριών φάσεων για την πρόβλεψη του συντελεστή διάχυσης. Στο μοντέλο αυτό, το εσωτερικό μέρος είναι το αδρανές, το εξωτερικό μέρος είναι η πάστα του τσιμέντου και ο σύνθετος κύκλος ανάμεσα τους είναι η διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη του σκυροδέματος. Αγνοήθηκε η επιρροή της θέσης και της κατανομής των αδρανών στο σκυρόδεμα στην τιμή του συντελεστή διάχυσης και τα αδρανή θεωρήθηκαν αδιαπέρατα. Μετά την επίλυση του μοντέλου εξήχθη μία κλειστή σχέση για το συντελεστή διάχυσης και επαληθεύτηκε το μοντέλο με πειραματικά αποτελέσματα. Εφαρμόστηκε διαφορά δυναμικού για την επιτάχυνση της διείσδυσης των ιόντων χλωρίου σε σκυρόδεμα που περιείχε τσιμέντο Portland, υπερπλαστικοποιητή, ιπτάμενη τέφρα, αδρανή μέγιστου κόκκου 9.5 mm και κλάσματος όγκου που κυμαίνονταν από 0 έως 0.4. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο συντελεστής διάχυσης των χλωριόντων μειώνεται με αύξηση του κλάσματος των αδρανών. Αντίθετα, ο συντελεστής διάχυσης αυξάνεται με αύξηση του πάχους της μεταβατικής ζώνης. Ακόμη, αποδείχτηκε ότι η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών έχει σημαντική επιρροή στο συντελεστή διάχυσης. Τέλος, η σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα απέδειξε την εγκυρότητα του μοντέλου.



Οι **L. Marsavina et al.**, το 2009 μελέτησαν την επιρροή των ρωγμών στη διείσδυση των χλωριόντων. Πραγματοποίησαν πειραματικές δοκιμές σύμφωνα με το πρότυπο NT BUILD 492 σε 3 διαφορετικούς τύπους σκυροδέματος. Ο πρώτος αποτελούταν από τσιμέντο CEM III/B 32.5 SR με σκωρία υψικαμίνου και οι υπόλοιποι ήταν με τσιμέντο Portland CEM I 52.5 N. Για κάθε σύνθεση παρασκευάστηκαν 20 δοκίμια για τη δοκιμή διείσδυσης των χλωριόντων. Ακόμη, πριν τη δοκιμή δημιουργήθηκαν τεχνητές ρωγμές στα δοκίμια πάχους 0.2, 0.3, 0.5 mm και βάθους 5, 10, 15, 20 mm. Επίσης, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του φαινομένου με το λογισμικό COSMOS/FFE όπου δημιουργήθηκαν οι γεωμετρίες των δοκιμίων με τις ρωγμές. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι υπήρξε υψηλότερη διείσδυση στην άκρη της εγκοπής σε σχέση με τα δοκίμια χωρίς τεχνητές ρωγμές και ότι το βάθος διείσδυσης αυξάνεται με αύξηση του βάθους της εγκοπής, ενώ για το πλάτος της εγκοπής δεν προέκυψαν ασφαλή συμπεράσματα. Τέλος, η προσομοίωση με το λογισμικό των πεπερασμένων στοιχείων, αποδείχτηκε ότι αποτελεί μία καλή επιλογή για την προσομοίωση της διείσδυσης των χλωριόντων σε σκυρόδεμα, καθώς υπήρξε καλή συμφωνία πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων.

Οι **Kyle Stanish, Michael Thomas**, το 2003 ανέπτυξαν μία αναλυτική διαδικασία για τον καθορισμό της τιμής του στιγμιαίου συντελεστή διάχυσης από μία συνάρτηση του χρόνου χρησιμοποιώντας δεδομένα από δοκιμές διάχυσης σύμφωνα με το πρότυπο NT BUILD 443. Αναδείχθηκε ότι ο σωστός καθορισμός της τιμής του συντελεστή διάχυσης καθώς και το πώς αλλάζει με το χρόνο, παίζουν σημαντικό ρόλο για το σχεδιασμό της διάρκειας ζωής μιας κατασκευής από σκυρόδεμα. Έγινε σύγκριση του μέσου και του στιγμιαίου συντελεστή διάχυσης και αποδείχτηκε ότι ο μέσος είναι συνάρτηση τόσο των ιδιοτήτων του υλικού όσο και των συνθηκών της δοκιμής, ενώ ο στιγμιαίος μόνο των ιδιοτήτων του υλικού. Έτσι, η παραδοχή χρήσης του μέσου συντελεστή διάχυσης έναντι του στιγμιαίου, λαμβάνει υπόψη την επίδραση των περιβαλλοντικών παραμέτρων και αποτελεί πιο έγκυρη προσέγγιση. Πραγματοποιήθηκε μία επαναληπτική διαδικασία 6 βημάτων για 4-5 φορές για τον καθορισμό των παραμέτρων διάχυσης και τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν αρκετά καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα στην πρόβλεψη των προφίλ των χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

Οι **Christina Frazão et al.**, το 2015 διερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες και τους δείκτες ανθεκτικότητας ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα, αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος σε σύγκριση με άοπλο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα ίδιας 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 ιδιότητες ανθεκτικότητας που μετρήθηκαν 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. Εκτιμήθηκε ότι δεν ήταν εφικτός ο προσδιορισμός του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων γιατί η δοκιμή προκαλούσε συσσώρευση χλωριόντων στις χαλύβδινες ίνες και διάβρωση των ινών. 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 πιο εφικτός αλλά τα αποτελέσματα στα δύο σκυροδέματα ήταν παρόμοια.

Οι **Eleftherios K. Anastasiou et al.**, το 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/m<sup>3</sup>, 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.

Οι **Michelle Nokken et al.**, το 2006 μελέτησαν τη μεταβολή της διάχυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα με το χρόνο εξαιτίας της δέσμευσης χλωριόντων και της ενυδάτωσης. Παρουσιάστηκαν δεδομένα από 3 εργασίες όπου τα δοκίμια ήταν συνεχώς εκτεθειμένα σε διαλύματα χλωρίου για χρονικά διαστήματα που κυμαίνονταν από 28 ημέρες έως 3 χρόνια. Τα προφίλ των χλωριόντων από τις τρεις αυτές εργασίες για διάφορους χρόνους χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό τιμών διάχυσης με την εξίσωση του Crank. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο συντελεστής διάχυσης μειώνεται σε σκυροδέματα που περιέχουν ποζολάνες λόγω της συνεχιζόμενης ποζολανικής τους δράσης. Ακόμη, υπολογίστηκε ο εξαρτώμενος από το χρόνο συντελεστής μείωσης  $m$  με τρεις διαφορετικές μεθόδους. Αποδείχτηκε ότι ο υπολογισμένος από μία μέθοδο συντελεστής μείωσης  $m$  μπορεί να μετατραπεί σε συντελεστή μείωσης άλλης μεθόδου αρκεί να είναι γνωστή η ηλικία κατά την αρχική έκθεση και ο χρόνος έκθεσης του δοκιμίου. Τέλος, τονίστηκε ότι είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γνωρίζουμε πως προέκυψαν οι συντελεστές διάχυσης και μείωσης κατά την εφαρμογή τους σε αναλύσεις, για να αποφεύγονται λάθος εκτιμήσεις για το σχεδιασμό της διάρκειας ζωής.

Οι **Sang-Soon Park et al.**, το 2012 πρότειναν ένα αναλυτικό μοντέλο για τον υπολογισμό της διείσδυσης των χλωριόντων σε μερικώς κορεσμένο και ρηγματωμένο σκυρόδεμα. Τονίστηκε ότι ο δεύτερος νόμος του Fick για τη διάχυση έχει περιορισμένη εφαρμογή σε καταστάσεις μερικώς κορεσμένου σκυροδέματος. Ακόμη, αποδείχτηκε ότι η ύπαρξη ρωγμών στην επιφάνεια σε μερικώς κορεσμένη κατάσταση οδηγεί σε επιπρόσθετη διάχυση λόγω διαφοράς συγκέντρωσης και διείσδυση λόγω υδροστατικής πίεσης και πρέπει να αξιολογείται κατά τον υπολογισμό της διείσδυσης των χλωριόντων. Εξετάστηκε η διείσδυση των χλωριόντων σε ένα αντιπροσωπευτικό στοιχείο όγκου (REV), σύμφωνα με τη δοκιμή της επιταχυνόμενης διείσδυσης των χλωριόντων (RCPT) για δοκίμια με διαφορετικό πλάτος ρωγμής και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής ψεκασμού άλατος (SST). Τα αναλυτικά αποτελέσματα έδειξαν καλή συμφωνία με τα πειραματικά και αποδείχτηκε ότι ο συντελεστής διάχυσης των χλωριόντων αυξάνεται με το πλάτος ρωγμής. Ακόμη, προέκυψε αύξηση του συντελεστή με την αύξηση του πλάτους της ρωγμής και εξήχθη μία κλειστή σχέση που συσχετίζει τα δύο μεγέθη. Τέλος, η προτεινόμενη τεχνική ανάλυσης είναι κατάλληλη για πλάτη ρωγμών μεγαλύτερα των 0.2 mm.

Ο **Nabil M. Al-Akhras**, το 2006 μελέτησε την επίδραση του μετακαολίνης στην βελτίωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε θειικά. Το σκυρόδεμα περιείχε τσιμέντο Portland , θρυμματισμένο ασβεστόλιθο, φυσική πυριτική άμμο, υπερπλαστικοποιητή, αερακτικό και μετακαολίνη σε ποσοστά αντικατάστασης 5%, 10%, 15% κατά βάρος τσιμέντου. Συνολικά παρασκευάστηκαν 12 μίγματα και εξετάστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ACI 211.1-91, τέσσερα ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου με μετακαολίνη (0%, 5%, 10%, 15% κατά βάρος), δύο λόγοι νερό προς συνδετικό μέσο (0.5 και 0.6), η περιεκτικότητα σε αέρα (1,5% και 5% κατά βάρος), η επίδραση της περιόδου ωρίμανσης (3, 7, 28 ημέρες) και οι συνθήκες συντήρησης (υγρή και αυτόκλειστη). Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν περιλάμβαναν τον προσδιορισμό της αντίστασης σε θειικά μέσω βύθισης των δοκιμίων σε διαλύματα περιεκτικότητας 5% θειούχου νατρίου για περίοδο 18 μηνών. Από τις δοκιμές προέκυψε ότι η αντικατάσταση του τσιμέντου από μετακαολίνη οδηγούσε σε αύξηση της αντίστασης σε θειικά. Επίσης, αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης είχε ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη αντίσταση σε θειικά. Ακόμη, παρατηρήθηκε ότι η αντίσταση σε θειικά ήταν βελτιωμένη όταν ο λόγος νερού προς συνδετικό μέσο ήταν 0.5 αντί για 0.6. Το ίδιο συνέβη όταν ο τύπος σκλήρυνσης ήταν αυτόκλειστος και όχι υγρός. Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν όσον αφορά την περιεκτικότητα σε αέρα, όπου παρουσιάστηκε ισχυρότερη αντίσταση σε θειικά για περιεκτικότητα 5% αντί για 1,5%. Τέλος, η περίοδος ωρίμανσης είχε ασήμαντη επιρροή στην αντίσταση σε θειικά.

Οι **Kosmas K. Sideris** και **Nikolaos S. Anagnostopoulos**, το 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) 42.5 N, θρυμματισμένα πυριτικά χονδρόκοκκα αδρανή, θρυμματισμένη ασβεστολιθική και ποταμίσια πυριτική άμμο διαφορετικής προέλευσης και διαβάθμισης, ασβεστολιθικό filler και μίγμα πολυμερούς καρβοξυλικού αιθέρα για τη μείωση του νερού. Παρασκευάστηκαν 8 διαφορετικά μίγματα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος κατηγορίας 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 αντίσταση 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 **A.A. Ramezani pour**, **H. Bahrami Jovein**, το 2012 διερεύνησαν την επιρροή του μετακαολίνης ως συμπληρωματικό υλικό του τσιμέντου στην αντοχή και στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα αποτελούνταν από ASTM C 150 τύπου 1 τσιμέντο Portland, μετακαολίνη σε ποσοστά αντικατάστασης 0%, 10%, 12,5% και 15% κατά βάρος, τοπική φυσική άμμο και θρυμματισμένο ασβεστόλιθο ως αδρανή, 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 συνδετικό μέσο (0,3, 0,4 και 0,5) διατηρώντας σταθερή ολική περιεκτικότητα συνδετικού μέσου  $400 \text{ kg/m}^3$ . Οι ιδιότητες ανθεκτικότητας που μετρήθηκαν ήταν η διείσδυση του νερού, η τριχοειδής απορρόφηση, η αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων, η συγκέντρωση άλατος 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 στον συντελεστή τριχοειδής απορρόφησης

του νερού ανεξαρτήτως της τιμής του λόγου νερού προς συνδετικό μέσο και της ηλικίας του δοκιμίου. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη μετακαολίνη βελτιώνει 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 **A.P. Singh, Dharendra Singhal**, το 2011 σε μελέτη τους, σύγκριναν τις μεταβολές της υδατοπερατότητας ινοπλισμένου σκυροδέματος για διάφορα ποσοστά ινών. Το σκυρόδεμα το οποίο χρησιμοποίησαν περιείχε τσιμέντο Portland αντοχής 43 MPa και 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, 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 **Cengiz Duran Atiş, Okan Karahan**, το 2009 διερεύνησαν τις ιδιότητες σκυροδέματος ιπτάμενης τέφρας οπλισμένου με ίνες χάλυβα. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από τσιμέντο Portland CEM I 42,5 R, ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου 0%, 15%, 30% κατά βάρος, φυσικά ποταμίσις αδρανής (άμμος και χαλίκια), χαλύβδινες ίνες με γαντζωτά άκρα σε κλάσματα όγκου ινών 0%, 0.25%, 0.5%, 1% και 1.5% και πλαστικοποιητή καρβοξυλικού τύπου. Συνολικά δημιουργήθηκαν 15 μίγματα και εξετάστηκαν 3 ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα (0%, 15%, 30% κατά βάρος), 5 ποσοστά ινών χάλυβα (0%, 0.25%, 0.5%, 1% και 1.5% κατά όγκο). 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 της περιεκτικότητας σε ιπτάμενη τέφρα και του ποσοστού των χαλύβδινων ινών. 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 ταυτόχρονη παρουσία ιπτάμενης τέφρας και ινών είτε με την προσθήκη καθενός ξεχωριστά. Τέλος, παρατηρήθηκε αύξηση της αντίστασης σε ψύξη-απόψυξη με την προσθήκη των ινών.

Οι **Okan Karahan, Cengiz Duran Atiş**, το 2011 μελέτησαν τις ιδιότητες ανθεκτικότητας σκυροδέματος ιπτάμενης τέφρας με ίνες πολυπροπυλενίου. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από τσιμέντο Portland CEM I 42,5 R, 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 κλάσματα όγκου ινών 0%, 0.05%, 0.1%, 0.2% και πλαστικοποιητή καρβοξυλικού τύπου. Παρασκευάστηκαν 12 συνθέσεις και εξετάστηκαν 3 ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα (0%, 15%, 30% κατά βάρος), 4 ποσοστά ινών πολυπροπυλενίου (0%, 0.05%, 0.1%, 0.2 % κατά όγκο). 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 ινών πολυπροπυλενίου. Επίσης, αποδείχτηκε ότι η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας επηρέασε τον συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης περισσότερο από την προσθήκη των ινών. Ακόμη, προέκυψε μείωση της συστολής ξήρανσης είτε με ταυτόχρονη παρουσία ιπτάμενης τέφρας και ινών είτε με την προσθήκη καθενός ξεχωριστά. Οι θετικές αλληλεπιδράσεις της ιπτάμενης τέφρας με τις ίνες πολυπροπυλενίου οδήγησαν στις χαμηλότερες τιμές της συστολής ξήρανσης. Τέλος, παρατηρήθηκε αύξηση της αντίστασης σε ψύξη-απόψυξη τόσο με την προσθήκη των ινών όσο και με την προσθήκη της ιπτάμενης τέφρας, με την ιπτάμενη τέφρα να έχει την μεγαλύτερη επιρροή στην αύξηση.

Οι **E.Badogiannis, S.Tsivilis**, το 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 καολίνης και ένας του εμπορίου με μεγάλη καθαρότητα. 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 υδράσβεστο νερό θερμοκρασίας 20° C. Η δοκιμή για την μέτρηση της αντίστασης σε διείσδυση χλωριόντων έγινε με το πρότυπο AASHTO T277 και έδειξε μείωση της διάχυσης των χλωριόντων με την προσθήκη μετακαολίνης. 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.

Οι **K.A.Gruber et al.**, το 2001 διερεύνησαν την αύξηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος με χρήση υψηλής δραστηριότητας μετακαολίνη. Μετρήθηκε η αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων και η επέκταση λόγω αλκαλοπυριτικής 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 βελτιωμένη συμπεριφορά του σκυροδέματος και για τα δύο ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου από μετακαολίνη με μείωση του λόγου νερού προς τσιμέντο. Για τη δοκιμή φθοράς λόγω αλκαλιοπυριτικής αντίδρασης χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι αδρανών (πυριτικός ασβεστόλιθος και γκρι αργιλίτης) και η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM C1293 και CSA A23.2-14A. Τα πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 75 mm \* 75 mm \* 300 mm χυτεύτηκαν με τσιμέντο υψηλής αλκαλικότητας, στο οποίο η αλκαλικότητα αυξήθηκε με τη χρήση NaOH. 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 φθορά και ότι το ποσοστό αντικατάστασης 10% ήταν το βέλτιστο για τη διακοπή της.

## 5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 5.1 Εισαγωγή

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 του ανοικτού πορώδους (β) της διαπερατότητας σε χλωριόντα μέσω του υπολογισμού (i) του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων (πρότυπο μοντέλο) και (ii) 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) και της διάχυσης και διείσδυσης χλωριόντων. Η πειραματική διερεύνηση έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του της Σχολής ΠΜ Ε.Μ.Π. και στο Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Τα πειραματικά αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για το αναλυτικό μοντέλο προσομοίωσης, τόσο της επιταχυνόμενης διείσδυσης όσο και της διάχυσης των χλωριόντων, που περιγράφονται στο κεφάλαιο 6.

### 5.2 Υλικά, Συνθέσεις σκυροδέματος, Δοκίμια και Ιδιότητες

Παράχθηκαν οχτώ (8) συνθέσεις και συγκεκριμένα, μία (1) σύνθεση αναφοράς με άοπλο σκυρόδεμα NC, μία (1) σύνθεση με πρόσθετο υλικό τον μετακαολίνη NC-MC, δύο (2) συνθέσεις με μεταλλικές ίνες (SF) 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 ΣΙΔΕΝΟΡ Α.Ε. και για τις ανάγκες της μεταπτυχιακής εργασίας κωδικοποιούνται ως SF. Οι συνθετικές ίνες, με ποσοστό 0.45% κ.ο. και 0.9 % κ.ο, που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: α) τύπου μακροίνες SikaFiber PP940-50 της εταιρείας SIKA Α.Ε. και για τις ανάγκες της μεταπτυχιακής εργασίας κωδικοποιούνται ως (NCPPF) και β) τύπου Concrìx ES της



εταιρίας BRUGGCONTECAG CH-8590 Romanshorn και για τις ανάγκες της μεταπτυχιακής εργασίας κωδικοποιούνται ως (NCPCX). Στον **Πίνακα 2** δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε ίνας και στην **Εικόνα 2** απεικονίζονται οι ίνες. Τέλος, σε μία σύνθεση χρησιμοποιήθηκε μετακαολίνης σαν πρόσθετο υλικό σκυροδέματος.

**Πίνακας 2:** Κύρια χαρακτηριστικά ινών

<b>ΚΩΔΙΚΟΣ</b>	<b>SF</b>	<b>NCPFF</b>	<b>NCPCX</b>
<b>ΧΑΡΑΚΤ. ΕΙΔΟΣ</b>	Χαλύβδινες ίνες	Συνθετικές ίνες	Συνθετικές ίνες
<b>ΥΛΙΚΟ</b>	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
<b>ΜΟΡΦΗ</b>	Ευθύγραμμες με αγκύρια στα άκρα, κυματοειδείς	Μακροΐνες, μονότητες, συνεχούς παραμόρφωσης (κυματοειδούς μορφής), χρώματος γκρι	Μακροΐνες, ευθύγραμμες με αυλακώσεις κατά μήκος και αγκύρια στις δύο άκρες, κατασκευαστικές, χρώματος κίτρινου
<b>ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ</b>	Μήκος 30 mm και Διάμετρος 0.75 mm	Μήκος 50 mm και Διάμετρος 0.75 mm	Μήκος 50 mm, Διάμετρος 0.75 mm και Περίμετρος 1-0.57 mm
<b>ΛΟΓΟΣ ΜΟΡΦΗΣ 1/d</b>	40	66.67	100
<b>ΠΡΟΤΥΠΑ</b>	ASTM A820 TYPE 1, EN 10016	ASTM C/1116/C 1116M TYPE III Fiber Reinforced Concrete, EN 14889-2:2006 Ίνες για Σκυροδέμα, Μέρος 2: Τάξη II (Φέρουν σήμανση CE)	EN 14889-2

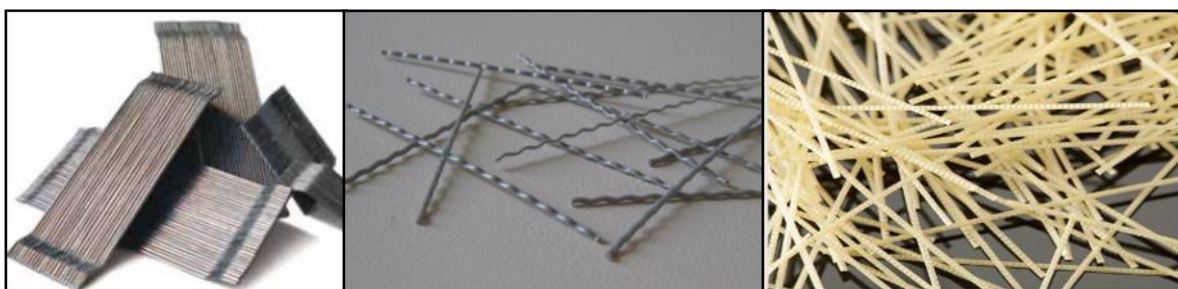
Για κάθε σύνθεση και με σκοπό την εκτέλεση των δοκιμών που αφορούσαν τις ιδιότητες ανθεκτικότητας παρασκευάστηκαν τρία (3) κυβικά δοκίμια διαστάσεων 100x100x100 mm, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του ανοικτού πορώδους, ενώ τα κυλινδρικά, ύψους H=200 mm με διάμετρο D=100 mm, χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό 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 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 συγκρίσιμα μεταξύ τους. Στους **Πίνακες 3 και 4**, αναγράφονται αναλυτικά οι συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν.

**Πίνακας 3:** Οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν

Αριθμός Μίγματος	Κωδικός Σύνθεσης	Τύπος Ίνας	% Ίνα κ.β. τσιμέντου	Αντικατάσταση Τσιμέντου
Σ1	NCPPF-0.9	Συνθετική	0.90	-
Σ2	NCPPF-0.45	Συνθετική	0.45	-
Σ3	NC	-	-	-
Σ4	NC-MC	-	-	Μετακαολίνης
Σ5	SF-1	Χαλύβδινη	1.00	-
Σ6	SF-0.5	Χαλύβδινη	0.50	-
Σ7	NCPCX-0.9	Συνθετική	0.90	-
Σ8	NCPCX-0.45	Συνθετική	0.45	-



**Εικόνα 2:** Οι τύποι των ινών που χρησιμοποιήθηκαν. Στα αριστερά, ίνες τύπου INOMIX, στη μέση ίνες τύπου SikaFiber PP940-50 και στα δεξιά ίνες τύπου Concrifix ES.

**Πίνακας 4:** Ποσότητες των υλικών ανά σύνθεση (kg/m<sup>3</sup>)

Κωδικός Σύνθεσης	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6	Σ7	Σ8
<b>ΥΛΙΚΑ/ΣΥΝΘΕΣΗ</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>							
<b>ΤΣΙΜΕΝΤΟ</b>	400	400	400	360	400	400	400	400
<b>ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗΣ</b>	-	-	-	40	-	-	-	-
<b>ΑΔΡΑΝΗ 0-4 mm</b>	900	900	900	900	900	900	900	900
<b>ΑΔΡΑΝΗ 8-16 mm</b>	700	700	700	700	700	700	700	700
<b>ΕΝΕΡΓΟ ΝΕΡΟ</b>	200	200	200	180	200	200	200	200
<b>ΙΝΕΣ</b>	9	4.50	-	-	80	40	9	4.50
<b>ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΗΣ</b>	1.33	0.90	0.87	3.25	1.00	1.06	1.33	0.90

Στον **Πίνακα 5** παρουσιάζονται οι ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος για όλες τις συνθέσεις όπως προέκυψαν πειραματικά στη **Μεταπτυχιακή Εργασία των Κομνηνού και Οικονόμου (2015)**.

**Πίνακας 5:** Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος όλων των συνθέσεων.

ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ	NC	NC-MC	SF-0.5	SF-1.0	PFS 0.5	PFS 1.0	PFC 0.5	PFC 1.0
<b>Κάθιση (mm)</b>	150	130	145	165	145	100	140	100
<b>Περιεκτικότητα σε Αέρα (%)</b>	1.8	2.4	2.5	3.6	2.2	1.6	2.1	2.2
<b>Μοναδιαίο Βάρος (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2318	2303	2342	2326	2302	2305	2295	2293

Στον **Πίνακα 6** παρουσιάζονται οι θλιπτικές αντοχές των κυβικών δοκιμίων 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 6:** Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμίων σε ηλικία 7 και 28 ημερών, μέση τιμή (Μ.Τ) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%) της κάθε σύνθεσης.

Δοκίμιο	7 Ημέρες			28 Ημέρες		
	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Μ.Τ. (MPa)	cv(%)	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Μ.Τ. (MPa)	cv(%)
NC A	41.80	41.80	1.91	48.30	49.67	2.39
NC B	41.00			50.40		
NC C	42.60			50.30		
NC-MC A	56.00	55.27	2.62	63.90	64.57	3.08
NC-MC B	56.20			66.80		
NC-MC C	53.60			63.00		
SF-0.5 A	38.40	38.17	0.84	47.40	46.20	2.60
SF-0.5 B	37.80			45.00		
SF-0.5 C	38.30			46.20		
SF-1.0 A	39.40	39.60	2.56	47.70	47.47	0.44
SF-1.0 B	40.70			47.40		
SF-1.0 C	38.70			47.30		
NCPPF-0.5 A	40.90	41.63	2.45	48.50	51.23	4.62
NCPPF-0.5 B	41.20			52.60		
NCPPF-0.5 C	42.80			52.60		
NCPPF-1.0 A	44.50	43.30	2.40	51.70	50.93	1.34
NCPPF-1.0 B	42.70			50.70		
NCPPF-1.0 C	42.70			50.40		
NCPCX-0.5 A	38.60	38.37	1.53	45.70	46.97	2.89
NCPCX-0.5 B	38.80			46.80		
NCPCX-0.5 C	37.70			48.40		
NCPCX-1.0 A	41.60	41.07	1.23	48.90	48.57	2.94
NCPCX-1.0 B	41.00			49.80		
NCPCX-1.0 C	40.60			47.00		

Στον **Πίνακα 7** παρουσιάζονται οι θλιπτικές αντοχές των κυλινδρικών δοκιμίων 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 7:** Θλιπτική αντοχή κυλινδρικών δοκιμίων σε ηλικία 28 ημερών, μέση τιμή (Μ.Τ) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%) της κάθε σύνθεσης.

Δοκίμιο	Θλιπτική Αντοχή	Μ.Τ.	cv(%)
NC A	38.85	38.71	0.36
NC B	38.57		
NC-MC A	46.47	48.83	7.28
NC-MC B	52.91		
NC-MC C	47.10	36.13	10.75
SF-0.5 A	38.55		
SF-0.5 B	38.20		
SF-0.5 C	31.65	37.00	4.98
SF-1.0 A	36.81		
SF-1.0 B	35.26		
SF-1.0 C	38.93	38.53	8.17
NCPPF-0.5 A	35.39		
NCPPF-0.5 B	41.68	39.95	3.80
NCPPF-1.0 A	38.43		
NCPPF-1.0 B	41.47	41.12	12.08
NCPCX-0.5 A	35.39		
NCPCX-0.5 B	44.11		
NCPCX-0.5 C	43.86	42.96	3.54
NCPCX-1.0 A	43.33		
NCPCX-1.0 B	41.28		
NCPCX-1.0 C	44.25		

### 5.3 Ανοικτό πορώδες

Το ανοικτό πορώδες (open porosity),  $p$  (%), 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,  $M_{imm}$ ) και (ii) σε αέρα (μάζα κορεσμένου δοκιμίου,  $M_{sat}$ ). 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 ξηράνσεως (πυριαντήριο) υπό σταθερή θερμοκρασία 105 °C μέχρι σταθεροποίησης του βάρους του. Μετά την ξήρανσή του, το δοκίμιο ζυγίστηκε ξανά σε αέρα (μάζα ξηρού δοκιμίου,  $M_{dry}$ ). Από τον συνδυασμό των τριών μαζών προέκυψε η τιμή του ανοικτού πορώδους, σύμφωνα με τις κάτωθι Εξισώσεις, όπου  $p_w$  το ειδικό

βάρος του νερού σε συνήθη θερμοκρασία (18 °C), το οποίο για τους υπολογισμούς ελήφθη ίσο με 1000 kg.m<sup>3</sup>.

Όγκος ανοιχτών πόρων	$(M_{\text{sat}}-M_{\text{dry}})/\rho_w$
Φαινόμενος όγκος	$(M_{\text{sat}}-M_{\text{imm}})/\rho_w$
Φαινόμενη πυκνότητα	$\rho_w M_{\text{dry}}/(M_{\text{sat}}-M_{\text{imm}})$
Ανοικτό πορώδες	$100(M_{\text{sat}}-M_{\text{dry}})/(M_{\text{sat}}-M_{\text{imm}})$

#### 5.4 Αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων

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

- Προσδιορισμός συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης (non-steady state chloride migration coefficient),  $D_{\text{nssm}}$  ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s), σύμφωνα με την πρότυπη επιταχυνόμενη μέθοδο **NordTest Build 492 (1999)**.
- Προσδιορισμός συντελεστή διάχυσης χλωριόντων, (chloride diffusion coefficient)  $D_{\text{sm}}$  ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/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.

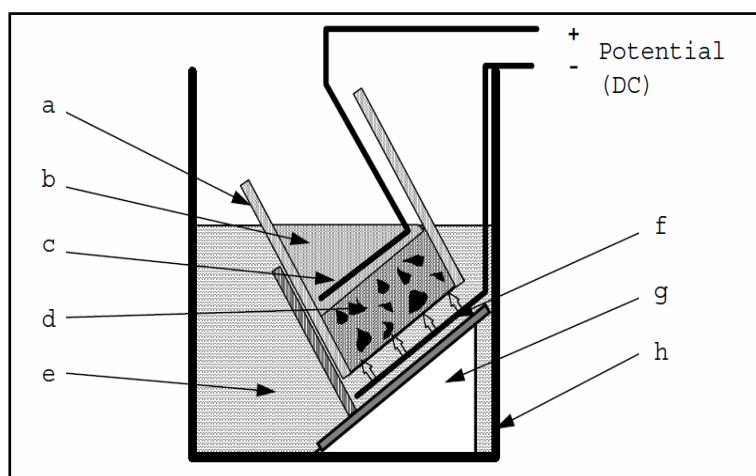
##### 5.4.1 Συντελεστής Διείσδυσης χλωριόντων - NT BUILD 492

Για την εκτίμηση της ικανότητας του σκυροδέματος να ανθίσταται στα χλωριόντα 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 ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Λόγω έλειψης της κατάλληλης διάταξης τα δοκίμια εν συνεχεία δεν συντηρήθηκαν σε αντλία κενού (vacuum treatment) πριν τον έλεγχό τους. Όπως

αναφέρουν οι [Stanish et al. (2007)] η συντήρηση σε υδροξείδιου 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 σκυρόδεμα, 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 8**.



**Σχήμα 7:** Η διάταξη της δοκιμής NT492

Όπου:

- a-μανίκι από λάστιχο
- b-διάλυμα ανόδου
- c-ηλεκτρόδιο ανόδου
- d-δοκίμιο
- e-διάλυμα καθόδου
- f-ηλεκτρόδιο καθόδου

- g-βάση στήριξης
- h-πλαστικό δοχείο

Επίσης, στη διάταξη της δοκιμής ανήκουν και διάφορες συσκευές του κυκλώματος (**Εικόνα 4**):

- Μετασχηματιστής απομόνωσης
- Ασφάλεια
- Αμπερόμετρο
- Διακόπτης
- Ρυθμιζόμενος αυτομετασχηματιστής
- Γέφυρα ανόρθωσης
- Πυκνωτής
- Πολύμετρο
- Κύκλωμα αποφόρτισης

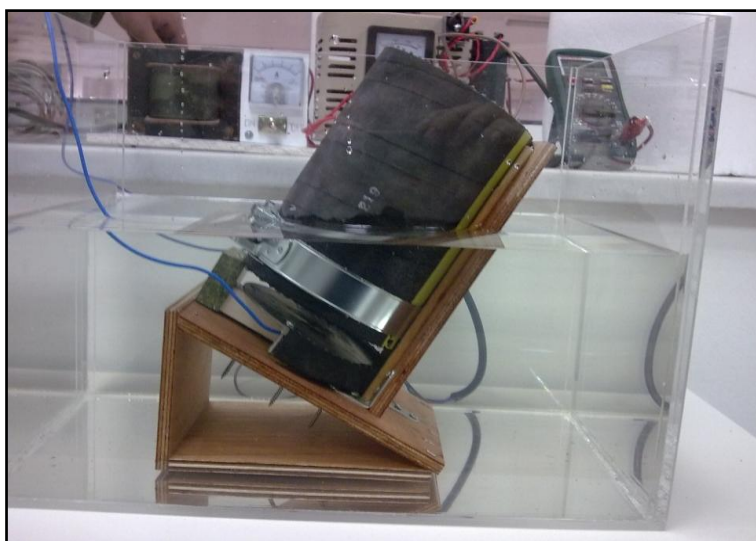
Ένα τμήμα κυλινδρικού δοκιμίου ( $D = 100$  mm,  $L = 50$  mm) παραμένει, μέσω κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων, υπό σταθερή διαφορά δυναμικού, από 10 έως 60 V dc (συνηθέστερα μεταξύ 10 και 30 V dc), για μία περίοδο μεταξύ 6 έως 96 ωρών (συνηθέστερα 24 ωρών). Η επιλογή της διαφορά δυναμικού, και της διάρκειας της δοκιμής γίνεται με βάση το αρχικώς διερχόμενο ρεύμα για δοκιμαστική διαφορά δυναμικού ίση με 30 V dc **Πίνακας 8**.

**Πίνακας 8:** Διαφορά δυναμικού και διάρκεια δοκιμής [πηγή: NordTest Build 492 (1999)]

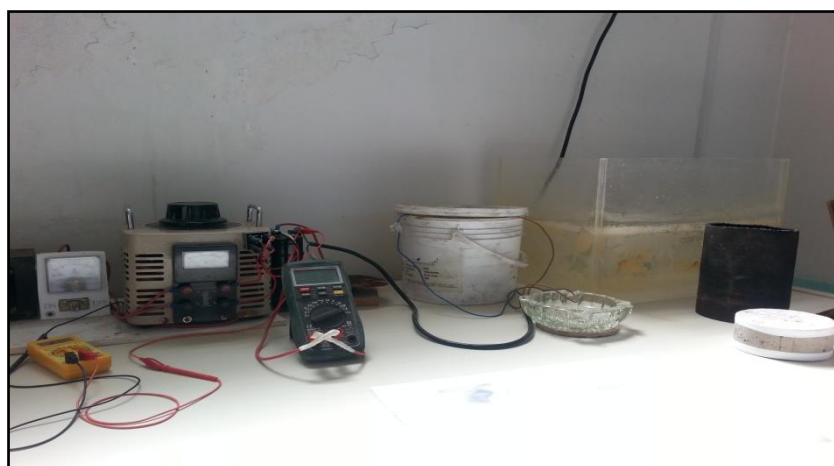
Αρχικό ρεύμα υπό σταθερή διαφορά δυναμικού 30 V dc (mA)	Επιβαλλόμενη διαφορά δυναμικού (κατόπιν ρύθμισης) (V)	Πιθανό νέο ρεύμα $I_o$ (mA)	Διάρκεια δοκιμής t (h)
$I_o < 5$	60	$I_o < 10$	96
$5 \leq I_o < 10$	60	$10 \leq I_o < 20$	48
$10 \leq I_o < 15$	60	$20 \leq I_o < 30$	24
$15 \leq I_o < 20$	50	$25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



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 στις **Εικόνες 3 και 4**.



**Εικόνα 3:** Η διάταξη της δοκιμής NT492.



**Εικόνα 4:** Οι διάφορες συσκευές του κυκλώματος.

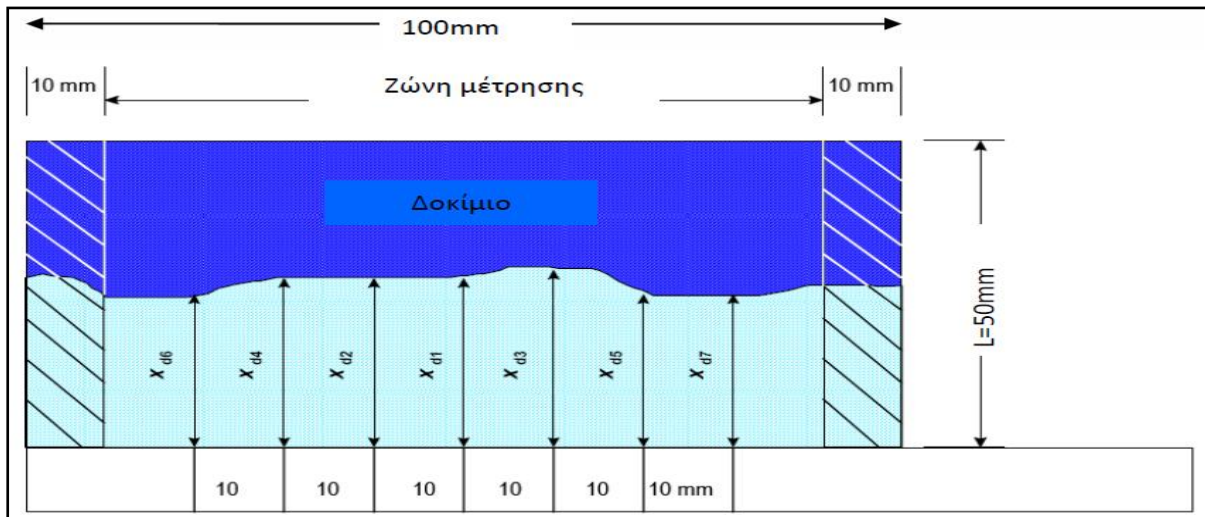


**Εικόνα 5:** Τυπικό προφίλ δοκιμίου σκυροδέματος κατόπιν δοκιμής αντίστασης σε χλωριόντα, σύμφωνα με το πρότυπο [NordTest Build 492 (1999)] και ψεκάσμού με νιτρικό άργυρο.

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 9** και στην **Εικόνα 10** παρουσιάζονται, αντιστοίχως, ο τρόπος μέτρησης του βάθους διείσδυσης και μερικά δοκίμια, μετά τον ψεκάσμό.



**Εικόνα 6:** Θραύση του δοκιμίου σε διάρρηξη.



Σχήμα 8: Υπόδειγμα μέτρησης βάθους διείσδυσης χλωριόντων



Εικόνα 7: Δοκίμια με χρωματισμένες επιφάνειες για τη μέτρηση του βάθους διείσδυσης χλωριόντων.

Η μέση τιμή των παραπάνω μετρήσεων,  $x_d$  (mm) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων,  $D_{nssm}$  ( $\times 10^{-12}$  m/s<sup>2</sup>). Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται οι Εξισώσεις (1) έως (3) που ακολουθούν:

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - a\sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad (2)$$

$$a = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad (3)$$

Όπου:

$D_{nssm}$  : συντελεστής διάχυσης χλωριόντων ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )

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

$U$  : απόλυτη τιμή της εφαρμοσμένης τάσης (V)

$T$  : μέση τιμή αρχικής και τελικής θερμοκρασίας του διαλύματος ανόδου ( $^{\circ}\text{C}$ )

$L$  : πάχος δοκιμίου (mm)

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

$t$  : διάρκεια του πειράματος (h)

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

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

Ο Πίνακας 9 περιλαμβάνει τον χαρακτηρισμό του σκυροδέματος ανάλογα με τον εκτιμημένο συντελεστή διάχυσης  $D_{nssm}$ , σύμφωνα με τον Tang (1996). Άλλες παρεμφερείς ταξινομήσεις μπορούν να βρεθούν στην βιβλιογραφία [Nilsson et all (1998)] κατά τον [Gjorv (2009)], Πίνακας 10. Στους Πίνακες 9,10 αναφέρονται συμπληρωματικώς και οι πρότυποι αγγλικοί περιγραφικοί όροι που χρησιμοποιούνται για την τον χαρακτηρισμό του σκυροδέματος.

**Πίνακας 9:** 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	Μέτρια	Moderate
2-8	Καλή	Good
<2	Πολύ Καλή	Very good

**Πίνακας 10:** Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση του στη διείσδυση χλωριόντων, για διάφορες τιμές του συντελεστή διάχυσης [Nilsson et all (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

#### 5.4.2 Συντελεστής Διάχυσης χλωριόντων - NT 443

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.

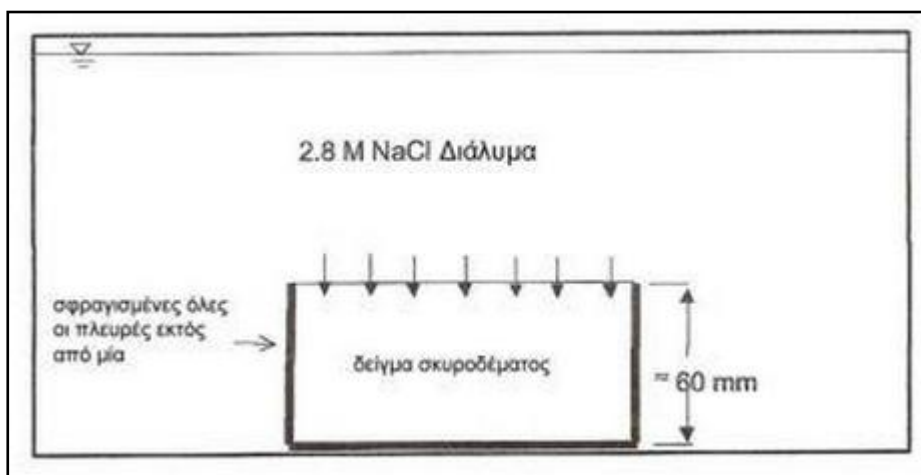
Για τη μόνωση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο στεγανοποιητικό υλικό (Dryproof Masonry waterproofer). Η επίστρωση των δοκιμών έγινε σε δυο στάδια, διαφοράς 2 h περίπου. Σε κάθε στάδιο χρησιμοποιήθηκαν περίπου 1 kg στεγανοποιητικού υλικού.. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε διάλυμα NaCl 16,5% το οποίο παρασκευάστηκε αναμειγνύοντας 11,1 L απιονισμένο νερό και 1870 g αλατιού σύμφωνα με το πρότυπο **Nordest Test Build 443**.

Ελήφθη μέριμνα ώστε ο λόγος του όγκου του νερού προς τον όγκο των δοκιμίων 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 δοκιμίων. Μετά το πέρας των έξι πρώτων εβδομάδων, το διάλυμα ανανεώθηκε διατηρώντας την ίδια περιεκτικότητα του υδατικού διαλύματος σε *NaCl* (16.5% w/w).

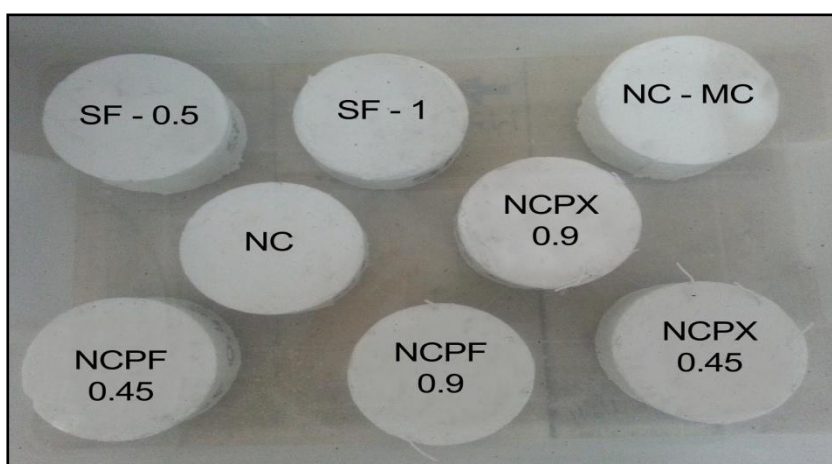
Μετά τη συμπλήρωση 50 ημερών από την τοποθέτηση των δοκιμίων στο διάλυμα *NaCl* τα δοκίμια αφέθηκαν να στεγνώσουν στο περιβάλλον, προκειμένου να προσδιοριστεί η συγκέντρωση των συνολικών χλωριόντων που περιέχονταν σε αυτά. Κατόπιν, υπολογίστηκαν οι συντελεστές διάχυσης όλων των δοκιμίων με προσαρμογή του προφίλ διάχυσης των χλωριόντων στο 2<sup>ο</sup> νόμο του **Fick**. Για το σκοπό αυτό τα δοκίμια με την χρήση ειδικού δράπανου «Profile Grinder»<sup>1</sup> 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**<sup>2</sup>. Πριν τη λήψη των δειγμάτων σκόνης, οι επιφάνειες των δοκιμίων τρίφτηκαν με γυαλόχαρτο για την απομάκρυνση εναπομένουσας ποσότητας αλατιού. Στο τέλος, συγκεντρώθηκαν τα δείγματα των δοκιμίων από κάθε βάθος και έγινε γενική ανάλυση για τον προσδιορισμό των συνολικών χλωριόντων.

<sup>1</sup> 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 (360ο), του μοχλού αντιστοιχεί σε 2mm βάθος. Σε κάθε βήμα ο μοχλός μετακινείται κατά 0.5 mm (90ο) έως ότου επιτευχθεί το επιθυμητό βάθος. Η σκόνη για κάθε βάθος προσαύξησης συλλέγεται σε πλαστικό σακουλάκι που συνδέεται με την πλάκα λείανσης.

<sup>2</sup> Άλεση και συλλογή σκυροδέματος σε σκόνη από λεπτές στρώσεις σκυροδέματος ( $\leq 2\text{mm}$ )



Σχήμα 9: Η διάταξη της δοκιμής Nordtest 443.



Εικόνα 8: Η διάταξη της δοκιμής Nordtest 443.

#### 5.4.2.1 Προσδιορισμός συνολικών χλωριόντων

Αρχικά, ζυγίστηκε η μάζα των δειγμάτων με ακρίβεια  $\pm 0.0001$  g. Η ποσότητα αυτή κινούνταν στην περιοχή 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 δείκτη 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 χρωματισμού του και (γ) μέχρι το διάλυμα να χρωματιστεί ερυθρόφαιο **Εικόνα 9**. Σημειώθηκε ο όγκος  $V_{NH_4SCN}$ , που απαιτήθηκε για να επέλθει η αλλαγή χρώματος στο διάλυμα.



**Εικόνα 9** : Χρωματικές αλλαγές του διαλύματος μέχρι να χρωματιστεί ερυθροφαιό, κατά την διάρκεια της τιτλοδότησης σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-2

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

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

όπου:

$\Delta V$  :  $V_{AgNO_3} - V_{NH_4SCN}$  (ml)

$AB_{Cl}$  : 35.545 (g)

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

#### 5.4.2.2 Προσδιορισμός συντελεστή διάχυσης χλωριόντων

Μετά τον προσδιορισμό των συνολικών και των ελεύθερων χλωριόντων που διείδυσαν στο εσωτερικό των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε προσαρμογή των προφίλ των χλωριόντων στο 2<sup>ο</sup> 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:

$$J_{A,z} = -D_{A,z} J \frac{dc_A}{dz}$$

Ο συντελεστής αναλογίας  $D_{AB}$  ονομάζεται συντελεστής διάχυσης του συστατικού A στο συστατικό B. Στο σύστημα μονάδων S.I. έχει διαστάσεις  $m^2s^{-1}$ , τις ίδιες με το κινηματικό ιξώδες  $\nu$  και το συντελεστή θερμικής διαχυτότητας  $\alpha$ . Η **Εξίσωση** 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:

$$J_{A,z} = -cD_{A,B} J \frac{dx_A}{dz}$$

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:

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

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:

- αρχική συνθήκη:  $C_{(x,0)} = x > 0$
- οριακή συνθήκη:  $C_{(x,0)} = x > 0, t \geq 0$

η λύση του προβλήματος οριακών τιμών είναι:

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

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)

## 6 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ COMSOL MULTIPHYSICS 4.4

### 6.1 Εισαγωγή

Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μοντελοποίηση και προσομοίωση της διάχυσης και της διείσδυσης των χλωριόντων υπό την εφαρμογή διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού σε δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος και η συσχέτιση των αναλυτικών με των πειραματικών αποτελεσμάτων. Ειδικότερα, υπολογίστηκαν οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων σε διάφορα βάθη και εκτιμήθηκε η επιρροή διαφόρων τύπων και ποσοστών ινών στο φαινόμενο της διάχυσης των χλωριόντων. Επιμέρους στόχος είναι η κατά το δυνατόν απεξάρτηση των βασικών παραμέτρων προσομοίωσης από τις πειραματικές τιμές, όπως π.χ. της επιφανειακή συγκέντρωση  $c_s$ .

Για τη προτυποποίηση του προβλήματος προσδιορισμού της συγκέντρωσης των χλωριόντων σε διάφορα βάθη χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης COMSOL MULTIPHYSICS 4.4. Το COMSOL MULTIPHYSICS είναι ένα ισχυρό διαδραστικό περιβάλλον για τη μοντελοποίηση και την επίλυση όλων των ειδών επιστημονικών και τεχνικών προβλημάτων που περιγράφονται από μερικές διαφορικές εξισώσεις (ΜΔΕ). Οι ΜΔΕ αποτελούν τη βάση για πολλούς από τους νόμους της επιστήμης και της φυσικής και παρέχουν τη βάση για τη μοντελοποίηση ευρέος φάσματος φαινομένων τους. Κατά την επίλυση των ΜΔΕ, το COMSOL MULTIPHYSICS χρησιμοποιεί την ιδιαίτερα επιτυχημένη και διαδεδομένη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Σημαντικό πλεονέκτημα του COMSOL είναι η δυνατότητα αλληλεπίδρασής του με το MATLAB και άλλες εργαλειακές για πλήθος υλικών και μια μεγάλη ποικιλία προγραμμάτων. Χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων ρευστομηχανικής, μεταφοράς θερμότητας, χημικής μηχανικής, ηλεκτρομαγνητισμού, μαγνητικών πεδίων, δομικής μηχανικής και διαφόρων άλλων ειδών. Το COMSOL MULTIPHYSICS αποτελείται από διάφορα υποπρογράμματα το κάθε ένα εκ των οποίων αποτελεί ένα αυτοτελές μοντέλο με εξισώσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος όταν αυτό οριστεί πλήρως από το χρήστη. Για να οριστεί πλήρως ένα πρόβλημα (αφού σχεδιαστεί η προς μελέτη γεωμετρία του στην επιφάνεια εργασίας) πρέπει για το κάθε μοντέλο να οριστούν οι εξισώσεις χωρίου, οι συνοριακές συνθήκες, οι αρχικές τιμές και οι σταθερές που περιέχονται στις εξισώσεις κάθε μοντέλου.

## 6.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος (δηλ. μέθοδος υπολογισμού με χρήση  $H/Y$ ) για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων.

Η διαδεδομένη χρήση της μεθόδου οφείλεται στο γεγονός ότι παρουσιάζεται ως ενιαίο εργαλείο για τη στατική και δυναμική γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους, για οποιοδήποτε γεωμετρικό σχήμα, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από τρία στάδια:

1. Το πρώτο στάδιο συνίσταται στην υποδιαίρεση και διάσπαση της κατασκευής σε ένα, ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια, μικρότερο ή μεγαλύτερο πλήθος στοιχείων πεπερασμένων διαστάσεων (elements), τα οποία εφάπτονται μεταξύ τους χωρίς να αφήνουν κανένα κενό και συνδέονται με τους κόμβους (nodes) που βρίσκονται στα σύνορα των στοιχείων. Το σύνολο αυτό των στοιχείων ονομάζεται δίκτυο ή πλέγμα (mesh) και η προσομοίωση του φορέα με το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων ονομάζεται διακριτοποίηση του φορέα (discretization).
2. Στο δεύτερο βήμα, μετά τη διακριτοποίηση της κατασκευής, θεωρείται κάθε τέτοιο πεπερασμένο στοιχείο ξεχωριστά και για το λόγο αυτό αποσπάται από το σύμπλεγμα των στοιχείων που συνθέτουν την κατασκευή.
3. Αφού μελετηθεί και καθορισθεί η μηχανική συμπεριφορά κάθε στοιχείου ακολουθεί το τρίτο βήμα της διαδικασίας επίλυσης που είναι η σύνθεση της κατασκευής από τα επιμέρους πεπερασμένα στοιχεία, η κατάλληλη δηλαδή επανασύνδεση των στοιχείων προς σχηματισμό της διακριτοποιημένης κατασκευής. Η μηχανική συμπεριφορά κάθε στοιχείου καθορίζεται συνήθως από τη σχέση ανάμεσα στις δυνάμεις και τις μετατοπίσεις στους κόμβους του.

Ωστόσο, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι προσεγγιστική εφόσον ο αρχικός συνεχής φορέας (κατασκευή), για να μπορέσει να επιλυθεί, μετατρέπεται σε ένα ασυνεχές σύμπλεγμα πεπερασμένων στοιχείων. Όσο περισσότερα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του ασυνεχούς μοντέλου υπολογισμού του αρχικού φορέα, όσο πιο ακριβές δηλαδή είναι το μηχανικό/υπολογιστικό προσομοίωμα του πραγματικού συστήματος, τόσο ακριβέστερα μπορούν να θεωρηθούν γενικώς τα αποτελέσματα (εφόσον βέβαια και η μηχανική συμπεριφορά των χρησιμοποιούμενων στοιχείων περιγράφεται ικανοποιητικά).

## Γενικές αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το στοιχείο είναι η βασική δομική μονάδα με προκαθορισμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας. Το πλέγμα προσομοιάζει με ιστό αράχνης, στον οποίο από κάθε κόμβο εκτείνεται ένα στοιχείο πλέγματος σε κάθε γειτονικό κόμβο. Το πλέγμα προγραμματίζεται ώστε να περιέχει τις δομικές ιδιότητες και τις ιδιότητες υλικού που καθορίζουν με ποιο τρόπο θα συμπεριφερθεί μία κατασκευή υπό ορισμένες συνθήκες φόρτισης. Οι κόμβοι τοποθετούνται με ορισμένη πυκνότητα εντός του υλικού ανάλογα με τα επίπεδα τάσης που αναπτύσσονται σε κάθε συγκεκριμένη περιοχή. Περιοχές με μεγαλύτερη αναμενόμενη τάση θα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα κόμβων από αυτές που η αναμενόμενη τάση είναι μικρότερη. Η επιλογή της κατάλληλης πυκνότητας πεπερασμένων στοιχείων του πλέγματος (mesh density) είναι σημαντικός παράγοντας επιτυχίας του μοντέλου, προκειμένου να επιλυθεί το υπό μελέτη πρόβλημα.

### **6.3 Μοντελοποίηση με το COMSOL MULTIPHYSICS 4.4 της διάχυσης των χλωριόντων**

Στο αρχικό παράθυρο του COMSOL επιλέχθηκε το παράθυρο που αντιστοιχεί στην επιλογή **Model Wizard** έναντι του παραθύρου της επιλογής **Blank Model**. Στη συνέχεια, ακολούθησε ο ορισμός της διάστασης του χώρου του μοντέλου. Επιλέχθηκε η ανάλυση να πραγματοποιηθεί σε περιβάλλον δύο διαστάσεων με αξονική συμμετρία (**2-D Axisymmetric**), όπου πρακτικά αντικαθίστανται οι τρεις διαστάσεις του δείγματος με δύο για λόγους ευκολίας σχεδίασης.

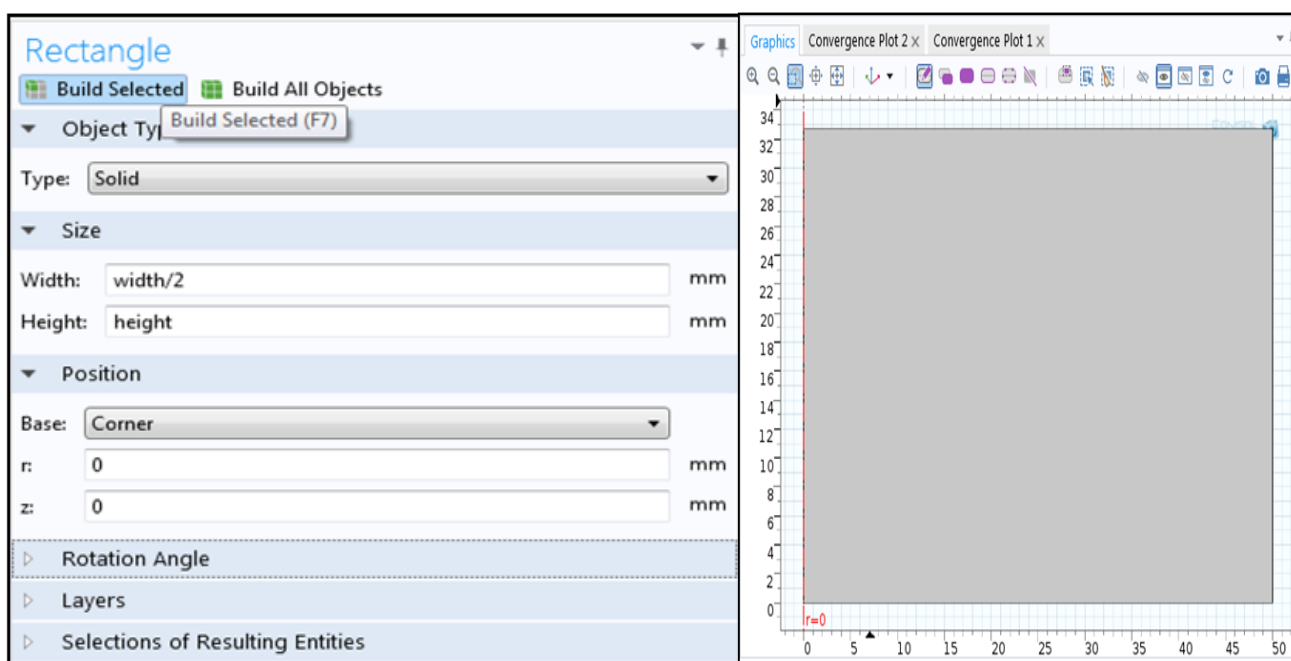
Έπειτα, ορίστηκε το φυσικό φαινόμενο που μας ενδιαφέρει μεταξύ πολυάριθμων φαινομένων που παρέχονται από το COMSOL. Στην παρούσα εργασία πρόκειται για μεταφορά ρευστού που αφορά στη διάχυση χλωριόντων σε σκυρόδεμα και για αυτό επιλέχθηκε από την κατηγορία **Chemical Species Transport** (μεταφορά χημικών ουσιών) το μοντέλο **Transport of Diluted Species** (μεταφορά διαλυμένων ουσιών). Το συγκεκριμένο μοντέλο παρέχει ένα προκαθορισμένο περιβάλλον προσομοίωσης για τη μελέτη της εξέλιξης των χημικών ειδών που μεταφέρονται με διάχυση και συναγωγή και βασίζεται στο νόμο του **Fick**, που διέπει τη διάχυση των διαλυμένων ουσιών, των αραιών μιγμάτων και των διαλυμάτων. Το μοντέλο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ενός αραιωμένου διαλύματος σε ένα διαλύτη. Αφού επιλέχθηκε το μοντέλο ορίστηκε ότι υπάρχει ένα διάλυμα όπου η συγκέντρωση του αποτελεί εξαρτημένη μεταβλητή. Τέλος, η ανάλυση ορίστηκε ως χρονικά εξαρτώμενη (**Time Dependent**) γιατί δεν είναι αμετάβλητη ως προς το χρόνο.

Με την ολοκλήρωση του ορισμού του περιβάλλοντος του μοντέλου, ακολούθησε η τοποθέτηση των παραμέτρων για την αντιπροσώπευση οποιουδήποτε μέρους του μοντέλου ή φυσικού μεγέθους. Ως παράμετροι τοποθετήθηκαν η διάμετρος (**width**), το ύψος (**height**) του κυλινδρικού δοκιμίου και ο συντελεστής διάχυσης του σκυροδέματος (**D**) που προέκυψε πειραματικά για κάθε σύνθεση που μελετήθηκε.

**Πίνακας 11:** Οι παράμετροι που ορίστηκαν για τις 8 συνθέσεις.

ΣΥΝΘΕΣΗ	NC	NC-MC	NCPFF-0.9	NCPFF-0.45	SF-1	SF-0.5	NCPCX-0.9	NCPCX-0.45
<b>ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (mm)</b>	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>ΥΨΟΣ (mm)</b>	32.70	30.70	26.43	30.66	25.33	34.33	30.67	27.00
<b>ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ (m<sup>2</sup>/s)x10<sup>-11</sup></b>	4.14	0.55	11.14	3.82	2.47	3.25	2.60	5.75

Το επόμενο βήμα στη διαδικασία μοντελοποίησης είναι η δημιουργία ή η εισαγωγή της γεωμετρίας του μοντέλου. Εφόσον επιλέχθηκε αξονική συμμετρία (**2-D Axisymmetric**) ως διάσταση χώρου οι 3 διαστάσεις αντικαταστάθηκαν με 2. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το κυλινδρικό δοκίμιο μπορεί να προσομοιωθεί ως ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο 2 διαστάσεων, με ύψος ίσο με το ύψος του δοκιμίου και πλάτος ίσο με το μισό της διαμέτρου του δοκιμίου λόγω της συμμετρίας.



**Εικόνα 10:** Στα αριστερά η εισαγωγή των διαστάσεων και των συντεταγμένων θέσης του ορθογώνιου και η εντολή Build Selected και στα δεξιά ο κানাβος με τη γεωμετρία που δημιουργήθηκε για τη σύνθεση NC.

Ακολούθησε η επιλογή των χρησιμοποιούμενων υλικών και η αντιστοίχιση τους στα κατάλληλα αντικείμενα, τομείς ή όρια της γεωμετρίας. Το υλικό που μας ενδιαφέρει για την ανάλυση μας είναι μόνο το σκυρόδεμα καθώς η συμπερίληψη των χλωριόντων στο μοντέλο έγινε με έμμεσο τρόπο μέσω του συντελεστή διάχυσης και της επιφανειακής συγκέντρωσης. Μετά, προστέθηκαν οι φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος οι οποίες δεν ήταν στην προεπιλογή του προγράμματος. Ειδικότερα, προστέθηκε ένας συντελεστής διάχυσης και αντιστοιχίστηκε με την παράμετρο που αφορούσε το συντελεστή διάχυσης των χλωριόντων που προέκυψε πειραματικά και τοποθετήθηκε προηγουμένως. Ο συντελεστής διάχυσης θεωρήθηκε σταθερός για την ανάλυση. Η θεώρηση αυτή αποτελεί δυσμενέστερη περίπτωση από την πραγματική (και συνεπώς επιτυγχάνεται σχεδιασμός κατασκευών υπέρ της ασφαλείας), καθώς, όπως αναφέρθηκε στα κεφάλαια 1 και 2, αυτός δύναται να μειώνεται με το χρόνο. Με την ίδια διαδικασία προστέθηκε και το πορώδες ως βασική ιδιότητα του σκυροδέματος και ορίστηκαν σε κάθε σύνθεση οι τιμές που προέκυψαν πειραματικά για αυτό. Ακόμη, τοποθετήθηκαν τιμές για την πυκνότητα για κάθε σύνθεση, όπως αυτές προέκυψαν πειραματικά από τη Μεταπτυχιακή Εργασία των **Κομνηνού και Οικονόμου (2015)**. Στο τέλος αυτού του βήματος και αφού προστέθηκαν οι ιδιότητες, αντιστοιχίστηκε το σκυρόδεμα σε ολόκληρη τη γεωμετρία

**Πίνακας 12:** Οι ιδιότητες που ορίστηκαν για τις 8 συνθέσεις.

ΣΥΝΘΕΣΗ	NC	NC-MC	NCPFF-0.9	NCPFF-0.45	SF-1	SF-0.5	NCPCX-0.9	NCPCX-0.45
<b>ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>								
<b>ΠΟΡΩΔΕΣ (%)</b>	15.42	14.92	15.75	15.55	14.64	14.87	16.07	15.96
<b>ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2318	2303	2305	2302	2326	2342	2293	2295
<b>ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ (m<sup>2</sup>/s)x10<sup>-11</sup></b>	4.14	0.55	11.14	3.82	2.47	3.25	2.60	5.75

### Διάχυση Χλωριόντων-Εξισώσεις Μοντέλου (Transport of Diluted Species))

Οι εξισώσεις που ορίζονται στο μοντέλο διάχυσης από το πρόγραμμα δίνονται παρακάτω:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \cdot \nabla \cdot c_i) = 0$$

και

$$N_i = -D_i \cdot \nabla \cdot c_i$$

Όπου:

- $D_i$ : ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης
- $c_i$ : η περιεχόμενη συγκέντρωση
- $N_i$ : η ροή μάζας

### Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες εφαρμόζονται στις γεωμετρικές οντότητες διαχωρίζοντας τις περιοχές αυτές τόσο από το απροσδιόριστο εξωτερικό περιβάλλον όσο και από εσωτερικές οντότητες της ίδιας διάστασης. Στα εσωτερικά όρια ισχύει η συνέχεια η οποία καθιστά το πεδίο της φυσικής συνεχές.

Οι συνοριακές συνθήκες εισάχθηκαν στη γεωμετρία αφορούν:

- την αριστερή πλευρά: όριο 1
- την κάτω πλευρά: όριο 2
- την πάνω πλευρά: όριο 3
- τη δεξιά πλευρά: όριο 4

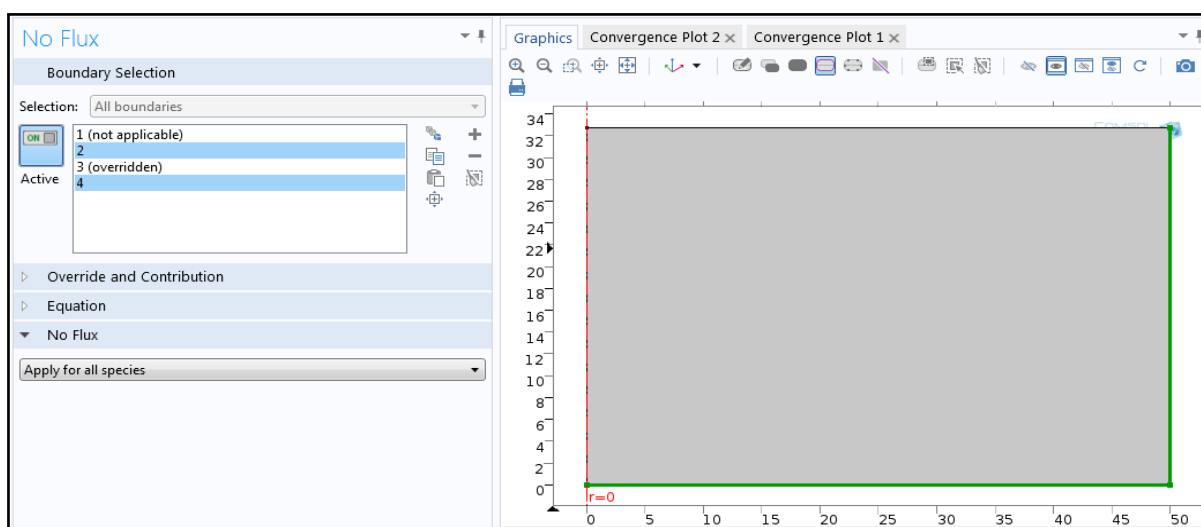
Αρχικά αξίζει να τονισθεί ότι η αξονική συμμετρία αντιστοιχήθηκε αυτόματα από το Comsol στο όριο 1. Δηλαδή στο όριο αυτό δε ήταν δυνατό να εισαχθεί κάποια άλλη συνοριακή συνθήκη. Στη συνέχεια, επελέγη **No Flux**, δηλαδή καμία ροή, για τα όρια 2 και 4 καθώς η μεταφορά μάζας θεωρείται ότι πραγματοποιείται μόνο από την πάνω πλευρά. Αυτό συμβαίνει γιατί οι υπόλοιπες πλευρές του δοκιμίου είναι μονωμένες και εκτεθειμένη είναι μόνο η πάνω επιφάνεια του. Ως αρχική τιμή (**Initial Value**) της συγκέντρωσης των χλωριόντων σε όλο το δοκίμιο του σκυροδέματος τοποθετήθηκε η τιμή 0 gr Cl/gr C.

Στην παρούσα εργασία ορίστηκε ως συνοριακή συνθήκη η συγκέντρωση σε χλωριόντα στην επιφάνεια σε μονάδες μέτρησης gr Cl/gr C, η οποία επιβλήθηκε στο πάνω όριο της γεωμετρίας τη στιγμή έναρξης του χρόνου ανάλυσης. Αυτή η τιμή προέκυψε από την επίλυση του 2<sup>ου</sup> νόμου του **Fick** για τη διάχυση, με βάση τις τιμές συγκεντρώσεων για διάφορα βάθη και το συντελεστή διάχυσης που προέκυψαν πειραματικά και αποτελεί τον τρόπο με τον οποίο εισήχθησαν τα χλωριόντα στο μοντέλο.

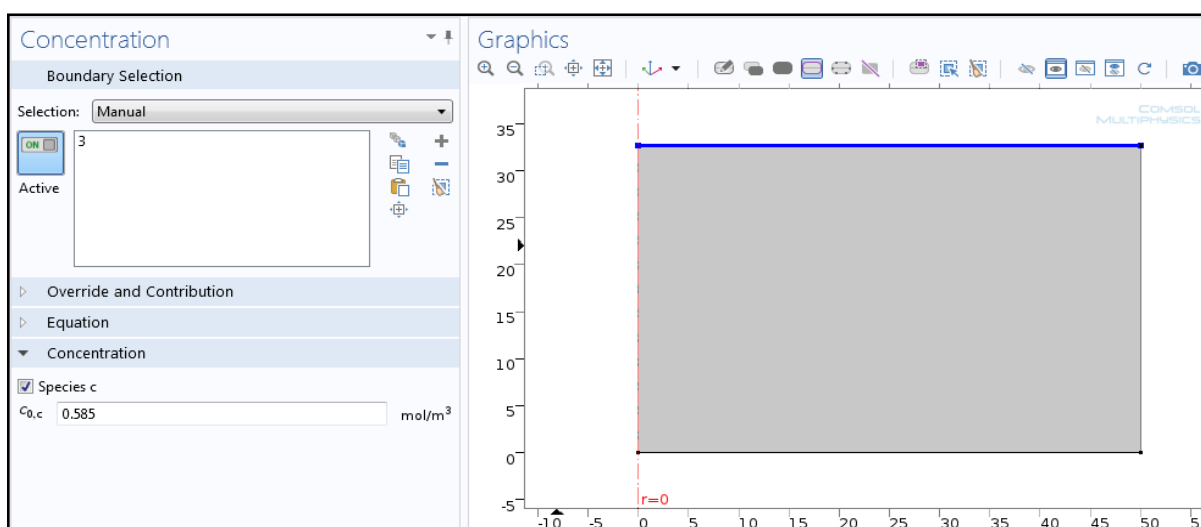
Παρότι στο Comsol η συγκέντρωση φαίνεται να είναι σε μονάδες mol/m<sup>3</sup> ενώ η τιμή που εισάγεται σε gr Cl/gr C, όλες οι υπόλοιπες μονάδες απαλοίζονται και συνεπώς, η συγκέντρωση που προκύπτει ως αποτέλεσμα έχει μονάδα μέτρησης τη μονάδα μέτρησης της επιφανειακής συγκέντρωσης, δηλαδή gr Cl/gr C.

**Πίνακας 13:** Οι συγκεντρώσεις στην επιφάνεια που τέθηκαν ως συνοριακές συνθήκες για κάθε σύνθεση.

ΣΥΝΘΕΣΗ	NC	NC-MC	NCPPF-0.9	NCPPF-0.45	SF-1	SF-0.5	NCPCX-0.9	NCPCX-0.45
<b>ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (gr Cl/gr C)</b>	0.59	0.05	0.51	0.60	0.74	0.62	0.70	0.51



**Εικόνα 11:** Η συνοριακή συνθήκη καμίας ροής στην δεξιά και στην κάτω πλευρά.



**Εικόνα 12:** Η συνοριακή συνθήκη για την επιφανειακή συγκέντρωση στην πάνω πλευρά για τη σύνθεση NC.



## **Βήματα ανάλυσης**

Πριν την επίλυση του μοντέλου, προηγήθηκε η δημιουργία των βημάτων ανάλυσης που πραγματοποιήθηκαν στο μοντέλο. Στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκε ένα βήμα ανάλυσης και ορίστηκαν η μονάδα μέτρησης του χρόνου καθώς και η αρχή, το τέλος και το μέγεθος προσαύξησης της ανάλυσης (βήμα της ανάλυσης). Ορίστηκε το δευτερόλεπτο ως μονάδα μέτρησης του χρόνου, η χρονική στιγμή 0 ως αρχή της ανάλυσης και η χρονική στιγμή 4320000 δευτερόλεπτα (που αντιστοιχεί σε 50 μέρες) ως το τέλος της ανάλυσης. Ως μέγεθος προσαύξησης ορίστηκε η τιμή 86400 δευτερόλεπτα που αντιστοιχεί σε μία ημέρα και σημαίνει ότι χρόνος πήγαινε κατευθείαν από την αρχή στη μία μέρα, μετά στη 2<sup>η</sup> κ.ο.κ.

### **6.4 Μοντελοποίηση της επιταχυνόμενης διείδυσης γλωριόντων, εξαιτίας της εφαρμογής διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, εκτός από τη διάχυση πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση της επιταχυνόμενης διείδυσης των γλωριόντων υπό την εφαρμογή διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού. Ουσιαστικά, προσομοιώθηκε το πείραμα της επιταχυνόμενης διείδυσης γλωριόντων χρησιμοποιώντας την εξίσωση που ανέπτυξαν οι **C. Andrade, M.A. Sanjuan, A. Recuero, O. Rio (1994)**. Στην εξίσωση αυτή θεωρείται ότι η διάχυση είναι αμελητέα και η διείδυση συμβαίνει μόνο λόγω εφαρμογής διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού. Η εξίσωση είναι ανάλογη αυτής της απλής διάχυσης του 2<sup>ου</sup> νόμου του Fick, με τη διαφορά ότι ο συντελεστής διείδυσης πολλαπλασιάζεται με έναν όρο που λαμβάνει υπόψη του τη διαφορά δυναμικού.

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν παρόμοια βήματα με την προσομοίωση της απλής διάχυσης. Τοποθετήθηκαν οι κατάλληλοι παράμετροι για τη διάμετρο και το ύψος του κυλινδρικού δοκιμίου καθώς και οι μέσοι όροι των αρχικών και των τελικών πειραματικών τιμών για την εφαρμοσμένη τάση και τη θερμοκρασία.

**Πίνακας 14:** Οι παράμετροι που τοποθετήθηκαν για τις 2 συνθέσεις.

ΣΥΝΘΕΣΗ	NC	NC-MC
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ(mm)	100.00	100.00
ΥΨΟΣ(mm)	47.33	45.67
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΤΑΣΗΣ (V)	20.15	29.70
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (K)	300.65	302.65

Στη συνέχεια, προστέθηκαν στις ιδιότητες του σκυροδέματος το πορώδες, η πυκνότητα και ο συντελεστής διάχυσης. Για το πορώδες και την πυκνότητα τοποθετήθηκαν οι τιμές που προέκυψαν πειραματικά.

Η επιφανειακή συγκέντρωση υπολογίστηκε στη βάση της συγκέντρωσης του διαλύματος και της πειραματικής τιμής του πορώδους. Με αυτήν την τιμή πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης όπου αναζητήθηκε ο συντελεστής διάχυσης για το οποίο υπήρχε σύγκλιση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων.

**Πίνακας 15:** Οι ιδιότητες που ορίστηκαν για τις 2 συνθέσεις.

ΣΥΝΘΕΣΗ	NC	NC-MC
ΙΔΙΟΤΗΤΑ		
ΠΟΡΩΔΕΣ (%)	15.42	14.92
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (kg/m <sup>3</sup> )	2318.00	2303.00
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ (m <sup>2</sup> /s)x10 <sup>-12</sup>	3.99	2.00

Καθώς στο Comsol δεν υπήρχε μοντέλο που να περιγράφει τη διείδυση των χλωριόντων θεωρώντας αμελητέα τη διάχυση όταν υπάρχει ισχυρή διαφορά δυναμικού, εισήχθη η μερική διαφορική εξίσωση που ανέπτυξαν οι **C. Andrade, M.A. Sanjuan, A. Recuero, O. Rio (1994)**. Αυτό πραγματοποιήθηκε μέσω της επιλογής του προγράμματος **Coefficient Form PDE** διαμορφώνοντας την εξίσωση του προγράμματος στην επιθυμητή μορφή.

### Εξισώσεις χωρίου

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{F \cdot z \cdot \Delta E \cdot D}{R \cdot T} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Και η λύση της διαφορικής εξίσωσης:

$$c = c_s \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot z \cdot \Delta E \cdot D}{R \cdot T}}}\right)$$

Όπου:

- **c**: Η συγκέντρωση των χλωριόντων (gr Cl/gr C)
- **D**: Ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων (m<sup>2</sup>/s)
- **z**: Η απόλυτη τιμή του σθένους ιόντων, για χλωρίοντα, z=1
- **F**: Η σταθερά του Faraday, F=9.648 \*10<sup>4</sup> (J/(V\*mol))
- **ΔE**: Η απόλυτη τιμή της εφαρμοσμένης τάσης (V)
- **R**: Η σταθερά αερίου, R=8.314 (J/(mol\*K))
- **T**: Η μέση τιμή της αρχική και τελικής θερμοκρασίας του διαλύματος ανόδου (K)
- **t**: Η διάρκεια του πειράματος (s)
- **x**: Το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων (m)

### Συνοριακές Συνθήκες

Όπως και στην απλή διάχυση η αξονική συμμετρία αντιστοιχίστηκε αυτόματα από το Comsol στο όριο 1. Στη συνέχεια, επελέγη **No Flux**, δηλαδή καμία ροή, για τα όρια 2 και 4 αφού κατά το πείραμα λαμβάνεται μέριμνα ώστε τα χλωρίοντα να διεισδύουν μόνο από την πάνω πλευρά όπου υπάρχει το διάλυμα με το NaCl. Ως αρχική τιμή (Initial Value) της συγκέντρωσης των χλωριόντων σε όλο το δοκίμιο του σκυροδέματος τοποθετήθηκε η τιμή 0 gr Cl/gr C.

Επίσης, ορίστηκε ως συνοριακή συνθήκη η συγκέντρωση σε χλωρίοντα στην επιφάνεια σε μονάδες μέτρησης gr Cl/gr C, η οποία επιβλήθηκε στο πάνω όριο της γεωμετρίας τη στιγμή έναρξης του χρόνου ανάλυσης. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η συγκέντρωση αυτή ήταν ίση με το γινόμενο της συγκέντρωσης του διαλύματος επί την πειραματική τιμή του πορώδους.

**Πίνακας 16:** Οι συγκεντρώσεις στην επιφάνεια που τέθηκαν ως συνοριακές συνθήκες για τις 2 συνθέσεις.

<b>ΣΥΝΘΕΣΗ</b>	<b>NC</b>	<b>NC-MC</b>
<b>ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>		
<b>ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (gr Cl/gr C)</b>	0.739	0.719

### **Βήματα ανάλυσης**

Δημιουργήθηκε ένα βήμα ανάλυσης και ορίστηκαν η μονάδα μέτρησης του χρόνου καθώς και η αρχή, το τέλος και το μέγεθος προσαύξησης της ανάλυσης (βήμα της ανάλυσης). Ορίστηκε το δευτερόλεπτο ως μονάδα μέτρησης του χρόνου, η χρονική στιγμή 0 ως αρχή της ανάλυσης και η χρονική στιγμή 86400 δευτερόλεπτα (που αντιστοιχεί σε 1 ημέρα) ως το τέλος της ανάλυσης. Ως μέγεθος προσαύξησης ορίστηκε η τιμή 3600 δευτερόλεπτα που αντιστοιχεί σε μία ώρα και σημαίνει ότι χρόνος πήγαινε κατευθείαν από την αρχή στη μία ώρα, μετά στη 2<sup>η</sup> κ.ο.κ.

## 7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

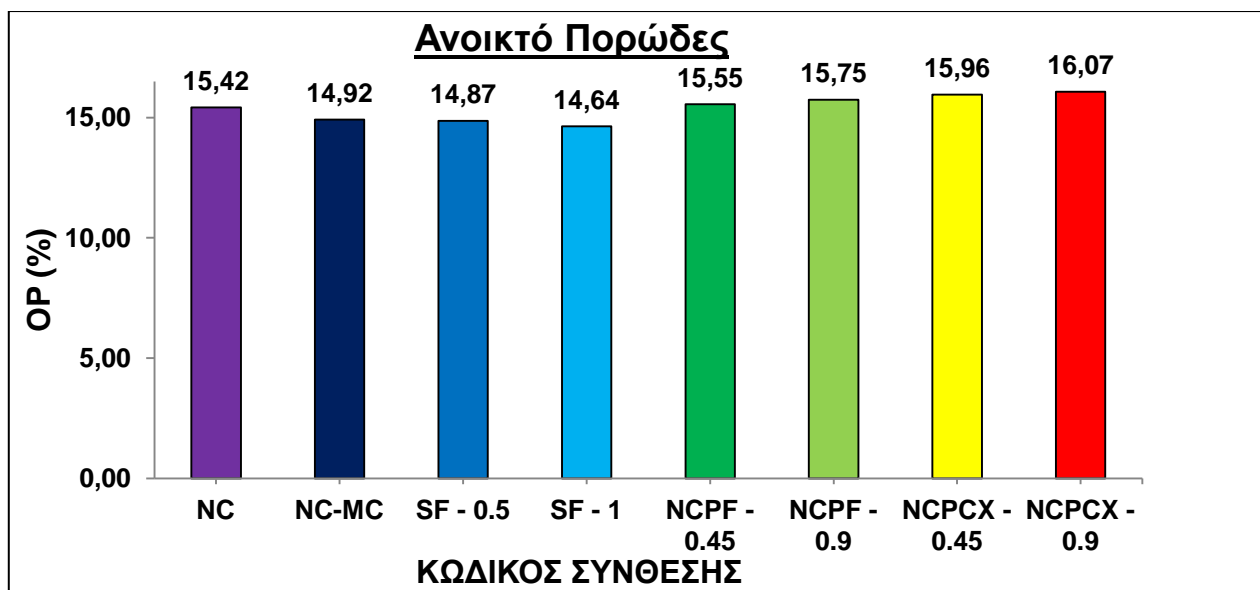
### 7.1 Ανοικτό Πορώδες OP

Στον Πίνακα 17 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές του ανοικτού πορώδους ανά σύνθεση, ενώ στο διάγραμμα του Σχήματος 10, η ανά σύνθεση διακύμανση τους. Επίσης δίνεται η ποσοστιαία μεταβολή της μέσης τιμής του ανοικτού πορώδους σε σχέση με το αμιγές μείγμα σκυροδέματος. Παρατηρείται μεταβολή ως προς το αμιγές σκυρόδεμα περίπου  $\pm 5\%$ , η οποία μας επιτρέπει, αν αυτό απαιτηθεί κατά την ανάλυση, να θεωρήσουμε το πορώδες σχεδόν σταθερό για όλες τις συνθέσεις.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 17 και στο διάγραμμα του σχήματος 10 παρατηρείται ότι η προσθήκη μετακαολίνη οδήγησε σε μικρή βελτίωση του ανοικτού πορώδους όπως και η προσθήκη μεταλλικών ιών. Αντίθετα, η προσθήκη συνθετικών ιών είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του ανοικτού πορώδους. Συγκρίνοντας τις συνθέσεις που περιείχαν ίνες, παρατηρούμε ότι η προσθήκη μεταλλικών ιών φαίνεται να οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές του ανοικτού πορώδους σε σχέση με την προσθήκη συνθετικών ιών. Ακόμη, φαίνεται ότι η αύξηση του ποσοστού των συνθετικών ιών οδηγεί σε αύξηση του ανοικτού πορώδους ενώ η αύξηση του ποσοστού των μεταλλικών ιών οδηγεί σε μείωση του ανοικτού πορώδους. Η μέγιστη τιμή του πορώδους παρατηρείται για τη σύνθεση NCPCX με ίνες τύπου Concrix με ποσοστό ιών 0.9 κ.β. και είναι 16.07% ενώ η ελάχιστη τιμή για τη σύνθεση SF με μεταλλικές ίνες με ποσοστό ιών 1 κ.β. και είναι 14.64%.

Πίνακας 17: Πειραματικά αποτελέσματα ανοικτού πορώδους (OP) % για κάθε σύνθεση

ΣΥΝΘΕΣΗ	ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ % (Μ.Ο. 3)	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΑΟΠΛΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ
NC	15.42	-
NC-MC	14.92	-3.27
SF - 0.5	14.87	-3.62
SF - 1	14.64	-5.06
NCPF - 0.45	15.55	0.85
NCPF - 0.9	15.75	2.09
NCPCX - 0.45	15.96	3.47
NCPCX - 0.9	16.07	4.22



Σχήμα 10: Μεταβολή της τιμής του ανοικτού πορώδους ανά σύνθεση.

## 7.2 Αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων

### 7.2.1 Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων - NT BUILD 492

Ο υπολογισμός του συντελεστή διείσδυσης των χλωριόντων  $D_{nssm}$  πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο NT BUILD 492 με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5.4.1.

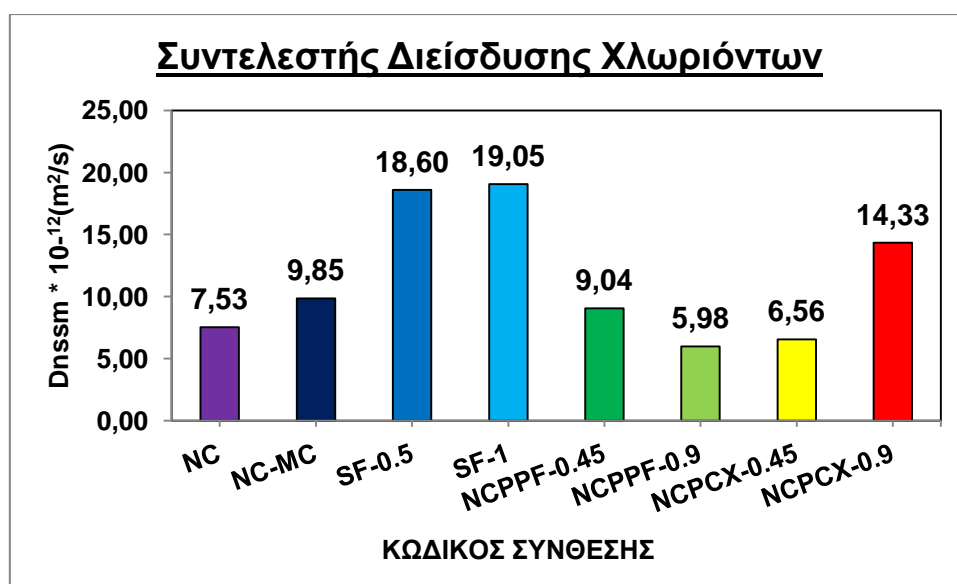
Στον Πίνακα 18 παρουσιάζεται ο συντελεστής διείσδυσης  $D_{nssm}$  ( $m^2/s$ ) συνολικά για κάθε σύνθεση καθώς και η μεταβολή του σε σχέση με το δείγμα αναφοράς που είναι η σύνθεση NC. Τέλος, αναφέρεται και η αντίστοιχη κατηγορία αντίστασης στη διείσδυση των χλωριόντων σύμφωνα με τον Πίνακα 10.

Πίνακας 18: Πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση (μέσες τιμές)

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ $D_{nssm}$ ( $m^2/s$ )* $10^{-12}$	% ΠΟΣΟΣΤΟ	
		ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΔΕΙΓΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ
NC	7.53	-	ΥΨΗΛΗ
NC-MC	9.85	30.90	ΥΨΗΛΗ
SF - 0.5	18.60	147.06	ΧΑΜΗΛΗ
SF - 1	19.05	153.10	ΧΑΜΗΛΗ
NCPF - 0.45	9.04	20.12	ΥΨΗΛΗ
NCPF - 0.9	5.98	-20.61	ΥΨΗΛΗ
NCPCX - 0.45	6.56	-12.89	ΥΨΗΛΗ
NCPCX - 0.9	14.33	90.37	ΜΕΤΡΙΑ

Όπως φαίνεται τόσο στον **Πίνακα 18** όσο και στο διάγραμμα του **Σχήματος 11**, 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 [A.A. Ramezani pour, H. Bahrami Jovein, 2012], [E.Badogiannis, S.Tsivilis, 2009], [K.A.Gruber et al., 2001]. Η προσθήκη συνθετικών ιών κατά περίπτωση επηρεάζει θετικά τη αντίσταση του σκυροδέματος στη διείσδυση των χλωριόντων. Στη σύνθεση NCPPF παρατηρείται μείωση της διείσδυσης με αύξηση του ποσοστού των ιών ενώ στην σύνθεση NCPCX παρατηρείται αύξηση της διείσδυσης με αύξηση του ποσοστού των ιών. Η σύνθεση NCPPF με ποσοστό ιών 0.9 κ.β. (NCPPF-0.9) παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά με υψηλή αντίσταση στη διείσδυση των χλωριόντων. Αντίθετα, η σύνθεση με το υψηλό ποσοστό χαλύβδινων ιών (SF-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.



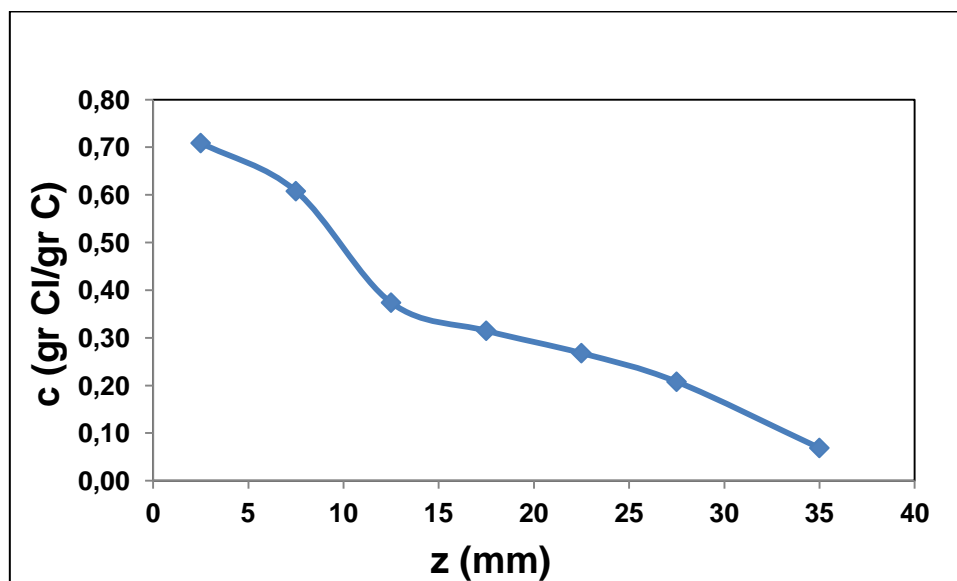
**Σχήμα 11:** Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων  $D_{nssm}$  (m<sup>2</sup>/s) για κάθε σύνθεση.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός της συγκέντρωσης των χλωριόντων για τις συνθέσεις NC και NC-MC σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρεται στο **κεφάλαιο 5.4.2.1**. Όπως

φαίνεται στον **πίνακα 19** και στα **Σχήματα 12 και 13**, η συγκέντρωση των χλωριόντων στη σύνθεση με την προσθήκη μετακαολίνη (NC-MC) είναι μικρότερη σε όλα τα βάθη παρότι τα πειραματικά αποτελέσματα της επιταχυνόμενης διείδυσης χλωριόντων, έδειξαν χειρότερη συμπεριφορά έναντι του δείγματος αναφοράς.

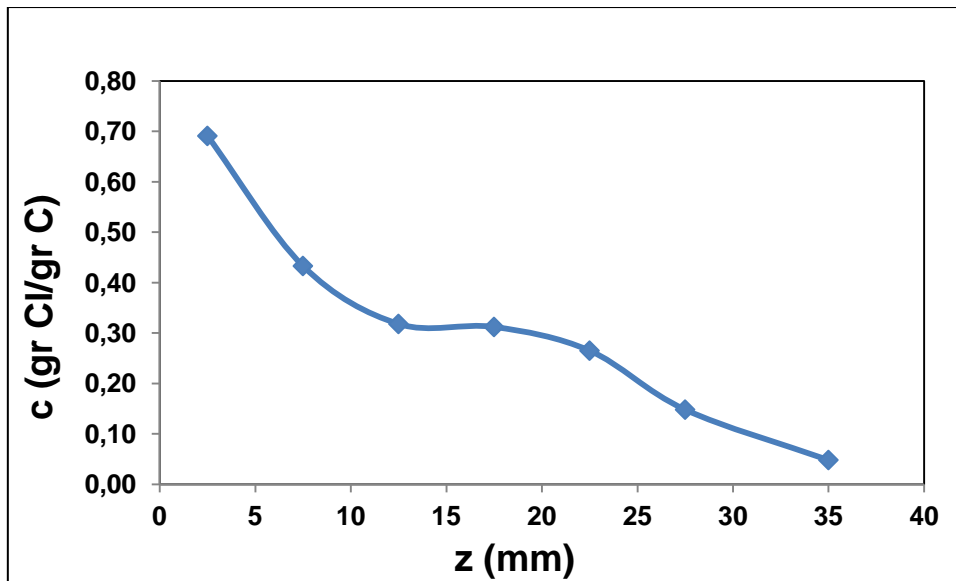
**Πίνακας 19:** Πειραματικά αποτελέσματα της συγκέντρωσης των χλωριόντων για τις συνθέσεις NC, NC-MC.

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ		NC	NC-MC
ΒΑΘΟΣ	ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ	
(mm)	(mm)	(gr Cl/gr C)	
0-5	2.50	0.709	0.691
5-10	7.50	0.608	0.433
10-15	12.50	0.374	0.318
15-20	17.50	0.315	0.312
20-25	22.50	0.268	0.265
25-30	27.50	0.208	0.148
30-40	35.00	0.069	0.048



**Σχήμα 12:** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διείδυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NC.



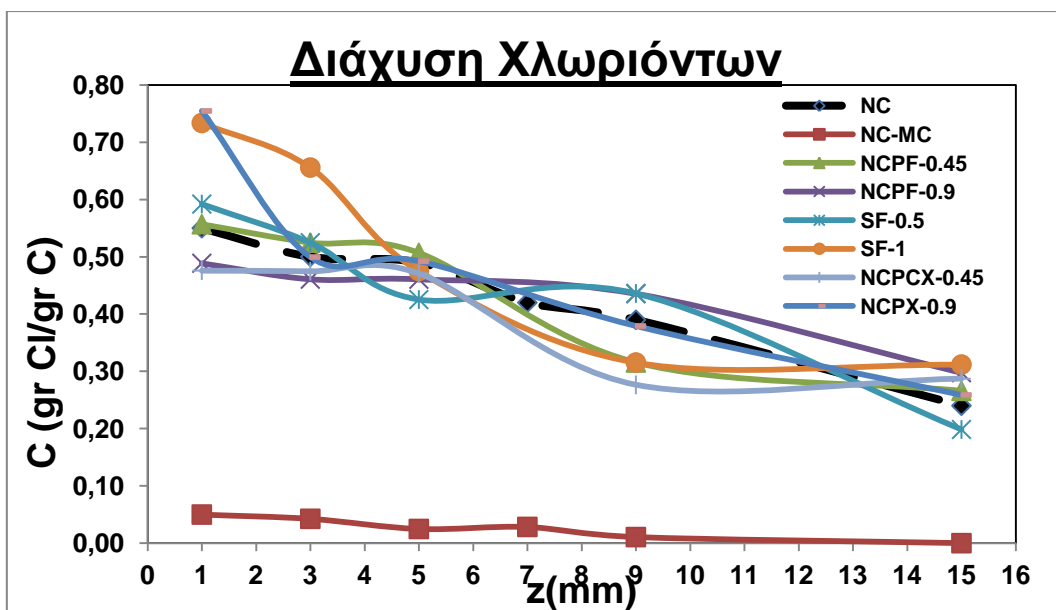


**Σχήμα 13:** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NC-MC.

### 7.2.2 Συντελεστής Διάχυσης χλωριόντων - NT BUILD 443

Ο υπολογισμός του συντελεστή διείσδυσης των χλωριόντων  $D$  πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο NT BUILD 443 με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο **κεφάλαιο 5.4.2**.

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 14**. Όπως φαίνεται στον **πίνακα 21** και **σχήμα 14** σε όλες τις συνθέσεις η συγκέντρωση των χλωριόντων φθίνει όσο αυξάνεται το βάθος.

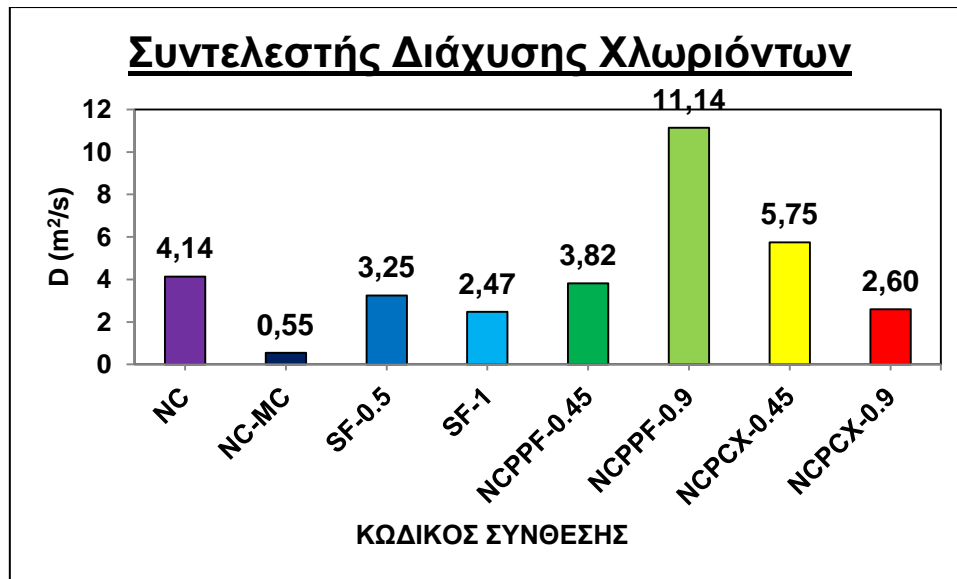


**Σχήμα 14:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διείδυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για όλες τις συνθέσεις

Στον **Πίνακα 17** δίνονται οι τιμές για τον συντελεστή διάχυσης  $D_{nssm}$  ( $m^2/s$ ), για κάθε σύνθεση καθώς και η μεταβολή του σε σχέση με το δείγμα αναφοράς. Οι τιμές αυτές αναπαρίστανται γραφικά στο **Σχήμα 15**.

**Πίνακας 20:** Πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής διάχυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση.

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ $D_{nssm}$ ( $m^2/s$ )* $10^{-11}$	% ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΔΕΙΓΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ
NC	4.14	-
NC-MC	0.55	-86.80
SF - 0.50	3.25	-21.50
SF - 1.00	2.47	-40.30
NCPF - 0.45	3.82	-7.73
NCPF - 0.90	11.14	169.00
NCPCX - 0.45	5.75	38.90
NCPCX - 0.90	2.60	-37.20



**Σχήμα 15:** Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων D (m<sup>2</sup>/s) για κάθε σύνθεση.

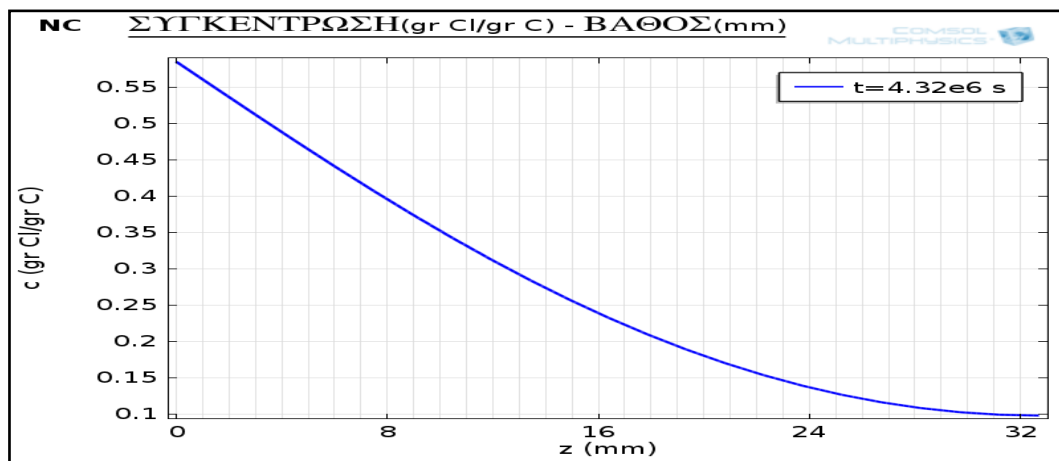
Όπως φαίνεται τόσο στον **Πίνακα 20** όσο και στο **Σχήμα 15** οι συνθετικές ίνες ευνοούν τη διάχυση σε αντίθεση με τις μεταλλικές όπου παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά. Η σύνθεση NCPPF με ποσοστό ιών 0.9 (NCPFF-0.9) έχει την χειρότερη συμπεριφορά καθώς η τιμή του συντελεστή διάχυσης είναι σχεδόν τριπλάσια 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 NCPXC παρατηρείται μείωση της διάχυσης με αύξηση του ποσοστού των ιών.

**Πίνακας 21:** Πειραματικά αποτελέσματα της συγκέντρωσης των χλωριόντων για όλες τις συνθέσεις.

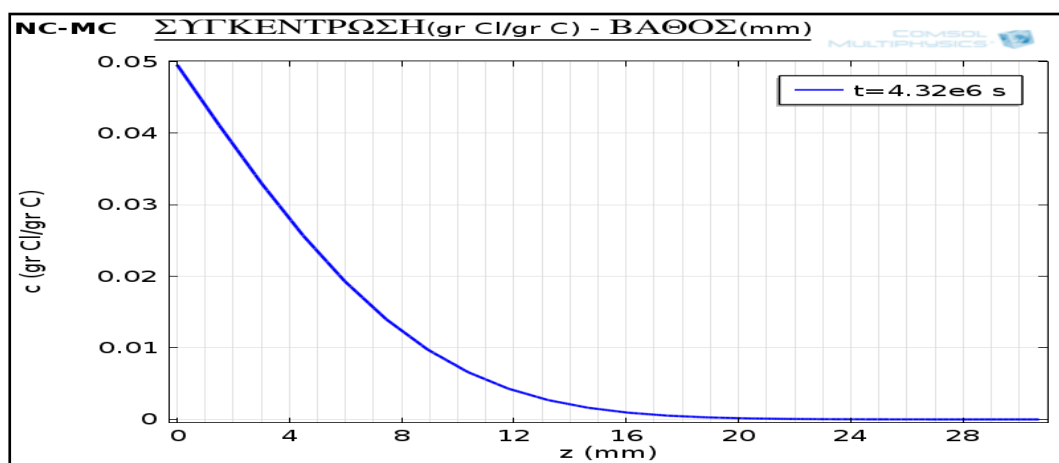
%OP		15.42	14.92	15.55	15.75	14.87	14.64	15.96	16.07
ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ		NC	NC - MC	NCPF - 0.45	NCPF - 0.9	SF - 0.5	SF - 1	NCPX - 0.45	NCPXC - 0.9
ΒΑΘΟΣ (mm)	ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (gr Cl/gr C)							
0 - 2	1	0.550	0.043	0.557	0.489	0.592	0.734	0.476	0.755
2 - 4	3	0.500	0.025	0.525	0.461	0.525	0.656	0.475	0.499
4 - 6	5	0.490	0.028	0.507	0.461	0.425	0.475	0.471	0.492
6 - 8	7	0.420	0.011	-	-	-	-	-	-
8 - 10	9	0.390	-	0.315	0.436	0.436	0.315	0.276	0.379
10 - 12	11	-	-	-	-	-	-	-	-
12 - 14	13	-	-	-	-	-	-	-	-
14 - 16	15	0.240	-	0.266	0.298	0.199	0.312	0.287	0.259

### 7.3 Μοντελοποίηση διάχυσης χλωριόντων

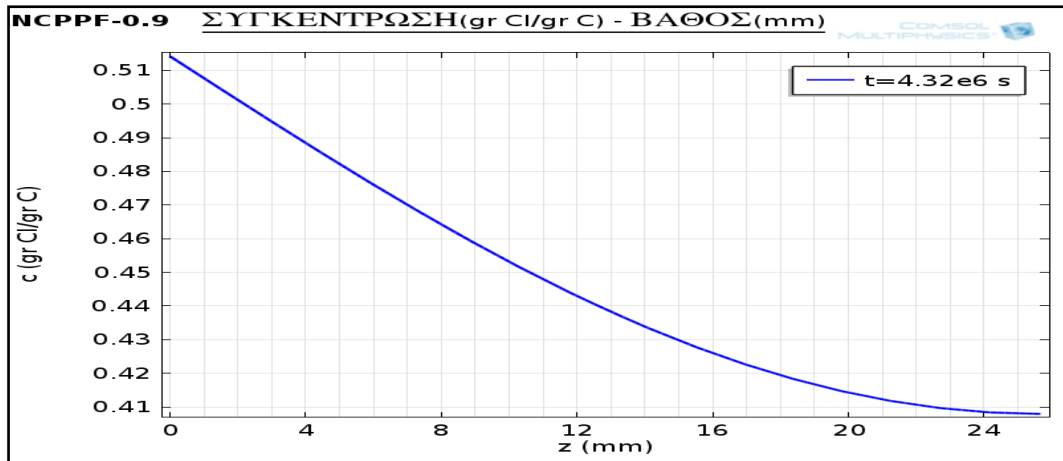
Με την επίλυση του μοντέλου προέκυψαν τα αναλυτικά αποτελέσματα για τη συγκέντρωση του σκυροδέματος σε χλωριόντα σε σχέση με το βάθος μετά από 50 ημέρες έκθεσης.



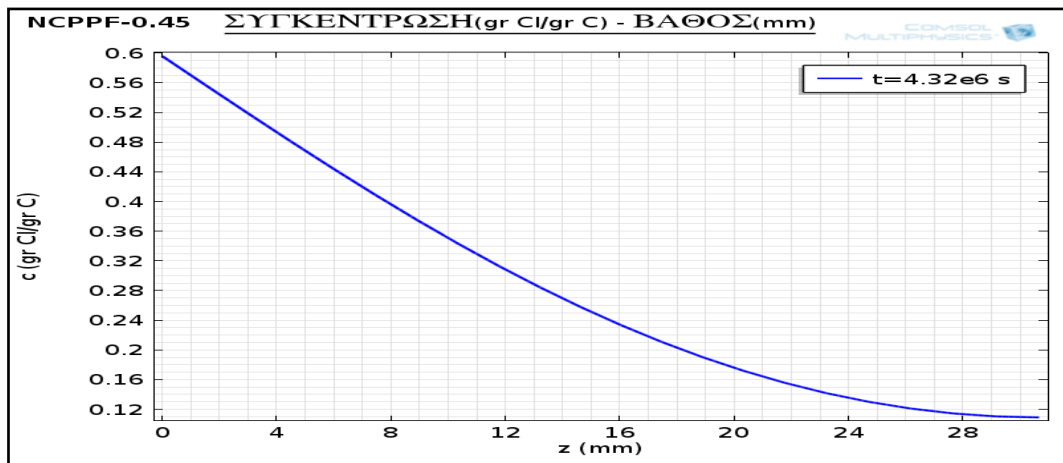
Σχήμα 16: Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NC.



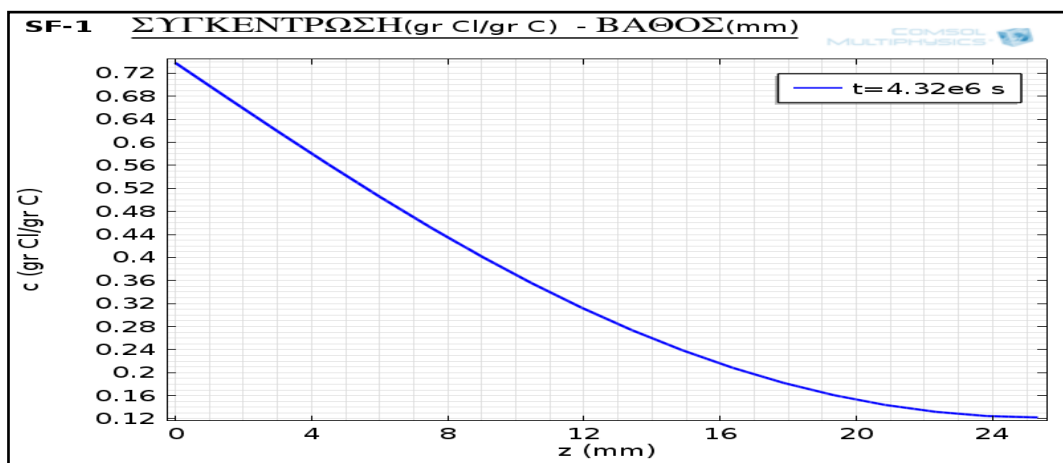
Σχήμα 17: Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NC-MC.



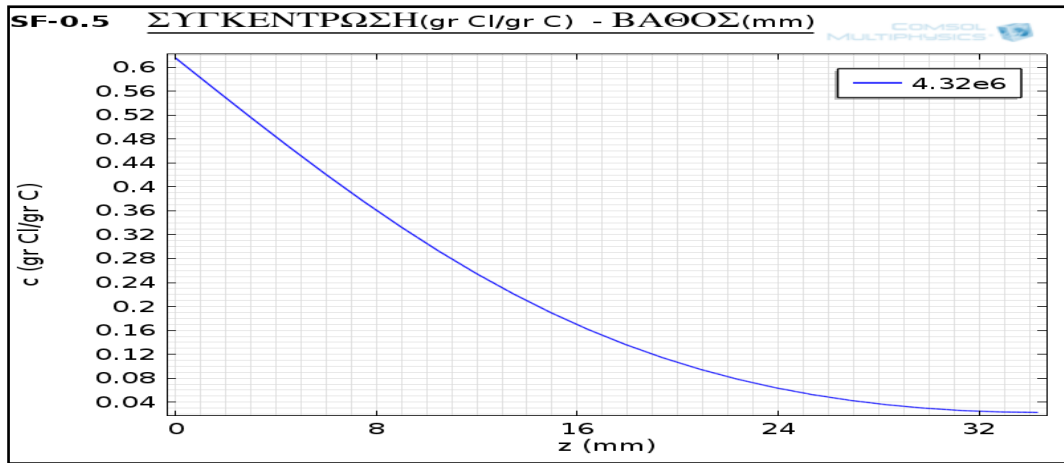
**Σχήμα 18:** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NCPPF-0.9.



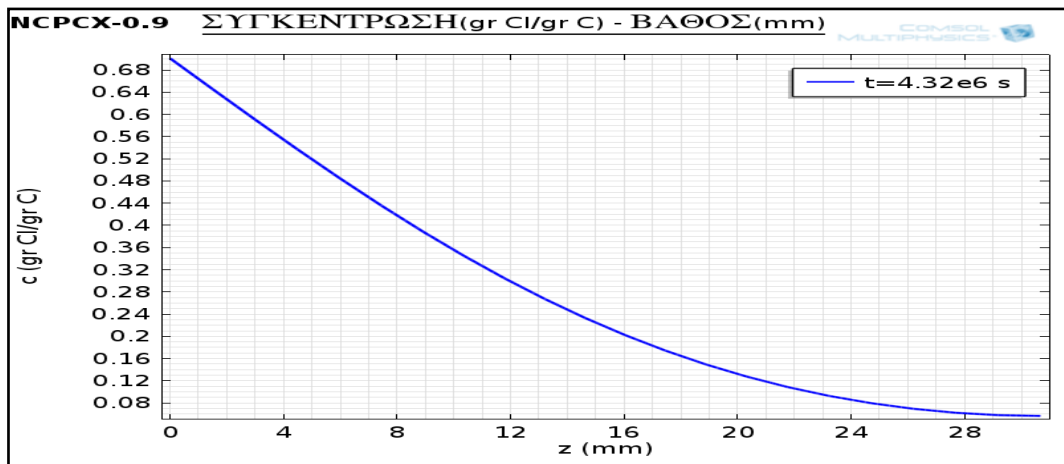
**Σχήμα 19:** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NCPPF-0.45.



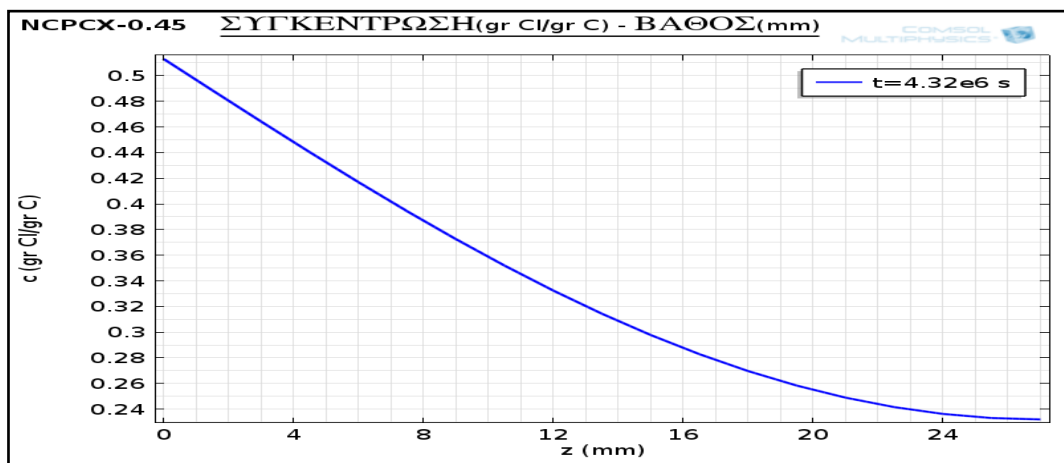
**Σχήμα 20:** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση SF-1.



**Σχήμα 21:** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση SF-0.5.



**Σχήμα 22:** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NCPCX-0.9.

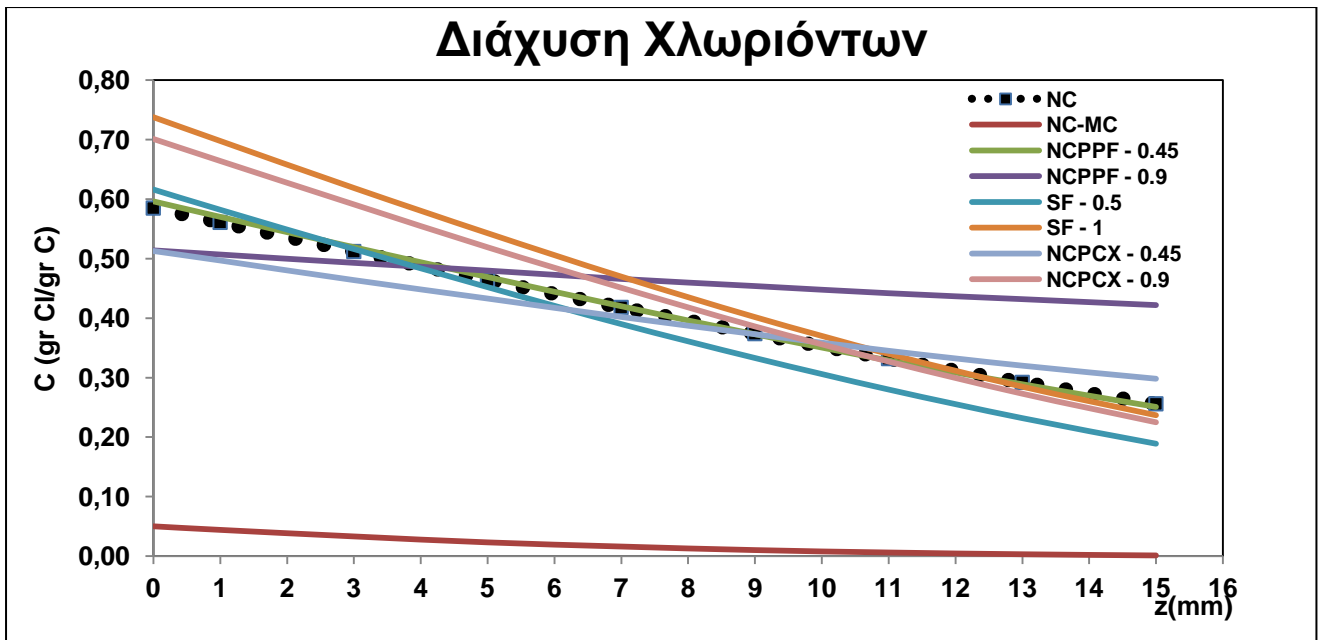


**Σχήμα 23:** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NCPCX-0.45.

**Πίνακας 22:** Αναλυτικά αποτελέσματα της συγκέντρωσης των χλωριόντων σε σχέση με το βάθος για κάθε σύνθεση.

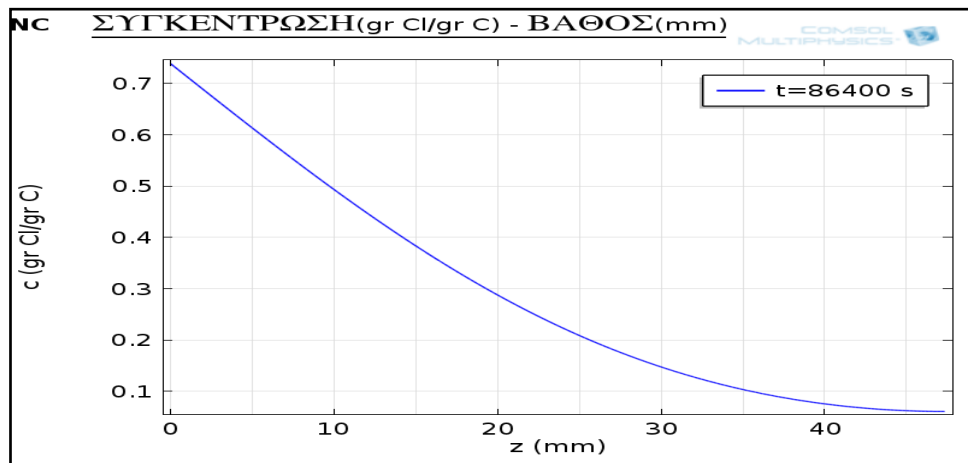
ΣΥΝΘΕΣΗ	NC	NC-MC	NCP PF- 0.9	NCP PF- 0.45	SF-1	SF-0.5	NCPCX- 0.9	NCPCX- 0.45
ΒΑΘΟΣ (mm)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (gr Cl/gr C)							
0-2	0.561	0.044	0.507	0.570	0.698	0.582	0.664	0.497
2-4	0.512	0.033	0.493	0.519	0.619	0.516	0.591	0.464
4-6	0.464	0.023	0.480	0.469	0.543	0.452	0.519	0.433
6-8	0.418	0.016	0.466	0.420	0.470	0.390	0.451	0.402
8-10	0.374	0.010	0.454	0.373	0.402	0.333	0.386	0.373
10-12	0.332	0.006	0.442	0.329	0.340	0.280	0.327	0.345
12-14	0.292	0.003	0.432	0.289	0.285	0.232	0.273	0.320
14-16	0.256	0.001	0.422	0.251	0.237	0.189	0.225	0.298

Όπως φαίνεται τόσο από τον **Πίνακα 22** όσο και από τα διαγράμματα των **Σχημάτων 16-23** αλλά και στο διάγραμμα του **Σχήματος 24** η σύνθεση με την προσθήκη του μετακαολίνης (NC-MC) παρουσίασε την καλύτερη συμπεριφορά έναντι στη διάχυση των χλωριόντων, κάτι αναμενόμενο δεδομένου ότι είχε το μικρότερο συντελεστή διάχυσης. Σε υψηλά βάθη (10-16 mm) φαίνεται ότι η προσθήκη ινών οδήγησε σε μειωμένες συγκεντρώσεις χλωριόντων εκτός από τις συνθέσεις NCP PF με ποσοστό ινών 0.9 κ.β. και NCPCX με ποσοστό ινών 0.45 κ.β. όπου παρουσίασαν υψηλότερες τιμές από το δείγμα αναφοράς. Αντίθετα, σε χαμηλά βάθη οι συνθέσεις NCP PF με ποσοστό ινών 0.9 κ.β. και NCPCX με ποσοστό ινών 0.45 κ.β. παρουσίασαν μικρότερες τιμές από τη σύνθεση NC, ενώ οι υπόλοιπες συνθέσεις μεγαλύτερες τιμές. Σημειώνεται ότι αυτές οι δύο συνθέσεις ήταν οι μοναδικές για τις οποίες προέκυψε μεγαλύτερος συντελεστής διάχυσης σε σχέση με το δείγμα αναφοράς. Επίσης, οι συνθέσεις με την προσθήκη χαλύβδινων ινών SF-1 και SF-0.5 παρότι είχαν μεγαλύτερες επιφανειακές συγκεντρώσεις από τη σύνθεση με το συμβατικό σκυρόδεμα, στο τέλος κατέληξαν με μικρότερες συγκεντρώσεις λόγω μικρότερου συντελεστή διάχυσης. Το ίδιο συνέβη και στη σύνθεση με ίνες τύπου Concrix για ποσοστό ινών 0.9 (NCPCX-0.9).



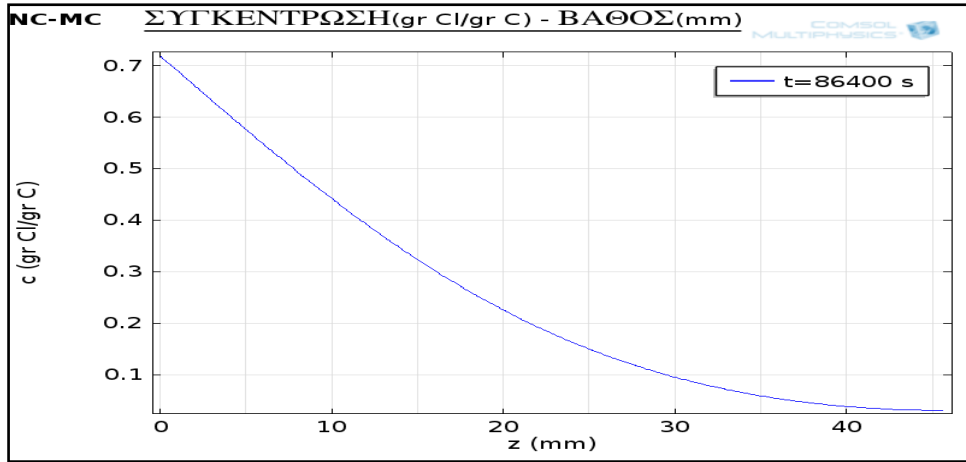
**Σχήμα 24:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για όλες τις συνθέσεις

#### 7.4 Μοντελοποίηση διεύδυσης χλωριόντων

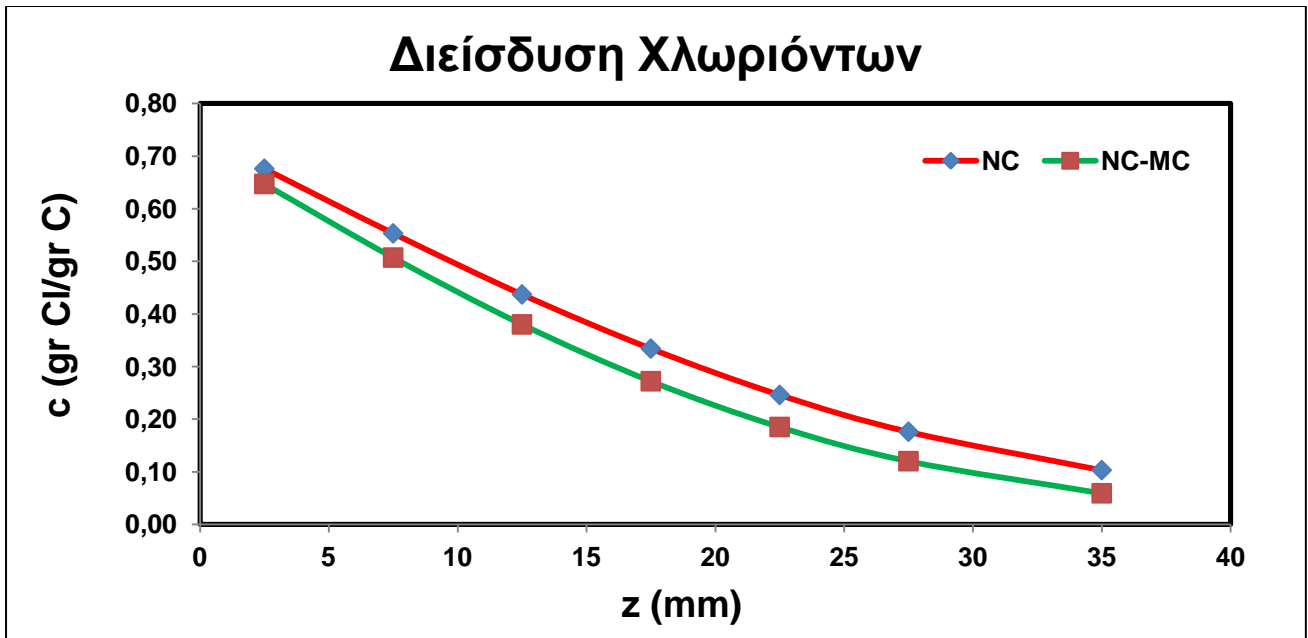


**Σχήμα 25:** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διεύδυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NC





Σχήμα 26: Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NC-MC



Σχήμα 27: Συγκεντρωτικό διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τις 2 συνθέσεις

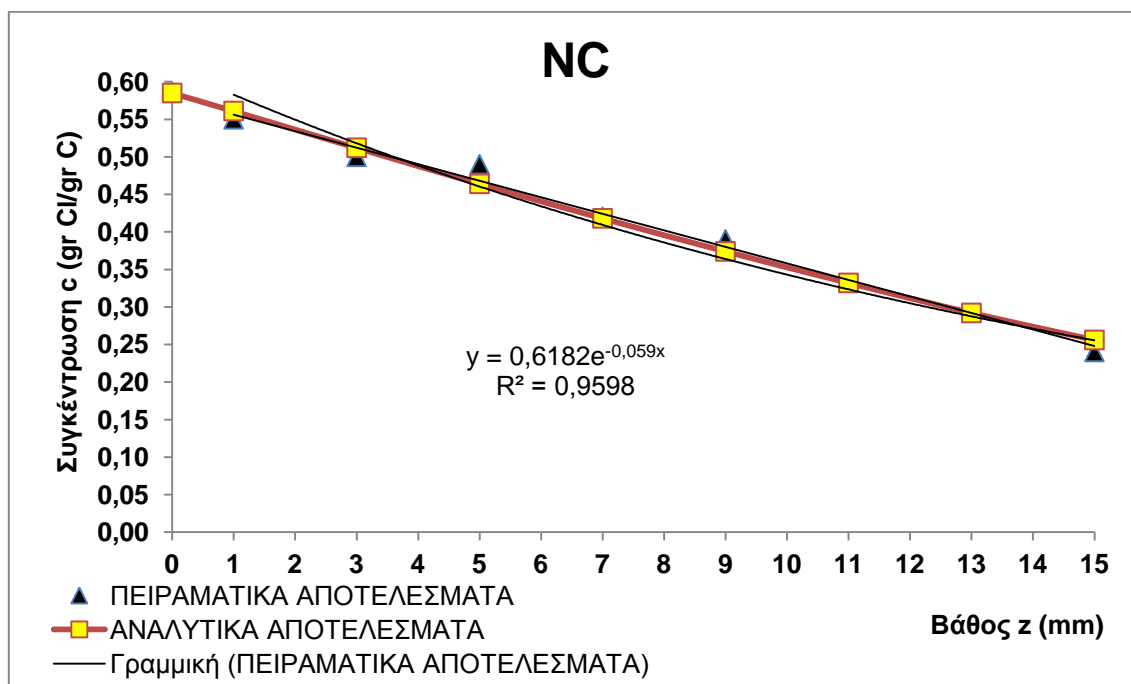
**Πίνακας 23:** Αναλυτικά αποτελέσματα της συγκέντρωσης των χλωριόντων σε σχέση με το βάθος για κάθε σύνθεση.

Σύνθεση		NC	NC-MC
ΒΑΘΟΣ	ΜΕΣΟ ΒΑΘΟΣ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ	
(mm)	(mm)	(gr CL/gr C)	
0-5	2.50	0.676	0.647
5-10	7.50	0.553	0.507
10-15	12.50	0.437	0.380
15-20	17.50	0.334	0.272
20-25	22.50	0.246	0.185
25-30	27.50	0.176	0.120
30-40	35.00	0.103	0.059

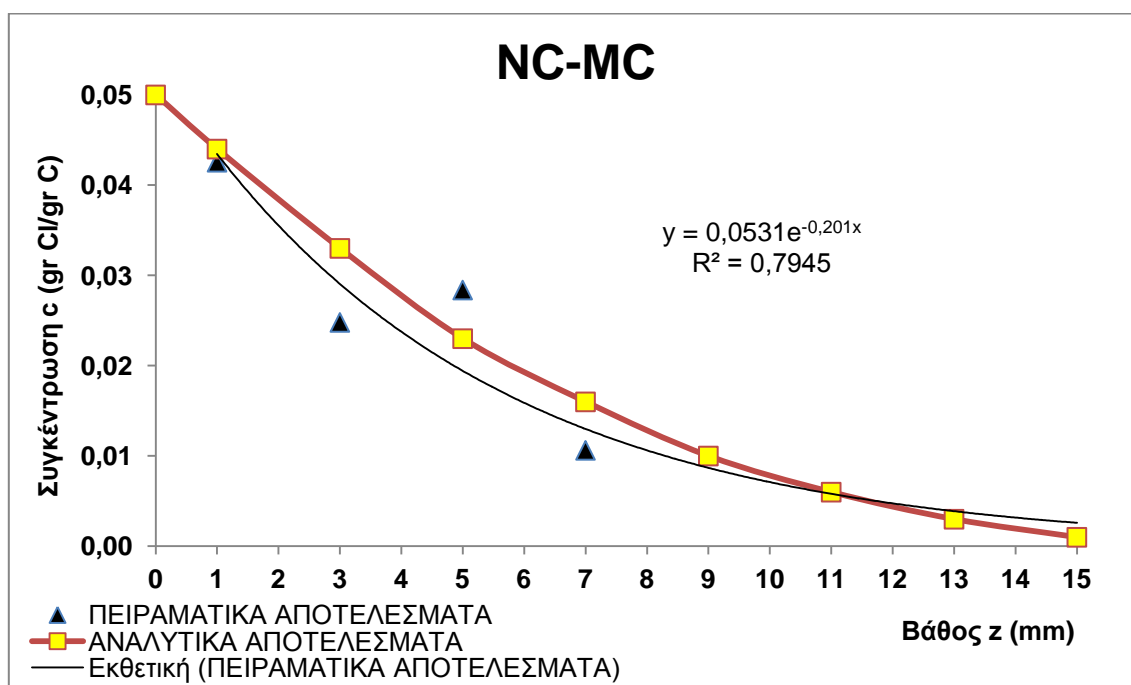
Όπως φαίνεται στα **Σχήματα 25, 26, 27** και όπως και στα πειραματικά αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων υπό την εφαρμογή διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού έτσι και στην ανάλυση προέκυψαν μικρότερες τιμές για τη σύνθεση με την προσθήκη μετακαολίνη για τη συγκέντρωση των χλωριόντων σε όλα τα βάθη.

## 7.5 Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων

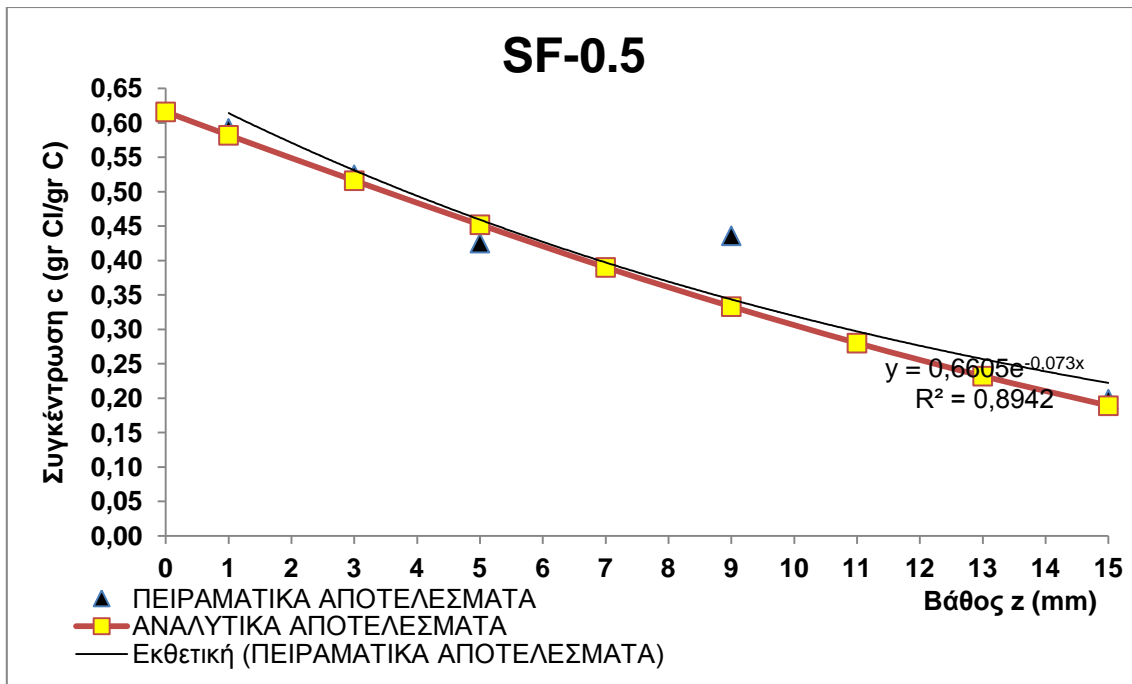
### 7.5.1 Διάχυση χλωριόντων



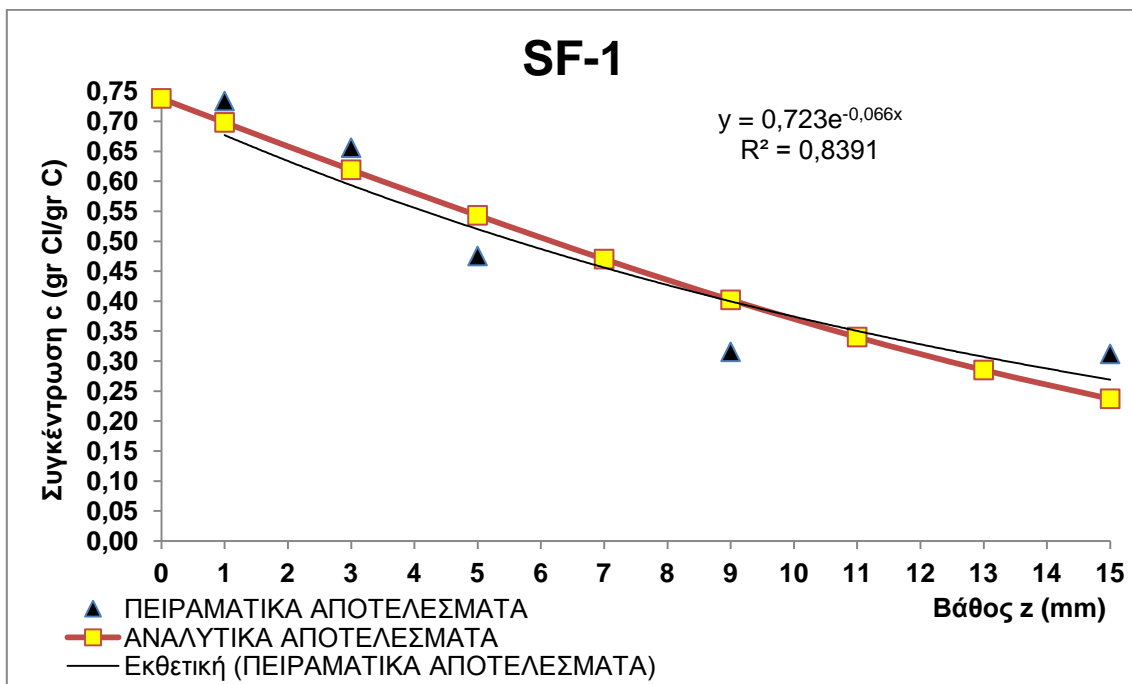
Σχήμα 28: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NC.



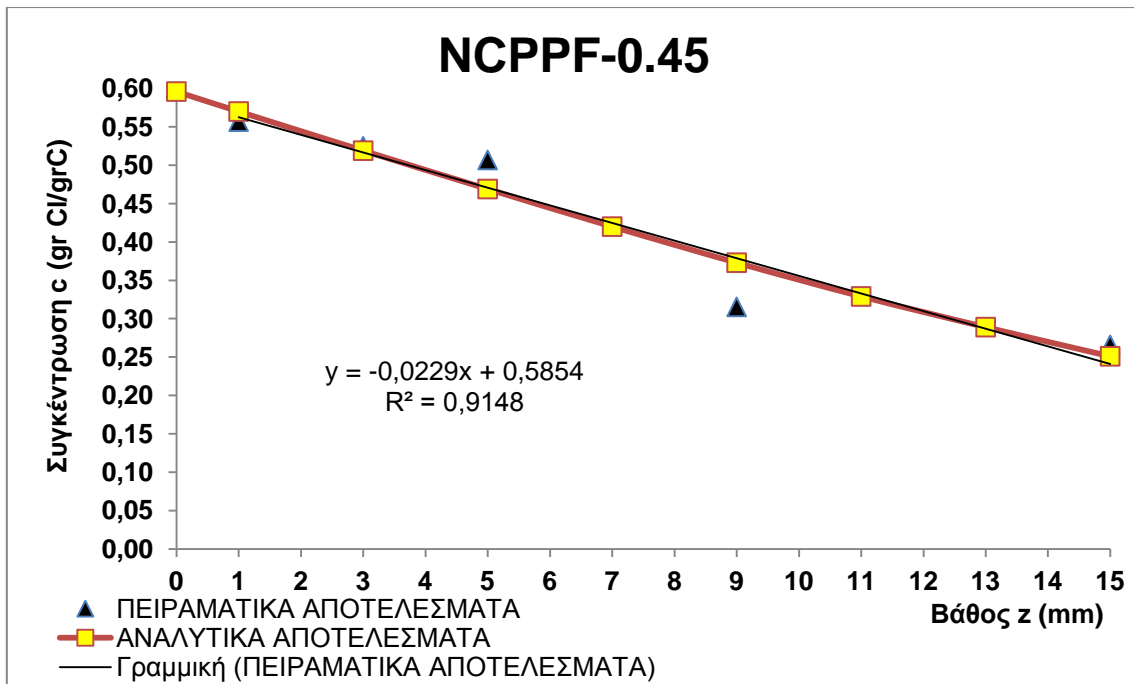
Σχήμα 29: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NC-MC.



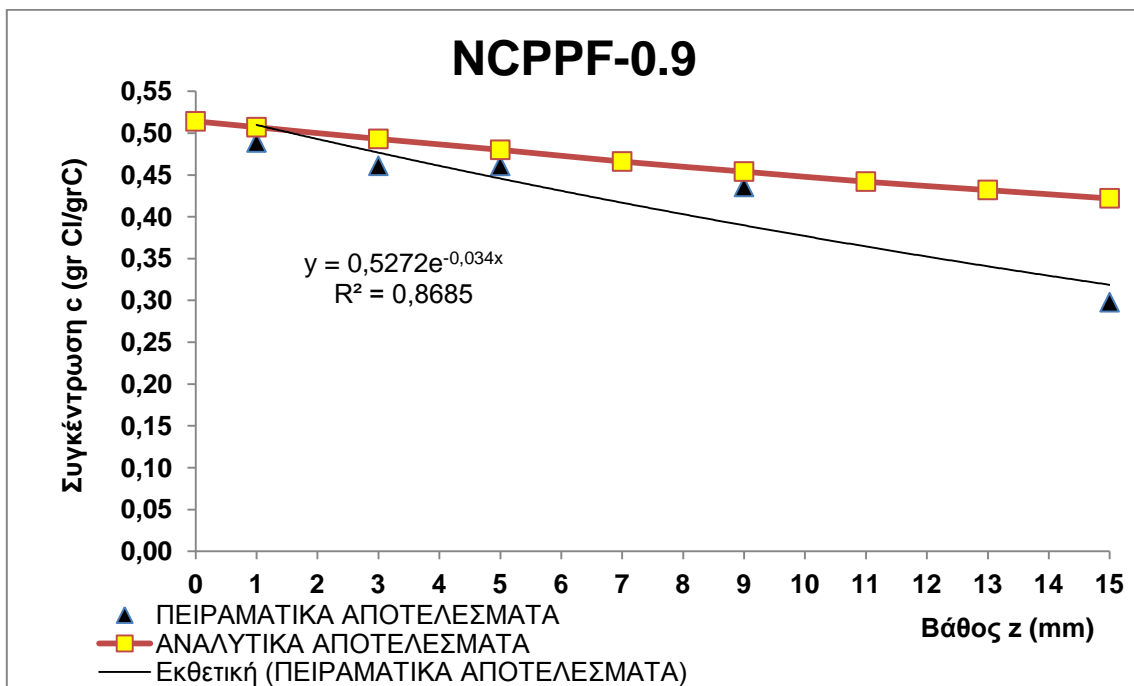
Σχήμα 30: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης SF-0.5.



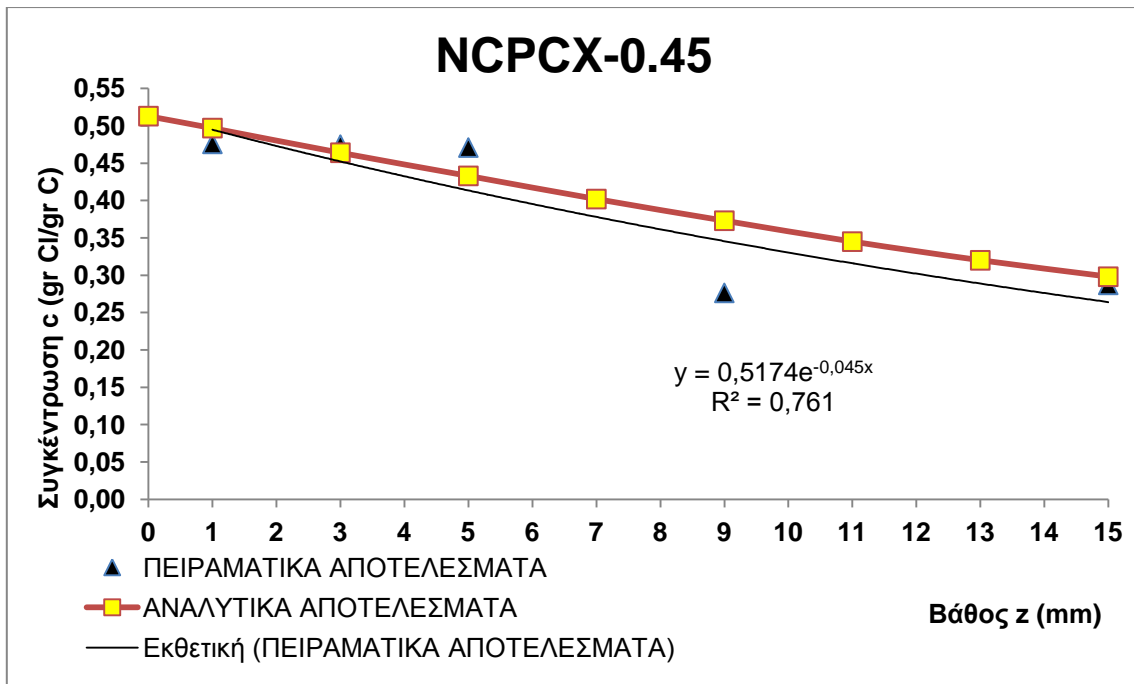
Σχήμα 31: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης SF-1.



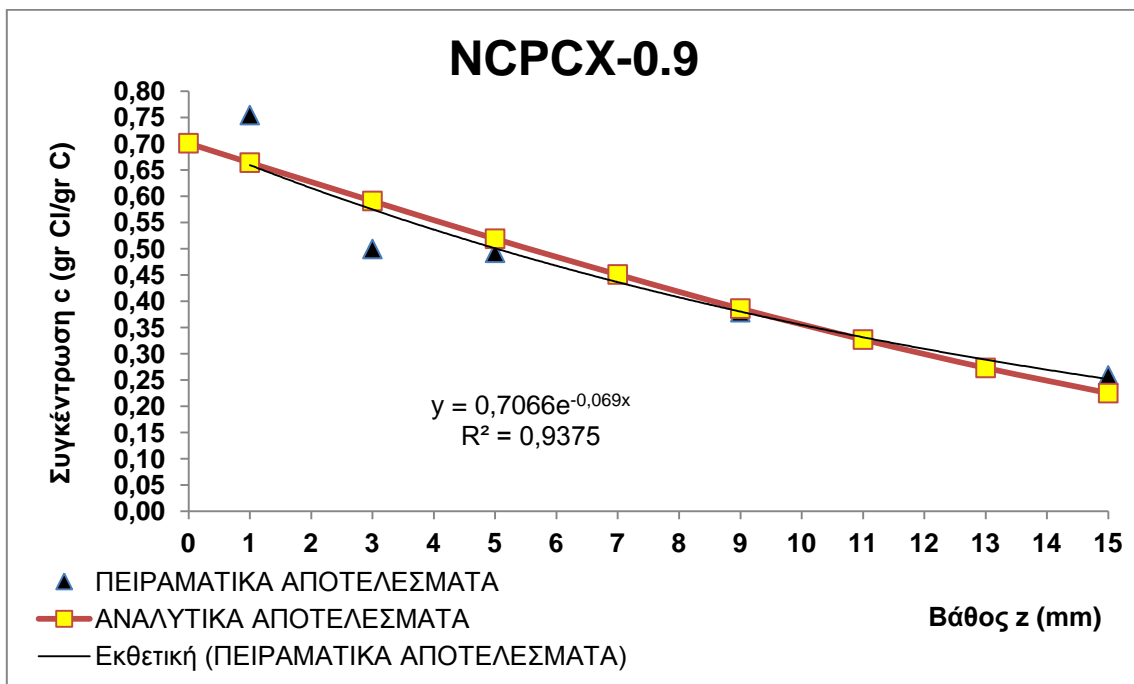
Σχήμα 32: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NCPFF-0.45.



Σχήμα 33: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NCPFF-0.9.



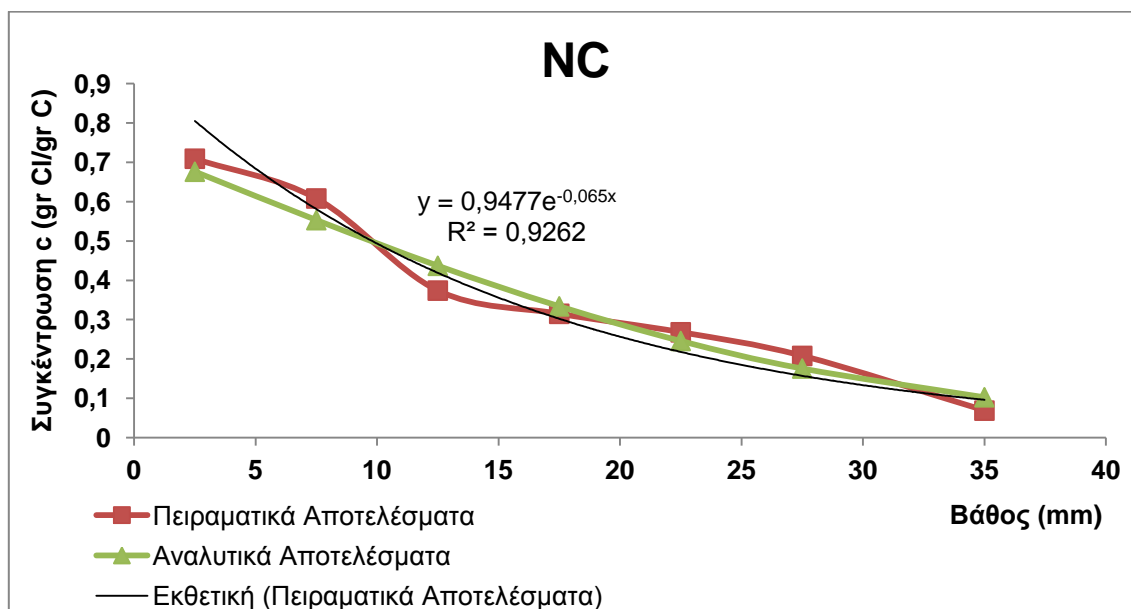
Σχήμα 34: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NCPCX-0.45.



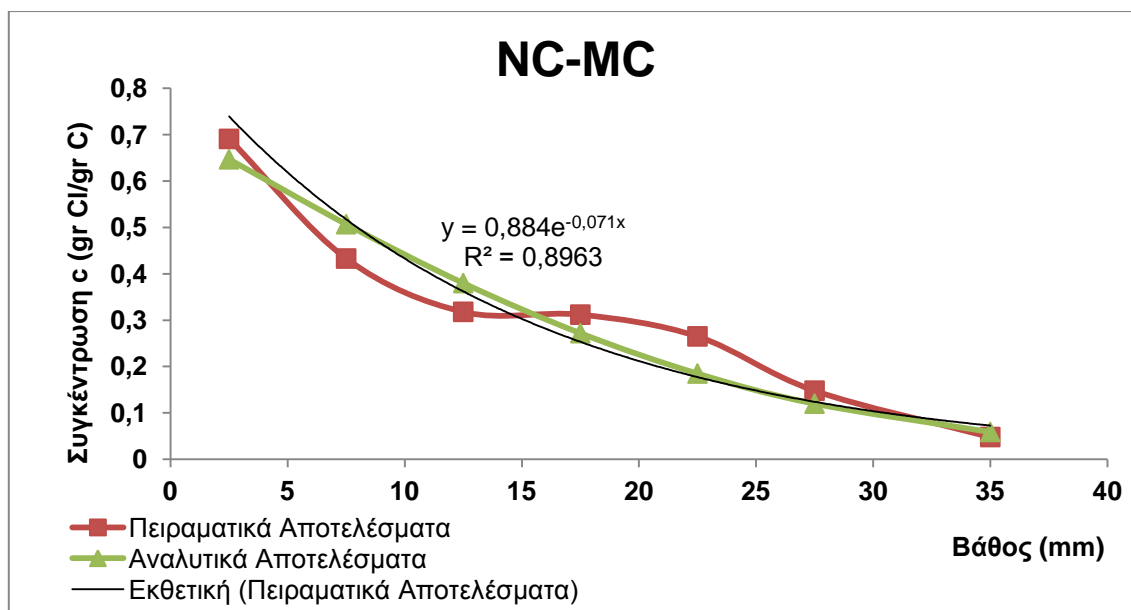
Σχήμα 35: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NCPCX-0.9.

Όπως φαίνεται στα **Σχήματα 28 έως 35** και στους **Πίνακες 21 και 22** υπάρχει αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων σε σχέση με το βάθος. Υπενθυμίζεται ότι οι συντελεστές διάχυσης που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση είναι οι ίδιοι που προέκυψαν πειραματικά. Η μεγαλύτερη συσχέτιση ( $R^2$ ) παρατηρείται στη σύνθεση αναφοράς NC και είναι 0,976 ενώ η μικρότερη στη σύνθεση με ίνες τύπου Concrix για ποσοστό ινών 0.45 κ.β. (NCPCX-0.45) και είναι 0,79. Μεταξύ των συνθέσεων που περιείχαν ίνες φαίνεται να υπάρχει καλύτερη συσχέτιση ( $R^2$ ) στη σύνθεση με ίνες τύπου SikaFiber NCPPF. Οι συνθέσεις NCPPF-0.9 και NCPCX-0.45 που παρουσίασαν υψηλούς συντελεστές διεύθυνσης και κατά συνέπεια υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων είχαν από τις χειρότερες συσχετίσεις ( $R^2$ ) (0.86 και 0.79 αντίστοιχα).

### 7.5.2 Διείσδυση χλωριόντων



**Σχήμα 36:** Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NC.



Σχήμα 37: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων της σύνθεσης NC-MC.

Πίνακας 24: Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ πειράματος και ανάλυσης για το συντελεστή διείσδυσης με τη μέθοδο NT BUILD 492.

ΚΩΔΙΚΟ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ $D_{nssm} (m^2/s) * 10^{-12}$		
	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ	ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ	% ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ
NC	7.53	4.02	-46.66%
NC-MC	9.85	2.00	-79.69%

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 36 και 37 και στους Πίνακες 23 και 24 παρατηρείται αρκετά καλή συμφωνία μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων σε σχέση με το βάθος και στις 2 συνθέσεις (NC, NC-MC), με τη σύνθεση NC να έχει τη μεγαλύτερη συσχέτιση ( $R^2$ ) που είναι 0,96 έναντι 0,92 της σύνθεσης NC-MC. Αυτό συμβαίνει όμως για διαφορετικές τιμές συντελεστών διείσδυσης και στις 2 συνθέσεις. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 24 οι αναλυτικές τιμές του συντελεστή διείσδυσης σύμφωνα με την εξίσωση του κεφαλαίου 6.4 [Andrade C., Sanjuan M.A., Recuero A., Rio O., 1994], είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές του πειράματος. Οι διαφορές στις τιμές ενδέχεται να οφείλονται στο γεγονός ότι πειραματικά ο συντελεστής προκύπτει μέσω χρωματογραφικής μεθόδου η οποία δεν είναι αξιόπιστη καθώς συχνά δεν είναι ευδιάκριτα τα όρια των χρωματισμένων περιοχών του δοκιμίου που αντιπροσωπεύουν το βάθος διείσδυσης.



## 7.6 Σύγκριση συντελεστών διείσδυσης & διάχυσης χλωριόντων

Στον Πίνακα 25 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ όλων των συντελεστών διείσδυσης χλωριόντων που προέκυψαν από τα πειράματα και τις αναλύσεις.

**Πίνακας 25:** Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ όλων των συντελεστών διείσδυσης χλωριόντων που προέκυψαν από τα πειράματα και τις αναλύσεις.

ΚΩΔΙΚΟ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ D (m <sup>2</sup> /s)*10 <sup>-11</sup>		ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ D (m <sup>2</sup> /s)*10 <sup>-11</sup>
	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ NT492	ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ NT492	
NC	0.753	0.402	4.140
NC-MC	0.985	0.200	0.516

Παρατηρείται μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα για το δείγμα αναφοράς ενώ στη σύνθεση με την προσθήκη μετακαολίνη τα αποτελέσματα έχουν μεγαλύτερη συσχέτιση. Δηλαδή, φαίνεται ότι πειραματικά ο συντελεστής διείσδυσης με το πείραμα της επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων απέχει από αυτόν του πειράματος της απλής διάχυσης και αυτό ενδέχεται να οφείλεται σε λανθασμένη εκτίμηση του συντελεστή μέσω της χρωματογραφικής μεθόδου προσδιορισμού του βάθους διείσδυσης. Αυτό ενισχύεται και από το γεγονός ότι η σύνθεση NC-MC η οποία αναμενόταν σύμφωνα με τη βιβλιογραφία να έχει βελτιωμένο συντελεστή σε σχέση με το δείγμα αναφοράς παρουσίασε μεγαλύτερο συντελεστή μόνο στο πείραμα NT BUILD 492. Επίσης, είναι πιθανό αυτή η διαφορά στις τιμές να οφείλεται στη διαφορετική ικανότητα δέσμευσης των χλωριόντων με την παρουσία ή την απουσία ηλεκτρικού πεδίου.

## 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη και την 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 σκυροδέμα περίπου  $\pm 5\%$ , δηλαδή δεν υπήρξε ουσιαστική μεταβολή του ανοικτού πορώδους.
- **Διείσδυση χλωριόντων σύμφωνα με την πρότυπη δοκιμή NT BUILD 492:** Ο συντελεστής διείσδυσης  $D_{nssm}$  ( $m^2/s$ ) παρουσίασε αύξηση για την προσθήκη χαλύβδινων ινών και για την προσθήκη του μετακαολίνη. Η προσθήκη συνθετικών ινών κατά περίπτωση επηρέασε θετικά τη αντίσταση του σκυροδέματος στη διείσδυση των χλωριόντων. Στη σύνθεση NCPPF παρατηρήθηκε μείωση της διείσδυσης με αύξηση του ποσοστού των ινών ενώ στην σύνθεση NCPCX παρατηρήθηκε αύξηση της διείσδυσης με αύξηση του ποσοστού των ινών. Η σύνθεση NCPPF με ποσοστό ινών 0.9 κ.β. (NCPPF-0.9) παρουσίασε την καλύτερη συμπεριφορά με υψηλή αντίσταση στη διείσδυση των χλωριόντων. Αντίθετα, η σύνθεση με το υψηλό ποσοστό χαλύβδινων ινών (SF-1) είχε τη χειρότερη συμπεριφορά με χαμηλή αντίσταση στη διείσδυση. Ωστόσο, τα αποτελέσματα για την προσθήκη χαλύβδινων ινών δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα καθώς η διείσδυση των χλωριόντων αυξάνεται λόγω της αύξησης της αγωγιμότητας του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος που προκαλείται από τις μεταλλικές ίνες. Τέλος, τα αποτελέσματα για την προσθήκη του μετακαολίνη έρχονται σε αντίθεση με την υπάρχουσα βιβλιογραφία.
- **Διάχυση χλωριόντων σύμφωνα με την πρότυπη δοκιμή NT BUILD 443:** Ο συντελεστής διάχυσης  $D$  ( $m^2/s$ ) παρουσίασε μείωση για την προσθήκη μετακαολίνη και για την προσθήκη των χαλύβδινων ινών ενώ η προσθήκη συνθετικών ινών κατά περίπτωση επηρέασε θετικά την αντίσταση του σκυροδέματος στη διάχυση των χλωριόντων. Στη σύνθεση NCPPF παρατηρήθηκε αύξηση της διάχυσης με αύξηση του ποσοστού των ινών ενώ στην σύνθεση NCPCX παρατηρήθηκε μείωση της διάχυσης με αύξηση του ποσοστού των ινών. Για τη σύνθεση NCPPF-0.9 προέκυψε συντελεστής διάχυσης  $D$  σχεδόν τριπλάσιος αυτού του συμβατικού σκυροδέματος ενώ για τη σύνθεση NC-MC ο συντελεστής διάχυσης ήταν σχεδόν οχτώ φορές μικρότερος αυτού του δείγματος αναφοράς.

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

Από τη σύγκριση των αναλυτικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- **Διάχυση χλωριόντων:** Υπήρξε σύγκλιση αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων για όλες τις συνθέσεις με ποσοστά συσχέτισης  $R^2$  που κυμάνθηκαν από 79% έως 97%. Το γεγονός αυτό ενισχύει την εγκυρότητα του αναλυτικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε.
- **Επιταχυνόμενη διείσδυση με την εφαρμογή διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού:** Προέκυψε σύγκλιση των αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων για τις συνθέσεις NC, NC-MC με τη χρήση διαφορετικών συντελεστών διείσδυσης. Οι συντελεστές διείσδυσης που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση ήταν μειωμένοι σε ποσοστά 46.66% και 79% αντίστοιχα για τις δύο συνθέσεις.

Η ύπαρξη της σημαντικής διαφοράς μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών τιμών ενδέχεται να οφείλεται στους εξής λόγους:

- Συνολικά η δοκιμή επιταχυνόμενης διείσδυσης σύμφωνα με το πρότυπο **NT Build 492** δεν είχε αξιόπιστα αποτελέσματα λόγω σφαλμάτων στον προσδιορισμό του βάθους διείσδυσης με τη χρωματογραφική μέθοδο.
- Η παραδοχή επιφανειακής συγκέντρωσης στη βάση της συγκέντρωσης του διαλύματος και της πειραματικής τιμής του πορώδους απείχε από την πραγματική επιφανειακή συγκέντρωση.

Τέλος από τη σύγκριση όλων των τιμών των συντελεστών διείσδυσης μπορεί να προκύψει το εξής συμπέρασμα:

- Παρότι το πείραμα της επιταχυνόμενης διείσδυσης των χλωριόντων με την εφαρμογή διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού αποτελεί μία γρήγορη μέθοδο για την εκτίμηση του συντελεστή διείσδυσης, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές με το πείραμα της απλής διάχυσης στις τιμές των συντελεστών διείσδυσης.

## 9 Προτάσεις Μετεξέλιξης Ερευνητικής Εργασίας

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνουν κάποιες προτάσεις εξέλιξης της εργασίας που αφορούν την αναλυτική διερεύνηση της διείδυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

Καταρχήν, για την προσομοίωση της διάχυσης των χλωριόντων θα ήταν πρακτικά χρήσιμο η ανάλυση να είναι ανεξάρτητη από το πείραμα ή να πραγματοποιείται σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα του πειράματος ώστε να εξασφαλίζεται ότι καταλήγει σε αξιόπιστα αποτελέσματα. Αυτό θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με κατάλληλη θεώρηση επιφανειακής συγκέντρωσης και αναζήτηση του συντελεστή διείδυσης. Η θεώρηση αυτή θα μπορούσε να γίνει είτε με κάποια λογική παραδοχή είτε να ληφθεί πειραματικά.

Ακόμη, σε μελλοντική εργασία θα μπορούσε να συνεκτιμηθεί η ικανότητα δέσμευσης των χλωριόντων, ο χρονικά μεταβαλλόμενος χαρακτήρας της θερμοκρασίας και της επιφανειακής συγκέντρωσης των χλωριόντων καθώς και η γήρανση του σκυροδέματος. Επίσης, ιδιαίτερα σημαντικό θα ήταν να μπορέσει να εισαχθεί με κάποιο τρόπο ως παράμετρος η επιρροή της υγρασίας στη διείδυση των χλωριόντων και κυρίως στο μηχανισμό της τριχοειδούς ρόφησης υγρασίας.

Τέλος, ιδιαίτερα ενδιαφέρον θα ήταν να πραγματοποιηθεί προσομοίωση ρηγματωμένου σκυροδέματος με σκοπό την εκτίμηση της επιρροής του πλάτους και του βάθους της ρωγμής στο συντελεστή διείδυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

## 10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αποστολόπουλος Χ, Παπαδάκης ΕΓ & Δέμης Σ., 21-23 Οκτωβρίου 2009. *Διερεύνηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα και της επακόλουθης υποβάθμισης λόγω διάβρωσης οπλισμού από τη δράση χλωριόντων*. Πάφος, Κύπρος: 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ.
2. Βούκια Δ., 2013. *Διαπερατότητα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με μετακαολίνη*. Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
3. Ενημερωτικό blog για μηχανικούς «Κατασκευή-Constructing and Design News»,. *Οπλισμένο Σκυρόδεμα*,. Available at: <http://kataskevvh.blogspot.gr>
4. Κόλιας Στ., 2011-2012. *Προχωρημένη τεχνολογία σκυροδέματος*. Σημειώσεις διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών Ε.Μ.Π. <<Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών>>, Αθήνα.
5. Κομνηνού Ε., Οικονόμου Π., 2015. *Συγκριτική αξιολόγηση μηχανικών χαρακτηριστικών και μηχανικής συμπεριφοράς σκυροδέματος, ινοπλισμένου με μεταλλικές και συνθετικές ίνες*. Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
6. Κορδή Ρ., 2014. *Πειραματική διερεύνηση θλιπτικής και καμπτικής αντοχής ινοπλισμένου σκυροδέματος*. Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
7. Κουμούσης Β. (1998). «Ανάλυση φορέων με πεπερασμένα στοιχεία, Α Μέρος», Αθήνα
8. Λυμπερέα Ν., Τεταγιώτη Δ., Κορωνάκη Ε.Δ., Μπουντουβής Α.Γ., Μπατής Γ., 2009. *Μελέτη των μηχανισμών μεταφοράς χλωριόντων σε οπλισμένο σκυρόδεμα υπό εναλλασσόμενη έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον*. 7<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Πάτρα.
9. Μακρής Κ., Σμαργιανάκη Δ., 2012. *Η επίδραση του μετακαολίνη στις ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητες και στην ανθεκτικότητα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος*. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π, Αθήνα.
10. Μαρκαντωνάτος Ν., Δεμαρτίνος Κ., 2003. *Ινοπλισμένο σκυρόδεμα – συμπεριφορά SFRC υπό φόρτιση και ικανότητα σε διάτμηση δοκών (προσέγγιση με την μηχανική των θραύσεων)*. 9<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο <<Επισκευές- Ενισχύσεις Κατασκευών-03>>, Πάτρα.
11. Μπαδογιάννης Σ., 2002. *Αξιοποίηση καολίνων στην τεχνολογία σκυροδέματος*. Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
12. Μπαϊράμης Χ., 2012. *Έλεγχος παραμέτρων ανθεκτικότητας πορώδους σκυροδέματος*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
13. Παπαδάτου Μ., 2014. *Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος*. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., Αθήνα.

14. Παπακώστα Α., Τσιάρα Α., 2015. *Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου – με ίνες χάλυβα – σκυροδέματος σε περιβάλλον θεικών*. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., Αθήνα.
15. Σίδερης Κ, 2010. *Ανθεκτικότητα Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος*. ISBN: 978-960-8257-60-3 επιμ. σ.λ.:Τεκδοτική, ΣΕΛΚΑ - 4Μ ΕΠΕ.
16. Σοφιανός Α.Ι., 2010 . *Μέτρα υποστήριξης σηράγγων*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
17. Σφήκας Ι. 2014. *Διερεύνηση ιδιοτήτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος*. Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
18. Τεταγιώτη Δ., 2011, *Μελέτη του χρόνου ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό εναλλασσόμενες διαβρωτικές συνθήκες*. Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
19. Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., 2004, *Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου*, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
20. 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*. σ.λ.:American Concrete Institute.
21. ACI 222R, 2010. *Protection of Metals in Concrete Against Corrosion*. σ.λ.:American Concrete Institute.
22. Al-Akhras N., 2006. *Durability of metakaolin concrete to sulfate attack*. Cement and Concrete Research, 36, pp. 1727–1734.
23. 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.
24. Andrade C., Sanjuan M.A., Recuero A., Rio O., 1994. *Calculation of chloride diffusivity in concrete from migration experiments, in non-steady conditions*. Cement and Concrete Research, vol 24, 7, pp. 1214-1228
25. Atis C.D., Karahan O., 2009. *Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete*. Construction and Building Materials, 23, pp. 392-399.
26. ASTM C 1218/C 1218M, 2008. *Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*. σ.λ.:σ.λ.
27. ASTM C 642, 1997. *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. σ.λ.:σ.λ.
28. Audenaert K, Boel V & De Schutter G, 2005. *Chloride penetration in self compacting concrete by cyclic immersion*. σ.λ.:1st International Symposium On Design, Performance And Use Of Self-Consolidating Concrete.
29. Audenaert K, Boel V & De Schutter G, June 4-6, 2007. *Chloride Migration in Self Compacting Concrete*. Tours, France: 5th International Conference ConSec'07.

30. Audenaert K & De Schutter G, August 17-20, 2003. *Chloride penetration in self compacting concrete*. s.l.:3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Reykjavik.
31. Audenaert K, Yuan Q, & De Schutter G. (2010). *On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete*. In *Construction and Building Materials* (Vol. 24, pp. 396-402). Belgium: Elsevier Ltd.
32. Badogiannis E. and Tsivilis S.,2009. *Exploitation of poor Greek kaolins: durability of metakaolin concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 31, pp.128–133.
33. Bastidas-Arteaga E., Chateaneuf A., Sanchez-Silva M., Bressolette Ph., Schoefs F., 2011. *A comprehensive probabilistic model of chloride ingress in unsaturated concrete*. *Engineering Structures*, 33, pp. 720-730.
34. BISFA, 2009. *Terminology of man-made fibers*. 2009 edition. Brussels: The International Bureau for the Standardization of Man-made Fibers.
35. Boutz M.M.R., Wegen G., Roelfstra P.E., Haverkort R., 2008. *Service life design of concrete structures by numerical modeling of chloride ingress*. *Tailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst*, London.
36. Broomfield, 2006. *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, investigation and repair*. s.l.:2nd Edition. CRC Press.
37. Claisse P., 2014. *Transport properties of concrete, Measurement and Applications*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering.
38. Comsol Multiphysics Reference Manual Version 4.4.
39. EN 196-2. (2013). *Method of testing cement - Part 2 Q Chemical analysis of cement*. Brussels: European committee for standardization.
40. 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.
41. Gruber K.A., Ramlochan T., Boddy A., Hooton R.D., Thomas M.D.A., 2001. *Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin*. *Cement & Concrete Composites*, 23, pp. 479-484.
42. Hausmann DA. (1967). Steel corrosion in concrete. How does it occur? *Materials Protection*.
43. Karahan O., Atis C.D., 2011. *The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete*. *Materials and Design*, 32, pp. 1044–1049.
44. Kim MY, Yang EI & Yi ST, 2007. *Evaluation of Chloride Penetration Characteristics using a Colorimetric Method in Concrete Structures*. Toronto: SMiRT 19.
45. Lee NP & Chisholm DH, 2005. *Durability of Reinforced Concrete Structures Under Marine Exposure in New Zealand*. Judgeford- New Zealand: BRANZ Study Report 145. BRANZ Ltd.

46. Li L., Easterbook D., Xia J., Jin W.L., 2015. *Numerical simulation of chloride penetration in concrete in rapid chloride migration tests*. Cement and Concrete Composites, 63, pp. 113-121.
47. Luping T., Gulikers J., 2007. *On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete*. Cement and Concrete Research, 37, pp.589-595.
48. Marsavina L., Audenaert K., De Schutter G., Faur N., Marsavina D., 2009. *Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete*. Construction and Building Materials, 23, pp. 264-274.
49. Nokken M., Boddy A., Hooton R. D., Thomas M.D.A., 2006. *Time dependent diffusion in concrete-three laboratory studies*. Cement and Concrete Research, 36, pp. 200-207.
50. NT Build 443, 1995. *Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration*. Finland: Nordtest.
51. NT Build 492, 1999. *Concrete, mortar and cement-based materials: Chloride migration coefficient from non-steady state migration experiment*. Finland: Nordtest.
52. Nunes S, Figueiras H, Sousa Coutinho J, & Figueiras J. (2009). *SCC and conventional concrete on site: Property assessment (Caracterização das propriedades do betão em elementos produzidos com BAC e betão convencional)*. In *REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS* (Vol. 2, pp. 25-36). Portugal: IBRACON Structures and Materials Journal.
53. Otsuki N, Nagataki S & Nakashita K, 1993. *Evaluation of the AgNO<sub>3</sub> solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials*. s.l.:Construction & Building Materials.
54. Papadakis VG. (2000). *Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress*. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 30, pp. 291-299). Denmark: Pergamon.
55. 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.
56. Park S.-S., Kwon S.-J., Jung S. H., 2012. *Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation*. Construction and Building Materials, 29, pp. 183-192.
57. Rahman M. K., Al-Kutti W.A., Shazali M.A. Baluch M.H., M.ASCE., 2012. *Simulation of Chloride Migration in Compression-Induced Damage in Concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 24, No. 7.
58. Ramezani pour A. A. and Bahrami J. H., 2012. *Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes*. Construction and Building Materials, 30, pp.470-479.



59. RILEM TC 116-PCD, 1999. *Permeability of Concrete as a criterion of its durability*, Bagnaux, France.
60. RILEM TC 178-TMC, 2002. *RILEM Technical Recommendation: Testing and Modelling Chloride Penetration In Concrete: Analysis of total chloride content in concrete*. s.l.:Materials and Structures.
61. RILEM TC 189-NEC, 2007. *Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover*. RILEM Publications S.A.R.L.
62. Sideris K. K. and Anagnostopoulos N. S., 2013. *Durability of normal strength self-compacting concretes and their impact on service life of reinforced concrete structures*. *Construction and Building Materials*, 4, pp.491-497.
63. Singh A.P., Singhal D., 2011. *Permeability of Steel Fibre Reinforced Concrete Influence of Fibre Parameters*. *Procedia Engineering*, 14, pp. 2823-2829.
64. Sirivivatnanon V, & Khatri RP. (1999). *Characterising chloride penetration resistance of concrete*. Australia: CSIRO Division of Building, Construction and Engineering.
65. Stanish KD, Hooton RD & Thomas MDA, 1997. *Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review*. s.l.:FHWA Contract DTFH61-97-R-00022 Prediction of Chloride Penetration in Concrete.
66. Stanish K., Thomas M., 2003. *The use of bulk diffusion tests to establish time-dependent concrete chloride diffusion coefficients*. *Cement and Concrete Research*, 33, pp. 55-62.
67. Tang L., Nilsson L.-O., 1991. *Chloride Diffusivity in High Strength Concrete*. s.l.:Nordic Concrete Research.
68. Tang L., Nilsson L.-O., 1992. *Chloride Diffusivity in High Strength Concrete at Different Ages*, *Nordic Concr. Res.*, Publication, vol. 11,pp. 162–171.
69. 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.
70. Tuutti K (1982): *Corrosion of steel in concrete*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, CBI Report fo 82-4, ISSN 0346-6906.
71. Zheng J. J., Zhou X. Z., 2007, *Prediction of the chloride coefficient of concrete*, *Materials and Structures*, 40, pp.693-701.

## 11 Παράρτημα

### 11.1 Ανοικτό Πορώδες

Στον Πίνακα 26 παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ανοικτού πορώδους.

Πίνακας 26 : Πειραματικά αποτελέσματα ανοικτού πορώδους OP (%) για όλα τα δοκίμια

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΜΕΤΡΗΣΗ ΒΑΡΟΥΣ ΞΗΡΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (g)	ΜΕΤΡΗΣΗ ΒΑΡΟΥΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (g)	ΜΕΤΡΗΣΗ ΒΑΡΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΥΠΟ ΑΝΩΣΗ (g)	ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ ΟΡ(%)
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
NCPPE-0.45	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
NCPPE-0.9	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
SF-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
SF-1	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
NCPCX-0.45	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
NCPCX-0.9	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

### 11.2 Αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων

#### 11.2.1 Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων κατά το πρότυπο NT BUILD 492

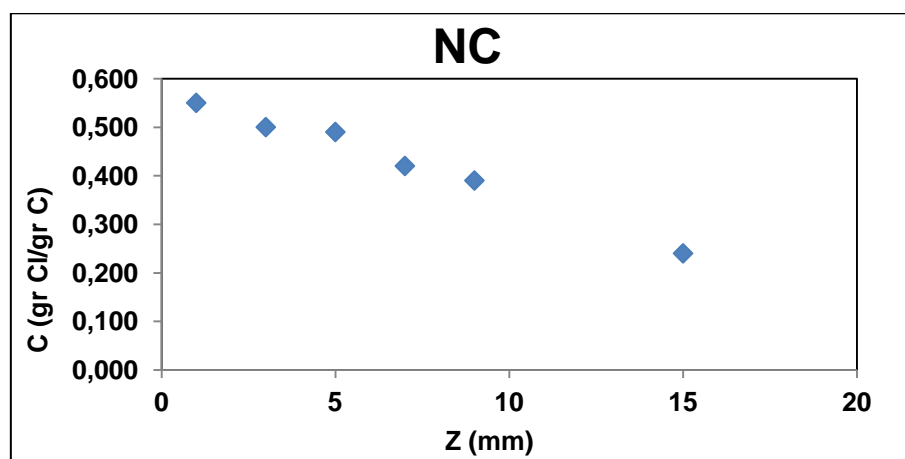
Στον Πίνακα 27 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα βασικά πρωτογενή δεδομένα για όλα τα δοκίμια

**Πίνακας 27 :** Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικών μετρήσεων της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση

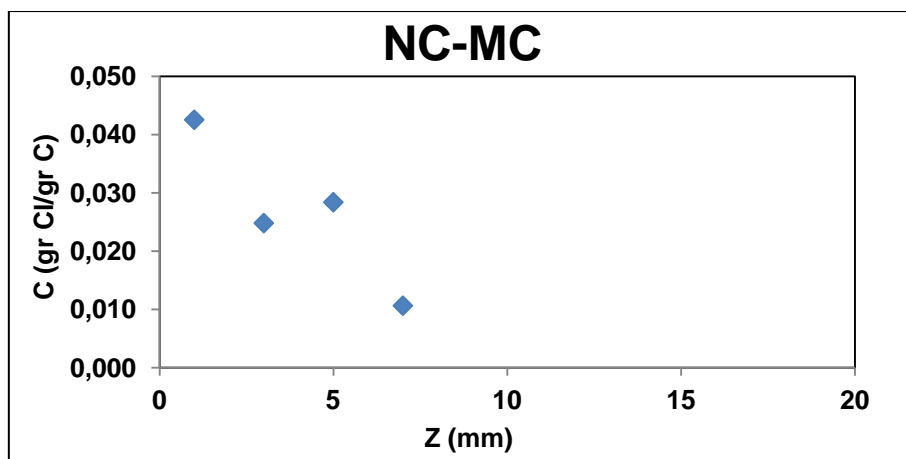
ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΔΟΚ. ΤΑΣΗ	ΔΟΚ. ΕΝΤΑΣΗ	ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ	ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	ΜΕΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ
ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	V	A	V	A	V	A	mm	h	°C	mm
NC	30.00	0.11	20.30	0.07	20.00	0.09	47.33	24.10	27.50	12.07
NC-MC	30.00	0.05	30.00	0.05	29.40	0.07	45.67	24.17	29.50	22.71
SF - 0.5	30.00	0.12	20.10	0.07	19.50	0.11	45.00	24.00	31.50	28.14
SF - 1	30.00	0.18	9.90	0.04	10.00	0.05	46.33	24.00	33.00	14.50
NCPF - 0.45	30.80	0.13	14.80	0.56	15.10	0.07	45.67	24.00	32.50	10.93
NCPF - 0.9	29.70	0.11	20.10	0.07	19.30	0.10	47.33	24.00	33.50	9.57
NCPCX - 0.45	30.00	0.11	20.10	0.07	19.40	0.12	48.33	24.03	31.50	10.29
NCPCX - 0.9	30.00	0.12	15.20	0.06	14.70	0.07	45.67	24.00	32.50	16.79

### 11.2.2 Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων με το πρότυπο NT 443

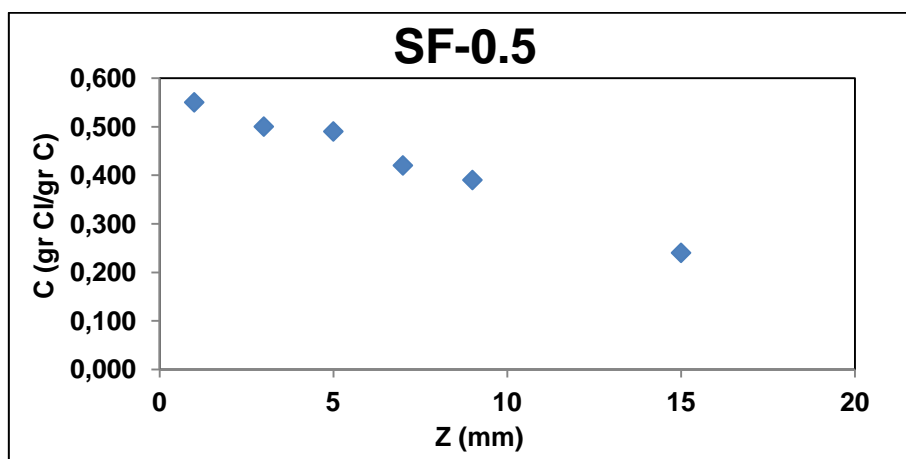
Στα Σχήματα 38-45 παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές προσδιορισμού της συγκέντρωσης χλωριόντων για όλα τα μείγματα και στα διάφορα βάθη.



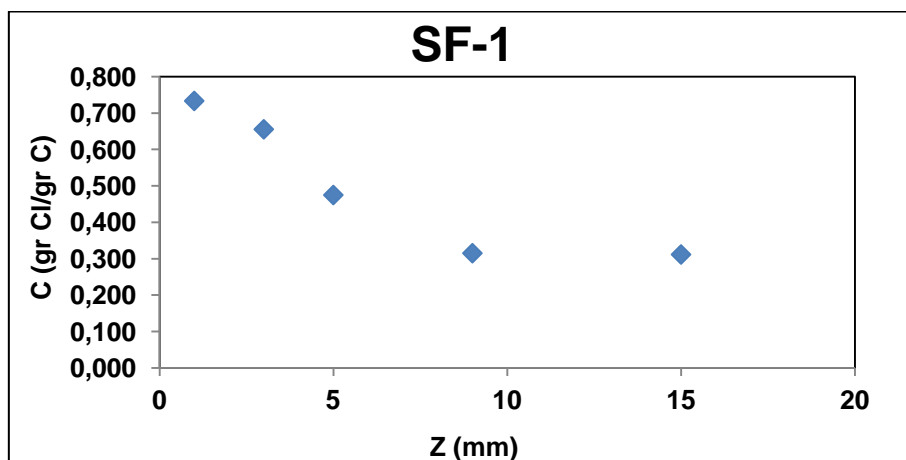
**Σχήμα 38 :** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NC.



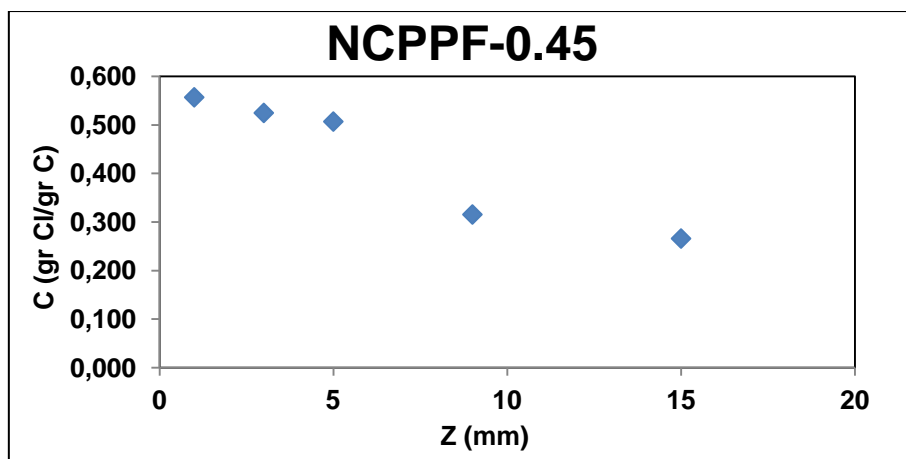
**Σχήμα 39 :** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NC-MC.



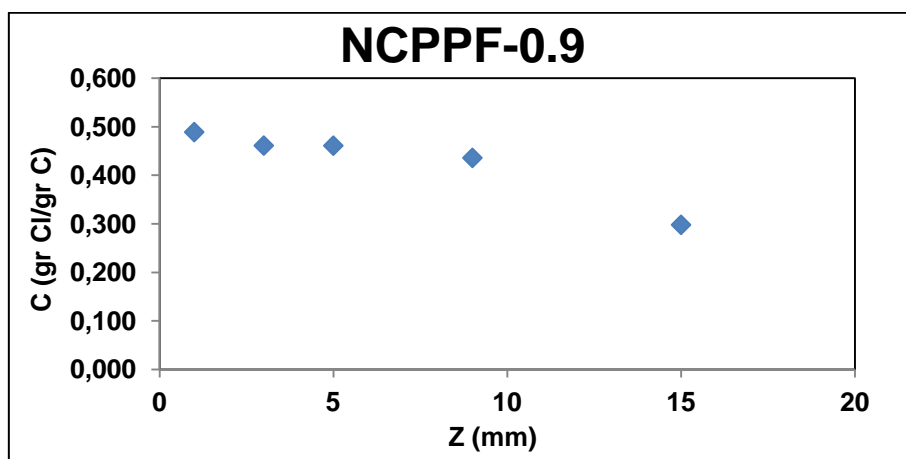
**Σχήμα 40:** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση SF-0.5.



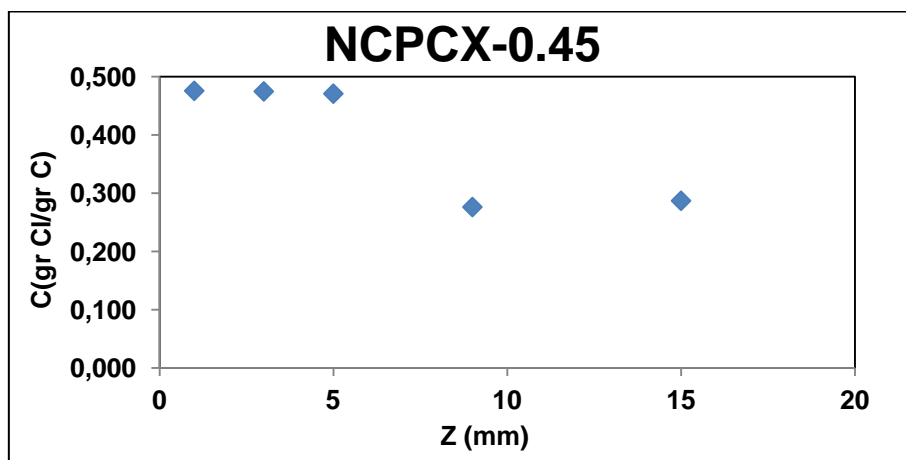
**Σχήμα 41 :** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση SF-1.



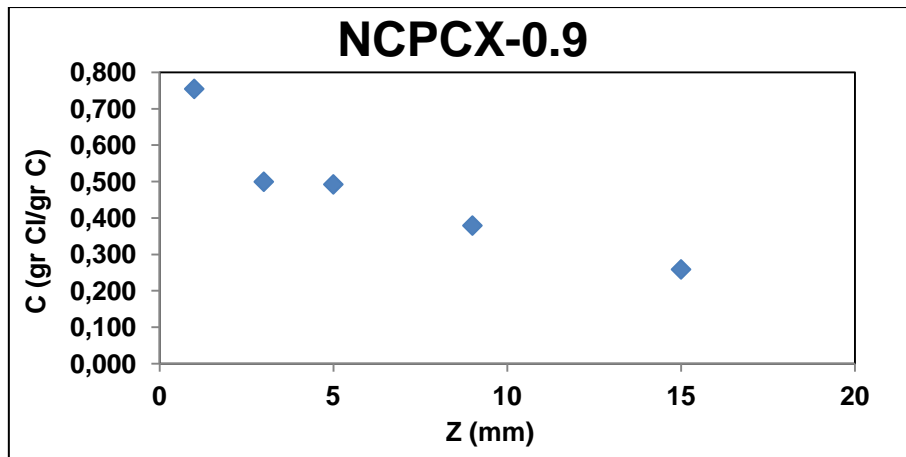
**Σχήμα 42 :** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NCPPF-0.45.



**Σχήμα 43 :** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NCPPF-0.9.



**Σχήμα 44 :** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NCPCX-0.45.



**Σχήμα 45:** Διάγραμμα της συγκέντρωσης  $c$  (gr Cl/gr C) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων  $z$  (mm) για τη σύνθεση NCPCX-0.9.