



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΗ ΠΡΟΣΘΕΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ειρήνη Ι. Μακρινού

Επιβλέπων :

Ευστράτιος Μπαδογιάννης | Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας και την περάτωση των προπτυχιακών μου σπουδών, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με στήριξαν και με βοήθησαν, άμεσα ή έμμεσα, σε αυτήν την πορεία.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μπαδογιάννη Ευστράτιο, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την αμέριστη βοήθεια, την συνεχή παρουσία και την πολύτιμη καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της μεγάλης και αρκετά απαιτητικής εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην υποψήφια διδάκτωρ του Πανεπιστήμιου Πατρών, Στρατουρά Μαρία, για την αδιαμφισβήτητης σημασίας βοήθεια της στη διεξαγωγή τόσο όλων των πειραμάτων, για μια ολόκληρη χρονιά, όσο και στη διαδικασία συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστίες οφείλω επίσης στο διδακτικό και ερευνητικό προσωπικό του Εργαστηρίου 'Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας' της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την υλικοτεχνική υποστήριξη τους κατά τη διεξαγωγή τμήματος των πειραμάτων και στον Ασπιώτη Κωνσταντίνο, υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για τη συνδρομή του στην προετοιμασία και την παραγωγή των συνθέσεων.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Στάμο Αθανάσιο, ΕΔΙΠ της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την πολύτιμη βοήθεια του στη χρήση του λογισμικού Matlab R2016a, κατά τη διαδικασία της Μοντελοποίησης της διάχυση και διείδυσης χλωριόντων.

Ακόμη, οφείλω να ευχαριστήσω το προσωπικό του Εργαστηρίου 'Οπλισμένου Σκυροδέματος' της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., και συγκεκριμένα τον κ. Χατζηρούμπη Δημήτριο, για τη βοήθεια του στη διαδικασία λήψης δοκιμίων και σκόνης.

Τέλος, θα ήθελα πραγματικά να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την διαρκή, έμπρακτη στήριξη, παρουσία και ενθάρρυνση τους όλα αυτά τα χρόνια που είμαι σε αυτή τη σχολή αλλά και τους φίλους μου για την αγάπη και την κατανόηση που έχουν δείξει μέχρι τώρα.

Μακρινού Ειρήνη

E-mail: eiren126@hotmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανθεκτικότητα των Κονιαμάτων και πώς αυτή επηρεάζεται από την προσθήκη πρόσθετων τσιμεντοειδών όπως ο Μετακαολίνης (MK), η Ιπτάμενη Τέφρα (FA), η Πυριτική Παιπάλη (SF) και η Σκωρία Υψικαμίνου (GGBF) Συνολικά παρασκευάστηκαν και εξετάστηκαν εννέα (9) συνθέσεις κονιαμάτων με διαφορετικά ποσοστά περιεχόμενων κ.β. τσιμεντοειδών (σε ποσοστά 10% και 20% για το κάθε τσιμεντοειδές) και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με εκείνα μιας Αμιγούς σύνθεσης κονιάματος (OPC).

Συγκεκριμένα, εκτιμήθηκε η αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων σύμφωνα με τα πρότυπα NordTest Build 492 και 443, μέσω του προσδιορισμού του Συντελεστή Διείσδυσης χλωριόντων (D_{nssm}) και του Συντελεστή Διάχυσης (D_{sm}) αντίστοιχα. Επίσης, μετρήθηκαν το ανοικτό πορώδες (OP), ο συντελεστής Τριχοειδούς Απορρόφησης (S), η Θλιπτική τους Αντοχή. Επίσης, μελετήθηκε η ρευστότητα του νωπού κονιάματος, μέσω της δοκιμής κάθισης.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με το λογισμικό του MATLAB R2016a των φαινομένων της διάχυσης των χλωριόντων και της επιταχυνόμενης διείσδυσης των χλωριόντων με την εφαρμογή διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού, με σκοπό τη συσχέτιση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων, όσον αφορά στη διείσδυση και διάχυση χλωριόντων.

Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, παρατηρήθηκε ουσιαστική μείωση του πορώδους καθώς και του συντελεστή Τριχοειδούς Απορρόφησης (S) ως προς την αμιγή Σύνθεση. Ακόμη, η δοκιμή διάχυσης σύμφωνα με το πρότυπο NT Build 443 έδειξε μείωση της διείσδυσης με την προσθήκη των Τσιμεντοειδών, με τη Σύνθεση MK20 να παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά. Επιπρόσθετα, από τη δοκιμή της διείσδυσης χλωριόντων τόσο κατόπιν επιταχυνόμενης διείσδυσης Cl^- , όσο και κατόπιν της δοκιμής διάχυσης Cl^- προέκυψε μείωση του συντελεστή διείσδυσης σε όλες τις συνθέσεις, με μεγαλύτερη μείωση στη σύνθεση MSF20. Τέλος παρατηρήθηκε, πολύ καλή συμφωνία μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων όσον αφορά στις συγκεντρώσεις των χλωριόντων σε διάφορα βάθη, τόσο για τη δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων όσο και για τη δοκιμή διάχυσης χλωριόντων.

Λέξεις κλειδιά: κόνιαμα, τσιμεντοειδή πρόσθετα, διάχυση χλωριόντων, διείσδυση χλωριόντων, θλιπτική αντοχή, υδατοαπορροφητικότητα, πορώδες.

ABSTRACT

The subject of this thesis is to assess the effect of cementitious materials addition on mortar's durability, such as Metakaolin (MK), Fly Ash (FA), Silica Fume (SF) and Granulated Blast Furnace Slag (GGBF). In total, nine (9) mixtures of mortar with various percentages of cementitious materials were examined (10% and 20% per weight of cement) and the results were compared with those of a reference mortar (OPC), containing only cement.

Specifically, the chloride penetration was investigated according to standards NordTest Build 492 and 443 in order to estimate the resistance to chloride ingress, while the Non-steady state chloride migration Coefficient (D_{nssm}) and Chloride diffusion Coefficient (D_{sm}), were estimated. The open porosity (OP), the sorptivity (S) the compressive strength and the rheology of fresh mortars were also investigated.

Additionally, the phenomena of chloride diffusion and accelerated chloride penetration by applying an electric potential difference were simulated with software MATLAB R2016a, in order to achieve correlation between the experimental and the analytical results as far as the penetration and diffusion of chlorides are concerned.

According to the experimental results, a substantial change in porosity and in sorptivity was observed, compared to the neat mortar. Furthermore, the diffusion test in accordance with standard NT Build 443 showed reduced ingress after the cementitious materials reinforcement. In particular, the mixture of 20% Metakaolin per volume of mortar (MK20) led to the lowest value of the Coefficient D_{sm} .

Finally, there was a fairly good agreement between analytical and experimental results, in terms of concentrations of chlorides at various depths, for both penetration and diffusion of chlorides.

Keywords: mortar, supplementary cementitious materials, chlorides' diffusion, chlorides penetration, compressive strength, sorptivity, open porosity

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Παράγοντες ανθεκτικότητας	2
1.3 Το νερό ως παράγοντας φθοράς	3
1.4 Συνδεδεμένοι πόροι στο σκυρόδεμα	5
1.5 Έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον	7
1.6 Διείσδυση χλωριόντων	8
1.6.1 Σπουδαιότητα χλωριόντων	8
1.6.2 Πηγές και ενώσεις χλωριόντων	9
1.7 Ενανθράκωση σκυροδέματος	12
1.8 Διάβρωση Οπλισμού	14
1.9 Μηχανισμοί διείσδυσης διαβρωτικών μέσων	18
1.9.1 Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)	18
1.9.2 Υδατοπερατότητα (Water permeability)	19
1.9.3 Μηχανισμός διείσδυσης (permeation)	22
1.9.4 Μηχανισμός διάχυσης (diffusion)	22
1.10 Τρόποι Προστασίας Οπλισμένου Σκυροδέματος	24
2. ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΗ ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	26
2.1 Εισαγωγή	26
2.2 Ιπτάμενη Τέφρα	27
2.3 Πυριτική Παιπάλη	29
2.4 Σκωρία Υψικαμίνου	30
2.5 Μετακαολίνης	32
3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	35
3.1 Εισαγωγή	35

3.2 Τρέχουσα ερευνητική εργασία	35
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	42
4.1 Εισαγωγή.....	42
4.2 Υλικά και Συνθέσεις δοκιμίων.....	42
4.3 Ρεολογικά χαρακτηριστικά και πυκνότητα κονιαμάτων.....	45
4.4 Μηχανικές ιδιότητες κονιαμάτων.....	46
4.5 Υδατοαπορροφητικότητα	47
4.5.1 Ανοιχτό Πορώδες (OP).....	48
4.5.2 Τριχοειδής απορρόφηση	50
4.6 Αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων.....	51
4.6.1 Συντελεστής Διείσδυσης χλωριόντων - NT BUILD 492.....	52
4.6.2 Συντελεστής Διάχυσης.....	59
4.6.2.1 Προσδιορισμός συγκέντρωσης χλωριόντων (Cl ⁻ total)	62
4.6.2.2 Προσδιορισμός συντελεστή διάχυσης χλωριόντων.....	65
5. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MATLAB R2016a.....	69
5.1 Εισαγωγή.....	69
5.2 Μοντελοποίηση της Επιταχυνόμενης Διείσδυσης των χλωριόντων, εξαιτίας της εφαρμογής διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού	70
5.2.1 Μέθοδος Επίλυσης Μερικής Διαφορικής Εξίσωσης, απευθείας από την αναλυτική της λύση.....	70
5.3 Μοντελοποίηση της Διάχυσης των χλωριόντων, της δοκιμής NT Build 443.....	74
5.3.1 Μέθοδος Επίλυσης Μερικής Διαφορικής Εξίσωσης Διάχυσης (Diffusion Differential Equation), απευθείας από την αναλυτική της λύση.....	74
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	77
6.1 Ρεολογικά χαρακτηριστικά Κονιαμάτων	77
6.2 Μηχανικές ιδιότητες κονιαμάτων.....	78

6.3	Υδατοαπορροφητικότητα	80
6.3.1	Ανοιχτό Πορώδες.....	80
6.3.2	Τριχοειδής απορρόφηση	83
6.4	Αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων.....	86
6.4.1	Συντελεστής Διείσδυσης χλωριόντων - NT BUILD 492.....	86
6.4.2	Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων - NT BUILD 443	89
6.5	Μοντελοποίηση της διείσδυσης και διάχυσης χλωριόντων με το πρόγραμμα MATLAB R2016a	94
6.5.1	Επιταχυνόμενη Διείσδυση χλωριόντων.....	94
6.5.2	Μοντελοποίηση της διάχυσης χλωριόντων.....	99
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	108
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	110
9.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	116
9.1	Τριχοειδής απορρόφηση.....	116
9.2	Αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων.....	117
9.2.1	Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων κατά το πρότυπο NT BUILD 492.....	117
9.3	Μοντελοποίηση διείσδυσης χλωριόντων NT 492	119
9.4	Μοντελοποίηση διείσδυσης χλωριόντων NT 492	123
9.5	Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων.....	126
9.5.1	Διάχυση χλωριόντων NT 443.....	126
9.6	Μοντελοποίηση διείσδυσης χλωριόντων NT 492 - Κώδικας Matlab R2016a.....	129
9.7	Μοντελοποίηση διάχυσης χλωριόντων NT 443 - Κώδικας Matlab R2016a.....	131

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1: Παράγοντες ανθεκτικότητας.....	3
Σχήμα 2: Σχηματική παράσταση τομής σκληρυμένου σκυροδέματος	5
Σχήμα 3: Επίδραση του λόγου N/T στη δημιουργία τριχοειδών κενών	6
Σχήμα 4 : Ελάχιστη κατηγορία αντοχής σκυροδέματος, ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου, μέγιστος λόγος N/T κατά EN 206.....	9
Σχήμα 5: Φθορά θαλάσσιας κατασκευής η οποία έρχεται σε άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό	11
Σχήμα 6: Διείσδυση διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂) στον οπλισμό σκυροδέματος.....	12
Σχήμα 7: Εκτίμηση βάθους ενανθράκωσης σκυροδέματος μετά από ψεκάσμο με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνη	13
Σχήμα 8 : Ο μηχανισμός της διάβρωσης του χάλυβα στο σκυρόδεμα	16
Σχήμα 9: Οι σχετικοί όγκοι του σιδήρου και των προϊόντων της διάβρωσης.....	16
Σχήμα 10: Εξέλιξη διάβρωσης οπλισμού από χλωριόντα.....	17
Σχήμα 11: Σχέση υδατοδιαπερατότητας, λόγου N/T και τριχοειδών πόρων	19
Σχήμα 12: Σκαρίφημα απεικόνισης υδατοπερατότητας πρισματικού δοκιμίου.....	21
Σχήμα 13: Σχέση θλιπτικής αντοχής, υδατοδιαπερατότητας και λόγου στερεών προς κενά..	22
Σχήμα 14: Μηχανισμοί μεταφοράς χλωριόντων στο σκυρόδεμα.....	24
Σχήμα 15 : Η διάταξη της δοκιμής NT492.....	53
Σχήμα 16 : Υπόδειγμα μέτρησης βάθους διείσδυσης χλωριόντων.....	56
Σχήμα 17 : Η διάταξη της δοκιμής NordTest 443	62
Σχήμα 18: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης δοκιμής και καθορισμός κατευθύνσεως ροής της μάζας	73
Σχήμα 19 : Μέση θλιπτική αντοχή (MPa), για κάθε σύνθεση	80
Σχήμα 20 : Ανοικτό πορώδες OP (%), για κάθε σύνθεση	82
Σχήμα 21 : Διάγραμμα απορρόφησης νερού συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, για τη σύνθεση MFA10	84
Σχήμα 22 : Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min ^{0.5}), ανά σύνθεση.....	86
Σχήμα 23 : Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων Dnssm (m ² /s), για κάθε σύνθεση	89

Σχήμα 24 : Συγκεντρωτικό διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm), για όλες τις συνθέσεις.....	91
Σχήμα 25 : Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων D_{sm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s), για κάθε σύνθεση.....	93
Σχήμα 26 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση OPC.....	94
Σχήμα 27 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση GBF10.....	95
Σχήμα 28 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση MFA10.....	95
Σχήμα 29 : Συγκεντρωτικό διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων z (mm) για όλες τις συνθέσεις.....	96
Σχήμα 30 : Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ πειράματος κι ανάλυσης για το μέγιστο βάθος διείσδυσης των χλωριόντων όλων των συνθέσεων.....	98
Σχήμα 31 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση OPC.....	99
Σχήμα 32 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση GBF10.....	100
Σχήμα 33 : Συγκεντρωτικό διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για όλες τις συνθέσεις.....	102
Σχήμα 34 : Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ πειράματος κι ανάλυσης για τη συγκέντρωση χλωριόντων, σε βάθος $z = 10$ mm όλων των συνθέσεων.....	104
Σχήμα 35 : Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων για τη σύνθεση MFA10.....	105
Σχήμα 36 : Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων για τη σύνθεση MSF10.....	106
Σχήμα 37 : Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων για τη σύνθεση GBF10.....	107

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1 : Χαρακτηριστικά και Κωδικοποίηση Συνθέσεων.....	43
--	----

Πίνακας 2 : Ποσότητες των υλικών ανά σύνθεση (Kg/m ³)	45
Πίνακας 3 : Διαφορά δυναμικού και διάρκεια δοκιμής [πηγή: NordTest Build 492 (1999)].	54
Πίνακας 4 : Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων, για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διάχυσης [πηγή: Tang (1996)].....	58
Πίνακας 5 : Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων, για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διάχυσης [πηγή: Nilsson et all (1998)]	59
Πίνακας 6 : Οι παράμετροι που τοποθετήθηκαν για τις 9 συνθέσεις.	71
Πίνακας 7 : Οι παράμετροι που συμπληρώθηκαν για τις 9 συνθέσεις.	75
Πίνακας 8 : Αποτελέσματα δοκιμής κάθισης και πυκνότητα.....	77
Πίνακας 9 : Αποτελέσματα (μέση τιμή) δοκιμών θλίψης 2 7, 14, 28 και 90 ημερών, κυβικών δοκιμών.	79
Πίνακας 10 : Μετρήσεις και αποτελέσματα δοκιμής ανοικτού πορώδους.	81
Πίνακας 11 : Πειραματικές μετρήσεις δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης για κάθε σύνθεση.	83
Πίνακας 12 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης.	85
Πίνακας 13: Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικών μετρήσεων της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων, για κάθε δοκίμιο.	87
Πίνακας 14 : Αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων, για κάθε σύνθεση.....	88
Πίνακας 15 : Αποτελέσματα της συγκέντρωσης των χλωριόντων, για όλες τις συνθέσεις, σε βάθη 0-16 mm.....	90
Πίνακας 16 : Αποτελέσματα της δοκιμής διάχυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση.....	92
Πίνακας 17 : Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ πειράματος και ανάλυσης, για το μέγιστο βάθος διείσδυσης κατά τη μέθοδο NT 492.....	97
Πίνακας 18 : Αναλυτικά αποτελέσματα της συγκέντρωσης των χλωριόντων σε σχέση με το βάθος (mm) για κάθε σύνθεση για την NT443.....	101
Πίνακας 19 : Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ πειράματος και ανάλυσης για τη συγκέντρωση c χλωριόντων,σε βάθος z=10 mm κατά τη μέθοδο NT 443.....	103

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1 : Ιπτάμενη Τέφρα.....	28
Εικόνα 2 : Πυριτική Παιπάλη.....	29
Εικόνα 3: Σκωρία υψικαμίνου.....	31
Εικόνα4: Μετακαολίνης.....	32
Εικόνα 5 : Παρασκευή δοκιμίων. Στα αριστερα, κυλινδρικά δοκίμια 200x100 (mm), στα δεξιά, κυβικά δοκίμια 50x50 (mm).....	44
Εικόνα 6 : Συντήρηση σε νερό 12 κυβικών κι ενός κυλινδρικού δοκιμίου, σύνθεσης MK20	44
Εικόνα 7: Διάταξη δοκιμής κάθισης (mini slump test) σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015....	46
Εικόνα 8 : Διάταξη δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής f_c	47
Εικόνα 9 : Θραύση δοκιμίων μετά από μονοαξονική θλίψη.....	47
Εικόνα 10 : Διαδικασία μέτρησης ανοικτού πορώδους: μέτρηση μάζας υπό άνωση (M_{imm}) .	49
Εικόνα 11 : Μέτρηση μάζας υπό άνωση (M_{imm})	49
Εικόνα 12 : Διεξαγωγή πειράματος τριχοειδούς απορρόφησης	50
Εικόνα 13 : Στα αριστερά, προετοιμασία δοκιμίων για το πείραμα τριχοειδούς απορρόφησης, δεξιά, διεξαγωγή πειράματος.....	51
Εικόνα 14 : Δοκίμια μετά την εμφύσηση σε νερό.....	51
Εικόνα 15 : Ηλεκτρική διάταξη.....	52
Εικόνα 16: Αριστερα, η πειραματική διάταξη της δοκιμής NT492, δεξιά, η διάταξη με το ηλεκτρικό κύκλωμα σε λειτουργία	55
Εικόνα 17 : Διάρρηξη δοκιμίου για τον προσδιορισμό της διείσδυσης των Cl^-	56
Εικόνα 18 : Δοκίμια μετά από διάρρηξη και ψεκάσμο με $AgNO_3$. Αριστερά, η Σύνθεση MSF10, στη μέση, η MSF20, δεξιά η GBF10.....	57
Εικόνα 19 : Δοκίμια μετά από ψεκάσμο με $AgNO_3$. Αριστερά, η σύνθεση MK10, δεξιά, η σύνθεση MK20.	57
Εικόνα 20 : Λήψη δειγμάτων σκόνης με την χρήση ειδικού δράπανου «Profile Grinder».....	60
Εικόνα 21 : Δοκίμιο μετά τη λήψη δειγμάτων σκόνης σε όλα τα βάθη (0-16 mm)	61

Εικόνα 22 : Δείγματα σκόνης της Σύνθεσης MK20 σε βάθη από 2 έως 16 mm.....	61
Εικόνα 23 : Ζύγιση δείγματος σκόνης σε ζυγό ακριβείας.....	63
Εικόνα 24 : Μαγνητικός αναδευτήρας για τη θέρμανση κι ανάδευση διαλύματος σκόνης....	64
Εικόνα 25 : Διήθηση διαλύματος σκόνης με ηθμό, σε ποτήρι ζέσεως 500 mL	64
Εικόνα 26 : Χρωματικές αλλαγές του διαλύματος μέχρι να χρωματιστεί ερυθρόφαιο, κατά τη διαδικασία τιτλοδότησης κατά το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-2	65

1. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

1.1 Εισαγωγή

Ανθεκτικότητα σε διάρκεια ονομάζουμε τον ελάχιστο χρόνο μέσα στον οποίο η κατασκευή έχει την ικανότητα να ανθίσταται στις περιβαλλοντικές επιδράσεις χωρίς να χάνει τις ιδιότητες αντοχής και λειτουργικότητάς της κάτω από ένα αποδεκτό όριο. Όπως όλα τα σύνθετα υλικά, έτσι και το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει πεπερασμένο χρόνο ζωής πέραν του οποίου κρίνεται λειτουργικά ανεπαρκές. Άλλωστε, κανένα υλικό δεν είναι από τη φύση του απολύτως ανθεκτικό. Ως αποτέλεσμα των περιβαλλοντικών αλληλεπιδράσεων, η μικροδομή και συνεπώς οι ιδιότητες αλλάζουν με το χρόνο. Ένα υλικό θεωρείται ότι έχει ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής του όταν οι ιδιότητές του, κάτω από δεδομένες συνθήκες λειτουργίας, έχουν απομειωθεί μέχρι ένα σημείο που η περαιτέρω χρήση του θεωρείται είτε επισφαλής είτε αντιοικονομική. Επιπλέον, μία ανθεκτική κατασκευή ευνοεί τη διατήρηση των περιβαλλοντικών πόρων και τη μείωση των αποβλήτων, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις περιβαλλοντικές επιδράσεις λόγω επισκευής και αντικατάστασης.

Το σκυρόδεμα πρέπει να ανθίσταται στις περιβαλλοντικές επιδράσεις, στη χημική προσβολή και στη φθορά, ενώ ταυτόχρονα επιβάλλεται να διατηρεί τις επιθυμητές μηχανικές του ιδιότητες. Το γεγονός αυτό σε συνάρτηση με το ότι τα έργα από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν κατασκευαστεί πριν από αρκετές δεκαετίες, καθιστά το πρόβλημα της ανθεκτικότητας σε διάρκεια το υπ' αριθμόν ένα επιστημονικό και πρακτικό πρόβλημα του σκυροδέματος.

Οι κατασκευές ανάλογα με τη χρήση και τη λειτουργία τους απαιτούν διαφορετικό βαθμό ανθεκτικότητας που εξαρτάται από τις συνθήκες έκθεσης του περιβάλλοντος και τις επιθυμητές ιδιότητες. Τα συστατικά του σκυροδέματος, η αναλογία τους και η αλληλεπίδραση αυτών, ο τρόπος ανάμιξης και συντήρησης και οι συνθήκες περιβάλλοντος καθορίζουν τελικά την ανθεκτικότητα και τη ζωή του σκυροδέματος.

Στις μέρες μας, υπάρχει μια γενική επίγνωση ότι κατά το σχεδιασμό των κατασκευών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να αξιολογούνται τα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας των δομικών υλικών τόσο σχολαστικά όσο και άλλα θέματα, όπως τα μηχανικά χαρακτηριστικά και το αρχικό κόστος. Άλλωστε, τα έξοδα της επισκευής και αντικατάστασης των κατασκευών που προκύπτουν από την αστοχία των υλικών πρέπει να αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι του συνολικού προϋπολογισμού της κατασκευής. Εκτιμάται ότι, στις βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες, το 40% των συνολικών πόρων της κατασκευαστικής βιομηχανίας χρησιμοποιείται για την επισκευή και συντήρηση των υπάρχουσών κατασκευών και μόνο το 60% για νέες εγκαταστάσεις. Επίσης, είναι εμφανής η τάση

για ενισχύση και αποκατάσταση υφιστάμενων κατασκευών, κυρίως λόγω των κακών οικονομικών συνθηκών που επικρατούν στη χώρα μας αλλά και παγκοσμίως.

1.2 Παράγοντες ανθεκτικότητας

Οι κύριες αιτίες μείωσης της ανθεκτικότητας μιας κατασκευής από σκυρόδεμα μπορεί να επηρεάζονται από α) εσωτερικούς ή β) εξωτερικούς παράγοντες και μπορεί να είναι 1) φυσικές, 2) χημικές, 3) μηχανικές. Οι τρεις κατηγορίες ρευστών που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα είναι:

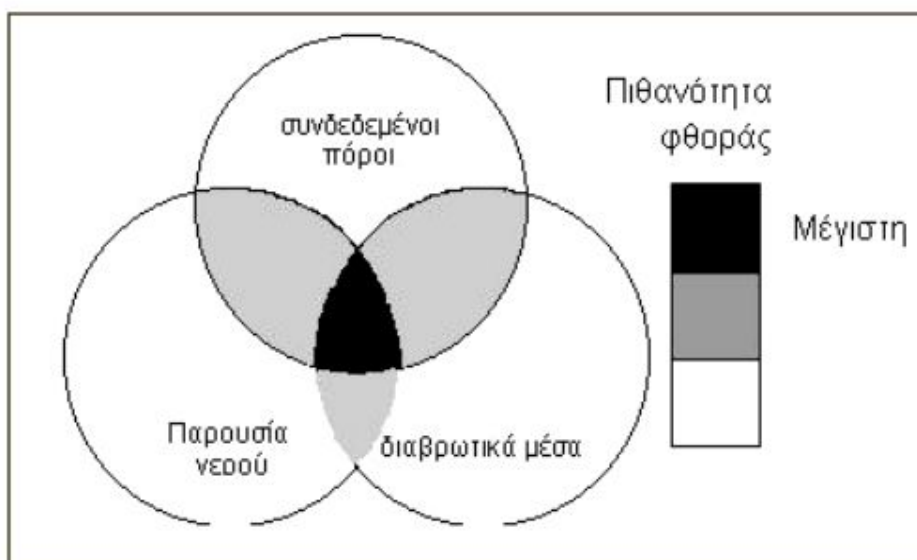
- το νερό
- ο ατμοσφαιρικός αέρας (O_2 , CO_2)
- το ειδικό περιβάλλον που μπορεί να βρίσκεται το σκυρόδεμα (SO_4^{2-} , Cl^- , O_2)

Η διαπερατότητα (permeability), εκφράζει την ευκολία με την οποία τα παραπάνω ρευστά εισέρχονται και μεταφέρονται στο σκυρόδεμα. Η κίνηση των ρευστών μέσα στο σκυρόδεμα μπορεί να πραγματοποιηθεί με τους εξής μηχανισμούς: α) διαμέσου ροής σε πορώδες μεσο, β) μέσω διάχυσης, γ) μέσω απορρόφησης

Έτσι, οι τρεις (3) παράγοντες επιρροής της ανθεκτικότητας είναι:

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

Καθένας απ' αυτούς τους τρεις παράγοντες συμβάλλει στη μείωση της ζωής του σκυροδέματος, ενώ συνύπαρξη και των τριών, συντελεί στην επιτάχυνση του χρόνου φθοράς της κατασκευής.



Σχήμα 1: Παράγοντες ανθεκτικότητας

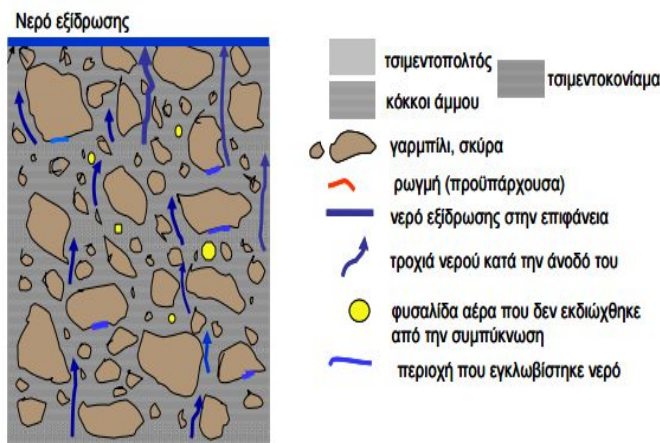
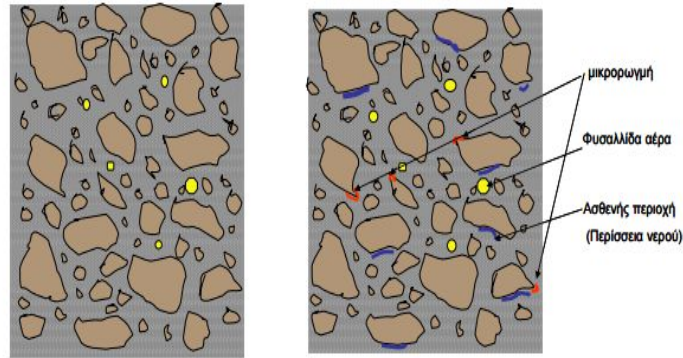
1.3 Το νερό ως παράγοντας φθοράς

Το νερό αποτελεί τον πιο καθοριστικό παράγοντα για την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Τα μόρια του είναι πολύ μικρά κι επομένως είναι ικανά να διεισδύουν μέσα σε λεπτούς πόρους και κοιλότητες ενώ είναι αυτό που διαλύει τις περισσότερες ουσίες από οποιοδήποτε άλλο υγρό. Επίσης, συμμετέχει σχεδόν σε όλους τους μηχανισμούς αποσάθρωσης του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, **1)** οι φθορές από τριβή και κρούση που οφείλονται σε δράσεις του περιβάλλοντος όπως αέρας, νερό και διάφορα φερτά υλικά, **2)** η αποσάθρωση λόγω παγετού που οφείλεται στην εναλλαγή κύκλων ψύξης - απόψυξης του σκυροδέματος με παρουσία υγρασίας ή νερού, το οποίο κατά τη φάση της ψύξης λόγω της μετατροπής του σε πάγο διογκώνεται και αποσαθρώνει το σκυρόδεμα που περικλείει πόρους ή ρωγμές γεμάτες με νερό, **3)** η διάβρωση-οξείδωση του οπλισμού και η καταστροφή της παθητικής προστασίας του που γίνεται όταν το νερό εισχωρήσει στην επιφάνεια του οπλισμού, είναι μερικά απ' τα παραδείγματα που κάνουν έκδηλη την επιρροή του νερού στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Ακόμη, το νερό **4)** επηρεάζει το πορώδες, αφού υψηλός λόγος w/c αυξάνει την ύπαρξη τριχοειδών πόρων, **5)** αποτελεί το μέσο διάχυσης των διαβρωτικών συστατικών στους πόρους τους σκυροδέματος, **6)** συμμετέχει στην αλκαλοπυριτική αντίδραση και ενανθράκωση.

Εκτός από τα παραπάνω, το νερό επηρεάζει την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, ως προς την ανομοιομορφία και την πολυφασικότητα του ως δομικό υλικό. Πράγματι, το μίγμα του τσιμέντου με τα λεπτόκκοκα αδρανή (τσιμεντοκονίαμα) φαίνεται μακροσκοπικά ότι είναι ομοιογενές, ενώ το σκυρόδεμα παρουσιάζεται ως ένα ανομοιόμορφο υλικό δύο φάσεων: το τσιμεντοκονίαμα (μέσο διασποράς) μέσα στο οποίο είναι διασκορπισμένα τα χονδρότερα αδρανή κατά τυχαίο τρόπο. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν περιοχές του τσιμεντοκονιάματος, οι οποίες είναι μικρότερης πυκνότητας και αντοχής λόγω συγκέντρωσης περισσότερου νερού. Οι περιοχές αυτές παρουσιάζονται κατά προτίμηση στη κάτω επιφάνεια των μεγαλύτερων αδρανών στις περιοχές, οι οποίες κατά τη διάστρωση, συμπίκνωση και πήξη του σκυροδέματος είχαν περίπου οριζόντιο προσανατολισμό. Στις περιοχές αυτές, ανάλογα με τη συμπίκνωση και τις ιδιότητες του σκυροδέματος, υπάρχει δυνατότητα εγκλωβισμού του νερού, το οποίο μεταβάλλει τοπικά τις αναλογίες σύνθεσης του μίγματος και μειώνει τοπικά την αντοχή. Ο εγκλωβισμός του νερού οφείλεται στο φαινόμενο της εξίδρωσης, δηλαδή στην άνοδο του νερού (που είναι το ελαφρύτερο συστατικό του σκυροδέματος) προς την επιφάνεια κατά το διάστημα που το σκυρόδεμα είναι νωπό, ή ακριβέστερα δεν έχει πήξει. Κατά την πορεία του νερού προς την επιφάνεια, σε πολλές περιπτώσεις μέρος αυτού εγκλωβίζεται κάτω από επιφάνειες μεγάλων συνήθως αδρανών που έχουν οριζόντιο περίπου προσανατολισμό, δημιουργώντας έτσι περιοχές μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε νερό συμβάλλοντας σε πυκνότητα και αντοχή τοπικά μικρότερη.

Συνοψίζοντας λοιπόν είναι εμφανής ο καταλυτικός ρόλος του νερού στην ανθεκτικότητα μιας κατασκευής από σκυρόδεμα, κι αυτό γιατί:

- Επηρεάζει το πορώδες (υψηλός λόγος w/c, αυξάνει την παρουσία τριχοειδών πόρων)
- Αποτελεί το μέσο διάχυσης των διαβρωτικών συστατικών στους πόρους του σκυροδέματος
- Αποτελεί το διαλύτη των διαβρωτικών μέσων
- Συμμετέχει στην αντίδραση διάβρωσης του οπλισμού και στην καταστροφή της παθητικής του προστασίας
- Συμμετέχει στην αλκαλοπυριτική αντίδραση και στην ενανθράκωση
- Απουσία νερού, δεν προχωράει σχεδόν καμία δράση φθοράς.



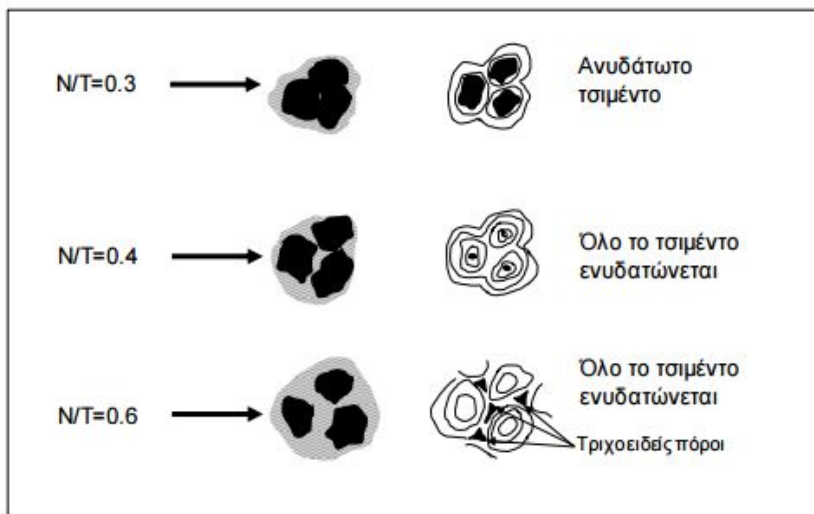
Σχήμα 2: Σχηματική παράσταση τομής σκληρυμένου σκυροδέματος . Πάνω αριστερά, τομή όπως φαίνεται με γυμνό οφθαλμό. Πάνω δεξιά, ασθενείς περιοχές λόγω συγκέντρωσης νερού και προϋπάρχουσες μικρορωγμές σε περιοχές της διεπιφάνειας μεγάλων αδρανών τσιμεντοπολτού. Κάτω, φαινόμενο εξίδρωσης (Κόλιας 2011-12).

1.4 Συνδεδεμένοι πόροι στο σκυρόδεμα

Το πορώδες, σχετίζεται με τον βασικό μηχανισμό σκλήρυνσης του σκυροδέματος και της αύξησης της αντοχής του, τη χημική αντίδραση του νερού με το τσιμέντο, που ονομάζεται «ενυδάτωση του τσιμέντου». Το σύνολο των κενών που απομένει μεταξύ των προϊόντων της ενυδάτωσης, αποτελεί το πορώδες του σκυροδέματος, το οποίο, ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες και την απόσταση του κάθε τμήματος του σκυροδέματος από την ελεύθερη επιφάνεια, μπορεί να είναι γεμάτο με νερό ή αέρα. Η σκληρυμένη τσιμεντόπαστα μαζί με τα περιεχόμενα αδρανή, αποτελούν το σκληρυμένο σκυρόδεμα. Το νερό που απαιτείται για την πλήρη αντίδραση

του τσιμέντου με το νερό είναι περίπου το 22-23% του βάρους του τσιμέντου, δηλαδή $w/c = 0.23$. [Παπακώστα και Τσιάρα (2015)].

Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει περίσσεια νερού για τις υπόλοιπες ιδιότητες που πρέπει να έχει το σκυρόδεμα, όπως η εργασιμότητα, αντλησιμότητα κλπ. Για να αποκτήσει το σκυρόδεμα αυτές τις ιδιότητες, εκτός των άλλων, απαιτείται περίσσεια νερού.



Σχήμα 3: Επίδραση του λόγου N/T στη δημιουργία τριχοειδών κενών

Όσο περισσότερο είναι το νερό σε σχέση με το τσιμέντο (μεγάλος λόγος w/c), τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ των προϊόντων ενυδάτωσης (πορώδες) των διπλανών κόκκων είναι σχετικά μεγάλα, με αποτέλεσμα η τάση που απαιτείται για να σπάσει αυτός ο «δεσμός» μεταξύ των προϊόντων αντίδρασης νερού-τσιμέντου να είναι σχετικά μικρή, οπότε και η αντοχή να είναι μικρή.

Όταν το νερό σε σχέση με το τσιμέντο είναι λιγότερο (μικρός λόγος w/c), ο δεσμός των προϊόντων ενυδάτωσης είναι αρκετά μεγάλος, τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ τους είναι σχετικά μικρά, με αποτέλεσμα η τάση που απαιτείται για να σπάσει να είναι μεγαλύτερη. Οι λόγοι w/c για τα συνηθισμένα έργα κυμαίνονται από 0.45 – 0.70. Για ειδικά σκυροδέματα μπορούμε να φτάσουμε και την τιμή $w/c = 0.30-0.35$.

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

- Μεγάλη ποσότητα τσιμέντου → μικρό πορώδες

- Μικρός λόγος w/c → μικρό πορώδες
- Μεγάλη αντοχή → μικρό πορώδες

Επομένως, οι υψηλοί λόγοι w/c, αυξάνουν την παρουσία τριχοειδών πόρων, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τη διαπερατότητα και μειώνοντας αισθητά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

Επιπρόσθετα, άλλο ένα σημείο στο οποίο πρέπει να αναφερθούμε, είναι η μεταβολή του πορώδους στη διεπιφανειακή ζώνη τσιμεντοπολτού και αδρανών, καθώς αυτό επηρεάζει το ρυθμό μεταφοράς μάζας και διαβρωτικών μέσων. Από πολλές έρευνες έχει διαπιστωθεί ότι γύρω από τους κόκκους των αδρανών υπάρχει μία ζώνη πάχους 10-30 μm περίπου με μεγαλύτερο πορώδες και γενικά με μικρότερη αντοχή, που ονομάζεται διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη ή απλώς μεταβατική ζώνη. Η ζώνη αυτή είναι συνήθως η ασθενέστερη περιοχή στο σκυρόδεμα και θεωρείται ότι έχει καθοριστική επίδραση στη συμπεριφορά του αν και η επίδρασή της δεν έχει ακόμη διερευνηθεί πλήρως.

Τέλος, έχει παρατηρηθεί με τη βοήθεια μικροσκοπίου ή ακτίνων X, ότι σε ορισμένα σημεία στη διεπιφάνεια μεγάλων συνήθως αδρανών και τσιμεντοκονιάματος, υπάρχουν μικρορηγματώσεις χωρίς να έχει υποβληθεί το σκυρόδεμα σε φόρτιση, δεδομένου ότι ο τσιμεντοπολτός κατά τις πρώτες ώρες μετά την σκυροδέτηση υφίσταται θερμοκρασιακές παραμορφώσεις (συστολοδιαστολές), λόγω της εξώθερμης αντίδρασης ενυδάτωσης του τσιμέντου σε συνδυασμό με τη επίδραση των ημερήσιων μεταβολών της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Οι αντίστοιχες παραμορφώσεις των αδρανών είναι ασήμαντες κι έτσι η ασυμβατότητα αυτή στις παραμορφώσεις προκαλεί ρηγμάτωση, μεταβάλλοντας έτσι το πορώδες του σκυροδέματος.

1.5 Έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον

Το περιβάλλον μέσα στο οποίο βρίσκεται το σκυρόδεμα εάν είναι διαβρωτικό, επιταχύνει τις χημικές επιδράσεις της φθοράς των κατασκευών. Οι χημικές αιτίες δράσης μπορεί να οφείλονται σε **α)** εξωτερικές επιδράσεις (όξινο διάλυμα, θαλασσινό νερό, έδαφος κ.τ.λ.) ή **β)** σε εσωτερικές δράσεις (ευπρόσβλητα αδρανή). Ανάλογα λοιπόν με το μηχανισμό με τον οποίο προκαλείται η φθορά, διακρίνονται οι εξής κατηγορίες χημικής διάβρωσης:

- Διάβρωση λόγω απόπλυσης (προκαλείται από νερό με μικρή σκληρότητα-μαλακό νερό)
- Διάβρωση λόγω διόγκωσης (προκαλείται από θειικά άλατα κυρίως)

- Διάβρωση λόγω ανταλλαγής μάζας (προκαλείται από οξέα, άλατα, φαινόλες)
- Αντίδραση αλκαλίων-αδρανών με κυρίαρχη την αλκαλιοπυριτική αντίδραση
- Επίδραση θαλασσινού νερού, η οποία είναι πολύπλοκη γιατί μπορεί να συνδιάζει πολλές φυσικές και χημικές επιδράσεις, όπως υδροφθορά, επίδραση παγετού-τήξεως, επίδραση του CO₂ της ατμόσφαιρας, επίδραση των αλάτων μέσα στο νερό (θεικών και χλωριούχων), επίδραση αλκαλίων και σχηματισμός βιολογικής μεμβράνης στην επιφάνεια του σκυροδέματος
- Επίδραση εδάφους και εδαφικού νερού

1.6 Διείδυση χλωριόντων

1.6.1 Σπουδαιότητα χλωριόντων

Στο παραθαλάσσιο περιβάλλον, εκτός του CO₂ δρουν αθροιστικά και τα Cl⁻, των οποίων η δραστηριότητα είναι μεγαλύτερη από του CO₂. Εκτός της μειωμένης διαπερατότητας, στην αντίσταση του σκυροδέματος στη διείδυση των Cl⁻ παίζει ρόλο και το είδος του τσιμέντου. Έχει βρεθεί ότι η χρήση τσιμέντων με ποζολάνες ή με σκωρία υψικαμίνων, τύπου II, III, IV σύμφωνα με το νέο πρότυπο **ΕΛΟΤ EN 197-1**, συντελεί σε μεγαλύτερη αντίσταση στη διείδυση Cl⁻ από ότι η χρήση αμιγούς τσιμέντου (CEM I, ΕΛΟΤ EN 197-1).

Τα διαλυμένα στο θαλασσινό νερό χλωριούχα και θειικά άλατα αντιδρούν με τα συστατικά του τσιμεντοπολτού σχηματίζοντας χλωριούχο ασβέστιο, θεικό ασβέστιο, υδροξείδιο του μαγνησίου και ετρινγκίτη. Η μεγαλύτερη φθορά στις κατασκευές που είναι σε επαφή με το θαλασσινό νερό, εμφανίζεται στην παλιρροιακή ζώνη (μεταξύ της άνω και της κάτω παλιρροιακής στάθμης), λόγω της ταυτόχρονης δράσης των κυμάτων, της χημικής επίδρασης των αλάτων και της ενανθράκωσης από το CO₂ του αέρα. Τα χλωριόντα μπορούν να διαπεράσουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίων, μέσα από τους πόρους του στρώματος με μεγαλύτερη ευκολία από άλλα ιόντα, με αποτέλεσμα την τοπική ή γενική καταστροφή του επιφανειακού προστατευτικού οξειδίου και την έναρξη της οξειδωσής του χάλυβα [**Φαρδής (2005)**].

Παρακάτω (**Σχήμα 4**) φαίνονται οι απαιτήσεις που θέτουν οι κανονισμοί διαφόρων χωρών για περιβάλλον κατηγορίας έκθεσης S1 (αέρας κορεσμένος σε θαλάσσια άλατα), περιβάλλον το οποίο στη χώρα μας απαντάται σε μεγάλο βαθμό.

**Τι προβλέπεται από τους Κανονισμούς
(EN 206)
για παραθαλάσσιο περιβάλλον (S1)**

	μέγιστος N/T	ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου	ελάχιστη αντοχή
Γερμανία	0,50	300	C 30/37
Αγγλία	0,50	340	C 32/40
Γαλλία	0,55	330	C 30/37
Ιταλία	0,50	340	C 32/40
Ελλάδα (ΚΤΣ 97)	0,60	330	

Σχήμα 4 : Ελάχιστη κατηγορία αντοχής σκυροδέματος, ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου, μέγιστος λόγος N/T κατά EN 206

Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από ιόντα χλωρίου (Cl⁻), αν η συγκέντρωση των τελευταίων υπερβεί το 0.4% έως 0.6% του βάρους του τσιμέντου. Τα χλωριόντα μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος, είτε από το εξωτερικό περιβάλλον που περικλείει το σκυρόδεμα [Φαρδής (2005)].

Τα χλωριόντα που μπορεί να διατηρήσουν το προστατευτικό στρώμα προέρχονται από το εσωτερικό του σκυροδέματος, εάν έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτά αδρανή από παράλιες ή θαλάσσιο νερό για το σκυρόδεμα ή από προσθετά βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα. Χλωριόντα από το εξωτερικό περιβάλλον είναι πολύ συνηθισμένο φαινόμενο σε παραθαλάσσιες περιοχές, όπου σε μεγάλες απόστασεις από την ακτή ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει χλωριούχα άλατα, ιδίως αν οι επικρατούντες άνεμοι κατευθύνονται από τη θάλασσα προς τη ξηρά. Στις περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη χιονόπτωση, βασική πηγή χλωριόντων είναι τα χλωριούχα άλατα που ρίχνονται στους δρόμους για την τήξη του χιονιού. Χλωριόντα μπορεί να προέρχονται επίσης και από τα επιταχυντικά πήξης που χρησιμοποιούνται ειδικά το χειμώνα.

1.6.2 Πηγές και μορφή χλωριόντων

Πηγές χλωριόντων

Τα χλωριόντα που επηρεάζουν τις κατασκευές εμπεριέχονται **1)** στο θαλασσινό νερό, **2)** τα αντιπαγωτικά άλατα και **3)** το υφάλμυρο νερό. Η παρουσία των χλωριόντων στο σκυρόδεμα οφείλεται σε_α) πρωτογενή, αλλά και β) δευτερογενή_αίτια. Πιο συγκεκριμένα:

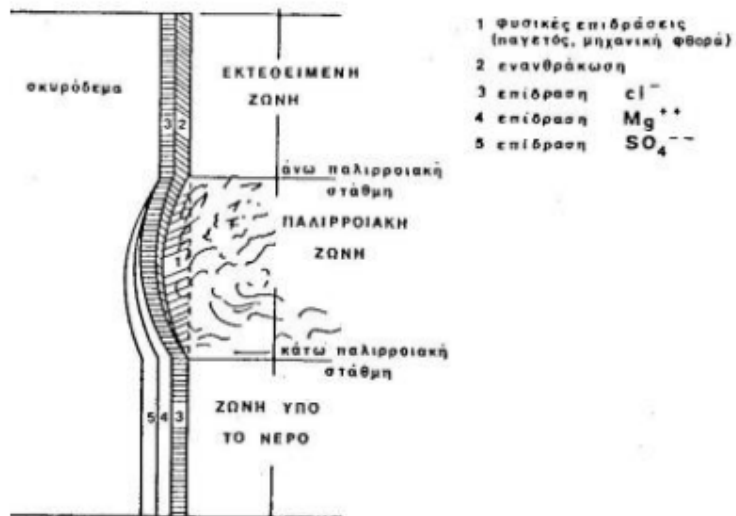
Κατά τη φάση της κατασκευής (πρωτογενή αίτια):

- Χρήση μη καθαρών αδρανών υλικών από παραθαλάσσιες περιοχές
- Χρήση θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού στην ανάμειξη
- Χρήση επιταχυντών για ταχεία σκυροδέτηση, με περιεκτικότητα σε Cl^- ($CaCl_2$)

Κατά τη φάση λειτουργίας (δευτερογενή αίτια):

- Αερομεταφερόμενα άλατα στην υγρασία περιβάλλοντος σε παραθαλάσσιες περιοχές
- Επαφή με άλατα στο υπέδαφος
- Παλίρροια
- Χρήση αντιπαγωτικών αλάτων κατά τους χειμερινούς μήνες για τήξη αλάτων
- Κατασκευές όπως σιλό αποθήκευσης αλατιού

Όπως αναφέρουν και οι **M. Regourd (1983)** και **B. Mather (1982)**, μια θαλάσσια κατασκευή η οποία έρχεται σε άμεση επαφή με το θαλάσσιο νερό, μπορεί να διακριθεί σε διάφορες ζώνες όπως στο παρακάτω σχήμα. Στις ζώνες αυτές καθεμία από τις προαναφερθείσες φυσικές και χημικές δράσεις εμφανίζεται με διαφορετική ένταση.



Σχήμα 5: Φθορά θαλάσσιας κατασκευής η οποία έρχεται σε άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό (Θ. Π. Τάσιος, Κ. Αλιζιάκη, Αθήνα 1993)

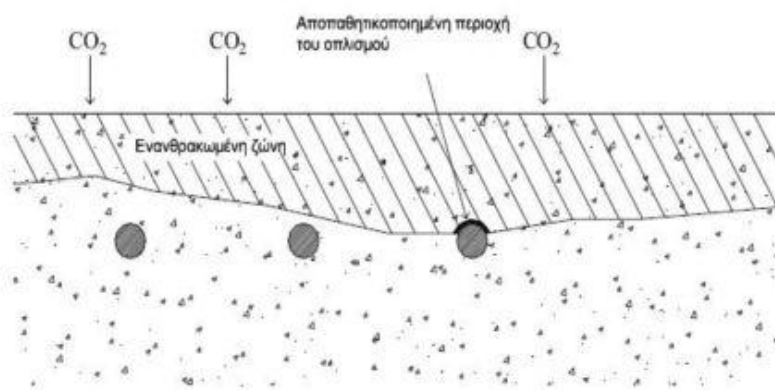
Οι επιπτώσεις εξαιτίας της φθοράς των κατασκευών από το θαλασσινό νερό, μπορούν να περιοριστούν με τη μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος και με την αύξηση του πάχους της επικάλυψης των οπλισμών. Η χρήση ποζολανικών πρόσθετων στο τσιμέντο συντελεί στη μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος.

Μορφή χλωριόντων

Τα συνολικά χλωριόντα (Cl^- total) που εμπεριέχονται στο σκυρόδεμα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: **α)** τα ελεύθερα χλωριόντα (Cl^- free) που συναντώνται εντός του πορώδους διαλυμένα στο υδατικό διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος και **β)** 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) μπορούν να προσδιοριστούν μέσω διάλυσης του δείγματος σε οξέα, μια 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)].

1.7 Ενανθράκωση σκυροδέματος

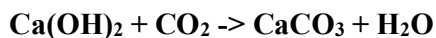
Οι ράβδοι οπλισμού προστατεύονται από την διάβρωση μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου, που διατηρείται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Η αλκαλικότητα αυτή χαρακτηρίζεται από μία τιμή του pH γύρω στο 12.5, που αντιστοιχεί στην υπό συνήθη θερμοκρασία συγκέντρωση ισορροπίας του υδροξειδίου του ασβεστίου $\text{Ca}(\text{OH})_2$, στο νερό των πόρων. Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από ιόντα χλωρίου, αν η συγκέντρωση των τελευταίων υπερβαίνει το 0.4 έως 0.6 % του βάρους του τσιμέντου, ή να διαλυθεί γενικά, λόγω μείωσης της αλκαλικότητας του σκυροδέματος γύρω από την ράβδο, σε τιμές του pH κάτω από 9.0. Τότε συμβαίνει *αποπαθητικοποίηση* του χάλυβα του οπλισμού (δηλαδή δεν απολαμβάνει πλέον την παθητική προστασία που του προσέφερε η αλκαλικότητα του σκυροδέματος).



Σχήμα 6: Διείσδυση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στον οπλισμό σκυροδέματος

Η μείωση του pH του σκυροδέματος σε τιμές κάτω του 9.0 οφείλεται στην χημική αντίδραση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ του νερού των πόρων (και γενικότερα του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού) με το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) της ατμόσφαιρας, που σταδιακά διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Η διαδικασία αυτή έχει σαν

αποτέλεσμα τη μετατροπή του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ σε ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) σύμφωνα με την αντίδραση:



Η όλη διαδικασία ονομάζεται *ενανθράκωση* του σκυροδέματος. Είναι αξιοσημείωτο να πούμε ότι η ενανθράκωση, η οποία για το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει δυσμενείς επιπτώσεις, είναι η ίδια που οδηγεί στην σκλήρυνση του ασβέστη, στον ατμοσφαιρικό αέρα. Στο **Σχήμα 7**, φαίνεται η διαδικασία εκτίμησης του βάθους ενανθράκωσης του σκυροδέματος μετά από ψεκασμό με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης.



Δοκίμιο σκυροδέματος το οποίο έχει ψεκασθεί με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης. Το τμήμα στο οποίο δεν παρουσιάζεται αλλαγή χρώματος (δεξιά) είναι ενανθρακωμένο (βάθος ενανθρακώσεως περίπου 3cm) Το αριστερά τμήματα (χρώματος ροζ-βυσσινί) δεν έχει ενανθρακωθεί.

Σχήμα 7: Εκτίμηση βάθους ενανθράκωσης σκυροδέματος μετά από ψεκασμό με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνη

Παράμετροι που επηρεάζουν την ενανθράκωση

Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν το ρυθμό ενανθράκωσης, είναι:

- Συνθήκες περιβάλλοντος: για σχετική υγρασία περιβάλλοντος 50% έως 70% παρατηρείται το μέγιστο ποσοστό ενανθράκωσης
- Ποιότητα και πάχος της επικάλυψης
 - Χαμηλή διαπερατότητα. Μειώνει το ρυθμό διείσδυσης του CO_2
 - Υπάρξη ρωγμών. Επιταχύνει πολύ τη διαδικασία ενανθράκωσης

- Ο λόγος N/T. Με μικρές τιμές του λόγου N/T περιορίζεται πολύ η διείδυση υγρασίας και CO₂)

- Είδος τσιμέντου. Κατά τον **U. Ludwig (1890)**: τσιμέντα που περιέχουν σκωρίες υψικαμίνων και ποζολάνες ενανθρακώνονται πιο γρήγορα από το Portland, κατά τον **Matthews (1984)**: η προσθήκη ιπταμένων τεφρών στο τσιμέντο επιταχύνει την ενανθράκωση σε σκυροδέματα με αντοχή μικρότερη από 30 έως 35 MPa. Κατά τους **A. Zhu (1982)** και **X. Tan (1982)**, η προσθήκη λιγνοσουλφόνης στο σκυροδέμα σε ποσότητα 0.25% κ.β. μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης κατά 10 έως 30%.

- Η προσθήκη πυριτικής παιπάλης, επιταχύνει την ενανθράκωση

1.8 Διάβρωση Οπλισμού

Στη συνήθη περίπτωση το σκυροδέμα αποτελεί ένα προστατευτικό περιβάλλον του σιδηροπλισμού για δύο λόγους:

- Το υδατικό διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος είναι έντονα αλκαλικό, εξαιτίας του υδροξειδίου του ασβεστίου, προϊόν της αντίδρασης σκλήρυνσης του τσιμέντου, με pH μεταξύ 12.5 και 13.9. Κάτω από αυτές τις συνθήκες ο χάλυβας καλύπτεται επιφανειακά από ένα παθητικό στρώμα οξειδίων, που παρεμποδίζει τη διάβρωσή του. Η διάβρωσή του περιορίζεται στη συντήρηση του παθητικού αυτού στρώματος, δράση εξαιρετικά αργή, που πρακτικά μπορεί να αγνοηθεί.
- Το σκυροδέμα αποτελεί ένα φυσικό εμπόδιο στην επαφή του οπλισμού με τα διάφορα διαβρωτικά αέρια (O₂, SO₂ κ.λπ.) και άλλες ουσίες, που βοηθούν τη διάβρωση (χλωριούχα κ.λ.π.).

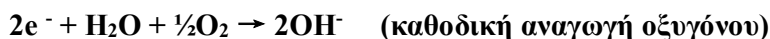
Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου, το σκυροδέμα μπορεί να χάσει την προστατευτική του ικανότητα, π.χ. λόγω ενανθράκωσης όπως προαναφέρθηκε, όπου το pH μπορεί να κατέβει κάτω από 9.0 ή όταν η συγκέντρωση των χλωριόντων γίνει επαρκής, ώστε να καταστρέψει το παθητικό στρώμα οξειδίων του χάλυβα, οπότε η διάβρωση του οπλισμού μπορεί να γίνει σημαντική. Η διάβρωση του οπλισμού στο σκυροδέμα είναι μια ηλεκτροχημική δράση, που λαμβάνει χώρα, όταν το σκυροδέμα έχει μια ηλεκτρική αγωγιμότητα λόγω της παρουσίας υγρασίας και ηλεκτρολυτών στους πόρους του. Η ηλεκτροχημική δράση συνεπάγεται την ύπαρξη ανόδου, όπου λαμβάνει χώρα η ανοδική δράση, την ύπαρξη καθόδου, όπου λαμβάνει χώρα η καθοδική δράση και την ύπαρξη ηλεκτρολύτη για τη μεταφορά των ιόντων. Η διεξαγωγή των δράσεων αυτών πραγματοποιείται στη

διεπιφάνεια μετάλλου – ηλεκτρολύτη και ακολουθεί η μετακίνηση των ιόντων στον ηλεκτρολύτη. Στο **Σχήμα 8** φαίνεται ο μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ στο **Σχήμα 9** γίνεται εμφανής η αύξηση του όγκου του σιδήρου κατά τα στάδια δημιουργίας σκωρίας.

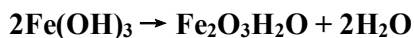
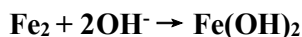
Κατά την έναρξη της διάβρωσης του χάλυβα, τα προϊόντα της διάβρωσης (ιόντα σιδήρου) διαλύονται στο νερό των πόρων του σκυροδέματος, απελευθερώνοντας ταυτόχρονα ηλεκτρόνια, σύμφωνα με την ανοδική αντίδραση:

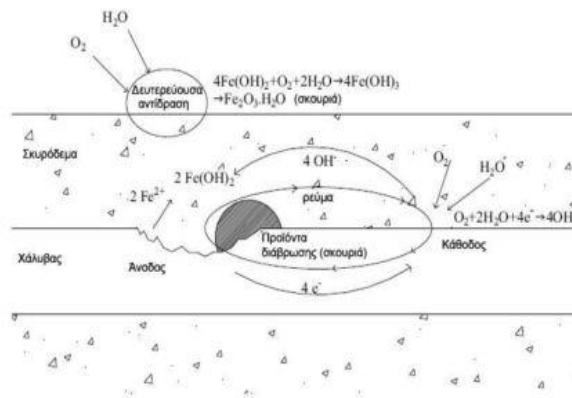


Τα δύο ηλεκτρόνια (e^-) που απελευθερώνονται κατά την ανοδική αντίδραση πρέπει, για λόγους διατήρησης της ηλεκτρικής ουδετερότητας να καταναλωθούν σε κάποιο διαφορετικό σημείο της επιφάνειας του χάλυβα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της καθοδικής αντίδρασης, μόνο με ταυτόχρονη παρουσία νερού και οξυγόνου:

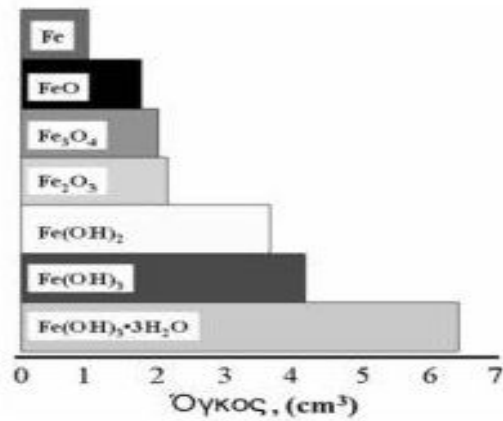


Ο σχηματισμός των ιόντων υδροξυλίου (OH^-) αυξάνουν τοπικά την αλκαλικότητα, ενδυναμώνοντας έτσι την παθητική στρώση και αποτρέποντας τις επιδράσεις της ενανθράκωσης και των χλωριόντων στην κάθοδο [Σωτηριάδης (2011)]. Η δημιουργία σκωρίας πραγματοποιείται με την ακόλουθη πορεία: υδροξείδιο σιδήρου $\text{Fe}(\text{OH})_2 \rightarrow$ σιδηρικό υδροξείδιο $\text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow$ ένυδρο οξείδιο του σιδήρου (σκωρία) $\text{FeO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



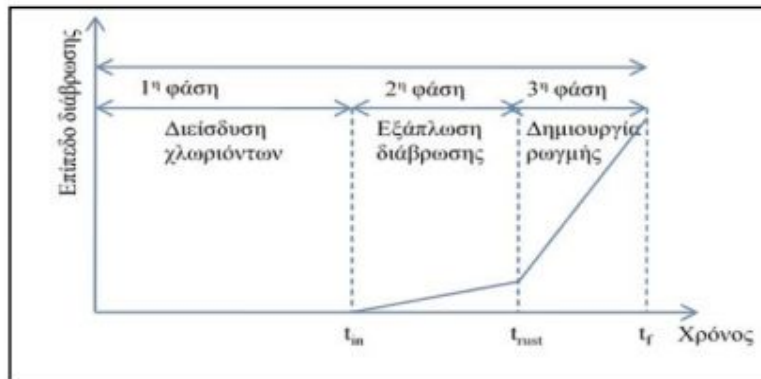


Σχήμα 8 : Ο μηχανισμός της διάβρωσης του χάλυβα στο σκυρόδεμα



Σχήμα 9: Οι σχετικοί όγκοι του σιδήρου και των προϊόντων της διάβρωσης

Η διάβρωση ολοκληρώνεται σε τρία βασικά στάδια: (1η φάση) διείσδυση χλωριόντων (chloride penetration), (2η φάση) εξάπλωση διάβρωσης (corrosion expansion), (3η φάση) δημιουργία ρωγμής (crack creation), όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 10**.



Σχήμα 10: Εξέλιξη διάβρωσης οπλισμού από χλωριόντα

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

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

Εάν και οι τρεις προϋποθέσεις εκπληρώνονται, τότε η διάβρωση του σιδηροπλισμού είναι δυνατή.

Τη διάβρωση του χάλυβα στο σκυρόδεμα επηρεάζουν, ακόμη, οι ακόλουθοι παράγοντες:

- Το είδος και η δομή του σκυροδέματος
- Το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού από το σκυρόδεμα
- Η ποσότητα του νερού στο σκυρόδεμα
- Η ύπαρξη ρωγμών στο σκυρόδεμα

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν τη διάχυση του οξυγόνου (αλλά και άλλων διαβρωτικών αερίων) στη μάζα του σκυροδέματος και κατά συνέπεια, στην επιφάνεια του χάλυβα.

Εφόσον οι προϋποθέσεις για τη διάβρωση του σκυροδέματος εκπληρούνται, η διάβρωση λαμβάνει χώρα και μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της διατομής των ράβδων οπλισμού με αρνητικές συνέπειες στη στατική ικανότητα της κατασκευής. Επιπλέον, τα προϊόντα της διάβρωσης (σχηματισμός οξειδίων στην επιφάνεια του οπλισμού), καταλαμβάνουν αρκετά μεγαλύτερο όγκο από τον αρχικό και προκαλούν εσωτερικές τάσεις στο σκυρόδεμα προκαλώντας διάρρηξη και ρωγμές,

καθώς παρεμποδίζεται η ανάπτυξή τους (άσκηση εφελκυστικών τάσεων στο σκυρόδεμα). Τέλος, η απώλεια της επικάλυψης του οπλισμού προκαλεί δομικές φθορές στο οπλισμένο σκυρόδεμα εξαιτίας της απώλειας της συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος και της μείωσης της διατομής του οπλισμού.

Τα πιο συνηθισμένα μέτρα προστασίας έναντι της διάβρωσης είναι η κατάλληλη επιλογή του πάχους της επικάλυψης των οπλισμών, η βελτίωση της ποιότητας του σκυροδέματος (μείωση της διαπερατότητας, χαμηλός λόγος w/c), η καλή συμπίκνωση και η υγρή συντήρηση.

1.9 Μηχανισμοί διείσδυσης διαβρωτικών μέσων

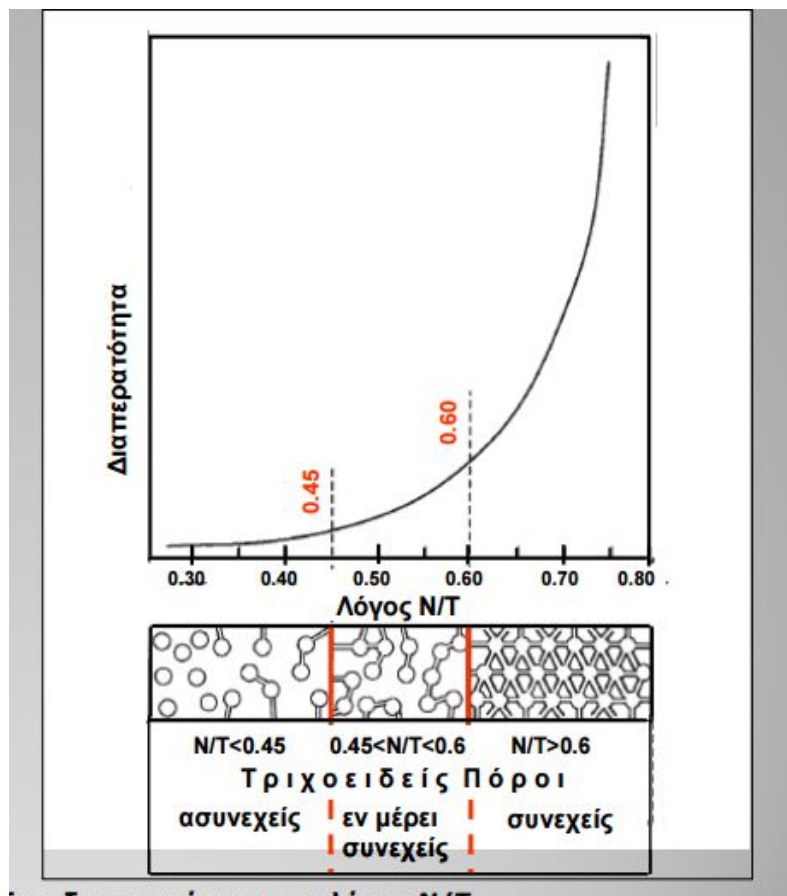
Τρεις είναι οι κύριοι μηχανισμοί με τους οποίους ξένες ουσίες μπορούν να εισχωρήσουν στο σκυρόδεμα, οι οποίοι μπορεί να δρουν είτε μεμονωμένα είτε ταυτόχρονα:

- Η απορρόφηση (είσοδος υγρών λόγω τριχοειδών φαινομένων)
- Η διείσδυση (ροή ρευστού υπό πίεση)
- Η διάχυση (κίνηση μορίων και ιόντων από περιοχές μεγαλύτερης συγκέντρωσης σε περιοχές μικρότερης συγκέντρωσης)

1.9.1 Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)

Η παράμετρος, η οποία θεωρείται ότι εκφράζει την ταχύτητα διείσδυσης του νερού εντός του σκυροδέματος και δίνει έτσι μια καλή πρόβλεψη της ανθεκτικότητάς του, είναι η τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity). Συγκεκριμένα, δεδομένου ότι η παρουσία του νερού σε υγρή μορφή είναι ένας από τους κυριότερους παράγοντες φθοράς στις κατασκευές από σκυρόδεμα, η τριχοειδής απορρόφηση είναι ο πιο συνήθης μηχανισμός διείσδυσης του νερού μέσα στα δομικά υλικά. Ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης είναι μια παράμετρος που χαρακτηρίζει τα δομικά υλικά αλλά και τα υλικά αποκατάστασης καθώς εκφράζει τον ρυθμό ρόφησης υγρασίας μέσω των τριχοειδών πόρων του κάθε υλικού. Μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί πολλά πειράματα ρόφησης νερού μέσω των οποίων προσδιορίζεται ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης μέσω διαφόρων πρότυπων διαδικασιών.

Η τριχοειδής απορρόφηση (ή αλλιώς προσρόφηση μέσω τριχοειδών πόρων), αποτελεί έναν από τους συνηθέστερους μηχανισμούς προσβολής σε περιπτώσεις κύκλων ύγρανσης και ξήρανσης της επιφάνειας του σκυροδέματος (ειδικά σε περιπτώσεις στεγνών επιφανειών), αλλά δεν μπορεί από μόνη της να δημιουργήσει πρόβλημα στον οπλισμό. Μειώνει ωστόσο την διαθέσιμη απόσταση που χρειάζεται να διανυθεί από τα χλωριόντα ώστε αυτά να φθάσουν στη στάθμη του οπλισμού, μέσω διάχυσης. Η διαδικασία της τριχοειδούς απορρόφησης προσεγγίζει το νόμο της διάχυσης. Στο **Σχήμα 11** φαίνεται η σχέση που υπάρχει μεταξύ τριχοειδών πόρων, υδατοδιαπερατότητας και λόγου N/T.



Σχήμα 11: Σχέση υδατοδιαπερατότητας, λόγου N/T και τριχοειδών πόρων

1.9.2 Υδατοπερατότητα (Water permeability)

Ως υδατοπερατότητα ορίζεται η ιδιότητα που χαρακτηρίζει το ρυθμό μεταφοράς του νερού μέσω των πόρων στερεών σωμάτων και χαρακτηρίζεται από το συντελεστή υδατοπερατότητας K , ο οποίος μετράται σε cm/s. Είναι η αντίσταση που προβάλλουν τα υλικά κατά τη διέλευση του νερού μέσα από τη μάζα τους. Ως προς την υδατοπερατότητα τα υλικά χωρίζονται σε **α)** υδατοπερατά και **β)** μη υδατοπερατά

Εξαρτάται από: **1)** το πορώδες υλικού (διάταξη πόρων και βαθμός επικοινωνίας τους), **2)** από τη μέση διάμετρο των κενών και των τριχοειδών αγγείων, **3)** από την υδροστατική πίεση, **4)** από τη σύνθεση του νερού, **5)** από τη θερμοκρασία (διαστολή πόρων, ελάττωση του ιξώδους του νερού).

Υδατοπερατότητα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού

Κατά την αντίδραση ενυδάτωσης του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού, καταλυτικοί παράγοντες για την υδατοπερατότητά του είναι το μέγεθος και η συνέχεια των τριχοειδών πόρων του. Πόροι γεμάτοι με νερό σημαίνουν χαμηλή υδατοπερατότητα για το σκυρόδεμα. Αντίστοιχα, πόροι κενοί ή ακόρεστοι σημαίνουν υψηλή υδατοπερατότητα, η οποία αυξάνεται περισσότερο όταν αυτοί είναι συνδεδεμένοι. Έτσι, λίγο μετά τη διάστρωση, το σκυρόδεμα παρουσιάζει συντελεστή υδατοπερατότητας της τάξης του 10^{-4} cm/s με 10^{-5} cm/s, ενώ κατά την ενυδάτωση μειώνεται τόσο το τριχοειδές πορώδες, όσο και ο συντελεστής, χωρίς όμως να υπάρχει κάποια αναλογία μεταξύ τους.

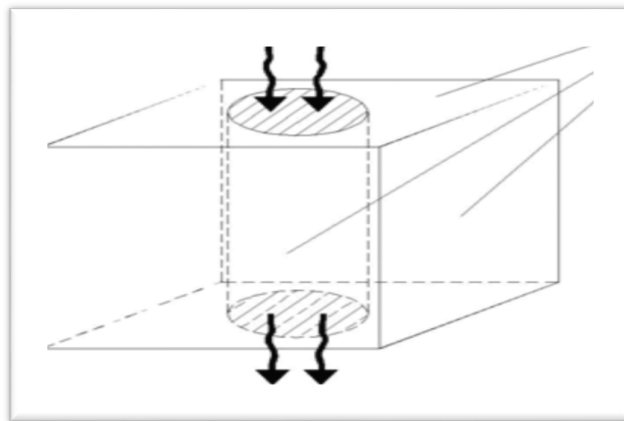
Υδατοπερατότητα των αδρανών

Τα αδρανή έχουν πολύ μικρότερο τριχοειδές πορώδες (συνήθως 3%, σπάνια ξεπερνάει το 10%), σε σχέση με το σκληρυθέν σκυρόδεμα. Ωστόσο, η υδατοπερατότητά τους είναι αυξημένη. Έτσι, ενώ υπάρχουν αδρανή όπως αυτά από μάρμαρο, βασάλτη, διορίτη και πυκνό γρανίτη που έχουν συντελεστή υδατοπερατότητας της τάξης του 1 έως 10×10^{-12} cm/s, κάποιες ποικιλίες από ασβεστόλιθο, ψαμμίτη και γρανίτη δίνουν τιμές δύο τάξεως μεγέθους παραπάνω. Αυτό εξηγείται από το μεγάλο μέγεθος των τριχοειδών πόρων που υπάρχουν σε αυτά τα αδρανή, ακόμα κι αν έχουν πορώδες που δεν ξεπερνά το 10%.

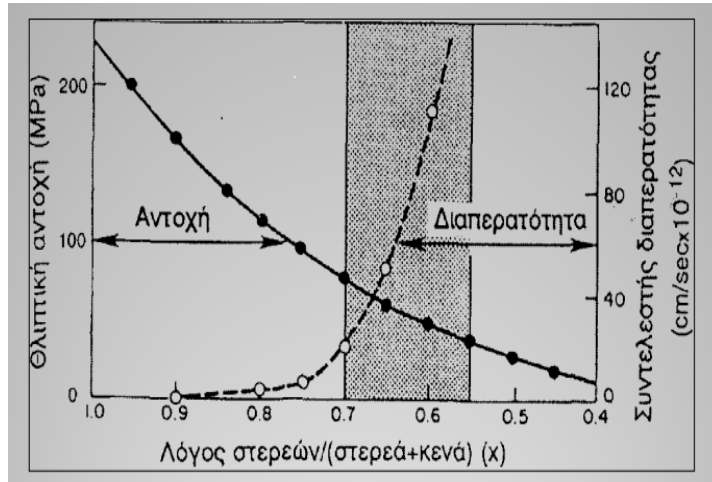
Υδατοπερατότητα του σκυροδέματος

Υδατοπερατό σκυρόδεμα, χαρακτηρίζεται ένα σκυρόδεμα με ανοικτή δομή, που επιτρέπει τη διέλευση του νερού μέσα από τα κενά του. Η εισαγωγή των χαμηλής διαπερατότητας αδρανών στο υψηλής διαπερατότητας νωπό τσιμέντο, στη φάση παραγωγής του σκυροδέματος, θα αναμενόταν να μειώνει την τελική υδατοπερατότητα του μίγματος, καθώς τα αδρανή θα εισχωρούσαν και θα κάλυπταν τα κανάλια διασύνδεσης των τριχοειδών πόρων. Πρακτικά όμως κάτι τέτοιο δε συμβαίνει και το τελικό προϊόν (σκυρόδεμα) έχει συντελεστή υδατοπερατότητας της τάξης του 1×10^{-10} cm/s έως 30×10^{-10} cm/s. Αυτό εξηγείται από τις μικρορωγμές που σχηματίζονται στη διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη μεταξύ των αδρανών και της τσιμεντόπαστας κατά τη φάση της ενυδάτωσης, εξαιτίας της συστολής ξήρανσης, των θερμοκρασιακών μεταβολών και των εξωτερικά εφαρμοζόμενων φορτίων. Αυτές οι μικρορωγμές δημιουργούν νέες, τριχοειδείς διόδους ροής του νερού μέσα στο σκυροδέμα, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η υδατοπερατότητά του. Στο **Σχήμα 12** απεικονίζεται σχηματικά η υδατοπερατότητα σε ένα δοκίμιο από σκυρόδεμα, ενώ στο **Σχήμα 13** φαίνεται η συχέτιση των παραμέτρων της θλιπτικής αντοχής, της υδατοδιαπερατότητας.

Μείωση του τριχοειδούς πορώδους, άρα και της υδατοπερατότητας του σκυροδέματος, μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση μικρότερου λόγου w/c, περισσότερης ποσότητας τσιμέντου, με κατάλληλη συμπύκνωση και με προσεκτική επιλογή καλά διαβαθμισμένων αδρανών. Τέλος, η προένταση του υλικού θα μπορούσε να περιορίσει την εμφάνιση των μικρορωγμών στη μεταβατική ζώνη, που είναι και ο κύριος λόγος της αυξημένης υδατοπερατότητας του σκυροδέματος, σε σχέση με το τσιμέντο και τα αδρανή.



Σχήμα 12: Σκαρίφημα απεικόνισης υδατοπερατότητας πρισματικού δοκιμίου



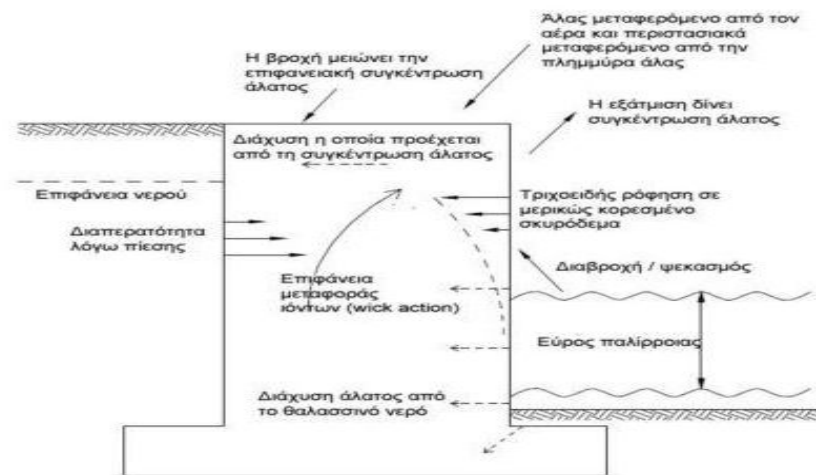
Σχήμα 13: Σχέση θλιπτικής αντοχής, υδατοδιαπερατότητας και λόγου στερεών προς κενά

1.9.3 Μηχανισμός διείσδυσης (permeation)

Διείσδυση: είναι η διαδικασία με την οποία ένα υγρό, αέριο ή υγρό, θα κινηθεί μέσα στο σύστημα των πόρων και ρωγμών του σκυροδέματος λόγω διαφοράς πίεσης. Η αντίσταση σε μια τέτοια ροή δημιουργείται από το ιξώδες του ρευστού, την τριβή στα τοιχώματα των πόρων και των ρωγμών και τη στενότητα και την στρεβλότητα των πόρων και των ρωγμών. Ο βαθμός κορεσμού των συστημάτων πόρου και ρωγμών έχει σημαντική επίδραση στο φαινόμενο της διείσδυσης. Αν ένα από τα ίδια τα υγρά (νερό) δε γεμίσει το σύστημα των πόρων πλήρως, άδειες κοιλότητες που είναι πληρωμένες με ένα άλλο ρευστό (αέρα), θα 'μπλοκάρουν' μέρος της ροής του ρευστού. Εάν ο βαθμός κορεσμού είναι χαμηλός, το ρευστό μπορεί να αποσυνδεθεί, αφήνοντας 'κανάλια ροής' του ρευστού. Η πίεση του υγρού μπορεί να είναι αρνητική, όπως και για τα υγρά στο μη κορεσμένο σκυρόδεμα, δίνοντας γρήγη απορρόφηση η οποία θα δημιουργήσει κλίσεις πίεσης και διείσδυσης. Αυτό ονομάζεται τριχοειδής απορρόφηση. Τέλος, στις περισσότερες περιπτώσεις, η διείσδυση του υγρού από μη κορεσμένο περιβάλλον, θα επηρεαστεί από τη διείσδυση του άλλου ρευστού, αφού στο ρευστό οι πιέσεις είναι αλληλοεξαρτώμενες.

1.9.4 Μηχανισμός διάχυσης (diffusion)

Διάχυση: είναι η μεταφορά αερίου ή διαλυμένης ουσίας σε ένα ρευστό λόγω διαφοράς συγκέντρωσης μεταξύ της επιφάνειας και του εσωτερικού ενός υλικού. Περιοχές με την υψηλότερη συγκέντρωση μιας ουσίας έχουν την τάση να «αραιώνονται», αν δεν υπάρχει πηγή διαθέσιμη. Η συγκέντρωση μιας ουσίας που έχει μια πηγή διατήρησης της συγκέντρωσης τείνει να εξαπλωθεί μέχρι να επέλθει ισορροπία. Αυτό ονομάζεται διάχυση. Η αντίσταση στη μεταφορά μιας τέτοιας διαδικασίας δημιουργείται από τη διάταξη του συστήματος πόρων, το μέγεθος των πόρων και την στρεβλότητα των πόρων και των ρωγμών. Σε πολύ μικρούς πόρους, η διάχυση επηρεάζεται από μοριακές συγκρούσεις με τα τοιχώματα των πόρων. Ο βαθμός κορεσμού του υγρού του συστήματος πόρων και ρωγμών έχει σημαντική επίδραση στη διάχυση. Οι ατμοί και τα αέρια διαχέονται πολύ αργά μέσα στους πόρους που είναι γεμάτοι με υγρό, βρίσκοντας πολύ πιο εύκολο το δρόμο μέσω των «ανοικτών» άδειων πόρων που συνδέονται για να σχηματίσουν κανάλια ροής γεμάτα με αέρα. Διαλυμένες ουσίες αντιθέτως, απαιτούν κορεσμένο περιβάλλον για να είναι σε θέση να διαχέονται μέσα από το σκυρόδεμα. Η τάση υδρατμών θεωρείται ως η κινητήρια δύναμη για τη ροή υδρατμών, κι η ιδιότητα αυτή του σκυροδέματος ονομάζεται διαπερατότητα υδρατμών, αν και ουσιαστικά ο μηχανισμός είναι η διάχυση, γεγονός που προκαλεί κάποια σύγχυση με τη διείσδυση του νερού και την υδατοπερατότητα. Για να αποφευχθεί αυτή η σύγχυση, η ροή ατμού στον αέρα θα πρέπει να θεωρείται ως μια διαδικασία διάχυσης που οδηγείται από κλίσεις στη συγκέντρωση των ατμών. Η ιδιότητα του υλικού θα πρέπει να εκφράζεται με το συντελεστή διάχυσης υδρατμών. Ωστόσο, ο διαχωρισμός είναι δύσκολος, όταν ο ατμός και η ροή υγρού συνδυάζονται, όπως στην περίπτωση της υγρασίας. Παρακάτω, στο **Σχήμα 14**, φαίνονται οι μηχανισμοί διείσδυσης διαβρωτικών μέσων (Cl⁻) στο σκυρόδεμα.



Σχήμα 14: Μηχανισμοί μεταφοράς χλωριόντων στο σκυρόδεμα

1.10 Τρόποι Προστασίας Οπλισμένου Σκυροδέματος

Οι τρόποι προστασίας των κατασκευών από σκυρόδεμα αφορούν **α)** το σκυρόδεμα, ώστε αυτό να καταστεί λιγότερο διαπερατό και περισσότερο ανθεκτικό σε βλαπτικούς παράγοντες που θα οδηγήσουν σε φαινόμενα διάβρωσης του οπλισμού και **β)** τον χάλυβα, ώστε να έχει τη δυνατότητα να ανθίσταται ή να καθυστερεί σημαντικά τα φαινόμενα διάβρωσης [Τριανταφύλλου (2005)]. Πιο συγκεκριμένα:

Μέθοδοι προστασίας σκυροδέματος:

- Επιλογή του κατάλληλου πάχους επικάλυψης οπλισμού
- Διατήρηση λόγου w/c μεταξύ 0.4 έως 0.6
- Καλή διάστρωση, συμύκνωση και υγρή συντήρηση για όσο το δυνατό περισσότερες μέρες
- Χρήση κατάλληλου τσιμέντου Portland είτε ποζολανικών τσιμέντων που περιορίζουν τη διείσδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα

- Χρήση ποζολανικών υλικών στο μίγμα
- Χρήση στεγανών ξυλοτύπων, οι οποίοι παρεμποδίζουν τη διαρροή τσιμεντοπολτού

Μέθοδοι προστασίας οπλισμού:

- Χρήση ανοξειδωτων ή γαλβανισμένων ράβδων, ή ράβδων με εποξειδοτική ρητίνη
- Καθδική προστασία των οπλισμών
- Επικάλυψη των επιφανειών με διαπερατές μεμβράνες ή στρώσεις αδιαπέραστου σκυροδέματος ειδικής σύνθεσης
- Χρήση χημικών προσθέτων, γνωστών ως 'αναστολείς διάβρωσης'

2. ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΗ ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια συνεχώς αυξανόμενη τάση για τη χρησιμοποίηση και άλλων υλικών στην παραγωγή τσιμέντου, εκτός από τα βασικά στοιχεία του, το κλίνκερ και το γύψο. Τα σύνθετα αυτά τσιμέντα σε διάφορους τύπους παράγονται ανάλογα με τις απαιτήσεις που υπάρχουν σε κάθε χώρα. Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται, τα οποία εμφανίζουν υδραυλικές ή ποζολανικές ιδιότητες ή είναι αδρανή, μπορεί να είναι είτε φυσικά υλικά, όπως ο ασβεστόλιθος και οι φυσικές ποζολάνες, είτε βιομηχανικά παραπροϊόντα, όπως η σκωρία υψικαμίνου, η πυριτική παιπάλη και οι ιπτάμενες τέφρες. Η παραγωγή και χρήση σύνθετων τσιμέντων Portland είναι πολύ διαδεδομένη, γεγονός που οφείλεται στην θετική συμβολή τους σε πολλές από τις ιδιότητες του σκυροδέματος, αλλά και στο γεγονός ότι πολλά από τα χρησιμοποιούμενα υλικά αποτελούν παραπροϊόντα άλλων βιομηχανικών διαδικασιών, που έτσι αξιοποιούνται σημαντικά και μειώνονται τα περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργεί η απόρριψή τους.

Επίσης, τα σύνθετα τσιμέντα έχουν κατά κανόνα, μικρότερο κόστος παραγωγής, ενώ με τη χρήση τους εξοικονομούνται ενέργεια, φυσικοί πόροι και πρώτες ύλες, ενώ συγχρόνως μειώνεται η έκλυση CO₂ κατά την παραγωγή κλίνκερ. Τα σύνθετα τσιμέντα Portland παρουσιάζουν αναμφισβήτητα βελτιωμένες ιδιότητες, οι κυριότερες από τις οποίες είναι: βελτιωμένη αντοχή έναντι θεικών και άλλων διαλυμάτων οξέων, χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης, βελτίωση χαρακτηριστικών σκυροδέματος (ανθεκτικότητα, προστασία σπλισμού), ανάπτυξη αντοχών κ.ά. Με την πάροδο του χρόνου όμως η βελτίωση της αποτελεσματικότητάς τους, η εκμετάλλευση των συμβατικών ορυκτών πρώτων υλών ή βιομηχανικών παραπροϊόντων καθώς και η μείωση του ενεργειακού κόστους σε συνδυασμό με την πράσινη ανάπτυξη έγιναν ο κύριος σκοπός παραγωγής τους.

Στην Ελλάδα

Η ενεργειακή πολιτική της χώρας μας τα τελευταία 50 χρόνια επικεντρώνεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ξηρή καύση των λιγνιτών έτσι ώστε η ενεργειακή εξάρτηση της χώρας από το πετρέλαιο να μειωθεί στο ελάχιστο. Αυτή η πολιτική έχει σαν

αποτέλεσμα την καύση όλο και μεγαλύτερων ποσοτήτων λιγνίτη που εξορύσσονται κυρίως σε δύο περιοχές:

Στα λεκανοπέδια της Δυτικής Μακεδονία, όπου η ηλεκτροπαραγωγή από την καύση του λιγνίτη, στις μονάδες Αμυνταίου, Φλωρίνης, Καρδιάς και Πτολεμαΐδας, καλύπτει το 65% των ενεργειακών αναγκών της χώρας και στη λεκάνη της Μεγαλόπολης, στην κεντρική Πελοπόννησο, όπου για την παραγωγή ενέργειας αξιοποιείται ένας από τους φτωχότερους λιγνίτες παγκοσμίως ενώ καλύπτει το 14% των αναγκών της χώρας μας.

Η καύση του λιγνίτη συνοδεύεται από την παραγωγή παραπροϊόντων των οποίων η σύσταση και οι ποσότητες παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις εξ' αιτίας των διαφορών στα γεωλογικά στρώματα που βρίσκεται ο εκάστοτε εξορυσσόμενος λιγνίτης. Τα παραπροϊόντα αυτά είναι: **α)** αέρια όπως: εκπεμπόμενο CO₂ και SO₃, **β)** στερεά όπως: Τέφρα πυθμένα (Bottom slag) και Ιπτάμενη τέφρα (Fly ash). Η ιπτάμενη τέφρα όπως και άλλα βιομηχανικά παραπροϊόντα (ιπτάμενη τέφρα,σκωρία υψικαμίνου,πυριτική παιπάλη), αλλά και ο θερμικά επεξεργασμένος καολίνης (μετακαολίνης), αποτελούν τεχνικές ποζολάνες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως 'πρόσμικτα',αντικαταθιστώντας κάποιο ποσοστό του τσιμέντου στο σκυρόδεμα και αντιδρώντας με το υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)₂),για τη δημιουργία αντίστοιχων τσιμεντοειδών ενώσεων.

2.2 Ιπτάμενη Τέφρα

Η ιπτάμενη τέφρα (fly ash) (**Εικόνα 1**), αποτελεί το κύριο σε ποσότητα παραπροϊόν των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι ένα στερεό και κοινιώδες υλικό το οποίο παράγεται κατά την καύση των κονιοποιημένων στερεών καυσίμων (λιθάνθρακες, λιγνίτες, τύρφη) στους λέβητες των θερμοηλεκτρικών σταθμών (Θ.Η.Σ.). Στη συνέχεια, συμπαρασύρεται από το ρεύμα των καυσαερίων και συλλέγεται στις εγκαταστάσεις αποκονίωσης (ηλεκτροστατικά φίλτρα). Όπως και στην χώρα μας έτσι και σε παγκόσμια κλίμακα ο διαρκώς αυξανόμενος ρυθμός της χρησιμοποίησης στερεών καυσίμων για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνονται παντού οι ποσότητες της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας. Στη χώρα μας, η παραγωγή τέφρας πυθμένα ανέρχεται σε 1 x 10⁶ τόν/έτος, ενώ η συνολική παραγωγή της ιπτάμενης τέφρας έχει ξεπεράσει τους 13 x 10⁶ τόν/έτος.



Εικόνα 1 : Ιπτάμενη Τέφρα

Η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται ως πρόσμικτο στην παρασκευή σκυροδέματος, προσφέροντας στο σκυρόδεμα ενδιαφέρουσες τεχνολογικές με αποτέλεσμα να εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα κοινά τσιμέντα. Δε συμπεριφέρεται σαν απλή ποζολάνη αλλά δείχνει να συμβάλλει κατά σημαντικό τρόπο στις τελικές αντοχές των μιγμάτων. Η ιπτάμενη τέφρα σε αντίθεση με τα γνωστά ποζολανικά υλικά έχει διαφορετική συμπεριφορά. Τα ποζολανικά υλικά αντιδρούν σε δεύτερη φάση (μετά τη λανθάνουσα περίοδο της ενυδάτωσης του τσιμέντου) με το παραγόμενο Ca(OH)_2 από τις πρώτες αντιδράσεις ενυδάτωσης των C_3S και C_2S . Αν ο ρόλος της περιοριζόταν στην αξιοποίηση του παραγόμενου Ca(OH)_2 θα υπήρχε χαμηλό όριο στο ποσοστό προσθήκης της, παρόμοιο με των ποζολανών. Κάτι τέτοιο όμως δεν παρατηρείται και τα μίγματα διατηρούν καλές τεχνολογικές ιδιότητες και σε υψηλά ποσοστά προσθήκης.

Η ιπτάμενη τέφρα είναι υλικό παρόμοιας χημικής σύστασης με το κλίνκερ αφού αποτελείται από τα οξείδια CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O κ.ά. και έχει μορφοποιηθεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Η συμπεριφορά της λοιπόν αναμένεται να είναι παρόμοια με του κλίνκερ ως προς την πορεία της ενυδάτωσης, ασχέτως αν αυτή η ενυδάτωση δε συνεπάγεται και ανάπτυξη αντοχών όπως στο καθαρό τσιμέντο. Η ενυδάτωση του τσιμέντου όμως είναι απαραίτητη προκειμένου η τέφρα να αντιδράσει με το παραγόμενο Ca(OH)_2 του ενυδατωμένου τσιμέντου. Αξίζει να σημειωθεί ότι δε λειτουργεί μόνο σαν ποζολανικό υλικό δεσμεύοντας το Ca(OH)_2 που παράγεται από τις πρώιμες αντιδράσεις ενυδάτωσης, αλλά ενεργοποιείται σε δεύτερο στάδιο (από την παρουσία των Ca^{+2}) και αναπτύσει ιδιαίτερα σημαντικές αντοχές.

Ωστόσο, απομένει να διευκρινισθεί εάν τα νέα υλικά που προτείνονται έχουν καλή συμπεριφορά στην επιθετική διάβρωση ιόντων που συναντώνται σε φυσικά ύδατα ώστε να διασφαλίζεται η χρήση τους και σαν ειδικού τύπου υλικά σε μεγάλα τεχνικά έργα, καθώς και

εάν μεταβάλλουν τον ρυθμό οξείδωσης του οπλισμού, ώστε να είναι δυνατή η χρήση τους σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα.

2.3 Πυριτική Παιπάλη

Η πυριτική παιπάλη, (**Εικόνα 2**), είναι ένα άμορφο, (μη κρυσταλλικό) πολύμορφο διοξειδίου του πυριτίου. Είναι μια σκόνη πολύ λεπτή που συλλέγεται σαν παραπροϊόν της βιομηχανίας πυρηνικών μετάλλων και σιδηροπυριτικών κραμάτων και αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια με μέση διάμετρο σωματιδίων 150 nm. Αυτό την καθιστά περίπου 100 φορές μικρότερη από το μέσο όρο των σωματιδίων του τσιμέντου. Το κύριο πεδίο εφαρμογής είναι ως ποζολανικό υλικό για σκυρόδεμα υψηλών επιδόσεων.



Εικόνα 2 : Πυριτική Παιπάλη

Η πρώτη δοκιμή της πυριτικής παιπάλης σε σκυροδέματα, πραγματοποιήθηκε το 1952. Το μεγαλύτερο εμπόδιο για την διερεύνηση των ιδιοτήτων της πυριτικής παιπάλης ήταν η έλλειψη του υλικού, με το οποίο επρόκειτο να πειραματιστούν.

Με την εφαρμογή των αυστηρότερων περιβαλλοντικών νόμων κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1970, χυτήρια πυριτίου άρχισαν να συλλέγουν την πυριτική παιπάλη και να αναζητούν εφαρμογές της [**Κανελλόπουλος (2009)**]. Εφαρμογές του υλικού αυτού πραγματοποιήθηκαν στη Νορβηγία και δείχνουν ότι το τσιμέντο τύπου Portland που περιέχει

πυριτική παιπάλη είχε πολύ υψηλές αντοχές και χαμηλό πορώδες. Έκτοτε, η έρευνα και η ανάπτυξη της πυριτικής παιπάλης είναι ένα από τα πιο πολύτιμα και με πολλαπλές χρήσεις,προσμίκτα, για σκυρόδεμα και τα τσιμεντοειδή προϊόντα που κατασκευάζονται.

Λόγω της λεπτότητας της και της υψηλής περιεκτικότητας σε διοξείδιο του πυριτίου, η πυριτική παιπάλη είναι ένα πολύ αποτελεσματικό ποζολανικό υλικό. Έτσι, προστίθεται σε σκυρόδεμα Portland για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του, ιδίως την αντοχή σε θλίψη και τη σύνδεση μεταξύ των κόκκων του ενώ συμβάλλει εμφανώς στη βελτίωση της εργασιμότητας του. Οι βελτιώσεις αυτές προκύπτουν από την προσθήκη μιας πολύ λεπτής σκόνης στην πάστα του τσιμέντου, καθώς και από την ποζολανική αντίδραση μεταξύ της πυριτικής παιπάλης και των ελεύθερων υδροξειδίων του ασβεστίου στην πάστα.

Η προσθήκη πυριτικής παιπάλης μειώνει επίσης τη διαπερατότητα του σκυροδέματος σε ιόντα χλωρίου (Cl^-), το οποίο προστατεύει το χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος από τη διάβρωση, ειδικά σε περιβάλλον πλούσιο σε χλωριόντα, όπως παράκτιες περιοχές αλλά και οδοστρώματα (λόγω της χρήσης των αποπαγωγικών αλάτων) ή και γέφυρες πάνω από θαλασσινό νερό.

2.4 Σκωρία Υψικαμίνου

Η σκωρία υψικαμίνου (Granulated Blast Furnace Slag), (**Εικόνα 3**), αποτελεί παραπροϊόν υψικαμίνων σιδηρομεταλλευμάτων σε μορφή σκωρίας, δηλαδή προκύπτει από την παραγωγική διαδικασία του χάλυβα. Είναι υλικό μη μεταλλικό, που αποτελείται από πυριτικά και αργιλοπυριτικά άλατα του ασβεστίου. Η χημική της σύσταση χαρακτηρίζεται κυρίως από οξείδια ασβεστίου,σιδήρου και μαγνησίου(CaO , FeO , MgO) και άλλα οξείδια και στοιχεία σε μικρότερες αναλογίες (SiO , MnO , Al_2O_3 , P_2O_5 , S). Δημιουργείται όταν το μέταλλωμα σιδήρου λιώνει μαζί με ασβεστόλιθο ή δολομίτη,σε φούρνο με αέρα υπό πίεση. Στον υψικάμινο, οι σκωρίες επιπλέουν στο μέταλλο κι έπειτα η λειωμένη σκωρία ψύχεται και στερεοποιείται. Αν η ψύξη της σκωρίας γίνεται πολύ γρήγορα με έκθεση στο νερό, σχηματίζεται διεσταλμένη σκωρία, η οποία στη συνέχεια συνθλίβεται για να παραχθούν τα απαιτούμενα μεγέθη για τις διάφορες εφαρμογές. Όταν η μεταλλουργική διαδικασία της τήξης ολοκληρώνεται, το ασβέστιο έχει συνδιαστεί χημικά με τα αργιλικά και πυριτικά άλατα του μεταλλεύματος και της τέφρας, ώστε να διαμορφωθεί αυτό το μη μεταλλικό προϊόν. Μαζί με τη σκωρία από φούρνους χάλυβα,η σκωρία υψικαμίνου αποτελεί τους

σημαντικότερους τύπους σκωρίας. Οι σκωρίες έχουν από μόνες τους υδραυλικές ιδιότητες. Όταν όμως ενυδατώνονται μόνες τους, χωρίς την παρουσία του τσιμέντου Portland, το ποσό του υδραυλικού υλικού που σχηματίζεται είναι μικρό και ο ρυθμός σχηματισμού του χαμηλός. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται πάντα σε μίγματα με τσιμέντο τύπου Portland.



Εικόνα 3: Σκωρία υψικαμίνου

Λόγω των υδραυλικών ιδιοτήτων της σκωρίας, σωματίδια κοκκομετρίας μικρότερης από τα 10 μm συνεισφέρουν στις πρώιμες αντοχές, ενώ σωματίδια μεγαλύτερα από 10 μm και μικρότερα από 45 μm συνεισφέρουν στις τελικές αντοχές. Σωματίδια κοκκομετρίας μεγαλύτερης των 45 μm είναι δύσκολο να ενυδατωθούν. Η σκωρία είναι υλικό κοκκομετρίας μικρότερης των 45 μm.

Η σκωρία υψικαμίνου έχει πολλά πλεονεκτήματα ως πρόσθετο στο σκυροδεμα, όπως: **1)** η υψηλή τελική αντοχή, με χαμηλές πρώιμες αντοχές, **2)** η υψηλή αναλογία σε κάμψη ως προς την αντοχή σε θλίψη, **3)** αντίσταση στα θειικά ιόντα και τα ιόντα χλωρίου, **4)** χαμηλή θερμοκρασία ενυδάτωσης, **5)** μείωση του πορώδους και της διαπερατότητας του σκυροδέματος. Τα τσιμέντα σκωρίας έχουν επίσης καλή εργασιμότητα και χαμηλή απαίτηση σε νερό. Στην ενυδάτωση της σκωρίας σημαντικό ρόλο παίζει η επίδραση της θερμοκρασίας. Η ενυδάτωση επιταχύνεται σε υψηλές θερμοκρασίες και επιβραδύνεται σε χαμηλότερες.

Τέλος, η σκωρία χάλυβα είναι αλκαλική, με pH που κυμαίνεται από 8 έως 10. Εντούτοις, το pH της σκωρίας μπορεί να υπερβεί την τιμή 11, ένα επίπεδο που είναι διαβρωτικό

στους γαλβανισμένους σωλήνες χάλυβα που έρχονται σε επαφή με τη σκωρία [Καραστεργίου (2009)].

2.5 Μετακαολίνης

Ο μετακαολίνης, (Εικόνα 4), είναι ένα προϊόν, άμορφο κατά το μεγαλύτερο μέρος του, που παράγεται με θερμική επεξεργασία (έψηση), σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (450°C) καθαρού καολινίτη (κύριο συστατικό του καολίνης). Ο καολινίτης έχει θεωρητική χημική σύσταση 46.54% SiO₂, 39.5% Al₂O₃, 13.96% H₂O κ.β. Αποτελεί τεχνητή ποζολάνη που παρουσιάζει πολύ υψηλή ποζολανική δραστηριότητα σε σύγκριση με τις φυσικές ποζολάνες. Χρησιμοποιείται ως πρόσθετο σκυροδέματος με σκοπό τη βελτίωση ορισμένων ιδιοτήτων του.



Εικόνα4: Μετακαολίνης

Ο καολινίτης, Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O, είναι ένα αργιλοπυριτικό ορυκτό, το οποίο πήρε το όνομά του από την κινεζική επαρχία Cauling. Το πέτρωμα που αποτελείται κυρίως από το ορυκτό καολινίτη, ονομάζεται καολίνης. Ο καολίνης είναι το βασικό συστατικό των πορσελανών. Ο καολινίτης ανήκει στην ομάδα των αργιλικών ορυκτών, με δομή 1:1, δηλαδή

ένα φύλλο τετραέδρων πυριτίου εναλλάσσεται με ένα φύλλο οκταέδρων αργιλίου. Ο καολινίτης χαρακτηρίζεται από λευκό χρώμα, λεπτόκοκη υφή, μεγάλη διασπορά, είναι χημικά αδρανής και έχει χαμηλό κόστος παραγωγής. Ο χοντρόκοκκος καολίνης χρησιμοποιείται ως πληρωτικό, ενώ ο λεπτόκοκκος ως υλικό επικάλυψης. Ο καολίνης αποτελεί πρώτη ύλη σε κεραμικά, σε πορσελάνες, σε είδη υγιεινής, στη τσιμεντοβιομηχανία, σε πυρίμαχους πλίνθους, στη χαρτοβιομηχανία, στη βιομηχανία ελαστικών και πλαστικών PVC κ.ά.

Αποθέσεις καολίνη υπάρχουν στη Λέσβο, την Κίμωλο, την Κω, τη Θήρα, τη Ροδόπη, το Κιλκίς, τη Μήλο και Δράμα. Ο καολίνης εξορύσσεται περιοδικά μόνο από τα κοιτάσματα της Μήλου και της Δράμας, που όμως η ποιότητα του είναι χαμηλή διότι, ο μεν καολίνης της Μήλου (13-20% Al_2O_3 και 0.3-0.6% Fe_2O_3) περιέχει οπαλιοειδή SiO_2 και αλουνίτη (θειούχο ορυκτό), ο δε καολίνης της Δράμας (18% Al_2O_3 και 2,5% Fe_2O_3) περιέχει χαλαζία, αστρίους και μαρμαρυγίες. Τα ενδεικτικά αποθέματα καολίνη (κυρίως της Μήλου και της Δράμας) είναι 50 εκατ. τόνοι.

Τα ορυκτολογικά και χημικά χαρακτηριστικά και των δύο τύπων καολίνη (της Μήλου και της Δράμας) τα καθιστούν ακατάλληλα για υψηλής ποιότητας επικαλυπτικά και πληρωτικά υλικά. Το μεγαλύτερο ποσοστό (80%) της παραγωγής της Μήλου καταναλώνεται, σε ακατέργαστη μορφή, στην εγχώρια τσιμεντοβιομηχανία, ενώ μικρό μέρος (10%) εξάγεται για την παραγωγή λευκού τσιμέντου. Όλη η παραγωγή των Λευκογείων Δράμας καταναλωνόταν μέχρι το 2010 για την παραγωγή πλακιδίων δαπέδου και τοίχου. Οι εγχώριες βιομηχανικές ανάγκες για υψηλής ποιότητας καολίνη ικανοποιούνται από εισαγωγές. Από το 1995 η παραγωγή καολίνη έχει περιοριστεί δραματικά, εξαιτίας κυρίως της έλλειψης καλής ποιότητας αποθεμάτων.

Σύμφωνα με μελέτες, μεγάλα πλεονεκτήματα μπορούν να προκύψουν από τη χρήση μετακαολίνη υψηλής δραστηριότητας στο σκυρόδεμα. Τα πλεονεκτήματα αυτά αφορούν το πορώδες, την κατανομή πόρων, τη διαπερατότητα σε αέρα, την υδατοαπορροφητικότητα, τη διάχυση των χλωριόντων Cl^- και την αντοχή του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, η παρουσία μετακαολίνη στο σκυρόδεμα επιδρά θετικά στο πορώδες, μειώνοντάς το. Αυτή η μείωση οφείλεται μεταξύ άλλων και στο ότι οι κόκκοι του μετακαολίνη είναι μικρότεροι από τους κόκκους του τσιμέντου με αποτέλεσμα να καλύπτουν τα κενά μεταξύ των κόκκων τσιμέντου. Επιπρόσθετα, η προσθήκη του μετακαολίνη βελτιώνει σημαντικά τις αντοχές θλίψης του σκυροδέματος. Βέβαια, η εργασιμότητα του σκυροδέματος με μετακαολίνη παρουσιάζεται μειωμένη σε σχέση με ένα σκυρόδεμα αμιγούς τσιμέντου αλλά αυτό εύκολα

ρυθμίζεται με τη χρήση ρευστοποιητών. Επομένως, η χρήση του μετακαολίνης συμβάλλει στην παραγωγή σκυροδέματος υψηλής απόδοσης (high performance concrete), αφού όλες οι ιδιότητες που διαμορφώνουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, παρουσιάζουν σαφή βελτίωση [Badogiannis E. & Tsivilis S., (2009)].

3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

3.1 Εισαγωγή

Η ανθεκτικότητα είναι ένα θέμα που ενδιαφέρει ιδιαίτερω τους μηχανικούς τα τελευταία χρόνια. Καθημερινά πραγματοποιείται έρευνα σε παγκόσμιο επίπεδο από επιστήμονες, πανεπιστημιακούς, μηχανικούς και φοιτητές σχετικά με τους παράγοντες που την επηρεάζουν, με τελικό στόχο την επίτευξη της διατήρησης της αντοχής και της λειτουργικότητας των κατασκευών σε όλη τη διάρκεια της ζωής τους.

Η ολοένα και πιο συχνή ανάμιξη πρόσθετων υλικών όπως σκωρίας υψικαμίνου, πυρηντικής παιπάλης,ιπτάμενης τέφρας και μετακαολίνη σε πληθώρα κατασκευών από σκυρόδεμα τις τελευταίες δεκαετίες, κίνησε σε πολλούς το ενδιαφέρον να μελετήσουν την επιρροή αυτών των τσιμεντοειδών υλικών, στην ανθεκτικότητα των κατασκευών.

Ακολουθεί η παράθεση κάποιων αποτελεμάτων και τα βασικά συμπεράσματα ερευνών που έχουν διεξαχθεί σχετικά με την τριχοειδή απορρόφηση, την υδατοπερατότητα, τη διαπερατότητα σε αέρα και τη διείσδυση χλωριόντων σε δοκίμια σκυροδέματος.

3.2 Τρέχουσα ερευνητική δραστηριότητα

Οι **K. Audenaert et al.**, το 2008 μελέτησαν τη μεταβολή του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων στο σκυρόδεμα συναρτήσει του χρόνου, σε 16 συνθέσεις από αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (SCC) και 4 συνθέσεις από συμβατικό σκυρόδεμα με κανονική συμπίκνωση (TC). Πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές, σε σκυρόδεμα ηλικίας έως και 5 χρόνων, κατά το πρότυπο **NordTest BUILD 492**. Ερευνήθηκε η επίδραση του τύπου και της ποσότητας του τσιμέντου, των υλικών πλήρωσης (filler), της ποσότητας του νερού στο συντελεστή διείσδυσης και της ηλικίας όλων των συνθέσεων. Το τριχοειδές πορώδες εισήχθη ως παράμετρος για να περιγράψει την επίδραση της σύνθεσης του σκυροδέματος και παρατηρήθηκε ότι αύξηση του τριχοειδούς πορώδους οδηγεί σε αυξημένο συντελεστή μεταφοράς των χλωριόντων και μείωση της επιρροής του παράγοντα της ηλικίας. Οι μελετητές διαπίστωσαν ότι ο συντελεστής διείσδυσης των

συνθέσεων με κανονική συμπίκνωση είναι υψηλότερος απ' αυτόν του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με τον ίδιο τύπο τσιμέντου και ίδιο λόγο w/c.

Οι **J. Kim et al.**, το 2015 ερεύνησαν τη διείσδυση χλωριόντων σε βάθρα γέφυρας από σκυρόδεμα, εντός θάλασσας και σύγκριναν εμπειρικά και φυσικά μοντέλα που περιγράφουν το φαινόμενο. Η μελέτη αυτή αποσκοπεί στην επικαιροποίηση των παραμέτρων και των δύο μοντέλων για την πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς του σκυροδέματος, σε θαλάσσιο περιβάλλον κατηγορίας έκθεσης XS2 και XS3. Ο χώρος δοκιμών βρισκόταν στη νότια Causeway που οδηγεί σε γέφυρα στο Dornoch Firth, βορειοανατολικά της Σκωτίας. Η γέφυρα, ολοκληρώθηκε το 1991 και περιλάμβανε κατάστρωμα, προκατασκευασμένο από σκυρόδεμα, το οποίο σταδιακά τοποθετήθηκε πάνω στα βάθρα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Συνολικά εννέα βάθρα φυσικής κλίμακας τοποθετήθηκαν, που αντιστοιχούσαν σε τρεις διαφορετικές θέσεις συνθήκες έκθεσης XS1, XS2 και XS3 όπως ορίζονται από τους κανονισμούς. Κάθε βάθρο, με βάρος που υπερέβαινε τους 10 τόνους, ήταν, οκταγωνικής διατομής, ύψους 2 m και πλευράς 6.60 m. Η μεταφορά χλωριόντων σε σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε θαλάσσιο περιβάλλον εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας τη λύση ERFK (Fickian) και το μοντέλο ClinConc. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός εκτεταμένου προγράμματος που βασίζεται σε δεδομένα πεδίου που λαμβάνονται από πλήρους κλίμακας βάθρα, σε ζώνες περιβαλλοντικής έκθεσης XS2 και XS3 για παρατεταμένο χρονικό διάστημα. Κατά συνέπεια, τα φυσικά μεγέθη όπως η συγκέντρωση χλωριόντων C_s , ο συντελεστής διάχυσης D_a , αποτέλεσαν μια πραγματική προσομοίωση των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα που είναι εκτεθειμένες σε θαλάσσιο περιβάλλον. Το έργο έδειξε τη μεταβλητή φύση των C και D_a . Για να περιγραφούν οι διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες για το μοντέλο ClinConc, δύο περιβαλλοντικοί παράγοντες μελετήθηκαν οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την περιγραφή της μεταφοράς χλωριόντων σε άλλες ζώνες εκτός από τη βυθισμένη ζώνη στην οποία βασίζεται το μοντέλο ClinConc. Από τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, επιβεβαιώθηκε ότι ο βαθμός διείσδυσης χλωριόντων ήταν εξαιρετικά μεταβλητός και ευαίσθητος στις περιβαλλοντικές συνθήκες, ιδιαίτερα στις περιοχές που ήταν εκτεθειμένες σε δράσεις ψεκασμού, όπου η επιφάνεια επαφής σκυροδέματος με το θαλασσινό νερό είναι πιο ακανόνιστη σε σχέση με αυτή στο σκυρόδεμα στην παλιρροιακή ζώνη, η οποία παραμένει σε ένα κορεσμένο ή σχεδόν κορεσμένο περιβάλλον.

Οι **Wenjun Zhu et al.**, το 2016, διερεύνησαν την επίδραση της μακροχρόνιας διάχυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα και την επίδραση της προκύπτουσας διάβρωσης του οπλισμού για τη λειτουργικότητα δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα (RC). Μια σειρά από πειραματικές μελέτες διεξήχθησαν σε διαβρωμένες δοκούς μέχρι 28 ετών. Η περιεκτικότητα σε χλωρίοντα σε διαφορετικές τοποθεσίες δοκιμάστηκαν κατά τη διάρκεια διαφόρων περιόδων. Μελετήθηκαν διαφορετικές παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργικότητα των διαβρωμένων δοκαριών, όπως το εύρος ρωγμής που προκαλείται από τη διάβρωση στο σκυρόδεμα, το βέλος μετατόπισης στο μέσο του ανοίγματος των δοκών κάτω από το φορτίο λειτουργίας και η φέρουσα ικανότητά τους. Με βάση τα διαθέσιμα αποτελέσματα από το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση, η διάρκεια ζωής των δοκών καθώς και η λειτουργικότητα τους ήταν άμεσα εξαρτημένη από τη διαδικασία της διάβρωσης του οπλισμού. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το όριο περιεκτικότητας σε χλωρίοντα σε ποσοστό 0.5% της μάζας του τσιμέντου στις ζώνες του πυθμένα και της κορυφής, επιτεύχθηκε μετά από λιγότερο από ένα χρόνο στο περιβάλλον έκθεσης σε χλωρίοντα. Επίσης, τα διαβρωμένα δοκάρια σε αυτό το πρόγραμμα, εξακολουθούσαν να λειτουργούν καλά όταν το άνοιγμα της διάβρωσης που προκαλείται από ρωγμέ, δε ξεπερνούσε τα 0.3 mm. Επίσης, αυτό το πλάτος ρωγμής θα μπορούσε να θεωρηθεί ως το όριο λειτουργικότητας και για αισθητικούς λόγους. Αξίζει να σημειωθεί ότι αποφλοίωση (spalling) στο σκυρόδεμα μπορεί να συμβεί όταν η ρωγμή φτάσει το 1.0 mm. Εντούτοις, στη συγκεκριμένη μελέτη, η αποφλοίωση έλαβε χώρα όταν η ρωγμή έφτασε τα 3.4 mm, ενώ η μετατόπιση των διαβρωμένων δοκών, η οποία συνδέεται με την απώλεια της συνάφειας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος, είχε αυξηθεί στο 14ο έτος, αλλά και στο 17ο έτος. Ωστόσο, στη συνέχεια έμεινε σχεδόν σταθερή συναρτήσει του χρόνου, παρά το γεγονός ότι τα φαινόμενα διάβρωσης συνέχιζαν να αυξάνονται. Όσον αφορά τη φέρουσα ικανότητα των διαβρωμένων δοκαριών, αυτή θα πέσει κάτω από το σχεδιασμένο φορτίο λειτουργικότητας περίπου την 48η χρονιά, σηματοδοτώντας το τέλος της διάρκειας ζωής των δοκών, ενώ θα πρέπει να επισημανθεί ότι όλα τα αποτελέσματα βασίζονται σε ένα συγκεκριμένο τύπο δοκών RC. Η εφαρμογή των συμπερασμάτων σε δοκούς RC, σε μεγάλες κατασκευές απαιτεί προφανώς ιδιαίτερη προσοχή και μελέτη.

Οι **Ciro Faella et al.**, το 2016 παρακολούθησαν τη μηχανική συμπεριφορά και την ανθεκτικότητα 'βιώσιμου' (φιλικού προς το περιβάλλον) σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος (RCAs) και ιπτάμενη τέφρα Fly Ash (FA). Για το σκοπό αυτό, 12 συνθέσεις σχεδιάστηκαν με αντικατάσταση μέρους των απλών συστατικών (δηλαδή το τσιμέντο, την άμμο και χονδρόκοκκων αδρανών υλικών) με ιπτάμενη τέφρα (FA) και ανακυκλωμένα αδρανή (RCAs). Δείγματα αυτών των συνθέσεων υποβλήθηκαν σε διάφορες δοκιμές που αποσκοπούν στην αξιολόγηση των ιδιοτήτων και της αντοχής τους. Όσον αφορά τη χρονική εξέλιξη της αντοχής σε θλίψη, αυτή παρακολούθηθηκε σε διάφορες χρόνους σκλήρυνσης μέχρι και 365 ημέρες, η αντοχή θραύσης προσδιορίστηκε στις 28 ημέρες, ενώ η ανθεκτικότητα των προαναφερόμενων συνθέσεων σκυροδέματος ελέγχθηκε με τη μέτρηση ιδιοτήτων όπως της διαπερατότητας του νερού, του βάθος ενανθράκωσης και της διείσδυσης χλωριόντων σε διάφορες ηλικίες ωρίμανσης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δοκιμές αυτές συχνά δεν είναι ξεκάθαρα, δεδομένου ότι είναι απόρροια της ταυτόχρονης επίδρασης του συνδυασμού των RCAs και της FA. Σύμφωνα με τους ερευνητές, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης ανακυκλωμένων συστατικών για την παραγωγή σκυροδέματος, φιλικού προς το περιβάλλον, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλο τουλάχιστον για κατασκευές που δεν εκτίθενται σε ιδιαίτερα διαβρωτικά περιβάλλοντα. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η μειωμένη μηχανική αντοχή και απόδοση των ανακυκλωμένων αδρανών (RAC), λόγω του υψηλού πορώδους τους, μπορεί να αντισταθμιστεί από την ταυτόχρονη προσθήκη της ιπτάμενης τέφρας κι ότι ενώ η διείσδυση ιόντων χλωρίου επηρεάζεται από την παρουσία αυτών των αδρανών στο σκυρόδεμα, η ταυτόχρονη παρουσία της ιπτάμενης τέφρας ενισχύει την αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι το βάθος ενανθράκωσης ελέγχεται κυρίως από τα χαρακτηριστικά της τσιμεντόπαστας και είναι μεγαλύτερο για υψηλότερες τιμές της αναλογίας νερού προς τσιμέντο (w/c).

Ο **Nabil M. Al-Akhras**, το 2006 μελέτησε την επίδραση του μετακαολίνης στην βελτίωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε περιβάλλον θεικών. Συνολικά παρασκευάστηκαν 12 συνθέσεις 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), και 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). Το σκυρόδεμα περιείχε τσιμέντο τύπου Portland, θρυμματισμένο ασβεστόλιθο, φυσική πυριτική άμμο, υπερπλαστικοποιητή, αερακτικό και μετακαολίνη σε ποσοστά αντικατάστασης 5%, 10%,

15% κατά βάρος τσιμέντου. 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 τρόπος ωρίμανσης ήταν αυτόκλειστος. Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν όσον αφορά την περιεκτικότητα σε άερα, 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 **C Alonso et al.**, το 2000 διερεύνησαν το κατώτατο όριο των χλωριόντων που θα ενεργοποιήσει την αποπαθητικοποίηση του στόματος χάλυβα σε τυποποιημένα αμιγή κονιάματα (OPC). Συγκεκριμένα, παρουσίασαν το κατώτατο όριο χλωριόντων που μελετήθηκαν σε κονιάματα με βάση τη μέτρηση της διάβρωσης και εκφράστηκαν ως συνολικά κι ελεύθερα χλωριόντα μέσω της αναλογίας Cl^-/OH^- . Για τη μελέτη αυτή, χρησιμοποιήθηκαν κυρίως λείες ράβδοι, αλλά και κάποιες ράβδοι με νευρώσεις. Κατώτατο όριο χλωριόντων βρέθηκαν από 1.24 - 3.08% και από 0.39 έως 1.16%, κατά βάρος του τσιμέντου, για τα συνολικά και ελεύθερα χλωριόντα αντίστοιχα. Διαπιστώθηκε και διασταυρώθηκε και με τα αποτελέσματα πολλών προηγούμενων ερευνών πάνω στο θέμα του κατώτατου ορίου συγκέντρωσης χλωριόντων, ότι ο λόγος ιόντων χλωρίου προς ιόντα υδροξυλίου (Cl^-/OH^-), δε φαίνεται να είναι ο μοναδικός παράγοντας στην έναρξη της ενεργούς διάβρωσης του χάλυβα καθώς αυτή εξαρτάται κι από διάφορους άλλους παράγοντες, όπως την αναλογία νερού προς τσιμέντο (w/c), την περιεκτικότητα σε C_3A του τσιμέντου, τον τρόπο ανάμιξης των υλικών, τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία, τις συνθήκες στην επιφάνεια του χάλυβα και την πηγή των χλωριόντων. Τέλος, οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι ένας από τους λόγους για τους οποίους παρατηρήθηκε μεγάλη διασπορά στο κατώτατο όριο του ποσοστού των χλωριόντων, είναι ο μεγάλος αριθμός των μεταβλητών που επηρεάζουν την ποσότητα των χλωριόντων για την έναρξη της αποπαθητικοποίησης του χάλυβα.

Οι **E.Badogiannis and S.Tsivilis**, το 2009 μελέτησαν την ανθεκτικότητα σκυροδέματος με μετακαολίνη. 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. Οι ιδιότητες ανθεκτικότητας που μετρήθηκαν ήταν η αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων, η διαπερατότητα σε αέρα, η τριχοειδής απορρόφηση και το πορώδες. 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 διείσδυσης 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. Αποδείχτηκε επίσης ότι η προσθήκη μετακαολίνης οδήγησε σε βελτίωση του πορώδους προκαλώντας μειωμένες τιμές μεγέθους πόρου και μεγαλύτερη ομοιομορφία κατανομής του μεγέθους των πόρων, ενώ προέκυψε παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος του μετακαολίνης του εμπορίου και του μετακαολίνης που προερχόταν από ελληνικό καολίνη.

Οι **Xianming Shi et al.**, το 2011 διερεύνησαν την αντοχή του χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος σε διαβρωτικό περιβάλλον χλωριόντων και ειδικότερα το ρόλο των πρόσθετων στο σκυρόδεμα αντοχής, τις μεθόδους μέτρησης της εισροής χλωριόντων και τη μοντελοποίηση της διάρκειας ζωής του οπλισμένου σκυροδέματος σε περιβάλλον χλωριόντων. Η χρήση πρόσθετων δείχνει να έχει πολλά οφέλη στην ανθεκτικότητα και τη βιωσιμότητα του οπλισμένου σκυροδέματος όπως η ιπτάμενη τέφρα, η πυριτική παιπάλη, ο μετακαολίνης και η σκωρία, έχουν δείξει να βελτιώνουν γενικά την αντίσταση του σκυροδέματος στη διείσδυση χλωριόντων. Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας, της σκωρίας και άλλων βιομηχανικών παραπροϊόντων, μπορεί να μεταφραστεί σε εξοικονόμηση κόστους και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και της υγειονομικής ταφής των αποβλήτων, χωρίς να θυσιάζει την ποιότητα και την αντοχή του σκυροδέματος στο πέρασμα των χρόνων. Ωστόσο, οι

ερευνητές αναφέρουν ότι υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω έρευνα, που θα αποσκοπεί στην επικύρωση της χρήσης τέτοιων τροποποιημένων μιγμάτων για τον περιορισμό της διάβρωσης σε θαλάσσιο περιβάλλον.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται μια διερεύνηση της επίδρασης των συστατικών 9 διαφορετικών συνθέσεων σε θέματα ανθεκτικότητας κονιαμάτων. Έτσι μελετάται η επίδραση σε μεγέθη που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα των κονιαμάτων κατόπιν προσθήκης 4 τσιμεντοειδών σε ποσοστά αναλογίας 10% και 20% κατά βάρος (κ.β.) τσιμέντου σε σύγκριση με μία αμιγή σύνθεση. Τα τσιμεντοειδή που προστίθενται είναι μετακαολίνης (metakaolin), ιπτάμενη τέφρα (fly ash), πυριτική παιπάλη (silica fume) και σκωρία υψικαμίνου (blast furnace slag). Συγκεκριμένα, μελετάται: **α)** η υδατοαπορροφητικότητα μέσω του υπολογισμού του ανοικτού πορώδους **β)** η διαπερατότητα σε χλωριόντα μέσω του υπολογισμού **i)** του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων με το πρότυπο **NT BUILD 492** και **ii)** του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων με το πρότυπο **NT BUILD 443**.

Παρακάτω, περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία και η μεθοδολογία ανάλυσης των αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό του πορώδους (OP) και της διάχυσης και διείσδυσης χλωριόντων, η οποία έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και στο Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

4.2 Υλικά και Συνθέσεις δοκιμίων

Όπως αναφέρθηκε, παράχθηκαν οχτώ (8) συνθέσεις με την προσθήκη των τεσσάρων τσιμεντοειδών σε αναλογία 10% και 20% κ.β., και μία (1) σύνθεση αναφοράς με αμιγές κονίαμα OPC. Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας οι συνθέσεις κωδικοποιήθηκαν σύμφωνα με τον **Πίνακα 1** ως εξής: χρησιμοποιούνται τα πρώτα γράμματα από το όνομα του πρόσθετου τσιμεντοειδούς στην Αγγλική γλώσσα και στη συνέχεια αναγράφεται το ποσοστό (%) της προσθήκης του τσιμεντοειδούς αυτού. Για παράδειγμα, ο συμβολισμός 'MK10', αναφέρεται στη σύνθεση κονιάματος με προσθήκη Μετακαολίνης σε ποσοστό 10% κ.β. τσιμέντου. Όσον αφορά την αμιγή σύνθεση, ο συμβολισμός αυτής 'OPC', προκύπτει από τα αρχικά των λέξεων Ordinary Portland Cement.

Πίνακας 1 : Χαρακτηριστικά και Κωδικοποίηση Συνθέσεων

Σύνθεση	% κ.β. τσιμέντου τσιμεντοειδούς πρόσθετου
OPC	Αμιγές κονιάμα
MK10	Μετακαολίνης 10%
MK20	Μετακαολίνης 20%
MFA10	Ιπτάμενη τέφρα 10%
MFA20	Ιπτάμενη τέφρα 20%
MSF10	Πυριτική παιπάλη 10%
MSF20	Πυριτική παιπάλη 20%
GBF10	Σκωρία υψικαμίνου 10%
GBF20	Σκωρία υψικαμίνου 20%

Για κάθε σύνθεση παρασκευάστηκαν δώδεκα (12) κυβικά δοκίμια διαστάσεων 50x50x50 mm, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής, ενώ για τον προσδιορισμό του ανοικτού πορώδους και των συντελεστών διάχυσης και διείσδυσης Cl^- , παρασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά, ύψους $H=200$ mm, με διάμετρο $D=100$ mm, ένα για την κάθε σύνθεση. Και στις εννέα (9) συνθέσεις κονιάματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM-I 42.5N. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ασβεστολιθική άμμος 0-2 mm. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής Sika Viscocrete. Κάθε σύνθεση ήταν των 3 lt με σταθερό λόγο νερού προς τσιμέντο $w/c = 0.55$, ποσότητα αδρανούς και κ.β. ποσοστό πρόσθετων τσιμεντοειδών, ενώ η ποσότητα του ρευστοποιητή άλλαζε κάθε φορά ανάλογα με την προσθήκη του τσιμεντοειδούς. Οι συνθέσεις παρέμειναν κατά τα άλλα αμετάβλητες, ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Στην **Εικόνα 5** φαίνεται η διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων, ενώ στην **Εικόνα 6** φαίνεται η διαδικασία συντήρησής τους στο νερό. Επίσης, στον **Πίνακα 2** φαίνονται οι συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν.



Εικόνα 5 : Παρασκευή δοκιμίων. Στα αριστερα, κυλινδρικά δοκίμια 200x100 (mm), στα δεξιά, κυβικά δοκίμια 50x50 (mm)



Εικόνα 6 : Συντήρηση σε νερό 12 κυβικών κι ενός κυλινδρικού δοκιμίου, σύνθεσης MK20

Πίνακας 2 : Ποσότητες των υλικών ανά σύνθεση (Kg/m³)

ΣΥΝΘΕΣΗ	ΥΛΙΚΑ (Kg/m ³)				N/T
	Τσιμέντο	Τσιμεντοειδές πρόσθετο	Άμμος	Ρευστοποιητής	
OPC	1845	-	5535	-	0.55
MK10	1539	171	5130	8.85	0.55
MK20	1296	324	4860	6.48	0.55
MFA10	1539	171	5130	7.70	0.55
MFA20	1368	342	5130	13.68	0.55
MSF10	1539	171	5130	13.68	0.55
MSF20	1368	342	5130	29.86	0.55
GBF10	1539	171	5130	7.70	0.55
GBF20	1368	342	5130	13.68	0.55

4.3 Ρεολογικά χαρακτηριστικά και πυκνότητα κονιαμάτων

Για το χαρακτηρισμό της ρευστότητας των κονιαμάτων, χρησιμοποιήθηκε δοκιμή κάθισης (mini slump test) κατά το πρότυπο **EN 1015**. Σύμφωνα με την δοκιμή προσδιορίστηκε η ποσότητα του ρευστοποιητή προκειμένου να επιτευχθεί εξάπλωση της τάξης των 18 cm.



Εικόνα 7: Διάταξη δοκιμής κάθισης (mini slump test) σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015

4.4 Μηχανικές ιδιότητες κονιαμάτων

Θλιπτική αντοχή f_m

Η θλιπτική αντοχή f_c των κονιαμάτων προσδιορίστηκε με καταπόνηση σε μονοαξονική θλίψη κυβικών δοκιμίων ακμής 50 mm. Ως θλιπτική αντοχή, f_m , του δοκιμίου ορίζεται η τάση θραύσεως και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f_m = P_{max} / bxd \quad (4.1)$$

όπου:

P_{max} : το μέγιστο φορτίο που ασκείται στο φορτίο μέχρι την αστοχία του (N)

b, d : οι διαστάσεις της επιφάνειας που ασκείται το φορτίο (mm), εδώ $b = d = 50 \text{ mm}$

Προσδιορίστηκε η αντοχή των παραγόμενων κονιαμάτων σε μονοαξονική θλίψη, ηλικίας 7, 14, 28 και 90 ημερών, χρησιμοποιώντας τη διάταξη TONI TECHNIK (Εικόνα 8), δυναμικότητας 600 kN. Στην Εικόνα 9 φαίνονται τα κυβικά δοκίμια μετά από τη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης.



Εικόνα 8 : Διάταξη δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής f_c



Εικόνα 9 : Θραύση δοκιμίων μετά από μονοαξονική θλίψη

4.5 Υδατοαπορροφητικότητα

Για τη μελέτη της Υδατοαπορροφητικότητας, η οποία περιλαμβάνει τις δοκιμές τριχοειδούς απορρόφησης και τον υπολογισμό του ανοιχτού πορώδους, χρησιμοποιήθηκαν τα κυλινδρικά δοκίμια $\varnothing 100 \times 200$ (mm) των 10 συνθέσεων, από τα οποία κόπηκαν στο εργαστήριο με τροχό δοκίμια $\varnothing 100 \times 15$ (mm), περίπου.

4.5.1 Ανοιχτό Πορώδες (OP)

Το ανοιχτό πορώδες (open porosity), ελέγχθηκε σύμφωνα με το αμερικανικό πρότυπο **ASTM C 642 (1997)**. Για τη μέτρηση του ανοικτού πορώδους καταγράφεται το βάρος κάθε δοκιμίου, με ακρίβεια 0.1 gr, σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις. Η πρώτη ζύγιση πραγματοποιείται σε κορεσμένο δοκίμιο (M_{sat}), αμέσως μετά την έξοδό του από τη δεξαμενή συντήρησης, σε περιβάλλον αέρα και η δεύτερη στο ίδιο δοκίμιο σε περιβάλλον νερού, υπό άνωση (M_{imm}). Η τρίτη ζύγιση πραγματοποιείται έπειτα από ξήρανση του δοκιμίου έως σταθεροποίησης του βάρους του, σε περιβάλλον αέρα (M_{dry}).

Τα δοκίμια ξηράθηκαν σε φούρνο, για περίπου 12 μέρες υπό σταθερή θερμοκρασία 85°C μέχρι σταθεροποίησης του βάρους του (διαφορά βάρους μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων σε διάστημα 24±2 h <0.1%). Μετά την ξήρασή 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 παρακάτω Εξισώσεις:

$$\text{Όγκος ανοιχτών πόρων: } (M_{sat}-M_{dry})/p_w \quad (4.2)$$

$$\text{Φαινόμενος όγκος} \quad : \quad (M_{sat}-M_{imm})/p_w \quad (4.3)$$

$$\text{Φαινόμενη πυκνότητα} \quad : \quad p_w M_{dry}/(M_{sat}-M_{imm}) \quad (4.4)$$

$$\text{Ανοιχτό πορώδες} \quad : \quad 100(M_{sat}-M_{dry})/(M_{sat}-M_{imm}) \quad (4.5)$$

όπου p_w : το ειδικό βάρος του νερού σε συνήθη θερμοκρασία (18°C), το οποίο για τους υπολογισμούς ελήφθη ίσο με 1000 kg/m³.

Στις **Εικόνες 10, 11, 12** φαίνεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μέτρηση των ακόλουθων παραμέτρων υπολογισμού της υδατοαπορροφητικότητας, **α)** τη μάζα ξηρού δοκιμίου, **β)** τη μάζα υπό αιώρηση, **γ)** τη μάζα του επιφανειακώς στεγνού δοκιμίου.



Εικόνα 10 : Διαδικασία μέτρησης ανοικτού πορώδους: μέτρηση μάζας υπό άνωση (M_{imm})



Εικόνα 11 : Μέτρηση μάζας υπό άνωση (M_{imm})



Εικόνα 12 : Διεξαγωγή πειράματος τριχοειδούς απορρόφησης

4.5.2 Τριχοειδής απορρόφηση

Το πείραμα της τριχοειδούς απορρόφησης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την οδηγία της **RILEM** (TC 116-PCD: *Permeability of Concrete as a criterion of its durability*), που αναφέρεται στην προσρόφιση νερού μέσω τριχοειδούς απορρόφησης.

Τα δοκίμια καλύπτηκαν περιμετρικά με ταινία ύψους 50 mm, όσο δηλαδή είναι το ύψος τους. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με νερό, έτσι ώστε η πλευρά έδρασης να βρέχεται ολόκληρη και η στάθμη του νερού να είναι σταθερά 3 mm πάνω από αυτή. Ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα τα δοκίμια ζυγίζονταν, το κάθε ένα ξεχωριστά, και επανατοποθετούνταν στη δεξαμενή νερού. Από τη διαφορά μεταξύ των διαδοχικών μετρήσεων για το ίδιο δοκίμιο, προκύπτει η απορροφημένη μάζα νερού.

Η πειραματική διαδικασία αλλά και η μορφή των δοκιμίων μετά την εμβάπτιση στο νερό, φαίνονται στις **Εικόνες 13, 14**.



Εικόνα 13 : Στα αριστερά, προετοιμασία δοκιμίων για το πείραμα τριχοειδούς απορρόφησης, δεξιά, διεξαγωγή πειράματος



Εικόνα 14 : Δοκίμια μετά την εμβάπτιση σε νερό

4.6 Αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας εφαρμόστηκαν δυο (2) διαφορετικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό των συντελεστών διείσδυσης και διάχυσης χλωριόντων σε δοκίμια κονιαμάτων. Χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια $\phi 100$, ύψους 55 mm, τα οποία αποκόπηκαν από τα κυλινδρικά δοκίμια $\phi 100 \times 200$. Το ένα από τα τρία τμήματα, παραλήφθηκε από το κάτω μέρος του αρχικού κυλινδρικού δοκιμίου και χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων, ενώ το μεσαίο τμήμα χρησιμοποιήθηκε στη μέθοδο προσδιορισμού του συντελεστή διάχυσης. Έτσι προσδιορίστηκαν:

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

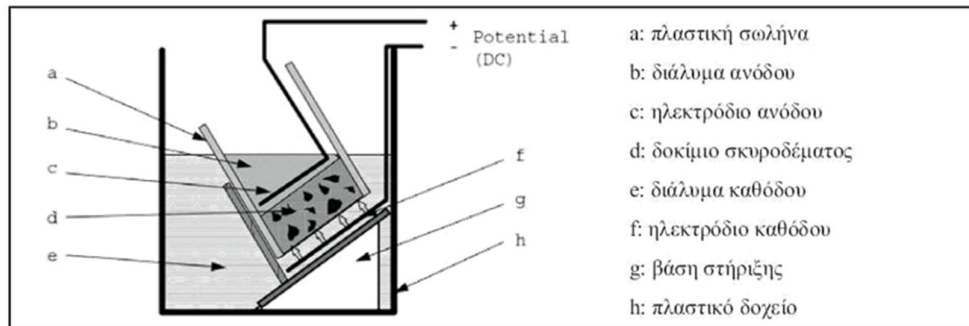
Η διαδικασία διεξαγωγής των αντίστοιχων δοκιμών, περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια.

4.6.1 Συντελεστής Διείσδυσης χλωριόντων - NT BUILD 492

Για την εκτίμηση της ικανότητας των κονιαμάτων να ανθίσταται στα χλωριόντα επιλέχθηκε η επιταχυνόμενη δοκιμή **NordTest Build 492 (1999)**. Αρχικά, τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου (Ca(OH)₂), μία μέρα πριν τη διεξαγωγή της δοκιμής της κάθε σύνθεσης. Σε αυτή τη δοκιμή, ο προσδιορισμός του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων (chloride migration coefficient), επιτυγχάνεται με την εξαναγκασμένη επιταχυνόμενη κίνηση των χλωριόντων, διαμέσου κυλινδρικού δοκιμίου κονιάματος και μέσω κατάλληλης διάταξης, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 15**.



Εικόνα 15 : Ηλεκτρική διάταξη



Σχήμα 15 : Η διάταξη της δοκιμής NT492

Ένα τμήμα κυλινδρικού δοκιμίου ($D = 100 \text{ mm}$, $L = 50 \text{ mm}$) παραμένει, μέσω κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων, υπό σταθερή διαφορά δυναμικού, από 10 έως 60 V dc (συνηθέστερα μεταξύ 10 και 30 V dc), για χρονική περίοδο μεταξύ 6 έως 96 ωρών (συνήθως 24 ωρών, όπως έγινε και στην παρούσα εργασία). Η επιλογή της επιβαλλόμενης διαφοράς δυναμικού και της διάρκειας της δοκιμής γίνεται με βάση το αρχικώς διερχόμενο ρεύμα για δοκιμαστική διαφορά δυναμικού ίση με 30 V dc, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 3**, ενώ η ηλεκτρική διάταξη παρουσιάζεται στην **Εικόνα 15**.

Πίνακας 3 : Διαφορά δυναμικού και διάρκεια δοκιμής [πηγή: NordTest Build 492 (1999)]

Αρχικό ρεύμα από σταθερή διαφορά δυναμικού 30 V dc (mA)	Επιβαλλόμενη διαφορά δυναμικού (κατόπιν ρύθμισης) (V)	Πιθανό νέο ρεύμα I_0 (mA)	Διάρκεια δοκιμής t (h)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$50 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$360 \leq I_0$	10	$120 \leq I_0$	6

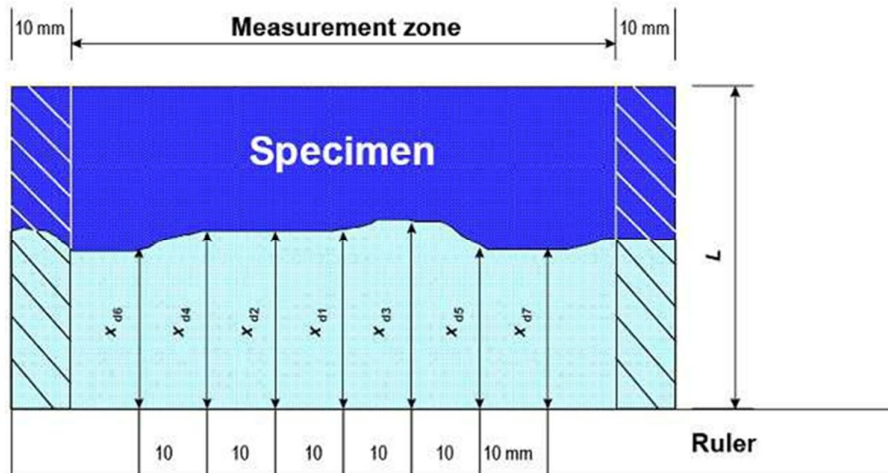
Η διαδικασία της δοκιμής βασίζεται στην εφαρμογή διαφοράς δυναμικού στο εσωτερικό του δοκιμίου λόγω της τάσης του συνεχούς ρεύματος. Το δοκίμιο παρατίθεται μεταξύ δύο διαλυμάτων, εκ των οποίων, το διάλυμα καθόδου αποτελείται από 10% κ.β χλωριούχο νάτριο NaCl (1333.33 gr NaCl σε 12 lt νερού βρύσης), ενώ το διάλυμα ανόδου από υδροξείδιο του

νατρίου NaOH 0.3N (4.84 gr NaOH σε 365 ml απιονισμένο νερό). Η σταθερή διαφορά δυναμικού επιβάλλεται για διάστημα 24 ωρών. Επίσης, 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, παρουσιάζεται στην **Εικόνα 16**.



Εικόνα 16: Αριστερα, η πειραματική διάταξη της δοκιμής NT492, δεξιά, η διάταξη με το ηλεκτρικό κύκλωμα σε λειτουργία

Η μέτρηση του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων γίνεται με τη χρήση της χρωματογραφικής μεθόδου και μέσω αυτής υπολογίζεται ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων (chloride migration coefficient). Ειδικότερα, αφού χωριστεί το δοκίμιο κάθετα στη μέση, μέσω διάρρηξης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 17**, και αφού ψεκαστούν τα δύο μέρη με διάλυμα 0.1M νιτρικού αργύρου AgNO_3 , με τη χρήση ενός παχύμετρου και ξεκινώντας από το κέντρο του δοκιμίου και προχωρώντας προς τα έξω, μετράται το βάθος διείσδυσης, δηλαδή το ύψος της περιοχής που έχει αλλάξει χρώμα μετά τον ψεκασμό με νιτρικό άργυρο, δεδομένου ότι η παρουσία χλωριόντων οδηγεί μέσω χημικών αντιδράσεων σε σχηματισμό χλωριούχου αργύρου AgCl . Η διαδικασία φαίνεται και στο **Σχήμα 16**, ενώ τα δοκίμια διαφόρων συνθέσεων, μετά τη διάρρηξη και τον ψεκασμό με AgNO_3 , φαίνονται στις **Εικόνες 18, 19**.



Σχήμα 16 : Υπόδειγμα μέτρησης βάθους διείσδυσης χλωριόντων



Εικόνα 17 : Διάρρηξη δοκιμίου για τον προσδιορισμό της διείσδυσης των Cl^-



Εικόνα 18 : Δοκίμια μετά από διάρρηξη και ψεκασμό με AgNO_3 . Αριστερά, η Σύνθεση MSF10, στη μέση, η MSF20, δεξιά η GBF10.



Εικόνα 19 : Δοκίμια μετά από ψεκασμό με AgNO_3 . Αριστερά, η σύνθεση MK10, δεξιά, η σύνθεση MK20.

Υπολογισμός Συντελεστή Διείσδυσης Χλωριόντων (Chloride Migration Coefficient)

Ο συντελεστής διείσδυσης των χλωριόντων, λόγω εξαναγκασμένης διείσδυσής τους μέσα στο κονίαμα, υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$D_{\text{nssm}} = (RT / ZFE) \cdot x_d - (\alpha \sqrt{x_d}) / t \quad (4.6)$$

$$E = (u - 2) / L \quad (4.7)$$

$$\alpha = 2 \sqrt{(RT / ZFE)} \cdot \text{erf}^{-1} (1 - 2c_d / c_o) \quad (4.8)$$

- D_{nssm} : συντελεστής διάχυσης χλωριόντων (m^2/s),
- Z : απόλυτη τιμή του σθένους ιόντων, για χλωρίοντα, $z = 1$
- F : σταθερά του Faraday, $F = 9.648 \cdot 10^4 J / (V \cdot mol)$
- U : απόλυτη τιμή της εφαρμοσμένης τάσης (V)
- R : παγκόσμια σταθερά αερίων, $R = 8.314 J / (V \cdot mol)$,
- T : μέση τιμή της αρχική και τελικής θερμοκρασίας του διαλύματος ανόδου (C)
- L : πάχος δοκιμίου (mm)
- xd : μέση τιμή των βαθών διείσδυσης των χλωριόντων (mm)
- t : διάρκεια του πειράματος (hour)
- cd : συγκέντρωση χλωριόντων στην οποία το χρώμα αλλάζει, $cd = 0.07N$
- co : συγκέντρωση χλωριόντων στο διάλυμα καθόδου, $co = 2N$

Στην περίπτωση του σκυροδέματος και ανάλογα με την τιμή του συντελεστή διείσδυσης, γίνεται η κατηγοριοποίηση των δοκιμίων ως προς την αντίστασή τους στη διείσδυση των χλωριόντων, σύμφωνα με τον [Tang (1996)], στον Πίνακα 4 καθώς και με βάση τους [Nilson et al (1998)], στον Πίνακα 5.

Πίνακας 4 : Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων, για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διάχυσης [πηγή: Tang (1996)]

Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων $D_{nssm} \times 10^{-12}$	Αντίσταση στη 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 5 : Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων, για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διάχυσης [πηγή: Nilsson et all (1998)]

Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων $D_{nssm} \times 10^{-12}$	Αντίσταση στη 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)

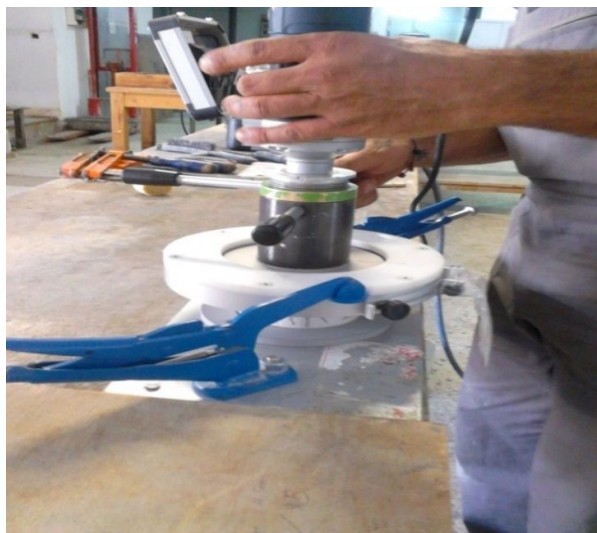
4.6.2 Συντελεστής Διάχυσης

Για την εκτίμηση του φαινομένου της διάχυσης χλωριόντων στο συμβατικό κονίαμα και τη μελέτη της επίδρασης της πρόσθετης τσιμεντοειδών, πραγματοποιήθηκε και η δοκιμή **NordTest Build 443 (1995)**. Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης των Cl⁻ έγινε με βάση το πρότυπου **ΕΛΟΤ EN 196-2**. Χρησιμοποιήθηκαν τα μεσαία τμήματα διαστάσεων φ100x55 mm, που προέρχονται από τα αντίστοιχα κυλινδρικά δοκίμια φ100x200 mm. Τα δοκίμια μονώθηκαν σε όλες τις πλευρές, (σε 2 φάσεις), με κατάλληλο στεγανωτικό υλικό, εκτός από μία (η πάνω επιφάνεια), με τρόπο τέτοιο ώστε η διάχυση των χλωριόντων να γίνεται μόνο από την ελεύθερη επιφάνεια του κάθε δοκιμίου. Ακολούθως, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε διάλυμα NaCl 16.5%, το οποίο παρασκευάστηκε αναμειγνύοντας 10 lt απιονισμένο νερό και 1650 gr αλάτι όπως προκύπτει από το πρότυπο **Nordest Test Build 443**. Η πειραματική διάταξη φαίνεται και στο **Σχήμα 17**.

Χρησιμοποιήθηκε αλάτι εμπορίου. Τα δοκίμια παρέμειναν στο υδατικό περιβάλλον του χλωριούχου νατρίου για ενενήντα (90) ημέρες προκειμένου να λάβει χώρα η διάχυση των χλωριόντων στο εσωτερικό των δοκιμίων (**Σχήμα 17**), ενώ γινόταν μια απλή ανάδευση του

διαλύματος ανά επτά (7) ημέρες. Μετά το πέρας πέντε εβδομάδων, το διάλυμα ανανεωνόταν, διατηρώντας την ίδια περιεκτικότητα του υδατικού διαλύματος σε NaCl (16.5% w/w).

Τέλος, μετά το πέρας 90 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^ο νόμο του **Fick**. Πριν τη λήψη των δειγμάτων σκόνης, απομακρύνθηκε με γυαλόχαρτο από την επιφάνεια των δοκιμίων, η εναπομένουσα ποσότητα αλατιού. Στη συνέχεια, με τη χρήση ειδικού δρόπανου «Profile Grinder», έγινε άλεση στην πάνω (ακάλυπτη) επιφάνεια των δοκιμίων, σε ομοκέντρους κύκλους. Λήφθηκαν δείγματα σκόνης (**Εικόνα 20**) από το κάθε δοκίμιο, σε διάφορα βάθη, εγκάρσια των δοκιμίων, ξεκινώντας από την πάνω επιφάνεια (0 mm) και συνεχίζοντας ανά 2 mm, έως τα 16 mm βάθος. Τα διαφορετικά βάθη προσαύξεσης: 0-2 mm, 2-4 mm, 4-6 mm, 6-8 mm, 8-10 mm, 10-12 mm, 12-14 mm και 14-16 mm, επιλέχτηκαν όπως ορίζεται στο πρότυπο **Nordest Test Build 443**. Τελικά, αφού συγκεντρώθηκαν δείγματα σκόνης από όλα τα δοκίμια (**Εικόνες 21, 22**) και από κάθε βάθος, πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση για τον προσδιορισμό των συνολικών χλωριόντων.



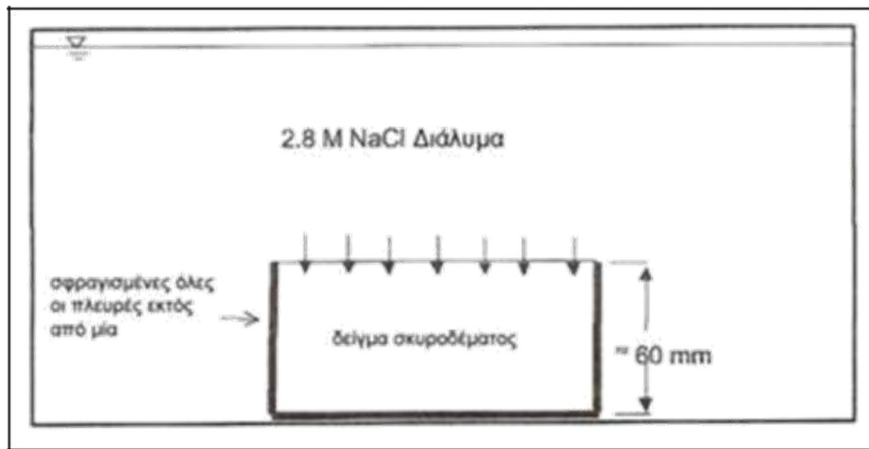
Εικόνα 20 : Λήψη δειγμάτων σκόνης με τη χρήση ειδικού δρόπανου «Profile Grinder»



Εικόνα 21 : Δοκίμιο μετά τη λήψη δειγμάτων σκόνης σε όλα τα βάθη (0-16 mm)



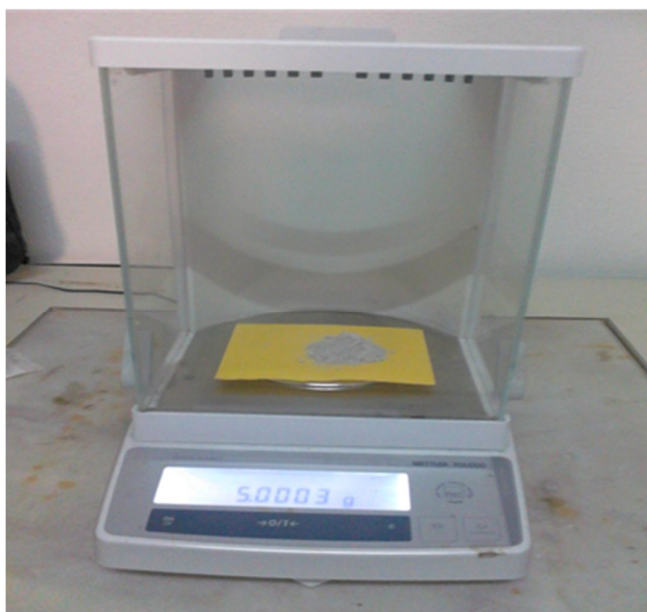
Εικόνα 22 : Δείγματα σκόνης της Σύνθεσης MK20 σε βάθη από 2 έως 16 mm



Σχήμα 17 : Η διάταξη της δοκιμής NordTest 443

4.6.2.1 Προσδιορισμός συγκέντρωσης συνολικών Χλωριόντων (Cl_{total})

Στην αρχή ζυγίστηκε η μάζα των δειγμάτων με ακρίβεια ± 0.0001 g (Εικόνα 23). Η ποσότητα αυτή κυμαίνονταν στην περιοχή των 5 gr για όλα τα κονιάματα. Η μάζα 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.

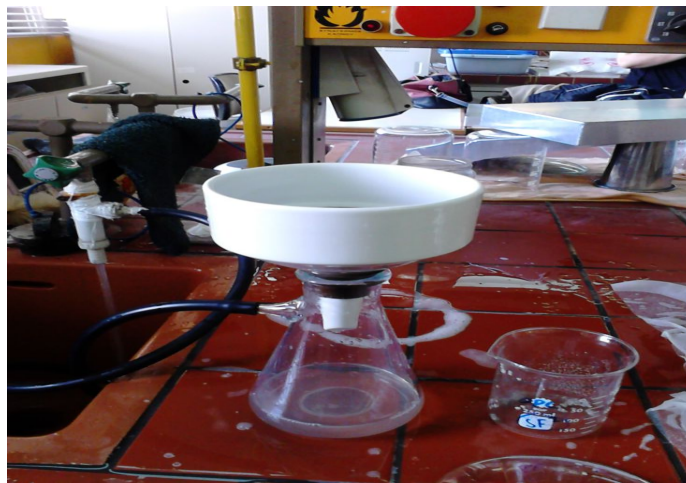


Εικόνα 23 : Ζύγιση δείγματος σκόνης σε ζυγό ακριβείας

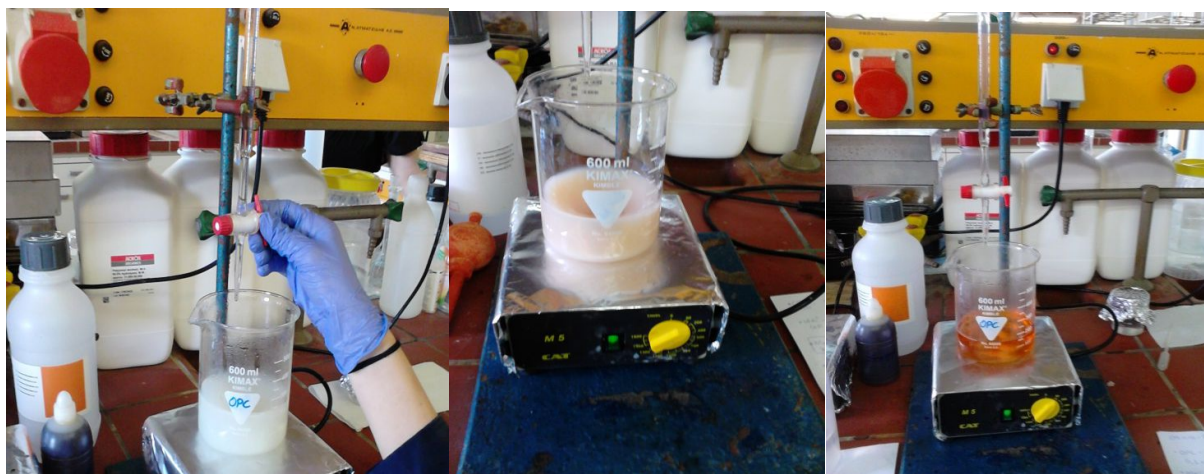
Όσον αφορά τα δοκίμια, για τα 2 πρώτα βάθη έως και τα 10 mm προστέθηκαν 15 mL AgNO_3 , ενώ για τα υπόλοιπα 2 βάθη 10 mL AgNO_3 . Ο βρασμός συνεχίστηκε για 1 min ακόμα και το διάλυμα διηθήθηκε σε ποτήρι ζέσεως των 500 mL με ηθμό, ο οποίος προηγουμένως είχε πλυθεί με αραιό νιτρικό οξύ 1:100 (**Εικόνες 24, 25**). 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 ($\text{H}_4\text{FeNO}_8\text{S}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ή $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) και ογκομέτρηση με διάλυμα NH_4SCN 0.1M υπό ισχυρή ανάδευση. Από την παραπάνω δόκιμη καταγράφηκαν μετρήσεις που αφορούν στην αλλαγή του χρώματος του διαλύματος, μέχρι το διάλυμα να χρωματιστεί ερυθρόφαιο (**Εικόνα 26**). Σημειώθηκε ο όγκος NH_4SCN , που απαιτήθηκε για να επέλθει η αλλαγή χρώματος στο διάλυμα.



Εικόνα 24 : Μαγνητικός αναδευτήρας για τη θέρμανση κι ανάδευση διαλύματος σκόνης



Εικόνα 25 : Διήθηση διαλύματος σκόνης με ηθμό, σε ποτήρι ζέσεως 500 mL



Εικόνα 26 : Χρωματικές αλλαγές του διαλύματος μέχρι να χρωματιστεί ερυθρόφαιο, κατά τη διαδικασία τιτλοδότησης κατά το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-2

Η διαδικασία υπολογισμού των χλωριόντων προέκυψε από την παρακάτω εξίσωση:

$$\%Cl = \Delta V \cdot 0.01(AB_{Cl} / M_{\text{δείγματος}}) \quad (4.9)$$

Όπου:

ΔV : $AgNO_3 - NH_4SCN$ (ml)

AB_{Cl} : 35.545 (g)

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

4.6.2.2 Προσδιορισμός συντελεστή διάχυσης χλωριόντων

Η διάχυση είναι η μετακίνηση μάζας μέσα στο υλικό και αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους μηχανισμούς, με τους οποίους πραγματοποιούνται οι μεταλλουργικές διεργασίες. Η κινούσα δύναμη για διάχυση είναι η κλίση (gradient) του χημικού δυναμικού ενός συστατικού, που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ανάλογο με την κλίση της συγκεντρώσεως.

Η διάχυση ατόμων σε στερεά διαλύματα αντικαταστάσεως πραγματοποιείται με μετακινήσεις ατόμων σε οπές, ενώ η διάχυση ατόμων παρεμβολής πραγματοποιείται με μετακίνηση ατόμων σε κενές θέσεις παρεμβολής. Πολλές φορές οι μετακινήσεις των ατόμων πραγματοποιούνται μέσα από δρόμους γρήγορης διαχύσεως, όπως είναι τα σύνορα των κόκκων και οι γραμμικές αταξίες. Σύμφωνα με τον 1ο νόμο του Fick η ροή ενός συστατικού είναι ανάλογη με την κλίση της συγκεντρώσεως. Ο συντελεστής αναλογίας ονομάζεται συντελεστής διαχύσεως και εξαρτάται από τη θερμοκρασία και από τη σύσταση. Η χρονική μεταβολή του προφίλ συγκεντρώσεως ενός συστατικού περιγράφεται από το **2^ο νόμο του Fick**. Ο προσδιορισμός του προφίλ πραγματοποιείται με λύση της εξίσωσης διαχύσεως. Στα στερεά διαλύματα αντικαταστάσεως η διάχυση προκαλεί μακροσκοπική ροή μάζας (επίδραση Kirkendall). Στην περίπτωση αυτή είναι προτιμότερο η περιγραφή του 2^{ου} νόμου του Fick να γίνεται με τη χρήση του συντελεστή ενδοδιαχύσεως, που είναι δυνατόν να προσδιοριστεί σαν συνάρτηση της συστάσεως με την ανάλυση Matano. Μέσω διάχυσης πραγματοποιούνται πολλές θερμικές και επιφανειακές κατεργασίες, όπως η ενανθράκωση και η διάχυση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

Αμέσως μετά τον προσδιορισμό των συνολικών χλωριόντων που διείσδυσαν στο εσωτερικό των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε προσαρμογή των προφίλ των χλωριόντων στο **2^ο νόμο του Fick**. Με αυτό τον τρόπο, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των συντελεστών διάχυσης των δοκιμίων για κάθε σύνθεση.

Τις περισσότερες φορές ενδιαφερόμαστε να υπολογίσουμε το πώς μεταβάλλεται η συγκέντρωση c των ατόμων ενός στοιχείου (π.χ ατόμων άνθρακα), σε οποιοδήποτε σημείο με το χρόνο, όταν δηλαδή δεν έχουμε μόνιμη κατάσταση. Έτσι, θεωρούμε μία κλίση συγκεντρώσεως, η οποία μεταβάλλεται χρονικά. Η ροή σε κάθε σημείο εξαρτάται από την τιμή του συντελεστή διαχύσεως D και της κλίσεως $\partial c / \partial x$. Για ένα πολύ μικρό τμήμα δx , η ροή των ατόμων άνθρακα που εισέρχεται στο τμήμα είναι :

$$J_1 = - D(\partial c / \partial x) \quad (4.10)$$

Η ροή που εξέρχεται από το τμήμα είναι :

$$J_2 = J_1 + (\partial J / \partial x) \delta x \quad (4.11)$$

Εάν η επιφάνεια εισόδου είναι A , τότε ο αριθμός των ατόμων του στοιχείου, που εισρέουν μέσα στο τμήμα δx σε χρόνο δt είναι $J_1 A \delta t$. Στον ίδιο χρόνο εκρέουν $J_2 A \delta t$ άτομα. Η αύξηση της συγκέντρωσης των ατόμων στο τμήμα δx είναι τότε :

$$\delta c = (J_1 - J_2) A \delta t / (A \delta x)$$

Συνδυάζοντας τις (10),(11) στο όριο $\delta t \rightarrow 0$ έχουμε : $\partial c / \partial t = - \partial J / \partial x$ και

$$\partial c / \partial t = \partial / \partial x (D \partial c / \partial x) \quad (4.12)$$

Η σχέση (12) είναι ο 2^{ος} νόμος του Fick. Εάν υποθέσουμε ότι ο συντελεστής διαχύσεως δεν μεταβάλλεται με τη συγκέντρωση των ατόμων άνθρακα, τότε ο 2^{ος} νόμος του Fick γίνεται :

$$\partial c / \partial t = D \partial^2 c / \partial x^2 \quad (4.13)$$

Παρατηρούμε ότι το πρόσημο του $\partial c / \partial t$ εξαρτάται από το πρόσημο του όρου $\partial^2 c / \partial x^2$.

- Εάν $\partial^2 c / \partial x^2 > 0$, τότε η συγκέντρωση των ατόμων του στοιχείου αυξάνεται με το χρόνο. Αντίθετα,
- Εάν $\partial^2 c / \partial x^2 < 0$, τότε η συγκέντρωση μειώνεται με το χρόνο στο συγκεκριμένο σημείο. Ο 2^{ος} νόμος του Fick αποτελεί την εξίσωση διαχύσεως, η επίλυση της οποίας μας επιτρέπει τον προσδιορισμό του προφίλ συγκέντρωσης $c(x,t)$ ενός συστατικού.

Έχει παρατηρηθεί ότι κατά τη διάχυση σε στερεά, ο συντελεστής διάχυσης παίρνει πολύ μικρές τιμές, ενώ έχουν σημειωθεί μεγάλες αποκλίσεις 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).

Στις δοκιμές της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η περίπτωση της διάχυσης των χλωριόντων στο κονίαμα 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. Η συνήθης τακτική για την εκτίμηση του ρυθμού διείσδυσης των χλωριόντων στο κονίαμα 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:

$$\partial c / \partial t = - \partial / \partial x (D \partial c / \partial x)$$

Δηλαδή είναι η εξίσωση της σχέσης (4.13), όπως αυτή διατυπώθηκε προηγουμένως.

όπου:

➤ $C(x,t)$: η περιεκτικότητα (%) σε Cl^- σε βάθος x , μετά από 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: $C_{(x,0)} = x > 0$ και $t \geq 0$

Η λύση του προβλήματος οριακών τιμών είναι:

$$C_{(x,t)} = C_s (1 - \text{erf}(x / 2\sqrt{Dt}))$$

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)

5. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MATLAB R2016a

5.1 Εισαγωγή

Ένας από τους στόχους αυτής της εργασίας ήταν η μοντελοποίηση και προσομοίωση **α)** της διάχυσης και **β)** της διείσδυσης των χλωριόντων υπό την εφαρμογή διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού σε δοκίμια κονιαμάτων με την προσθήκη πρόσθετων τσιμεντοειδών και η συσχέτιση των αναλυτικών με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Για την προτυποποίηση του προβλήματος προσδιορισμού της συγκέντρωσης των χλωριόντων σε διάφορα βάθη (**NT BUILD 443**) αλλά και για τη μοντελοποίηση της επιταχυνόμενης διείσδυσης των χλωριόντων υπό την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού (**NT BUILD 492**), χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MATLAB R2016a.

Το MATLAB (MATrix LABoratory), είναι μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλών επιδόσεων (high performance language for technical computing), το οποίο παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμών, απεικονίσεων και προγραμματισμού σε 'φίλικό' για το χρήστη περιβάλλον. Χρησιμοποιείται ευρέως για μαθηματικά και υπολογισμούς, ανάπτυξη αλγορίθμων, μοντελοποίηση, ανάλυση δεδομένων, γραφήματα καθώς και ανάπτυξη εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένου περιβάλλοντος χρήσης (Graphical User Interface-GUI).

Εκατομμύρια μηχανικών και επιστημόνων σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιούν το MATLAB, προκειμένου να αναλύσουν και να σχεδιάζουν. Χρησιμοποιείται ακόμη για τη διαδικασία εκμάθησης της μηχανικής, την επεξεργασία σήματος, την επεξεργασία εικόνας, την επικοινωνία, την υπολογιστική οικονομία, τον έλεγχο σχεδιασμού, τη ρομποτική, κ.ά.

Οι πίνακες που βασίζονται σε γλώσσα MATLAB αποτελούν τον πιο φυσικό τρόπο να εκφραστούν τα υπολογιστικά μαθηματικά. Χάρη στα γραφήματα που προσφέρει, καθιστάται εύκολη η απεικόνιση και η απόκτηση γνώσεων με βάση τα δεδομένα. Μια απέραντη βιβλιοθήκη λειτουργιών από έτοιμες εργαλειοθήκες (toolboxes), δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ξεκινήσει αμέσως με αλγορίθμους. Όλα αυτά τα εργαλεία, στο περιβάλλον εργασίας του MATLAB, καθώς και οι δυνατότητες του, είναι όλα αυστηρά ελεγμένα και σχεδιασμένα για να λειτουργούν ταυτόχρονα.

Με το MATLAB, υπάρχει η δυνατότητα να εκτελεστούν αναλύσεις σε μεγαλύτερα σύνολα δεδομένων καθώς υπάρχει η δυνατότητα αλληλεπίδρασης και με άλλες εργαλειοθήκες και προγράμματα. Αποτελεί ένα εκτεταμένο σύνολο από ενσωματωμένες λειτουργίες μαθηματικών,

υποστηρίζει τη μηχανική και την επιστημονική ανάλυση, ενώ οι 2D και 3D λειτουργίες του, δίνουν τη δυνατότητα για καλύτερη οπτικοποίηση των δεδομένων, σχεδίαση και επεξεργασία εικόνων.

Ακόμη, υπάρχει βιβλιοθήκη (API), η οποία επιτρέπει στο χρήστη να γράψει προγράμματα σε άλλες γλώσσες (πχ. C και Fortran), τα οποία να μπορούν να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον MATLAB, ενώ προσφέρεται κι η δυνατότητα να κληθούν ρουτίνες από το MATLAB (δυναμική σύνδεση- dynamic linking).

Άλλωστε, οι MATLAB εφαρμογές επιτρέπουν να εκτελεστούν κοινές εργασίες μηχανικής, χωρίς να χρειάζεται να προγραμματιστούν. Η ολοκληρωμένη επεξεργασία και εντοπισμός σφαλμάτων που προσφέρονται στο Matlab, επιτρέπουν να εξερευνηθούν γρήγορα πολλαπλές επιλογές, να τελειοποιηθεί η ανάλυση, με επανάληψη μέχρι να βρεθεί βέλτιστη λύση, ενώ δίνεται η δυνατότητα για επίλυση Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων (ΜΔΕ) σε προβλήματα μηχανικού όπως αυτό της Διάχυσης (Diffusion) και της Μεταφοράς Θερμότητας (Heat Transfer). Η επίλυση ΜΔΕ Διάχυσης χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα μελέτη.

5.2 Μοντελοποίηση της Επιταχυνόμενης Διείσδυσης των χλωριόντων, εξαιτίας της εφαρμογής διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού

5.2.1 Μέθοδος Επίλυσης Μερικής Διαφορικής Εξίσωσης, απευθείας από την αναλυτική της λύση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε μια προσπάθεια ‘προσαρμογής’ του φαινομένου της Διείσδυσης των χλωριόντων, υπό την εφαρμογή διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού, 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 διείσδυση συμβαίνει μόνο λόγω εφαρμογής διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού. Η εξίσωση είναι ανάλογη αυτής της απλής διάχυσης του 2^{ου} νόμου του Fick, με τη διαφορά ότι ο συντελεστής διείσδυσης πολλαπλασιάζεται με έναν όρο που λαμβάνει υπόψη του τη διαφορά δυναμικού.

MATLAB και Επίλυση ΜΔΕ

Το MATLAB R2016a, προσφέρει ένα ολοκληρωμένο Περιβάλλον Εργασίας (Desktop), το οποίο είναι διαθέσιμο αμέσως μόλις καλέσει κανείς το MATLAB. Σε αυτό περιλαμβάνονται ένα σύνολο εργαλείων σε γραφικό περιβάλλον για τη διαχείριση αρχείων, εντολών, μεταβλητών και εφαρμογών σχετικά με τη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB.

Τα δύο βασικά μέρη του περιβάλλοντος εργασίας είναι: **1)** το Παράθυρο Εντολών (Command Window), **2)** ο Επεξεργαστής Αρχείων (Editor). Πρακτικά, γίνεται η σύνταξη του Κώδικα στον Editor, ο οποίος είναι είτε ένα απλό 'm-file'(script) είτε μια Συνάρτηση (function) και στη συνέχεια με την επιλογή 'RUN', εκτελείται το Πρόγραμμα και αποδίδει τα αποτελέσματα στην οθόνη, στο Command Window, κάτω από τον Editor.

Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα αρχείο στο Σημειωματάριο (notepad), με το όνομα 'syntelestes_dokx.txt' με τη μορφή πίνακα όπου αναγράφονταν όλες οι απαραίτητες διάμετροι και για τα 9 δοκίμια.

Στην 1^η στήλη συμπληρώθηκε το ύψος h του δοκιμίου σε mm, στη 2^η στήλη η εφαρμοσμένη τάση de σε V, στην 3^η ο συντελεστής διεύθυνσης d σε m^2/s , στην 4^η η μέση θερμοκρασία του διαλύματος ανόδου $temp$ σε K, ενώ στην τελευταία στήλη γράφτηκε το βάθος διεύθυνσης των χλωριόντων x σε m, όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 6**.

Πίνακας 6 : Οι παράμετροι που τοποθετήθηκαν για τις 9 συνθέσεις.

Δοκίμια	Ύψος δοκιμίου h (mm)	Εφαρμοσμένη Τάση de (V)	Συντελεστής Διεύθυνσης d (m^2/s)	Μέση Θερμοκρασία $temp$ (K)	Βάθος διεύθυνσης χλωριόντων x (m)
OPC	50.33	30	20.05e-12	21.95	21.21
MK10	47.00	30	4.68e-12	22.50	11.21
MK20	49.00	30	1.34e-12	22.65	5.43
MFA10	49.67	30	13.54e-12	22.75	19.68
MFA20	47.33	30	6.96e-12	21.85	16.25
MSF10	50.33	30	6.69e-12	22.55	14.75
MSF20	50.67	30	1.31e-12	23.55	5.18
GBF10	51.33	30	15.45e-12	21.05	21.71
GBF20	46.50	30	9.39e-12	21.25	18.46

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε νέο αρχείο 'results.txt', στο οποίο εκτυπώθηκαν τα αποτελέσματα από το MATLAB.

Στον κώδικα επίσης συμπληρώθηκαν οι εξής σταθερές: η σταθερά Faraday $f = 9.648 \cdot 10^4$ J/(V*mol), η απόλυτη τιμή του σθένους χλωριόντων $z = 1$, καθώς και η παγκόσμια σταθερά αερίων $R = 8.314$ J/(mol*K).

Η διαδικασία σύνταξης του κώδικα με τις επιμέρους συναρτήσεις φαίνεται στο **Παράρτημα Α** της παρούσας εργασίας.

Εξίσωση χωρίου

Χρησιμοποιήθηκε η Μερική Διαφορική Εξίσωση (Μ.Δ.Ε.) (5.1), η οποία αναπτύχθηκε από τους **C. Andrade, M.A. Sanjuan, A. Recuero, O. Rio (1994)** και συγκεκριμένα με την Αναλυτική λύση της (5.2). Η Μ.Δ.Ε. και η λύση της, δίνονται παρακάτω:

$$\partial c / \partial t = (f \cdot z \cdot de \cdot d / (R \cdot temp)) \cdot (\partial^2 c / \partial x^2) \quad (5.1)$$

$$c = c_0 \cdot \operatorname{erfc}(x / (2 \cdot \sqrt{(f \cdot z \cdot de \cdot d / (R \cdot temp) \cdot t)})) \quad (5.2)$$

Όπου:

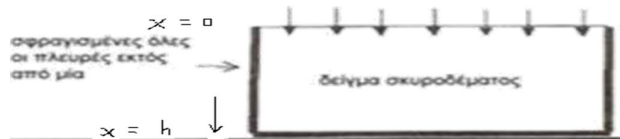
- **c**: Η συγκέντρωση των χλωριόντων (gr Cl/gr M)
- **de**: Ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων (m²/s)
- **z**: Η απόλυτη τιμή του σθένους ιόντων, για χλωριόντα, $z=1$
- **f**: Η σταθερά του Faraday, $f=9.648 \cdot 10^4$ (J/(V*mol))
- **de**: Η απόλυτη τιμή της εφαρμοσμένης τάσης (V)
- **R**: Η παγκόσμια σταθερά αερίων, $R=8.314$ (J/(mol*K))
- **temp**: 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)

Αρχικές Συνθήκες

Σαν Αρχική Συνθήκη θεωρήθηκε η συγκέντρωση του διαλύματος της καθόδου (διάλυμα χλωριούχου νατρίου NaCl), που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα της διείσδυσης χλωριόντων με την εφαρμογή διαφοράς δυναμικού. Η μάζα του χλωριούχου νατρίου ήταν : $m_{\text{NaCl}} = 1333.33 \text{ g}$ σε 12 lt νερού, δηλαδή $1333.33 \text{ g} / 12 \text{ lt} = 111.08 \text{ g NaCl/lt}$ και άρα: $111.08 * 35.5 / 58.5 = 67.4 \text{ g Cl}^-$ (όπου $A_{\text{rCl}} = 35.5$ και $M_{\text{rNaCl}} = 58.5$), οπότε αυτό μεταφράζεται σε συγκέντρωση: $c(0) = m_{\text{NaCl}} / A_{\text{rCl}} = 67.4 / 35.5 = 1.9 \text{ mols}$. Δηλαδή, κατά την αρχή του πειράματος για $t = 0$, ξεκινώντας από τη βάση του δοκιμίου, για $x = 0$, $c(0) = 1.9$, ενώ προχωρώντας προς το εσωτερικό του δοκιμίου και μέχρι το ύψος h του δοκιμίου (τμήμα κυλινδρικού δοκιμίου), ισχύει: $c = 0$.

Συνοριακές Συνθήκες

Θεωρήθηκε ότι η διείσδυση των χλωριόντων γίνεται προς μία μόνο κατεύθυνση (**Σχήμα 18**), δεδομένου ότι οι τρεις από τις τέσσερις πλευρές του δοκιμίου ήταν μονωμένες (βάψιμο με στεγανωτικό υλικό). Ξεκινώντας η μέτρηση των τιμών του x από την πάνω μεριά του δοκιμίου ($x = 0$), ισχύει : $c(0) = 1.9 \text{ mols}$. Για την τελική τιμή του x , ($x = h$), ισχύει $c(h) = 0$. Προφανώς, οι ενδιάμεσες τιμές του x , αντιπροσωπεύουν τα βάθη διείσδυσης x_i , τα οποία μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Σχήμα 18: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης δοκιμής και καθορισμός κατευθύνσης ροής της μάζας

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 βήμα προσαύξησης ορίστηκε η τιμή 3600 δευτερόλεπτα που αντιστοιχεί σε

μία ώρα. Ο χρόνος ξεκινούσε για $t = 3600$ s, δηλαδή πήγαινε από την αρχή στη μία ώρα, εν συνεχεία πήγαινε στη 2^η ώρα, κ.ο.κ. μέχρι την ολοκλήρωση των 24 ωρών.

Η μέθοδος αυτή λειτούργησε με επιτυχία και υπήρξε ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων της Δοκιμής **NT BUILD 492** και της αναλυτικής λύσης της ΜΔΕ **(5.1)**. Τα αποτελέσματα της επίλυσης δίνονται στο **Κεφάλαιο 6**.

5.3 Μοντελοποίηση της Διάχυσης των χλωριόντων, της δοκιμής NT Build 443.

5.3.1 Μέθοδος Επίλυσης Μερικής Διαφορικής Εξίσωσης Διάχυσης (Diffusion Differential Equation), απευθείας από την αναλυτική της λύση.

Δημιουργήθηκε με παρόμοιο τρόπο, όπως στην Ενότητα **5.2.1**, ένα αρχείο στο Σημειωματάριο (Notepad), με το όνομα 'syntelestes2_dokx.txt', όπου με τη μορφή πίνακα αναγράφονταν όλες οι απαραίτητες παράμετροι και για τα 9 δοκίμια.

Στην 1^η στήλη συμπληρώθηκε το ύψος h του δοκιμίου σε mm, στη 2^η στήλη ο συντελεστής διάχυσης D σε m^2/s και στην 3^η γράφτηκε το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων x σε m, όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 7**.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε ένα νέο αρχείο 'results2.txt', στο οποίο εκτυπώθηκαν τα αποτελέσματα της ανάλυσης από το MATLAB.

Ομοίως, η διαδικασία σύνταξης του κώδικα με τις επιμέρους συναρτήσεις φαίνεται στο **Παράρτημα Α**.

Πίνακας 7 : Οι παράμετροι που συμπληρώθηκαν για τις 9 συνθέσεις.

Δοκίμια	Ύψος δοκιμίου h (mm)	Συντελεστής Διάχυσης D (m ² /s)	Βάθος διείσδυσης χλωριόντων x (mm)
OPC	50.33	27.17e-12	15
MK10	47.67	5.54e-12	15
MK20	49.00	1.45e-12	9
MFA10	49.67	16.05e-12	15
MFA20	47.33	8.05e-12	15
MSF10	50.33	9.46e-12	15
MSF20	50.67	2.07e-12	13
GBF10	51.33	19.9e-12	15
GBF20	46.50	14.1e-12	15

Εξίσωση χωρίου

Πραγματοποιήθηκε λύση της Μ.Δ.Ε. (5.7): $\partial c / \partial t = -D \cdot (\partial^2 c / \partial x^2)$ σύμφωνα με την εξίσωση 5.8:

$$C_{(x,t)} = C_s (1 - \text{erf}(x / 2\sqrt{Dt})) \quad (5.8)$$

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)

Αρχικές Συνθήκες

Ως Αρχική Συνθήκη θεωρήθηκε η συγκέντρωση του διαλύματος χλωριούχου νατρίου (NaCl), που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα της διάχυσης χλωριόντων. Η μάζα του χλωριούχου νατρίου ήταν : $m_{\text{NaCl}} = 1650 \text{ g}$ σε 10 lt απιονισμένου νερού, δηλαδή $1650 \text{ g} / 10 \text{ lt} = 165 \text{ g NaCl/lt}$ και: $165 * 35.5 / 58.5 = 100.13 \text{ g Cl}^-$ (όπου $A_{\text{rCl}} = 35.5$ και $M_{\text{rNaCl}} = 58.5$), οπότε αυτό μεταφράζεται σε συγκέντρωση: $c(0) = m_{\text{NaCl}} / A_{\text{rNaCl}} = 100.13 / 35.5 = 2.82 \text{ mols}$. Δηλαδή, κατά την αρχή του πειράματος για $t = 0$, από τη βάση του δοκιμίου (για $x = 0$), $c(0) = 2.82$, και προχωρώντας προς το εσωτερικό και μέχρι το ύψος h του δοκιμίου (τομή κυλινδρικού δοκιμίου), όπου $c(h) = 0$.

Συνοριακές Συνθήκες

Θεωρήθηκε ότι η διάχυση των χλωριόντων γίνεται προς μία μόνο κατεύθυνση, δεδομένου ότι οι τρεις από τις τέσσερις πλευρές του δοκιμίου ήταν μεμονωμένες (στεγανωτικό υλικό). Ξεκινώντας από την πάνω μεριά του δοκιμίου, όπου $x = 0$, $c(0) = 2.82 \text{ mols}$, ενώ για την τελική τιμή του x , στο τέλος του ύψους του δοκιμίου $x = h$, ισχύει $c(h) = 0$. Οι ενδιάμεσες τιμές του x , αντιπροσωπεύουν τα βάθη διείδυσης x_i , τα οποία μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Βήματα 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 βήμα προσαύξησης ορίστηκε η τιμή 86400 δευτερόλεπτα που αντιστοιχεί σε μία μέρα, το οποίο σημαίνει ότι ο χρόνος ξεκινούσε για $t = 0$, εν συνεχεία πήγαινε στη μία μέρα, δηλαδή $t = 86400$ μετά στη $2^{\text{η}}$, μέχρι το πέρας των πειραμάτων που ήταν οι 90 ημέρες

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

6.1 Ρεολογικά χαρακτηριστικά Κονιαμάτων

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής κάθισης και η πυκνότητα νοπού σκυροδέματος για τις εννέα (9) συνθέσεις.

Πίνακας 8 : Αποτελέσματα δοκιμής κάθισης και πυκνότητα.

Σύνθεση	Κάθιση (mm)	Πυκνότητα (g/mm ³)
OPC	176.5	2.19
MK10	154.5	2.20
MK20	151.0	2.20
MFA10	169.0	2.19
MFA20	159.5	2.24
MSF10	163.0	2.19
MSF20	190.0	2.22
GBF10	195.5	2.20
GBF20	212.0	2.26

Παρατηρείται ότι η τιμή της κάθισης κατά βάση καταγράφεται μέσα στα επιθυμητά όρια 150 mm - 200 mm, με μια μικρή υπέρβαση για τη σύνθεση GBF20 (**Πίνακας 8**). Η πυκνότητα έλαβε μικρές τιμές για τη σύνθεση OPC, ενώ για μεγαλύτερα ποσοστά προσθήκης τσιμεντοειδούς πρόσθετου, σε ποσοστό 20% κ.β., καταγράφονται αυξημένες τιμές της πυκνότητας.

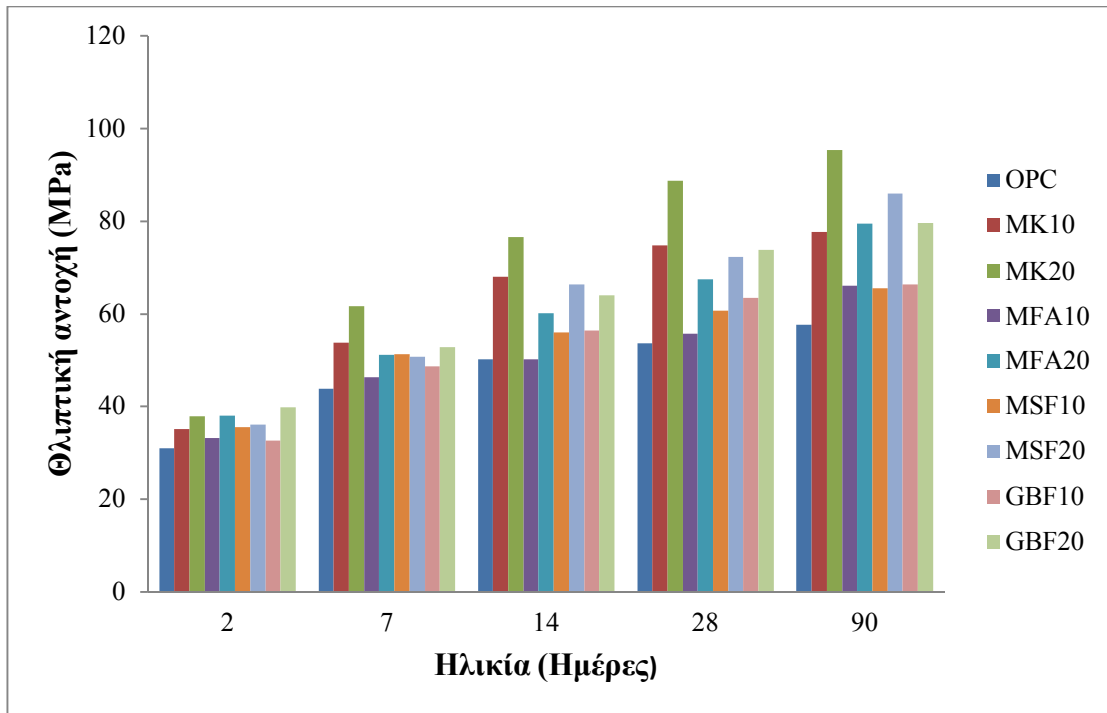
6.2 Μηχανικές ιδιότητες κονιαμάτων

Στον **Πίνακα 9** παρουσιάζεται η μέση θλιπτική αντοχή (MPa) 3 δοκιμίων των εννέα (9) συνθέσεων, για ηλικίες κονιάματος 7, 14, 28 και 90 ημερών.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, αλλά και από τα διαγράμματα του **Σχήματος 19**, η θλιπτική αντοχή αυξάνεται σημαντικά με την προσθήκη τσιμεντοειδών. Στην ηλικία των 28 ημερών, η μεγαλύτερη τιμή της θλιπτικής αντοχής καταγράφηκε στις συνθέσεις MK20 και MK10 και ακολουθούν η σύνθεση GBF20 και MSF20. Συγκεκριμένα για τη σύνθεση MK20 καταγράφηκε αύξηση της τάξης του 46%, ενώ αρκετά μεγάλη είναι και η αύξηση που παρατηρείται στις συνθέσεις MK10, GBF10, MSF20 με ποσοστό αύξησης 23%, 22%, 19% σε σχέση με την αμιγή σύνθεση OPC. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι στη σύνθεση MFA10 δε σημειώθηκε ουσιαστική αύξηση (4%), δηλαδή πρακτικά παρέμεινε στα ίδια επίπεδα θλιπτικής αντοχής με την αμιγή σύνθεση, για την ηλικία των 28 ημερών. Ωστόσο, στις 90 ημέρες παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής της τάξης του 16%, γεγονός αναμενόμενο δεδομένου ότι στην ιπτάμενη τέφρα καθυστερεί η ποζολανική αντίδραση, λόγω της υαλώδους δομής της.

Πίνακας 9 : Αποτελέσματα (μέση τιμή) δοκιμών θλίψης 2 7, 14, 28 και 90 ημερών, κυβικών δοκιμίων.

Σύνθεση	Θλιπτική Αντοχή (MPa)				
	2 ημέρες	7 ημέρες	14 ημέρες	28 ημέρες	90 ημέρες
OPC	31.00	43.75	50.11	53.60	57.57
MK10	35.06	53.67	67.89	74.78	77.65
MK20	37.84	61.55	76.49	88.61	95.32
MFA10	33.17	46.30	50.07	55.65	65.97
MFA20	37.96	51.05	60.07	67.36	79.35
MSF10	35.47	51.24	55.93	60.66	65.46
MSF20	35.98	50.62	66.24	72.27	85.86
GBF10	32.65	48.67	56.35	63.40	66.26
GBF20	39.84	52.80	63.97	73.76	79.60



Σχήμα 19 : Μέση θλιπτική αντοχή (MPa), για κάθε σύνθεση

6.3 Υδατοαπορροφητικότητα

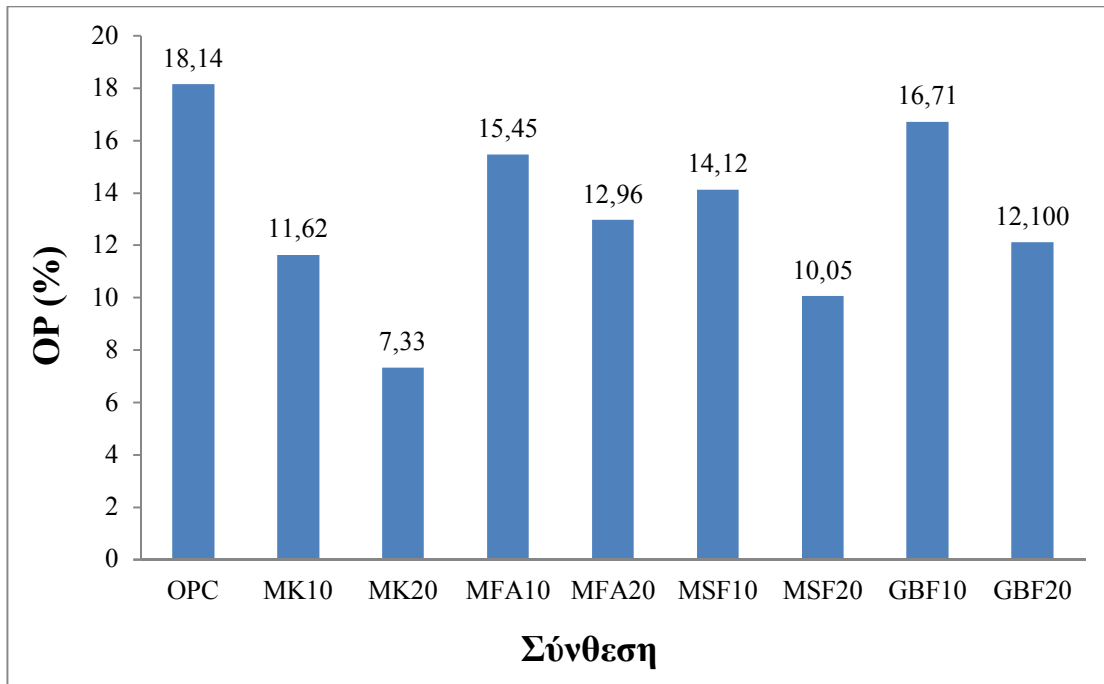
6.3.1 Ανοιχτό Πορώδες

Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι ζυγίσεις που πραγματοποιήθηκαν για όλα τα δοκίμια στις τρεις διαφορετικές καταστάσεις. Στην τελευταία στήλη του πίνακα έχει υπολογιστεί το ανοιχτό πορώδες, σύμφωνα με τη σχέση (4.5) και η % μεταβολή του ως προς το αμιγές κονίαμα.

Πίνακας 10 : Μετρήσεις και αποτελέσματα δοκιμής ανοικτού πορώδους.

Σύνθεση	Μέτρηση Βάρους ξηρών δοκιμίων (gr)	Μέτρηση Βάρους κορεσμένων δοκιμίων (gr)	Μέτρηση Βάρους δοκιμίων υπό άνωση (gr)	Ανοιχτό Πορώδες OP (%)	% Μεταβολή ως προς αμιγές κονίαμα
OPC	362.29	394.13	218.64	18.14	-
MK10	533.08	562.01	313.08	11.62	-35.95
MK20	436.12	450.58	253.23	7.33	-59.62
MFA10	494.93	530.76	298.80	15.45	-14.86
MFA20	528.20	559.66	317.00	12.96	-28.54
MSF10	468.79	500.24	277.48	14.12	-22.19
MSF20	484.18	506.59	283.62	10.05	-44.60
GBF10	424.86	458.95	254.97	16.71	-7.89
GBF20	455.68	480.92	272.34	12.10	-33.31

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα του **Σχήματος 20**, παρατηρήθηκε πολύ σημαντική μείωση του ανοικτού πορώδους, κατά 60% για προσθήκη Μετακαολίνη 20% κ.β. τιμέντου (MK20), ενώ πολύ μεγάλη ήταν κι η μείωση του πορώδους (45%) τόσο στη σύνθεση MSF20, όσο και στην MK10 με τιμή 36%. Ακολουθούν τα δοκίμια GBF20, με μείωση 33%, η σύνθεση MFA20, με ποσοστό 29%, η MSF10, με ποσοστό μείωσης του ανοικτού πορώδους στο 22% και η Ιπτάμενη Τέφρα 10% κ.β. (MFA10), με μείωση της τάξης του 15%.



Σχήμα 20 : Ανοικτό πορώδες OP (%), για κάθε σύνθεση

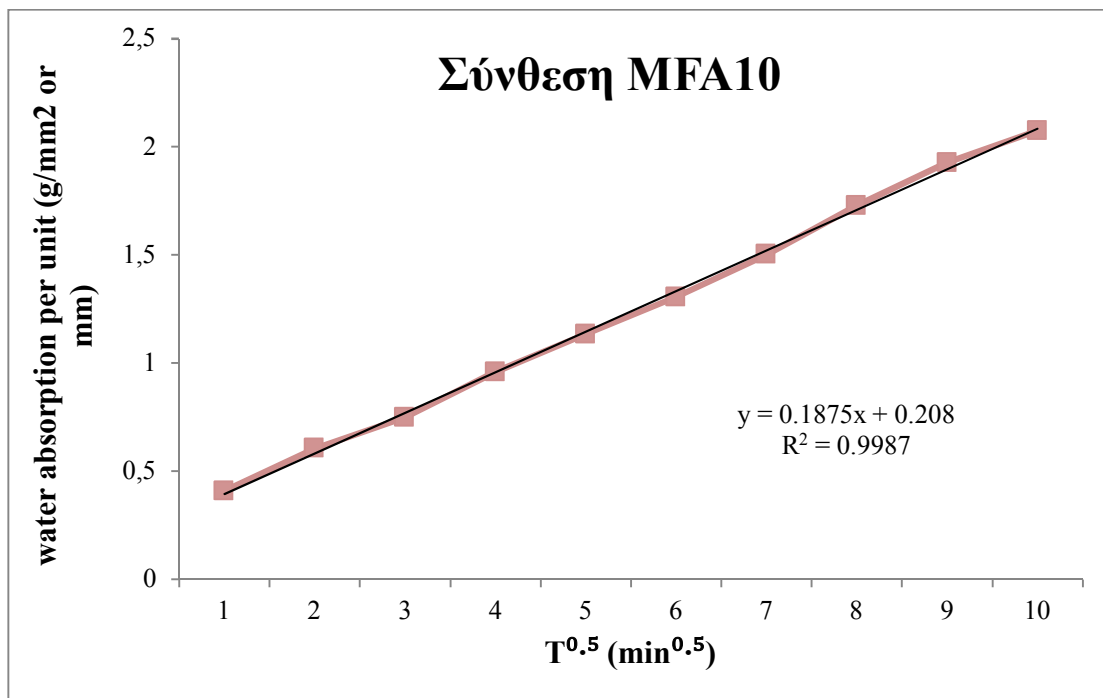
6.3.2 Τριχοειδής απορρόφηση

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται οι τιμές που προέκυψαν από τα πειράματα τριχοειδούς απορρόφησης και αφορούν σε όλες τις συνθέσεις.

Πίνακας 11 : Πειραματικές μετρήσεις δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης για κάθε σύνθεση.

T ^{1/2}	Σ(ΔW/A)/ρ _w (mm)								
	OPC	MK10	MK20	MFA10	MFA20	MSF10	MSF20	GBF10	GBF20
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	0.2101	0.1127	0.084	0.2044	0.2158	0.0719	0.2069	0.1974	0.1903
2	0.275	0.1188	0.084	0.202	0.1884	0.1014	0.163	0.1944	0.1405
3	0.2572	0.1248	0.0818	0.1872	0.169	0.1066	0.1515	0.1738	0.1334
4	0.2553	0.1184	0.0868	0.1917	0.1589	0.1202	0.1373	0.1785	0.1365
5	0.2572	0.1337	0.0893	0.1889	0.1619	0.1214	0.1258	0.1797	0.1239
6	0.271	0.1251	0.0904	0.1864	0.1492	0.1122	0.1279	0.1853	0.1195
7	0.2647	0.1262	0.0818	0.1878	0.1509	0.12	0.1175	0.1805	0.1175
8	0.2779	0.1228	0.0867	0.1921	0.1491	0.1253	0.1094	0.1845	0.115
9	0.2788	0.1196	0.0895	0.1926	0.1515	0.121	0.1077	0.186	0.1146
10	0.2695	0.1227	0.0817	0.1886	0.147	0.122	0.0988	0.1845	0.1114

Στο διάγραμμα του **Σχήματος 21** παρουσιάζεται, η καμπύλη αθροιστικής απορρόφησης του νερού $\Sigma(\Delta W/A)/\rho w$ σε συνάρτηση με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου $T^{1/2}$, ενδεικτικά για το δοκίμιο της σύνθεσης MFA10. Από τη μορφή του διαγράμματος φαίνεται ότι τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθεί ότι αποτελούν σημεία μιας γραμμικής καμπύλης της μορφής $y = ax+b$, όπου $y = \Sigma(\Delta W/A)/\rho w$ και $x = T^{1/2}$, καθώς οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης κυμαίνονται μεταξύ 0.9897 - 0.9987 για όλα τα δοκίμια. Από την κλίση της ευθείας προκύπτει η τιμή του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης S . Στο διάγραμμα αυτό, για τη σύνθεση MFA10, η τριχοειδής απορρόφηση είναι $S = 0.1875 \text{ mm/min}^{0.5}$.



Σχήμα 21 : Διάγραμμα απορρόφησης νερού συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, για τη σύνθεση MFA10

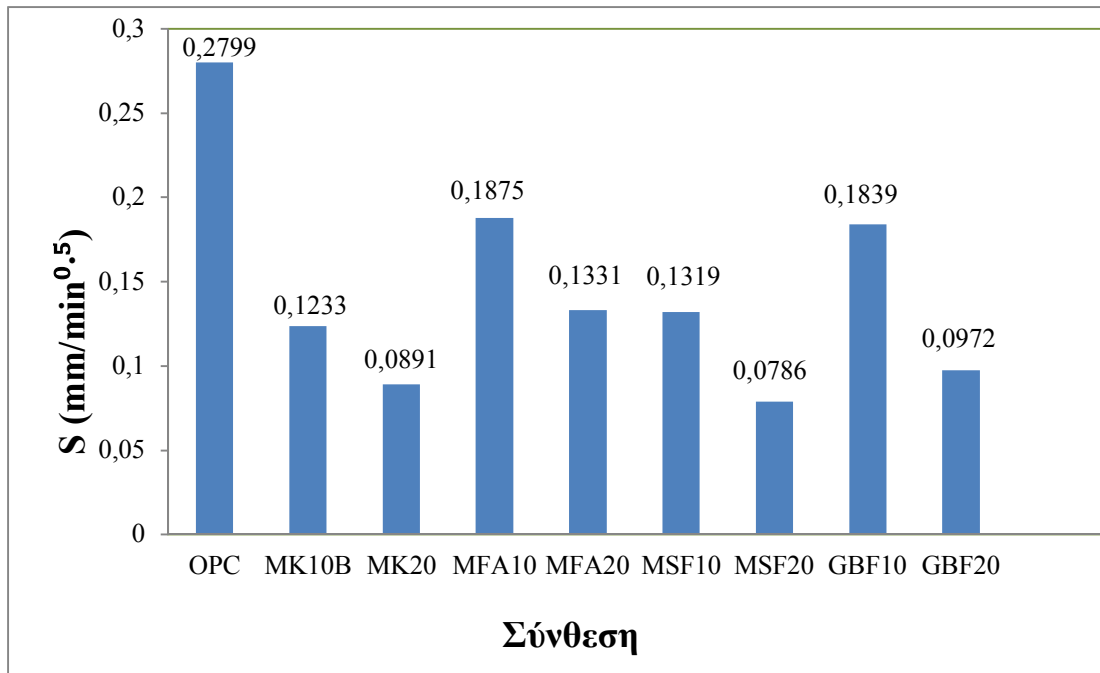
Σχεδιάζοντας τα διαγράμματα και για τα υπόλοιπα δοκίμια προκύπτουν όλες οι τιμές των συντελεστών της τριχοειδούς απορρόφησης, οι οποίες εμφανίζονται συνολικά στον **Πίνακα 12**, ενώ δίνονται και οι τιμές των αντίστοιχων συντελεστών γραμμικής συσχέτισης.

Πίνακας 12 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης.

Σύνθεση	Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min ^{0.5})	% Μεταβολής S ως προς αμιγές κονίαμα	Συντ. γραμμικής συσχέτισης R ²
OPC	0.2799	-	0.9976
MK10	0.1233	-55.9	0.9942
MK20	0.0891	-68.2	0.9897
MFA10	0.1875	-33.01	0.9987
MFA20	0.1331	-52.4	0.9972
MSF10	0.1319	-52.9	0.9955
MSF20	0.0786	-71.9	0.9806
GBF10	0.1839	-34.3	0.9978
GBF20	0.0972	-65.3	0.9957

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα του **Σχήματος 22**, η προσθήκη πρόσθετων τσιμεντοειδών στο κονίαμα, οδήγησε σε εμφανή μείωση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης σε όλες τις συνθέσεις. Έτσι, για τη σύνθεση MSF20, παρατηρήθηκε μείωση του συντελεστή κατά 71.9%, ενώ

ακολουθούν η σύνθεση MK20, με ποσοστό μείωσης 68.2%, η σύνθεση GBF20 με ποσοστό 65.3% και ακολούθως η MK10 με μείωση κατά 55.9%. Αντίθετα, στις συνθέσεις GBF10, MFA10, σημειώθηκε η μικρότερη μείωση, κατά 34.3% και 33.01% αντίστοιχα.



Σχήμα 22 : Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min^{0.5}), ανά σύνθεση

6.4 Αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων

6.4.1 Συντελεστής Διείσδυσης χλωριόντων - NT BUILD 492

Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι πρωτογενείς μετρήσεις, για όλα τα δοκίμια.

Πίνακας 13: Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικών μετρήσεων της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων, για κάθε δοκίμιο.

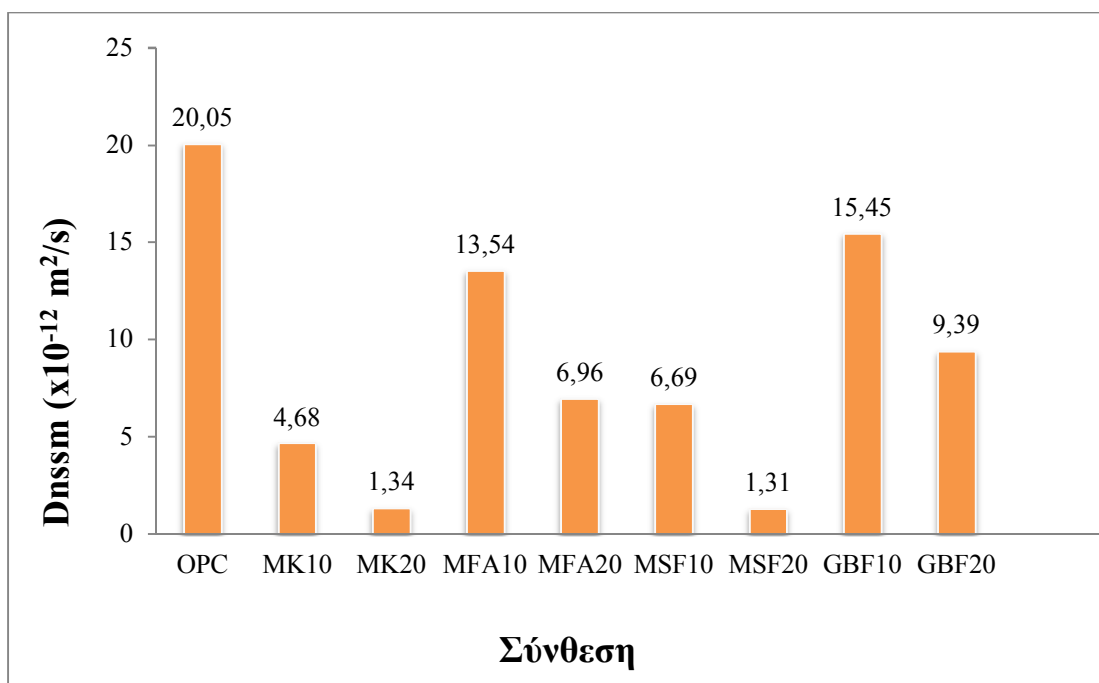
Σύνθεση	Δοκίμ. Τάση	Δοκίμ. Ένταση	Αρχ. Τάση	Αρχ. Ένταση	Τελ. Τάση	Τελ. Ένταση	Μέσο Πάχος	Διάρκεια Δοκιμής	Μέση Θερμ/σία	Μέση Διείσδυση
	V	A	V	A	V	A	mm	ώρες	οC	mm
OPC	30	0.16	14.9	0.074	15	0.073	50.33	24	21.95	21.21
MK10	30	0.046	30	0.046	31.2	0.050	47.00	23.92	22.50	11.21
MK20	30	0.015	50	0.029	50	0.041	49.00	24	22.65	5.43
MFA10	30	0.10	20	0.064	20	0.066	49.67	24	22.75	19.68
MFA20	30	0.050	30.20	0.050	28.9	0.054	47.33	24	21.85	16.25
MSF10	30	0.046	30	0.046	30.9	0.062	50.33	24	22.55	14.75
MSF20	30	0.016	50	0.030	48.8	0.055	50.33	24	23.55	5.18
GBF10	30	0.019	20	0.075	20.5	0.079	51.33	24	21.05	21.71
GBF20	30	0.081	25.2	0.067	24.9	0.077	46.50	24	21.25	18.46

Ο υπολογισμός του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} γίνεται, κατά το πρότυπο **NT492**, με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 4.6.1**. Στον **Πίνακα 14** παρουσιάζεται ο συντελεστής διείσδυσης D_{nssm} για κάθε σύνθεση καθώς και η μεταβολή του σε σχέση με την αμιγή σύνθεση κονιάματος (OPC).

Πίνακας 14 : Αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων, για κάθε σύνθεση.

Σύνθεση	Συντελεστής διείσδυσης $D_{nssm}(x10^{-12})$	% μεταβολή D_{nssm} ως προς αμιγές κονιάμα
OPC	20.05	-
MK10	4.68	-76.69
MK20	1.34	-93.32
MFA10	13.54	-32.47
MFA20	6.96	-65.29
MSF10	6.69	-66.63
MSF20	1.31	-93.47
GBF10	15.45	-22.94
GBF20	9.39	-53.17

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα του **Πίνακα 14**, αλλά και από το **Σχήμα 23**, η προσθήκη τσιμεντοειδών στο κονιάμα, επηρεάζει μόνο θετικά την αντίσταση του κονιάματος στη διείσδυση των χλωριόντων, σε όλες τις συνθέσεις. Όπως και στην προηγούμενη δοκιμή της τριχοειδούς απορρόφησης, έτσι και σε αυτή, η σύνθεση MSF20 παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά σε σύγκριση με τις υπόλοιπες συνθέσεις, με συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων κατά 94% μειωμένο σε σχέση με την αμιγή σύνθεση κονιάματος. Ακολουθεί η Σύνθεση MK20 με αισθητή μείωση της τάξης του 93% του συντελεστή διείσδυσης. Πολύ καλή συμπεριφορά στην αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων παρατηρείται και για τη συνθέση MK10 με ποσοστό μείωσης 77%.



Σχήμα 23 : Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} (m^2/s), για κάθε σύνθεση

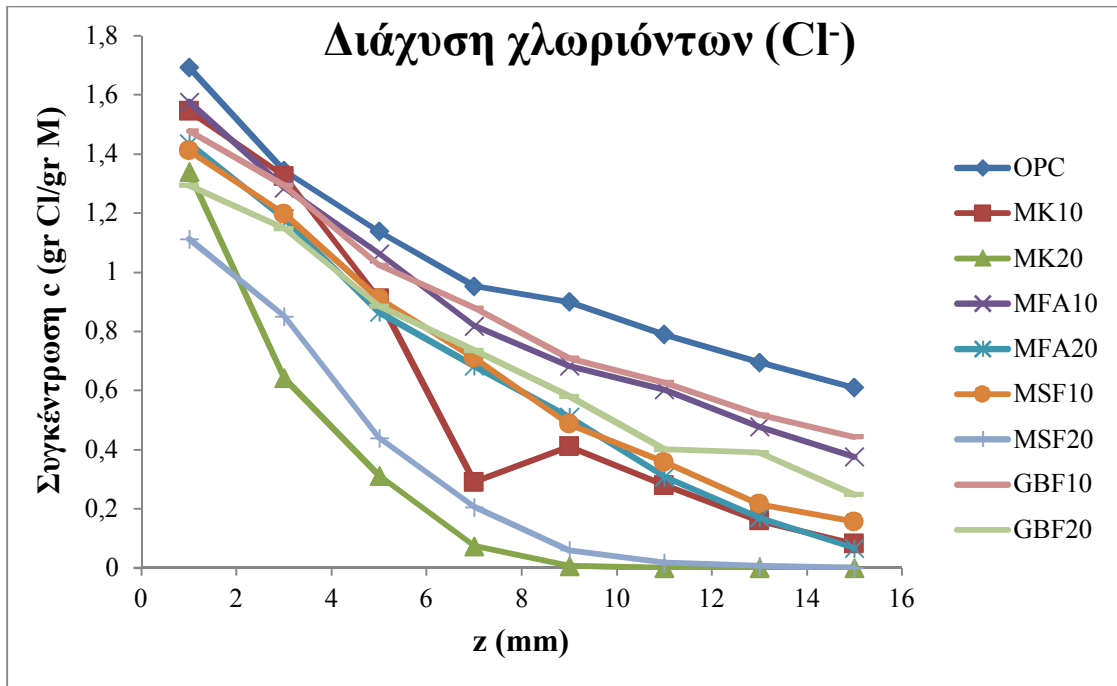
6.4.2 Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων - NT BUILD 443

Ο υπολογισμός του συντελεστή διάχυσης των χλωριόντων D_{sm} πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο **NT BUILD 443** με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 4.6.2**.

Για όλες τις συνθέσεις πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός της συγκέντρωσης χλωριόντων. Από τις πειραματικές τιμές προσδιορισμού της συγκέντρωσης χλωριόντων για όλα τα μείγματα, στα διάφορα βάθη, έγιναν οι γραφικές παραστάσεις για τη κάθε σύνθεση σε ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 25**. Όπως προκύπτει και από τον **Πίνακα 15**, αλλά και από το **Σχήμα 24**, σε όλες τις συνθέσεις η συγκέντρωση των χλωριόντων φθίνει καθώς αυξάνεται το βάθος.

Πίνακας 15 : Αποτελέσματα της συγκέντρωσης των χλωριόντων, για όλες τις συνθέσεις, σε βάθη 0-16 mm.

Σύνθεση	Συγκέντρωση (gr Cl/gr M)							
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8-10	10 - 12	12 - 14	14 -16
OPC	1.694	1.344	1.138	0.953	0.900	0.790	0.695	0.610
MK10	1.545	1.326	0.911	0.291	0.411	0.280	0.160	0.082
MK20	1.340	0.642	0.312	0.074	0.007	0.000	0.000	0.000
MFA10	1.577	1.287	1.063	0.819	0.684	0.603	0.478	0.376
MFA20	1.436	1.181	0.865	0.684	0.510	0.308	0.170	0.067
MSF10	1.411	1.198	0.911	0.709	0.486	0.358	0.216	0.156
MSF20	1.113	0.851	0.44	0.206	0.060	0.018	0.007	0.000
GBF10	1.478	1.294	1.025	0.879	0.709	0.627	0.518	0.443
GBF20	1.294	1.148	0.886	0.737	0.581	0.401	0.390	0.248

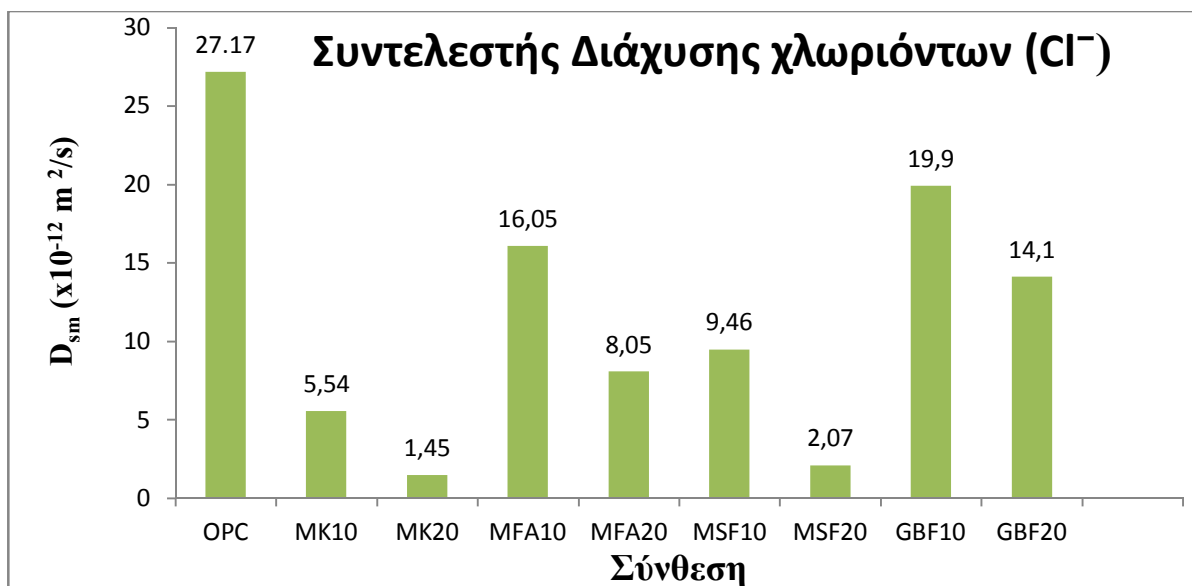


Σχήμα 24 : Συγκεντρωτικό διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm), για όλες τις συνθέσεις

Στον **Πίνακα 16** δίνονται οι τιμές για τον συντελεστή διάχυσης D_{sm} (m^2/s), για κάθε σύνθεση καθώς και η μεταβολή του σε σχέση με το αμιγές κονίαμα. Οι τιμές αυτές αναπαρίστανται γραφικά στο **Σχήμα 26**.

Πίνακας 16 : Αποτελέσματα της δοκιμής διάχυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση.

Σύνθεση	Συντελεστής Διάχυσης $D_{sm}(x10^{-12}$ $m^2/s)$	% Μεταβολή D_{sm} ως προς αμιγές κονίαμα
OPC	27.17	-
MK10	10.57	-61.1
MK20	1.45	-94.7
MFA10	16.05	-40.9
MFA20	8.05	-70.4
MSF10	9.46	-65.2
MSF20	2.07	-92.4
GBF10	19.90	-26.8
GBF20	14.10	-48.1



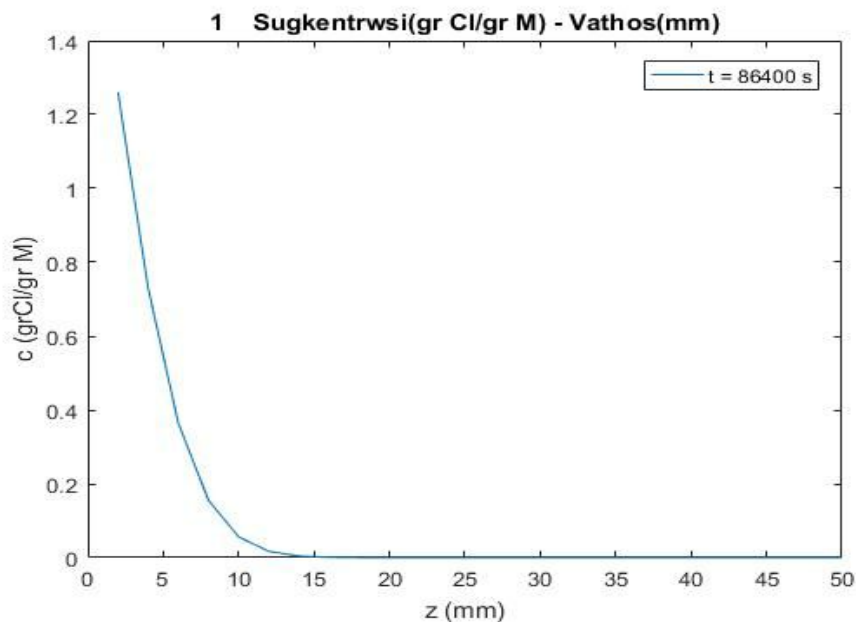
Σχήμα 25 : Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων D_{sm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), για κάθε σύνθεση

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 16**, αλλά και από το **Σχήμα 25** και με αυτή τη δοκιμή καταγράφεται η θετική επίδραση της προσθήκης τσιμεντοειδών στην αντίσταση των κονιαμάτων στη διάχυση των χλωριόντων για όλες τις συνθέσεις, όπως ακριβώς διαπιστώθηκε και στην προηγούμενη δοκιμή του προσδιορισμού του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων κατά τη μέθοδο **NT BUILD 492**. Συγκεκριμένα, η σύνθεση MK20 παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά σε σύγκριση με τις υπόλοιπες συνθέσεις, με συντελεστή διάχυσης χλωριόντων κατά 95% μειωμένο σε σχέση με την αμιγή σύνθεση κονιάματος, ενώ αμέσως μετά, την καλύτερη συμπεριφορά σημείωσε η σύνθεση MSF20, με αισθητή μείωση της τάξης του 92% του συντελεστή διάχυσης. Πολύ καλή συμπεριφορά στην αντίσταση στη διάχυση χλωριόντων σημειώθηκε επίσης και στις συνθέσεις MK10 με ποσοστό μείωσης κατά 78%, στη σύνθεση MFA20, με μείωση της τάξης του 70% καθώς και στο δοκίμιο MSF10, στο οποίο ο συντελεστής διάχυσης των χλωριόντων εκτιμήθηκε κατά 65% μειωμένος σε σχέση με την αμιγή σύνθεση κονιάματος.

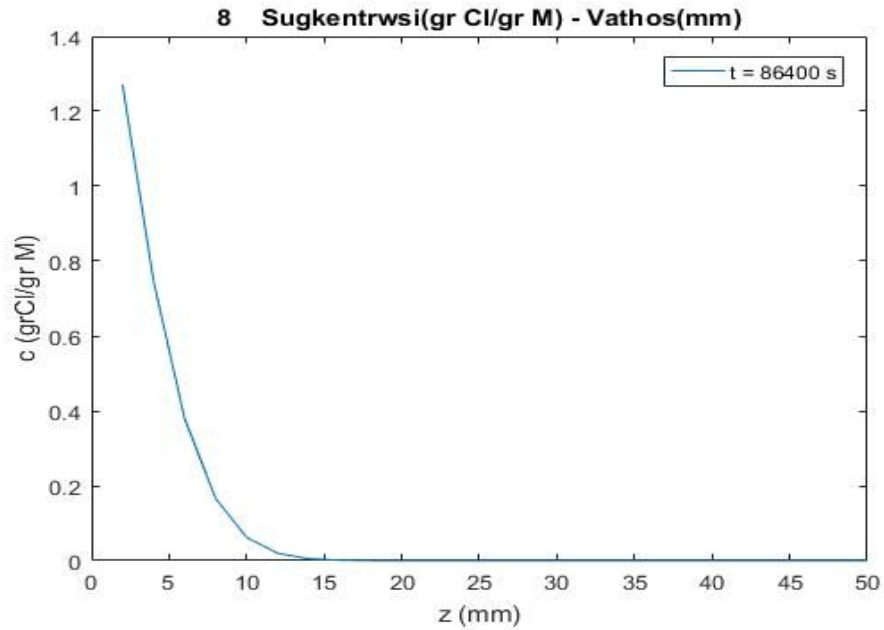
6.5 Μοντελοποίηση της διείσδυσης και διάχυσης χλωριόντων με το πρόγραμμα MATLAB R2016a

6.5.1 Επιταχυνόμενη Διείσδυση χλωριόντων

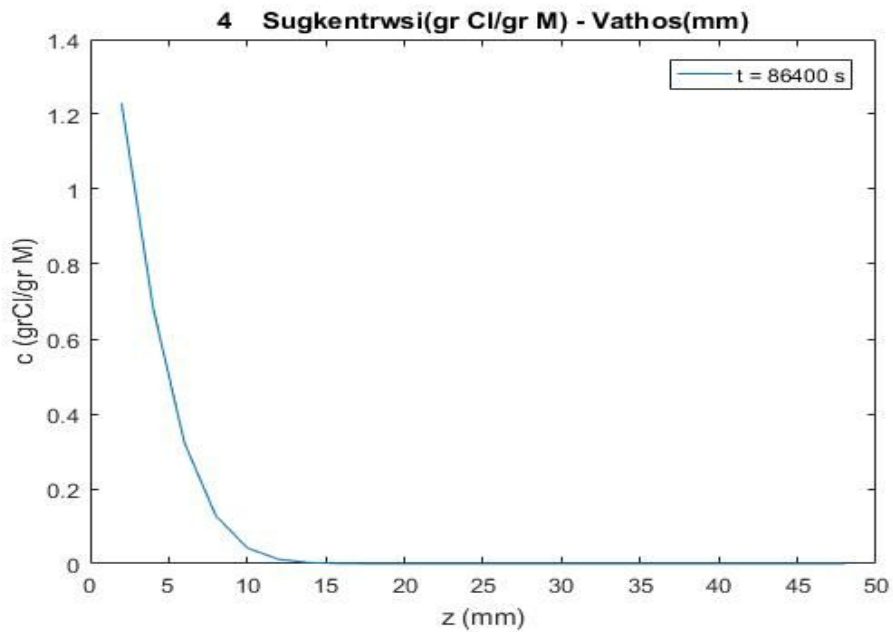
Με την επίλυση του μοντέλου, προέκυψαν τα αναλυτικά αποτελέσματα για τη συγκέντρωση των κονιαμάτων σε χλωρίοντα σε σχέση με το βάθος, μετά από εφαρμογή διαφοράς δυναμικού και ύστερα από 1 ημέρα έκθεσης ($t = 86400$ s).



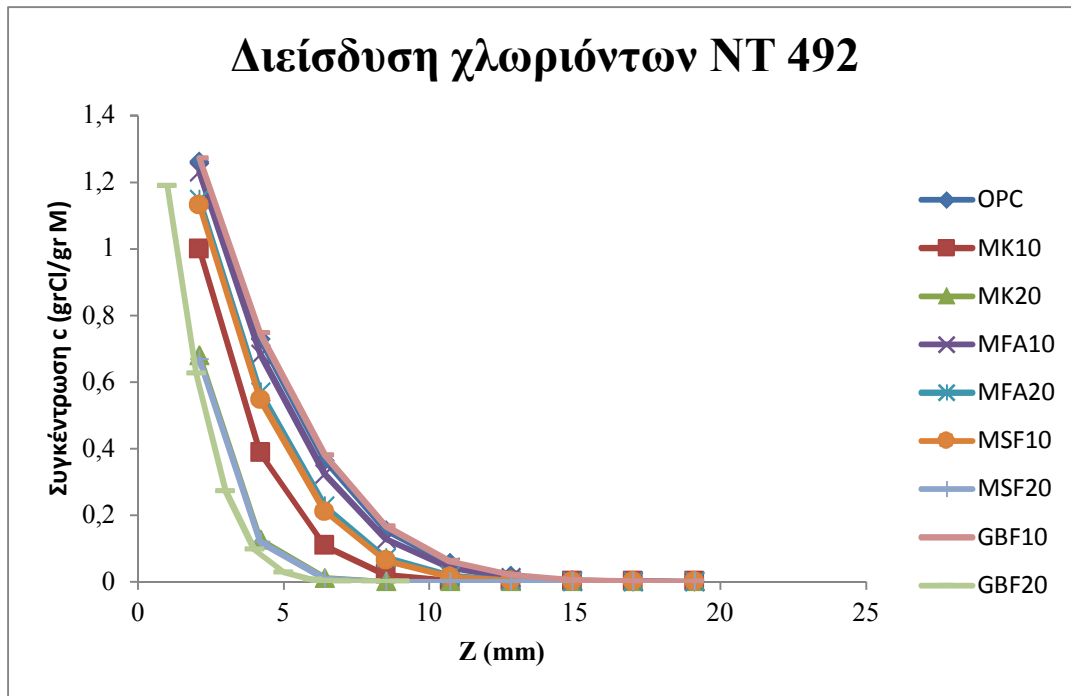
Σχήμα 26 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση OPC



Σχήμα 27 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση GBF10



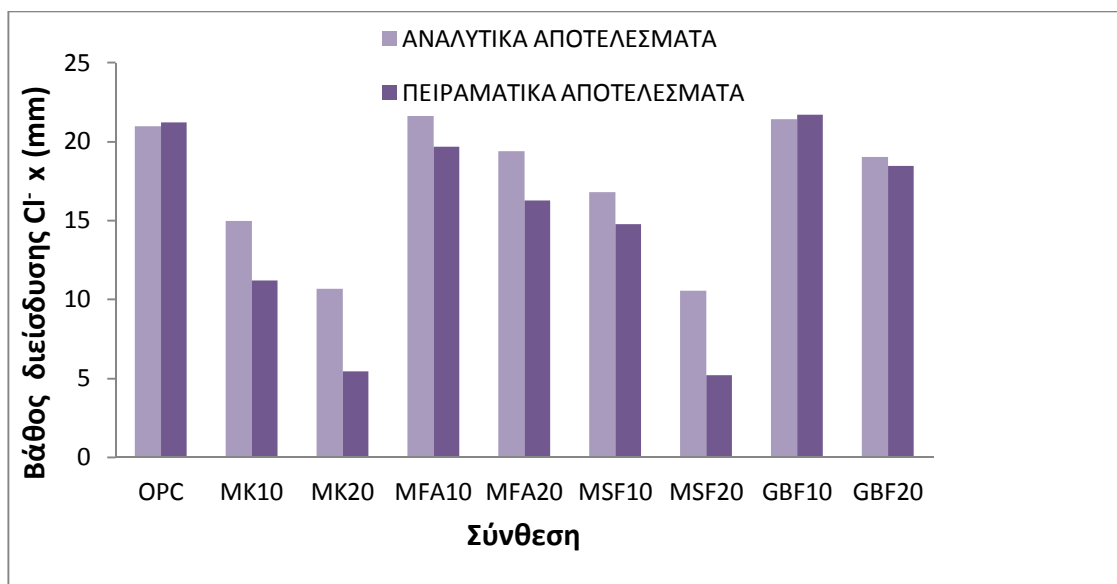
Σχήμα 28 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση MFA10



Σχήμα 29 : Συγκεντρωτικό διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων z (mm) για όλες τις συνθέσεις

Πίνακας 17 : Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ πειράματος και ανάλυσης, για το μέγιστο βάθος διείσδυσης κατά τη μέθοδο NT 492.

Βάθος διείσδυσης χλωριόντων x (mm)			
Σύνθεση	Πειραματικά	Αναλυτικά	Απόκλιση τιμών (%)
OPC	21.21	20.97	-1.13
MK10	11.21	14.96	33.45
MK20	5.43	10.65	96.13
MFA10	19.68	21.60	9.76
MFA20	16.25	19.36	19.14
MSF10	14.75	16.78	13.76
MSF20	5.18	10.56	103.86
GBF10	21.71	21.39	-1.47
GBF20	18.46	19.02	3.03



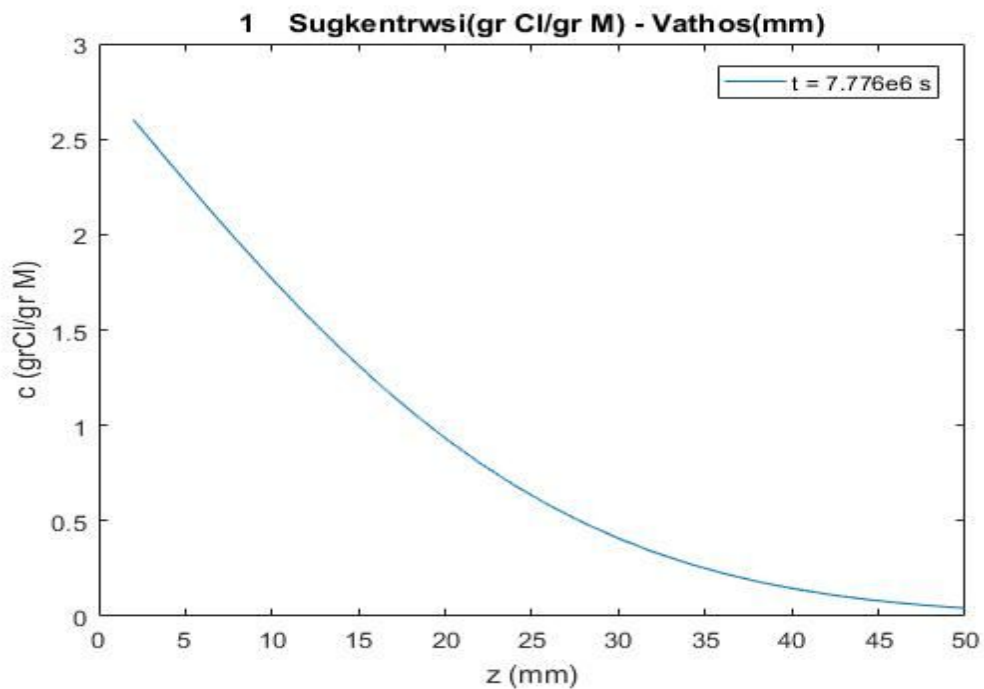
Σχήμα 30 : Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ πειράματος κι ανάλυσης για το μέγιστο βάθος διείσδυσης των χλωριόντων όλων των συνθέσεων.

Όπως φαίνεται στα **Σχήματα 26 έως 30** και στον **Πίνακα 17**, οι αναλυτικές τιμές δε διαφέρουν σημαντικά από τις πειραματικές τιμές. Επίσης, γίνεται σαφές ότι τόσο πειραματικά όσο και αναλυτικά, διατηρείται η σειρά κατάταξης των συνθέσεων σε σχέση με το βάθος διείσδυσης τους. Τέλος, σε όλες σχεδόν τις συνθέσεις πέρα από την OPC και GBF10, οι πειραματικές τιμές είναι μικρότερες από τις αναλυτικές τιμές.

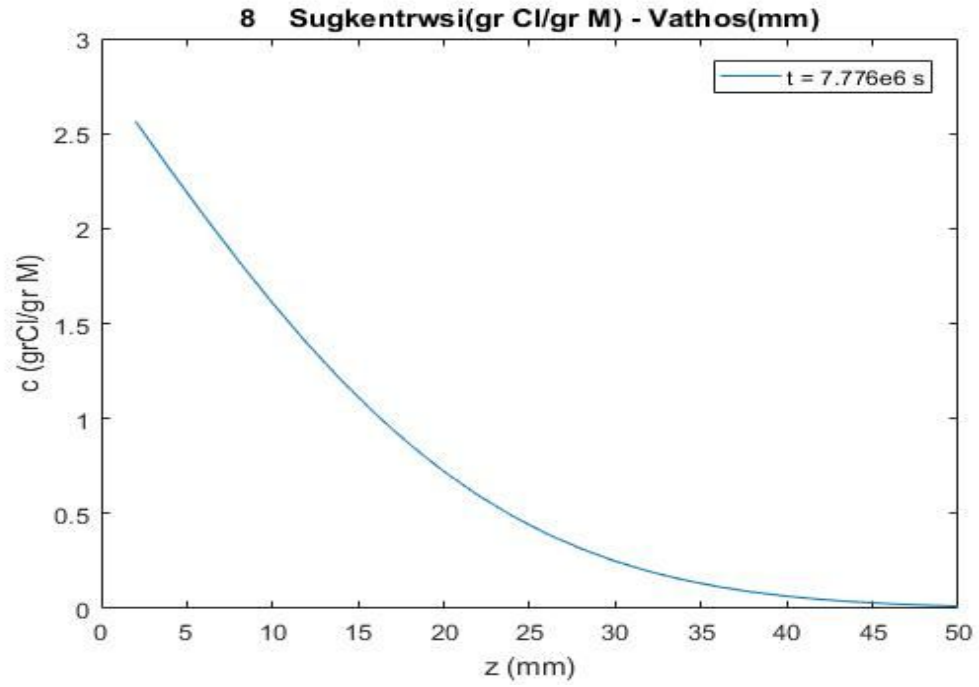
Στις συνθέσεις με χαμηλή τιμή συντελεστή διάχυσης, όπως στις MK20, MSF20, MK10 υπήρξε μεγαλύτερη διαφορά πειραματικών και αναλυτικών τιμών, ενώ για τις υπόλοιπες συνθέσεις η διαφορά κυμάνθηκε από 1% έως 13%. Υπενθυμίζεται εδώ ότι οι συντελεστές διείσδυσης που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση, προέκυψαν πειραματικά. Γενικά, οι διαφορές στις τιμές ενδέχεται να οφείλονται στο γεγονός ότι ο συντελεστής προκύπτει πειραματικά μέσω χρωματογραφικής μεθόδου, όπου συχνά δεν είναι ευδιάκριτα τα όρια των χρωματισμένων περιοχών του δοκιμίου που αντιπροσωπεύουν το βάθος διείσδυσης.

6.5.2 Μοντελοποίηση της διάχυσης χλωριόντων

Με την επίλυση του μοντέλου, προέκυψαν τα αναλυτικά αποτελέσματα για τη συγκέντρωση των κονιαμάτων σε χλωρίοντα σε σχέση με το βάθος μετά από 90 ημέρες έκθεσης ($t = 7776000$ s).



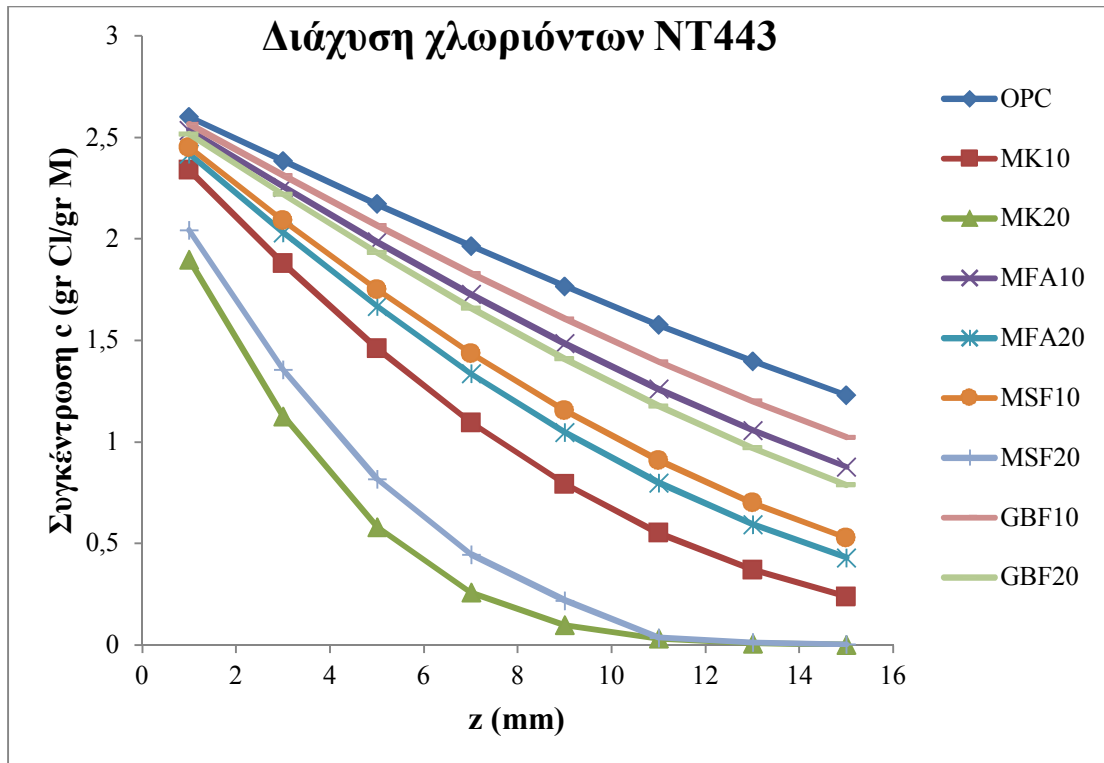
Σχήμα 31 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση OPC



Σχήμα 32 : Διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για τη σύνθεση GBF10

Πίνακας 18 : Αναλυτικά αποτελέσματα της συγκέντρωσης των χλωριόντων σε σχέση με το βάθος (mm) για κάθε σύνθεση για την NT443.

Σύνθεση	Συγκέντρωση (gr Cl/gr M)							
	0-2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8-10	10 - 12	12 - 14	14 -16
OPC	2.601	2.385	2.173	1.966	1.767	1.577	1.398	1.231
MK10	2.339	1.880	1.461	1.096	0.793	0.553	0.371	0.239
MK20	1.900	1.127	0.582	0.260	0.099	0.032	0.009	0.002
MFA10	2.536	2.256	1.986	1.728	1.486	1.262	1.059	0.878
MFA20	2.420	2.032	1.669	1.338	1.048	0.800	0.595	0.431
MSF10	2.451	2.091	1.751	1.437	1.155	0.910	0.701	0.528
MSF20	2.043	1.356	0.819	0.447	0.220	0.038	0.014	0.004
GBF10	2.565	2.313	2.067	1.831	1.607	1.396	1.202	1.024
GBF20	2.517	2.220	1.933	1.661	1.409	1.178	0.971	0.789



Σχήμα 33 : Συγκεντρωτικό διάγραμμα της συγκέντρωσης c (gr Cl/gr M) σε συνάρτηση με το βάθος διάχυσης των χλωριόντων z (mm) για όλες τις συνθέσεις

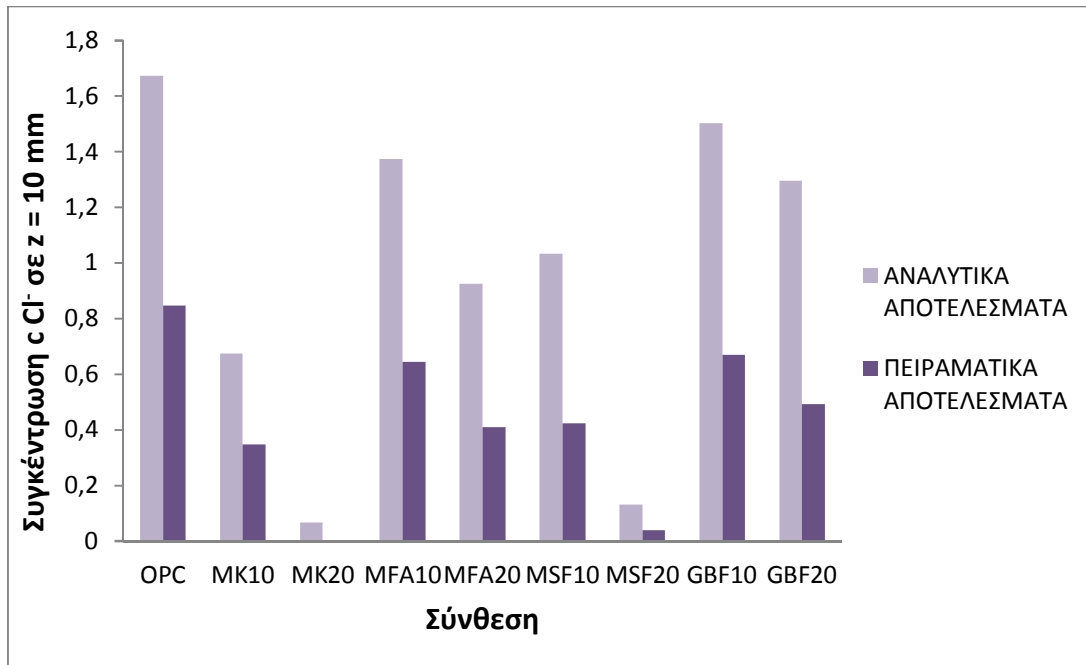
Όπως φαίνεται στα **Σχήματα 31 έως 33** και στον **Πίνακα 18**, οι συνθέσεις MSF20 και MK20 παρουσίασαν την καλύτερη συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, η σύνθεση MK20 είχε τις μικρότερες τιμές συγκέντρωσης χλωριόντων και αμέσως χαμηλές τιμές η MSF20, γεγονός το οποίο επαληθεύτηκε κι από τα πειραματικά αποτελέσματα. Ακολουθούν οι συνθέσεις MK10 και MFA20, ενώ αμέσως μεγαλύτερες τιμές παρουσίασαν οι MSF10, GBF20, MFA10, GBF10, ενώ όλες οι συνθέσεις παρουσίασαν χαμηλότερες τιμές συγκέντρωσης σε σχέση με τη σύνθεση OPC.

Πραγματοποιήθηκε σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων αναφορικά με τη συγκέντρωση των χλωριόντων σε βάθος $z = 10$ mm, όπως αυτό ορίζεται ως ελάχιστο πάχος επικάλυψης κατά τον **Ευρωκώδικα 2**. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης φαίνονται στον Πίνακα 19.

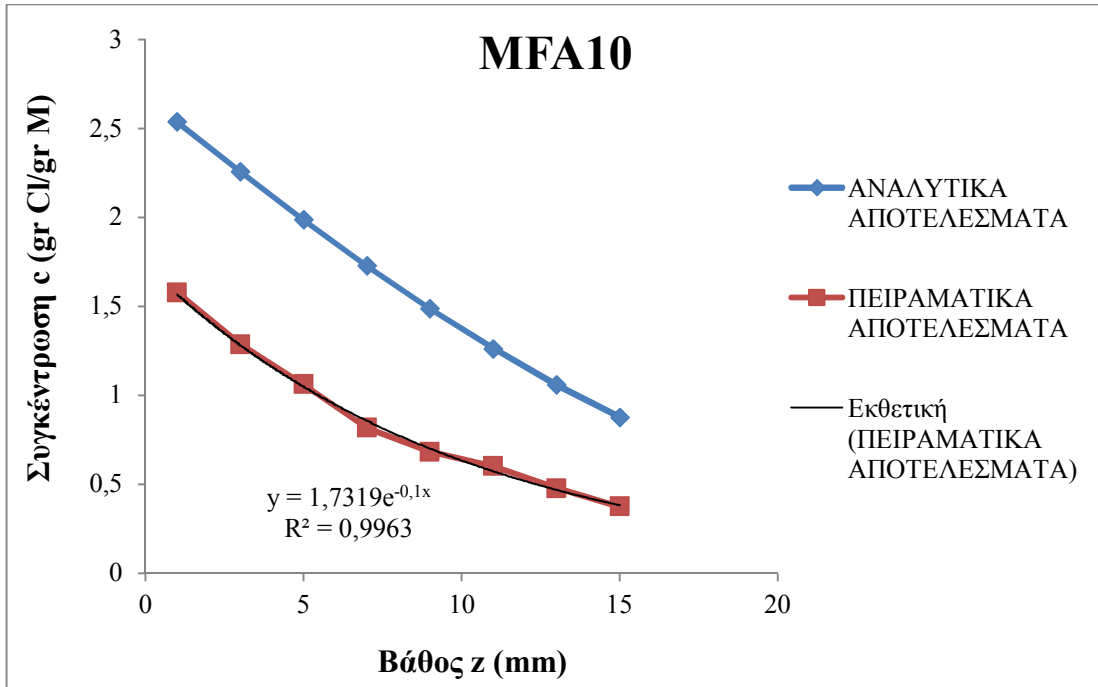
Πίνακας 19 : Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ πειράματος και ανάλυσης για τη συγκέντρωση c χλωριόντων, σε βάθος $z=10$ mm κατά τη μέθοδο NT 443.

Συγκέντρωση Cl^- σε βάθος $z = 10$ mm	Σύνθεση								
	OPC	MK10	MK20	MFA10	MFA20	MSF10	MSF20	GBF10	GBF20
Αναλυτικά αποτελέσματα	0.8450	0.3460	0.0004	0.6440	0.4090	0.4220	0.0390	0.6680	0.4910
Πειραματικά αποτελέσματα	1.6720	0.6730	0.0660	1.3740	0.9240	1.0330	0.1290	1.5020	1.2940
Απόκλιση(%)	49.46	48.59	99.47	113.35	55.74	59.15	69.77	55.53	62.06

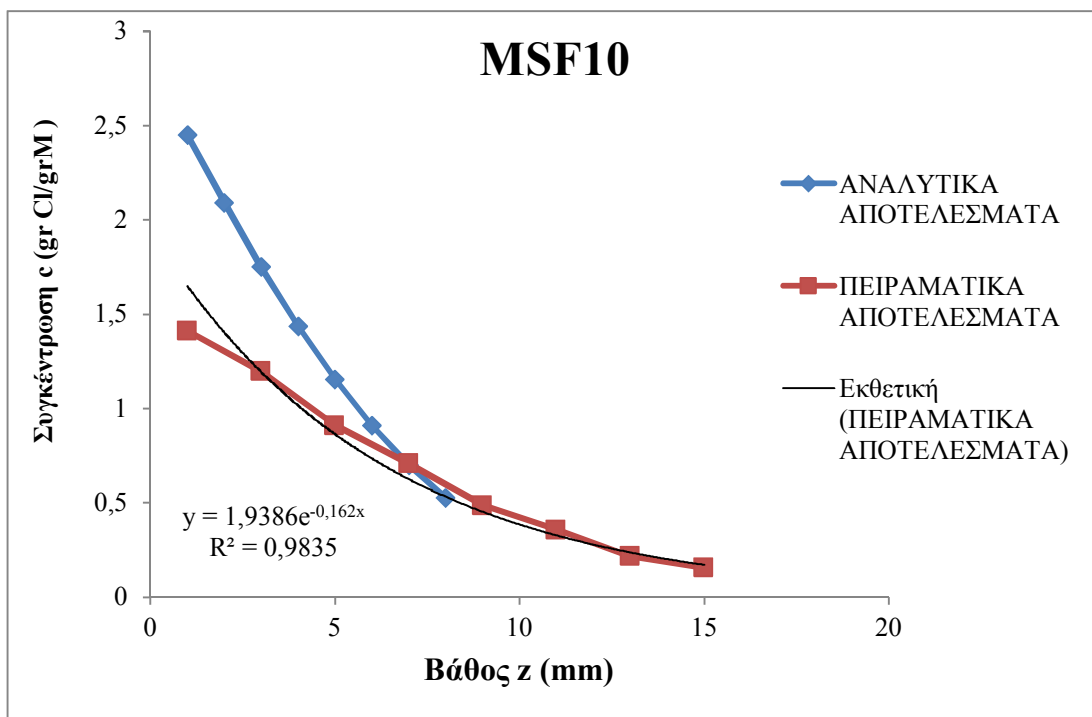
Στη συνέχεια και για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων αναφορικά με τη συγκέντρωση των Cl^- σε διάφορα βάθη, δίνεται ενδεικτικά στα **Σχήματα 35, 36, 37** το προφίλ της διάχυσης των Cl^- σε διάφορα βάθη, όπως αυτό προσδιορίστηκε πειραματικά και αναλυτικά.



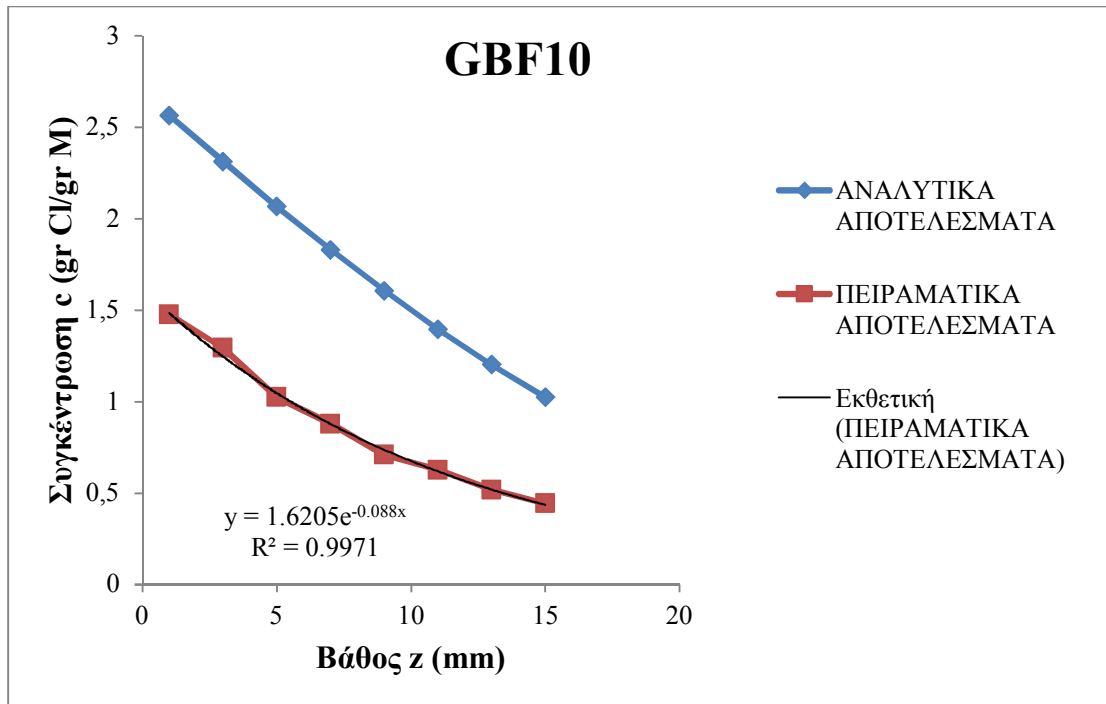
Σχήμα 34 : Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ πειράματος κι ανάλυσης για τη συγκέντρωση χλωριόντων, σε βάθος $z = 10 \text{ mm}$ όλων των συνθέσεων.



Σχήμα 35 : Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων για τη σύνθεση MFA10



Σχήμα 36 : Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων για τη σύνθεση MSF10



Σχήμα 37 : Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων για τη σύνθεση GBF10

Όπως προκύπτει κι από τα **Σχήματα 34, 35, 36, 37**, υπάρχει απόκλιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για τη συγκέντρωση των χλωριόντων σε σχέση με το βάθος. Επισημαίνεται και σε αυτή την περίπτωση ότι οι συντελεστές διείσδυσης που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση, προέκυψαν από τα πειραματικά αποτελέσματα και προέκυψαν κατόπιν γραμμικής παλινδρόμησης. Ωστόσο, γίνεται σαφές ότι τόσο πειραματικά όσο και αναλυτικά, διατηρείται η σειρά κατάταξης των συνθέσεων σε σχέση με το βάθος διείσδυσης τους, ενώ σε όλες τις συνθέσεις, οι πειραματικές τιμές είναι μικρότερες από τις αναλυτικές τιμές.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η μελέτη της επίδρασης της προσθήκης πρόσθετων τσιμεντοειδών (Μετακαολίνη, Ιπτάμενη Τέφρα, Πυριτική Παιπάλη, Σκωρία Υψικαμίνου), στην ανθεκτικότητα των κονιαμάτων. Συνολικά παράχθηκαν εννέα (9) συνθέσεις και συγκεκριμένα, μία (1) σύνθεση αναφοράς με αμιγές κονίαμα OPC, και 8 συνθέσεις με τα παρακάτω πρόσθετα: μετακαολίνη, ιπτάμενη τέφρα, πυριτική παιπάλη και σκωρία υψικαμίνου. Τα πρόσθετα αυτά τσιμεντοειδή προστέθηκαν σε αναλογία 10% και 20% κ.β. κονιάματος. Από τη μελέτη και την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- ❖ Η **θλιπτική αντοχή (f_m)** αυξήθηκε σημαντικά σε όλες τις συνθέσεις στις 28 ημέρες με την προσθήκη τσιμεντοειδών. Η μεγαλύτερη τιμή της θλιπτικής αντοχής στις 28 ημέρες, σημειώθηκε στη σύνθεση MK20 και MK10. Στη σύνθεση MFA10 (Ιπτάμενη Τέφρα 10% κ.β.), παρατηρήθηκε μια μικρή μόνο αύξηση 4%, ενώ σημαντική αύξηση 15% παρουσίασε σε ηλικία 90 ημερών, γεγονός αναμενόμενο.
- ❖ Καταγράφηκε μείωση του **ανοικτού πορώδους (OP)** σε όλες τις συνθέσεις. Καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με την αμιγή σύνθεση παρουσίασε η σύνθεση MK20 ενώ αμέσως επόμενες έρχονται οι MSF20 και MK10.
- ❖ Ο **συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης (S)** επίσης μειώθηκε σημαντικά με την προσθήκη πρόσθετων τσιμεντοειδών στο κονίαμα σε όλα τα δείγματα, με τη σύνθεση MSF20 να έχει τη μεγαλύτερη βελτίωση σε σχέση με το αμιγές κονίαμα. Την αμέσως καλύτερη συμπεριφορά έδειξαν οι συνθέσεις MK20, GBF20 και MK10.
- ❖ Ο **συντελεστής διείσδυσης Cl⁻ D_{nssm} (m^2/s)** παρουσίασε σημαντική μείωση για όλα τα είδη και όλες τις αναλογίες τσιμεντοειδών. Η σύνθεση MSF20 παρουσίασε την καλύτερη συμπεριφορά με εξαιρετικά υψηλή αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων καθώς επίσης και η σύνθεση MK20. Πολύ υψηλή αντίσταση έδειξε και η σύνθεση MK10 ενώ υψηλή χαρακτηρίστηκε κι η αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων των συνθέσεων MSF10, MFA20.

- ❖ Η προσθήκη πρόσθετων τσιμεντοειδών συνέβαλε στη μείωση του **συντελεστή διάχυσης D_{sm} (m^2/s)** σε όλες τις συνθέσεις. Έτσι, στη σύνθεση MK20 έχουμε τη μεγαλύτερη μείωση του συντελεστή διάχυσης, με τιμή του D_{sm} κατά δεκαεννέα (19) φορές μικρότερη σε σχέση με αυτή της αμιγούς σύνθεσης κονιάματος, ενώ στην MSF20 έχουμε μόλις δεκατρείς (13) φορές μικρότερη τιμή του συντελεστή διείδυσης χλωριόντων. Ακολούθως έχουμε τις συνθέσεις MK10 και MFA20.
- ❖ **Μοντελοποίηση επιταχυνόμενης διείδυσης χλωριόντων:** Προέκυψε καλή σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων για το βάθος διείδυσης των χλωριόντων (x) σε όλες τις συνθέσεις, με εξαίρεση τις συνθέσεις MK20 και MSF20, όπου παρουσιάστηκαν μεγαλύτερες αποκλίσεις πειραματικών κι αναλυτικών τιμών. Είναι προφανές κι εδώ ότι τόσο πειραματικά όσο και αναλυτικά, διατηρείται η σειρά κατάταξης των συνθέσεων σε σχέση με το βάθος διείδυσης τους, ενώ σε όλες τις συνθέσεις, εκτός των OPC και GBF10, οι πειραματικές τιμές είναι μικρότερες από τις αναλυτικές τιμές. Παρατηρήθηκε ότι στις συνθέσεις με χαμηλή τιμή συντελεστή διάχυσης, όπως στις MK20, MSF20, MK10 υπήρξε σημαντική διαφορά πειραματικών και αναλυτικών τιμών, ενώ για τις υπόλοιπες συνθέσεις η διαφορά κυμάνθηκε από 1% έως 13%. Ωστόσο, οι διαφορές στις τιμές ενδέχεται να οφείλονται στον προσδιορισμό του βάθους διείδυσης με τη χρωματογραφική μέθοδο, διαδικασία που ενέχει σφάλμα.
- ❖ **Μοντελοποίηση διάχυσης χλωριόντων:** Υπήρξε απόκλιση μεταξύ πειραματικών κι αναλυτικών τιμών για τη συγκέντρωση των χλωριόντων σε σχέση με το βάθος. Ωστόσο, διατηρείται η σειρά κατάταξης των συνθέσεων σε σχέση με το βάθος διείδυσης τους, ενώ σε όλες τις συνθέσεις, οι πειραματικές τιμές είναι μικρότερες από τις αναλυτικές τιμές.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Τ.Ε.Ε Ελληνικό τμήμα σκυροδέματος. (1994). *11ο Ελληνικό Συνέδριο σκυροδέματος, Τόμος 1*. 18-20 Μαΐου 1994, Κέρκυρα.

<http://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/latomika-orykta/biomihanika-orykta/58-kaolinitis>. (2016, December 17). <http://www.orykta.gr>

www.en.wikipedia.org. (2016, December 31). <https://en.wikipedia.org/wiki/Diffusion>

www.mie.uth.gr. (2016, December 31). Σημειώσεις Προπτυχιακού μαθήματος της Πολυτεχνικής Σχολής Μηχανολόγων μηχανικών Θεσσαλίας <<Διάχυση>>: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/ch5t.pdf

<https://www.mathworks.com>. (5 Μαρτίου 2017). <https://www.mathworks.com/help/pde/heat-transfer-and-diffusion-equations.html>

www.mathworks.com. (4 Μαρτίου 2017). <https://www.mathworks.com/products/matlab/features.html#matlab-is-designed-for-engineers-and-scientists>

www.mathworks.com. (4 Μαρτίου 2017). <https://www.mathworks.com/help/matlab/math/partial-differential-equations.html>

ACI 222.1. (1996). Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. American Concrete Institute.

ACI 222R. (2010). Provisional Standard Test Method for Water-Soluble Chloride Available for Corrosion of Embedded Steel in Mortar and Concrete Using the Soxhlet Extractor. American Concrete Institute.

ASTM C 1218/C 1218M. (2008). Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.

ASTM C 642. (1997). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

- Badogiannis E, & Tsvivilis S. (2009). Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete. *Cement & Concrete Composites*, 128-1333.
- Beretka J, & Mathew PJ. (1985). Natural radioactivity of Australian building materials, Industrial wastes and. *Health Phys, Vol 48*, 87-95.
- C., A., 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.
- C., F., Carmine L., Martinelli E., Pepe M., & Realfonzo R. (2016, August). Mechanical and durability performance of sustainable structural concretes: An experimental study. *Cement and Concrete Composites, Vol 71*, pp. 85–96.
- Choo S. B., & N. (2003). *Advanced Concrete Technology*. Imperial College & Napier University, Oxford.
- EN 196-2. (2013). Method of testing cement - Part 2 Q Chemical analysis of cement. Brussels: European committee for standardization.
- Kim J, McCarter M, Suryanto B, Nanukuttan S, & Basheer M. (2015, September). Chloride ingress into marine exposed concrete: A comparison of empirical- and physically- based models. *Cement and Concrete Composites, Vol 72*, pp. 133–145.
- Ludwing U, & Singh N B. (1986). *Cement- Kalk- Gips*. Vol 39.
- Nilsson L. O., Poulsen E., Sandberg P., Sørensen H., & Klinghoffer O. (1998). *Chloride penetration into concrete, State-of-the-Art, Transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models*. (Tech. Rep. No. 53). Copenhagen, Denmark.
- NT Build 443. (1995). Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration. Filand : Nordtest.
- NT Build 492. (1999). Concrete, mortar, and cement-based materials: Chloride migration coefficient from non-steady state migration experiment. Filand: Nordtest.
- Tan X, & Gong Y. (1983). *Priliminary analysis on BOS slag use in Bao Steelworks. Internal information for design of Bao Steelworks*. (8pp.).

- Tang L. (1996). *Chloride Transport in Concrete - Measurement and Prediction*. Doctoral work, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Taylor P C, Nagi M A, & Whiting D A. (1999). *Threshold Chloride Content for Corrosion of Steel in Concrete: A Literature Review*. Serial No. 2169, Portland.
- Zhu D, & Zongjin L. (2016, August 26). Study of High Early Strength Cement based on Fly Ash, Magnesia and Phosphate. (U. Professor R D K Misra (University of Texas at El Paso, Ed.) *Materials Technology- Advanced Performance Materials, Vol 20(3)*, pp. 136-141.
- Audenaert K, Yuan Q, & De Schutter G . (2008). On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete. *Construction and Building Materials, 24(3)*, pp.396-402.
- Βασιλείου Δ. (2014). *Επιρροή παραθαλάσσιου περιβάλλοντος στην ανθεκτικότητα μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα*. Πτυχιακή Εργασία, Τ.Ε.Ι Πειραιά, Αθήνα.
- Βούκια Δ. (2013). *Διαπερατότητα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με μετακαολίνη*. Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Ζέρης Χ. (n.d.). *Σημειώσεις Προπτυχιακού μαθήματος Αρχιτεκτόνων μηχανικών Ε.Μ.Π. << Δομική μηχανική 3>>, Κεφάλαιο 1: Σκυρόδεμα*. Retrieved from <http://courses.arch.ntua.gr>
- Καραβιώτη Α. (2012). *Τροποποιημένα παραδοσιακά επιχρίσματα για την προστασία ωμοπλινθοδομών από την υγρασία*. Μεταπτυχιακή Εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Καραστεργίου Α. (2009). *Μελέτη της συνεργατικής υδροθερμικής κατεργασίας ιπτάμενης τέφρας και μεταλλουργικής σκωρίας για την παρασκευή δομικών υλικών*. Διπλωματική Εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Κατσενίου Γ., & Δημάδη Κ. (2006). *Διάβρωση χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος & τρόποι αποκατάστασης*.
- Κόλιας Σ. (2011-2012). Προχωρημένη τεχνολογία σκυροδέματος. Σημειώσεις Διατμηματικού Προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών Ε.Μ.Π. <<Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών>>, Αθήνα.
- Κορόζης Η. (2015). *Μοντελοποίηση της διάχυσης χλωριόντων σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα*. Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Λαγαρός Ν, Φραγκιαδάκης Μ, Στάμος Α, & Φραγκουδάκης Χ. (2017, Μάρτιος 4). [www.mycourses.ntua.gr](http://mycourses.ntua.gr). Retrieved from Σημειώσεις Προπτυχιακού μαθήματος Ε.Μ.Π. <<Μέθοδοι Επίλυσης με Η/Υ>>: http://mycourses.ntua.gr/courses/CIVIL1171/document/SolutionMethods_Week01.pdf

Μαρίνος Α, Μπατής Γ, Καστριώτης Σ Μ, Γάλλιας Ι, & Μπατής Γ. (2015). Μελέτη της ανθεκτικότητας κονιαμάτων με μετακαολίνη υπό αέρια συντήρηση. *10ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, 4-6 ΙΟΥΝΙΟΥ 2015, Πάτρα.*

Μοροπούλου Α, Καραγιάννης Ν, Καρόγλου Μ, & Μπακόλας Α.. Επίδραση της θερμοκρασίας στο συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης ιστορικών και παραδοσιακών δομικών υλικών. *10ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, 4-6 ΙΟΥΝΙΟΥ 2015, Πάτρα.*

Μπαδογιάννης Ε. (2016). *Concrete structures, Durability, Lime mortal*. Ανάκτηση από Σημειώσεις Προπτυχιακού Μαθήματος Πολιτικών μηχανικών Ε.Μ.Π <<Τεχνικά Υλικά>>: www.mycourses.ntua.gr

Παπαδάτου Μ. (2014). *Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος*. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Παπακώστα Α, & Τσιάρα Α. (2015). *Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου - με ίνες χάλυβα -σκυροδέματος σε περιβάλλον θεικών*. Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Πραγματογνώμονες, Τ. Ε. (2006). *Εκτίμηση της κατάστασης του σιδηρού οπλισμού κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος κατά την ανάληψη του κινδύνου ή μετά από μία ζημιά*. ΕΝΗΜ . 4 / ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ / 14.06.2006, Χαλάνδρι, Αθήνα.

Ρούτουλας Α. (2012, Φεβρουάριος). *Σημειώσεις Τεχνολογίας δομικών υλικών και Επεμβάσεις*. Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Φυσικής Χημείας και Τεχνολογίας Υλικών: <http://ikaros.teipir.gr/phyche/Subjects/Routoulas/Petyl>

Σιδέρης Κ. (2010). *Ανθεκτικότητα κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος*. Σέλκα - 4Μ.

Σιόβα Ε., & Μπατής Γ. (2009). *Ανθεκτικότητα Κονιαμάτων Αποκατάστασης με Λευκό Τσιμέντο - Δυνατότητες Προστασίας*. *16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009*. Πάφος, Κύπρος.

- Σπανός Χ, Τρέζος Κ, & Σπιθάκης Μ. (2001). Αντισεισμική θωράκιση υφισταμένων κατασκευών. *T.E.E.* Μάιος, Αθήνα.
- Στιβανάκης Ε. Β. (2003). *Έρευνα και ανάπτυξη νέων δομικών υλικών από στερεά παραπροϊόντα λιγνιτικής καύσης ενεργειακού κέντρου Μεγαλόπολης*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Χημικών μηχανικών Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Στρατουρά Χ. Μ. (2015). *Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος*. Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Σωτηριάδης Κ. (2011). *Διερεύνηση και ερμηνεία της συμπεριφοράς ασβεστολιθικών τσιμέντων σε συνδιασμένο περιβάλλον χλωριόντων και θειικών ιόντων*. Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Τάσιος, Θ. Π. (1993). *Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος*. Αθήνα: Εκδόσεις Φοίβος.
- Τεταγιώτη Δ. (2011). *Μελέτη του χρόνου ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό εναλλασσόμενες διαβρωτικές συνθήκες*. Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Τριανταφύλλου Χ Α. (2005). *Δομικά Υλικά*. 7η Έκδοση, Πάτρα.
- Τσακαλάκης Κ. (2010). *Τεχνολογία παραγωγής Τσιμέντου και Σκυροδέματος*. Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Τσιβιλής Σ, Κακάλη Γ, & Μπενάκης Β. (2013). Ανθεκτικότητα κονιαμάτων σύνθετων τσιμέντων σε υψηλή θερμοκρασία. *9ο Πανελλήνιο Συνέδριο Χημικής Μηχανικής Ε.Μ.Π.* Αθήνα.
- Τσίκας Π, & Παπασπυριδάκος Χ. (2006). *Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος σε διάρκεια*. Πάτρα.
- Φαρδής Μ. (2005). Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος. In *Μέρος III*. Πάτρα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.
- Φίτος Π. Μ. (2014). *Ποζολανική δραστηριότητα μηχανικά ενεργοποιημένων μετακαολινών και εφαρμογή τους στην τεχνολογία σκυροδέματος*. Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π, Αθήνα.
- Xianming Shi, N. X. (2012, May). Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. *Construction and Building Materials*, 30, pp. 125–138.

