



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

**ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ
ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΗ ΠΡΟΣΘΕΤΑ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ
ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΔΟΚΙΜΗΣ
ΣΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ
ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Ποτετσιανάκη Ευάγγελου



Επιβλέπων:

Ευστράτιος Γ. Μπαδογιάννης | Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	ii
Abstract.....	iii
Ευχαριστίες.....	iv
1. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	2
1.1 Εισαγωγή.....	2
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.....	7
1.6.1 Σπουδαιότητα χλωριόντων.....	7
1.6.2 Πηγές και ενώσεις χλωριόντων.....	9
1.7 Ενανθράκωση σκυροδέματος.....	10
1.8 Μηχανισμοί διείσδυσης διαβρωτικών μέσων.....	12
1.8.1 Τριχοειδής απορρόφηση.....	12
1.8.2 Υδατοπερατότητα.....	13
1.8.3 Μηχανισμός διείσδυσης (migration).....	15
1.8.4 Μηχανισμός διάχυσης (diffusion).....	15
1.9 Τρόποι Προστασίας Οπλισμένου Σκυροδέματος.....	16
2. ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΗ ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	18
2.1 Εισαγωγή.....	18
2.2 Ιπτάμενη Τέφρα (Fly Ash).....	19
2.3 Μετακαολίνης (Metakaolin).....	20
2.4 Σκωρία Υψικαμίνου (Granulated Blast Furnace Slag).....	21
2.5 Πυριτική Παιπάλη (Silica Fume).....	23
3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	24
3.1 Εισαγωγή.....	24
3.2 Τρέχουσα ερευνητική δραστηριότητα.....	24
3.2.1 Θλιπτική αντοχή.....	24
3.2.2 Ανοιχτό πορώδες.....	25
3.2.3 Τριχοειδής απορρόφηση.....	27
3.2.4 Διείσδυση χλωριόντων.....	28
3.2.5 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής σκυροδέματος.....	30
4. Πειραματικό μέρος.....	32
4.1 Εισαγωγή.....	32
4.2 Υλικά και Συνθέσεις Δοκιμών.....	32

4.3	Μέτρηση θλιπτικής αντοχής.....	34
4.4	Ανοιχτό πορώδες.....	36
4.5	Τριχοειδής απορρόφηση.....	37
4.6	Συντελεστής διείδυσης χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης.....	39
5.	Παρουσίαση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	45
5.1	Θλιπτική αντοχή.....	45
5.2	Ανοιχτό πορώδες.....	46
5.3	Τριχοειδής απορρόφηση.....	49
5.4	Διείδυση χλωριόντων.....	51
5.4.1	Πειραματική διαδικασία 24 ωρών.....	52
5.4.2	Πειραματική διαδικασία 6 ωρών.....	54
5.4.3	Συσχέτιση Dnssm 24 ωρών και Dnssm 6 ωρών.....	55
6.	Συμπεράσματα.....	59
	Βιβλιογραφία.....	61
	Παράρτημα.....	65
	Θλιπτική αντοχή.....	65
	Τριχοειδής απορρόφηση.....	66
	Διείδυση Χλωριόντων.....	67

Πίνακας Εικόνων-Σχημάτων

Εικόνα 1: Παράγοντες ανθεκτικότητας.....	3
Εικόνα 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.....	5
Εικόνα 3: Επίδραση του λόγου N/T στη δημιουργία τριχοειδών κενών.....	6
Εικόνα 4: Φθορά θαλάσσιας κατασκευής η οποία έρχεται σε άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό.....	9
Εικόνα 5: Διείσδυση διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂) στον οπλισμό σκυροδέματος	11
Εικόνα 6: Εκτίμηση βάθους ενανθράκωσης σκυροδέματος μετά από ψεκασμό με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης. Το τμήμα στο οποίο δεν παρουσιάζεται αλλαγή χρώματος (δεξιά) είναι ενανθρακωμένο (βάθος ενανθράκωσης περίπου 3 cm). Το αριστερό τμήμα (χρώμα ροζ-βυσσινί) δεν έχει ενανθρακωθεί.	11
Εικόνα 7: Σχέση υδατοδιαπερατότητας, λόγου N/T και τριχοειδών πόρων	13
Εικόνα 8: Σκαρίφημα απεικόνισης υδατοπερατότητας πρισματικού δοκιμίου	14
Εικόνα 9: Σχέση θλιπτικής αντοχής, υδατοδιαπερατότητας και λόγου στερεών προς στερεά και κενά	15
Εικόνα 10: Μηχανισμοί μεταφοράς χλωριόντων στο σκυρόδεμα	16
Εικόνα 11: Ιπτάμενη τέφρα	19
Εικόνα 12: μετακαολίνης	20
Εικόνα 13: Σκωρία Υψικαμίνου.....	22
Εικόνα 14: Πυριτική παιπάλη.....	23
Εικόνα 15: Παρασκευή κυλινδρικών και κυβικών δοκιμίων	34
Εικόνα 16: Συντήρηση δοκιμίων σε νερό	34
Εικόνα 17: Ζύγιση κυβικού δοκιμίου.....	35
Εικόνα 18: Διάταξη δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής f_c	35
Εικόνα 19: Μέτρηση μάζας επιφανειακώς στεγνού δοκιμίου (Msat).....	37
Εικόνα 20: Μέτρηση μάζας υπό άνωση (Mimm)	37
Εικόνα 21: Διεξαγωγή πειράματος τριχοειδούς απορρόφησης.....	38

Εικόνα 22: Δοκίμια κατά την διάρκεια και με το πέρας του πειράματος της τριχοειδούς απορρόφησης.....	38
Εικόνα 23: Δοκίμια σκυροδέματος με μονωτική ταινία Teflon.....	39
Εικόνα 24: Ηλεκτρική διάταξη δοκιμής NordTest Build 492 κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας	40
Εικόνα 25: Η διάταξη της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων	41
Εικόνα 26: Διάρρηξη του δοκιμίου	41
Εικόνα 27: Δοκίμια μετά τη διάρρηξη και τον ψεκάσμο με AgNO ₃	42
Εικόνα 28: Υπόδειγμα μέτρησης βάθους διείσδυσης χλωριόντων	42
Σχήμα 1: Μέση θλιπτική αντοχή για κάθε σύνθεση	46
Σχήμα 2: Ανοιχτό πορώδες (%) για κάθε σύνθεση, στις 28 και 110 ημέρες	48
Σχήμα 3: Διάγραμμα απορρόφησης νερού συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου για το δοκίμιο S4-A.....	50
Σχήμα 4: Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min ^{0.5}), ανά σύνθεση	51
Σχήμα 5: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων Dnssm (m ² /s) 24 ωρών, στις 28 και στις 110 ημέρες, για κάθε σύνθεση.	53
Σχήμα 6: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων Dnssm (m ² /s) 6 ωρών, στις 28 και στις 110 ημέρες, για κάθε σύνθεση.	55
Σχήμα 7: Διάγραμμα απλής γραμμικής παλινδρόμησης του συντελεστή Dnssm 24 ωρών, σε συνάρτηση με τον συντελεστή Dnssm 6 ωρών.....	57

Πίνακες

Πίνακας 1: Ελάχιστη κατηγορία αντοχής σκυροδέματος, ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου, μέγιστος λόγος N/T κατά EN 206	8
Πίνακας 2: Ποσότητες υλικών ανά σύνθεση και ιδιότητες νωπού σκυροδέματος.....	33
Πίνακας 3: Διαφορά δυναμικού και διάρκεια δοκιμής [NordTest Build 492 (1999)].....	40
Πίνακας 4: Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων, για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διείσδυσης [πηγή: Tang L. (1996)]..	43
Πίνακας 5: Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων, για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διείσδυσης [πηγή: Nilsson L. O.et all (1998)].....	44
Πίνακας 6: Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής 28 και 110 ημερών	45

Πίνακας 7: Μετρήσεις και αποτελέσματα δοκιμής ανοιχτού πορώδους στις 28 ημέρες....	47
Πίνακας 8: Μετρήσεις και αποτελέσματα δοκιμής ανοιχτού πορώδους στις 110 ημέρες..	47
Πίνακας 9: Πειραματικές μετρήσεις δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης για κάθε σύνθεση σκυροδέματος.....	49
Πίνακας 10: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης.....	51
Πίνακας 11: Αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων 24 ωρών, στις 28 και στις 110 ημέρες.....	52
Πίνακας 12: Χαρακτηρισμός των συνθέσεων σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων.....	54
Πίνακας 13: Αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων 6 ωρών, στις 28 και στις 110 ημέρες.....	54
Πίνακας 14: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων για κάθε δοκίμιο.....	56
Πίνακας 15: Χαρακτηρισμός των συνθέσεων σκυροδέματος για την αντίσταση τους στη διείσδυση χλωριόντων, βάσει των προβλεπόμενων συντελεστών διείσδυσης 24 ωρών	58

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η ανθεκτικότητα σκυροδέματος με τσιμεντοειδή πρόσθετα. Συγκεκριμένα διερευνήθηκε η επιρροή του μετακαολίνης (MK), της πυριτικής παιπάλης (SF), της σκωρίας υψικαμίνου (GS) και της ιπτάμενης τέφρας (FA) ως πρόσθετα, σε κάποιες παραμέτρους ανθεκτικότητας του σκυροδέματος, όπως η θλιπτική αντοχή, το ανοιχτό πορώδες, ο ρυθμός διείσδυσης νερού μέσω της τριχοειδούς απορρόφησης και η αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων. Επίσης στο πλαίσιο της δοκιμής NT Build 492, μελετήθηκε η επίδραση του χρόνου δοκιμής στη διαμόρφωση των τιμών του συντελεστή διείσδυσης CI.

Συνολικά παρασκευάστηκαν 10 συνθέσεις σκυροδέματος. Στις 2 χρησιμοποιήθηκε μόνο τσιμέντο Portland, αμιγείς συνθέσεις, με λόγο νερού/τσιμέντου (ν/τ) 0.55 και 0.50 αντίστοιχα. Σε κάθε μία από τις υπόλοιπες 8 χρησιμοποιήθηκε ένα από τα παραπάνω πρόσθετα, αντικαθιστώντας το τσιμέντο σε ποσοστό 10% ή 20% κατά βάρος. Ο λόγος ν/τ στις συνθέσεις με τσιμεντοειδή πρόσθετα παρέμεινε στην τιμή 0.50.

Μέσω συγκεκριμένων δοκιμών και μεθόδων καθορίστηκαν οι παράμετροι ανθεκτικότητας για όλες τις συνθέσεις, στις 28 και στις 110 ημέρες ωρίμανσης του κάθε σκυροδέματος. Προσδιορίστηκε η θλιπτική αντοχή βάσει μονοαξονικής θλίψης, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός του ανοιχτού πορώδους, καθώς και ο ρυθμός διείσδυσης νερού μέσω της τριχοειδούς απορρόφησης. Η εκτίμηση της αντίστασης στη διείσδυση των χλωριόντων βασίστηκε στο πρότυπο NT Build 492. Για κάθε σύνθεση έγιναν δύο ίδιες πειραματικές διαδικασίες όπου διήρκησαν 24 και 6 ώρες αντίστοιχα, υπολογίζοντας δύο συντελεστές διείσδυσης χλωριόντων, D_{nssm}. Επιπρόσθετα, μέσω απλής γραμμικής παλινδρόμησης συσχετίστηκαν οι δύο αυτοί συντελεστές.

Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, η προσθήκη πυριτικής παιπάλης στο σκυρόδεμα έδειξε εντυπωσιακή βελτίωση σε σχέση με το αμιγές σε όλες τις παραμέτρους. Οι συνθέσεις με μετακαολίνη παρουσίασαν πολύ υψηλή θλιπτική αντοχή και αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων, ενώ και αυτές που περιείχαν σκωρία υψικαμίνου έδειξαν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε αυτές τις 2 παραμέτρους, αλλά και στην τριχοειδή απορρόφηση. Αντίθετα η χρησιμοποίηση ιπτάμενης τέφρας δε βελτίωσε την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

Λέξεις Κλειδιά: σκυρόδεμα, ανθεκτικότητα, τσιμεντοειδή πρόσθετα, θλιπτική αντοχή, ανοιχτό πορώδες, τριχοειδής απορρόφηση, NT Build 492, γραμμική παλινδρόμηση.

Abstract

The current dissertation is aiming to investigate the durability of concrete with supplementary cementing materials (SCM). In particular, the influence of metakaolin (MK), silica fume (SF), granulated blast furnace slag (GS) and fly ash (FA) was examined, according to some parameters of durability, such as compressive strength, open porosity, water absorption through sorptivity and resistance on chloride migration. In addition, the influence of experimental duration at the NT Build 492 test on the chloride penetration coefficient, was examined.

A total of 10 mixtures of concrete were produced. Two of them only contained Portland cement, and with the ratio of water to cement (w/c) set as 0.55 and 0.50, were used as reference mixtures. At each of the other 8 mixtures, one of the SCM was used, replacing the cement at a percentage of 10% and 20% per weight. The ratio of w/c remained constant at 0.50.

Through specific tests and methods, the parameters of durability were determined for all the mixtures, after 28 and 110 days of curing. Compressive strength was defined through uniaxial compression, the estimation of open porosity was made, as well as the rate water absorption through sorptivity was also estimated. The evaluation of the resistance of chloride migration was depend on the method NT Build 492. For every mixture, two experimental procedures were done, where they last 24 and 6 hours respectively, estimating two chloride penetration coefficients, $D_{ns,m}$. Furthermore, using simple linear regression, the two chloride penetration coefficients were correlated.

According to the experimental results, adding silica fume at the concrete showed impressive improvement related to the reference one at all the parameters. The mixtures with metakaolin presented very high compressive strength and chloride migration resistance, while also those with granulated blast furnace slag performed satisfactory at those 2 parameters and at sorptivity. On the contrary, the usage of fly ash didn't improve the durability of concrete.

Keywords: concrete, durability, supplementary cementing materials, compressive strength, open porosity, sorptivity, NT Build 492, linear regression.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τομέα Δομοστατικών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Ολοκληρώνοντάς την, θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον κύριο Ευστράτιο Μπαδογιάννη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή την εργασία και τη συνολική καθοδήγησή της από την αρχή έως το πέρας αυτής.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Μαρία Στρατουρά, με την οποία συνεργάστηκα άψογα, τόσο κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών όσο και κατά τη συγγραφή του κειμένου. Η συνεισφορά της ήταν καθοριστική για την εργασία αυτή, λόγω της παρουσίας και βοήθειας στο χώρο του Εργαστηρίου.

Επιπλέον, καθοριστική ήταν και η συμβολή του προσωπικού και των επιστημονικών συνεργατών του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος της σχολής Πολιτικών Μηχανών ΕΜΠ. Για την προθυμία και την υπομονή που έδειχναν κάθε φορά που χρειάστηκα τη βοήθειά τους, ευχαριστώ ιδιαίτερος τον κ. Παναγιώτη Κορνέζο, τον κ. Δημήτρη Χατζηρούμπη και την υποψήφια διδάκτορα Ερατώ Οικονομοπούλου που διευκόλυνε την πρόσβασή μου στο εργαστήριο, κυρίως τις απογευματινές ώρες.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αμέριστη στήριξη που μου προσέφεραν όλο αυτό το διάστημα.

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 υπαρχουσών κατασκευών και μόνο το 60% για νέες εγκαταστάσεις. Επίσης, είναι εμφανής η τάση για ενίσχυση και αποκατάσταση υφιστάμενων κατασκευών, κυρίως λόγω των 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:

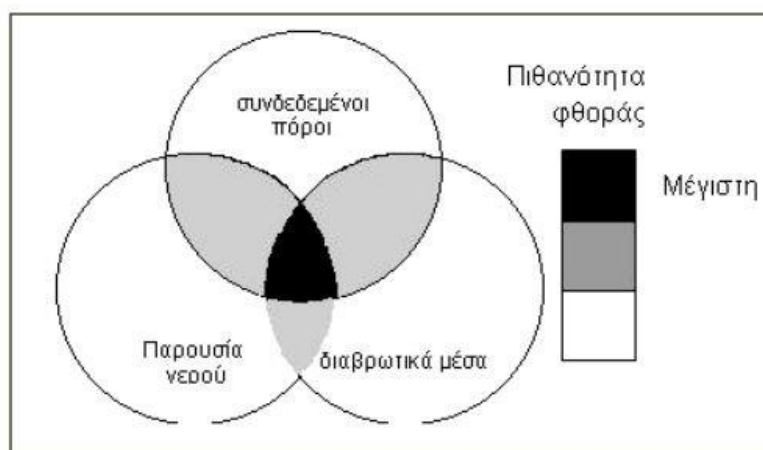
- το νερό
- ο ατμοσφαιρικός αέρας (O_2 , CO_2)
- το ειδικό περιβάλλον που μπορεί να βρίσκεται το σκυρόδεμα (SO_4^{-2} , Cl^- , O_2)

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 μέσο, 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 (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Παράγοντες ανθεκτικότητας

1.3 Το νερό ως παράγοντας φθοράς

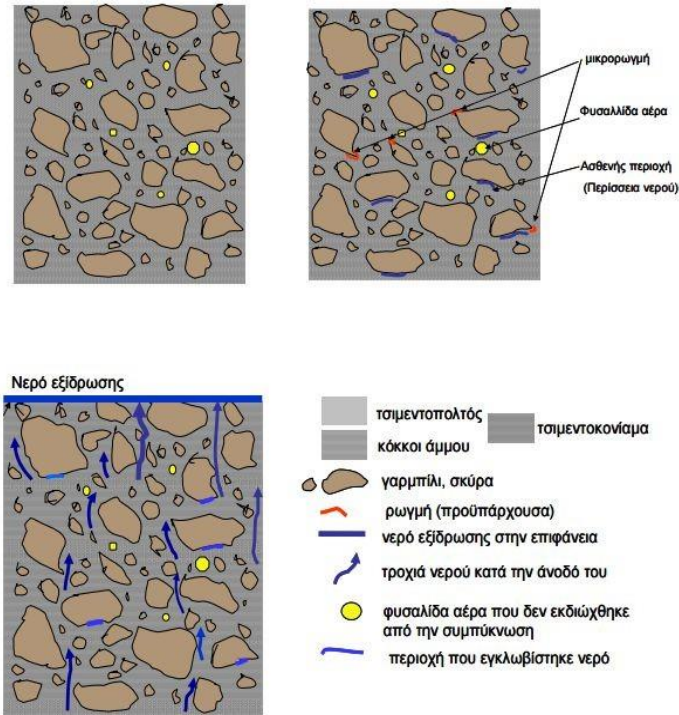
Το νερό αποτελεί τον πιο καθοριστικό παράγοντα για την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Τα μόρια του είναι πολύ μικρά κι επομένως είναι ικανά να διεισδύουν μέσα σε λεπτούς πόρους και κοιλότητες ενώ είναι αυτό που διαλύει τις περισσότερες ουσίες από οποιοδήποτε άλλο υγρό. Επίσης, συμμετέχει σχεδόν σε όλους 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, 4) το νερό επηρεάζει το πορώδες, αφού υψηλός λόγος w/c αυξάνει την ύπαρξη τριχοειδών πόρων, 5) αποτελεί το μέσο διάχυσης των διαβρωτικών συστατικών στους πόρους του 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 λεπτόκοκκα αδρανή (τσιμεντοκονίαμα) φαίνεται μακροσκοπικά ότι είναι ομοιογενές, ενώ το σκυρόδεμα παρουσιάζεται ως ένα ανομοιομορφο 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 (Εικόνα 2). 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 (Κόλιας Σ. 2011-12).

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.



Εικόνα 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.

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 απομένουν 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 $w/c = 0.23$ [Παπακόστα Α, & Τσιάρα Α. (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.

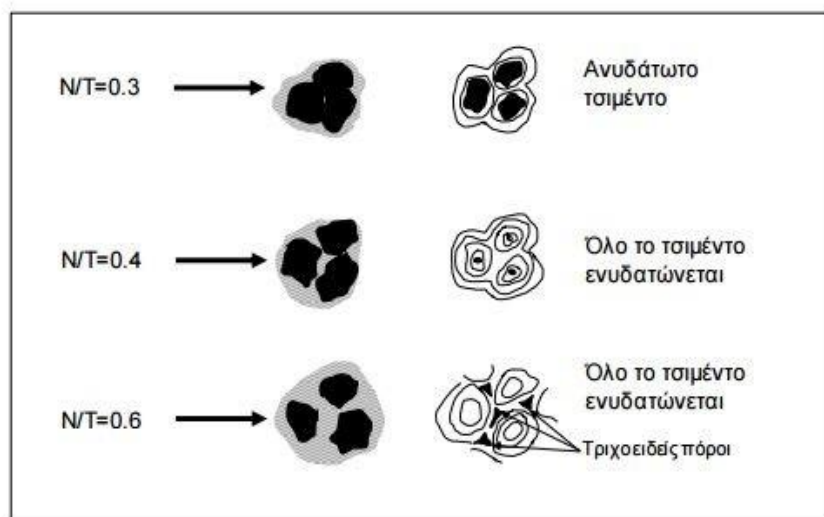
Όσο περισσότερο είναι το νερό σε σχέση με το τσιμέντο (μεγάλος λόγος w/c), τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ των προϊόντων ενυδάτωσης (πορώδες) των διπλανών κόκκων είναι σχετικά μεγάλα, με αποτέλεσμα η τάση που απαιτείται για να σπάσει αυτός ο «δεσμός» μεταξύ των προϊόντων αντίδρασης νερού-τσιμέντου να 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. Η επίδραση του λόγου N/T στο πορώδες φαίνεται στην *Εικόνα 3*.



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

Επιπρόσθετα, άλλο ένα σημείο το οποίο πρέπει να αναφερθεί, είναι ότι η μεταβολή του πορώδους στη διεπιφανειακή ζώνη τσιμεντοπολτού και αδρανών, 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 σκυροδέμα 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 σκυροδέμα 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 συνδυάζει 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 Διείσδυση 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 διείσδυση 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 διείσδυση 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, θειικό 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 [Μ. Φαρδής (2005)].

Στον Πίνακα 1 φαίνονται οι απαιτήσεις που θέτουν οι κανονισμοί διαφόρων χωρών για περιβάλλον κατηγορίας έκθεσης S1 (αέρας κορεσμένος σε θαλάσσια άλατα), περιβάλλον το οποίο απαντάται στη χώρα μας σε μεγάλο βαθμό.

Πίνακας 1: Ελάχιστη κατηγορία αντοχής σκυροδέματος, ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου, μέγιστος λόγος N/T κατά EN 206

	Μέγιστος N/T	Ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου	Ελάχιστη αντοχή
Γερμανία	0.50	300	C30/37
Αγγλία	0.50	340	C32/40
Γαλλία	0.55	330	C30/37
Ιταλία	0.50	340	C32/40
Ελλάδα (ΚΤΣ '97)	0.60	330	

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 [Μ. 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 αποστάσεις από την ακτή ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει χλωριούχα άλατα, ιδίως αν οι επικρατούντες άνεμοι κατευθύνονται από τη θάλασσα προς τη ξηρά. Στης 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 ενώσεις χλωριόντων

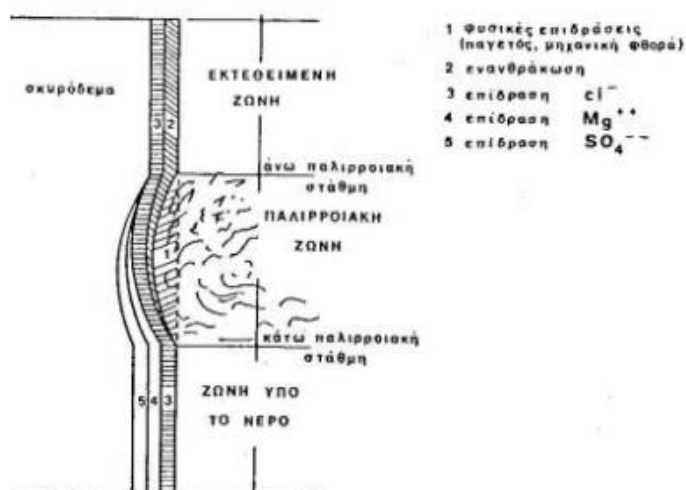
Πηγές χλωριόντων

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 **Regourd M. (1983)** και **Mather B. (1982)**, μια θαλάσσια κατασκευή η οποία έρχεται σε άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό, μπορεί να διακριθεί σε διάφορες ζώνες όπως στην *Εικόνα 4*. Στις ζώνες αυτές καθεμία από τις προαναφερθείσες φυσικές και χημικές δράσεις εμφανίζεται με διαφορετική ένταση (**Θ. Π. Τάσιος, Κ. Αλιζιγάκη, Αθήνα 1993**).



Εικόνα 4: Φθορά θαλάσσιας κατασκευής η οποία έρχεται σε άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό

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.

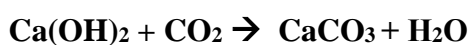
Μορφή χλωριόντων

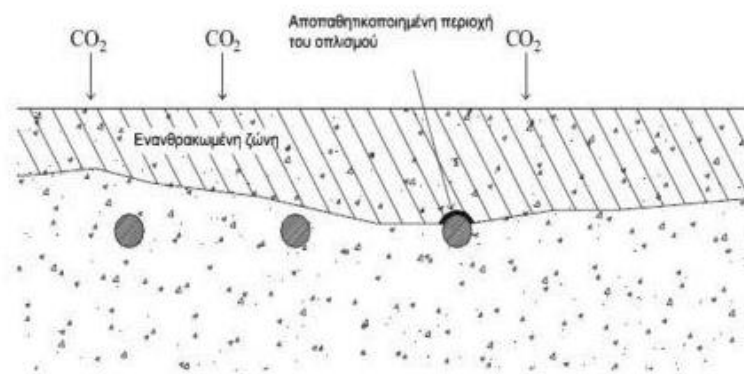
Τα συνολικά χλωριόντα (Cl_{-total}) που εμπεριέχονται στο σκυρόδεμα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: α) τα ελεύθερα χλωριόντα (Cl_{-free}) που συναντώνται εντός του πορώδους διαλυμένα στο υδατικό διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος και β) τα δεσμευμένα στη σκληρυμένη φάση του σκυροδέματος χλωριόντα (Cl_{bound}), τα οποία χωρίζονται με τη σειρά τους στα χημικώς δεσμευμένα και τα φυσικώς δεσμευμένα χλωριόντα [Κ. Σιδέρης (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 P. C. 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 $Ca(OH)_2$, 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).

Η μείωση του PH του σκυροδέματος σε τιμές κάτω του 9.0 οφείλεται στην χημική αντίδραση του $Ca(OH)_2$ 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 (Εικόνα 5). Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη μετατροπή του $Ca(OH)_2$ σε ανθρακικό ασβέστιο ($CaCO_3$) σύμφωνα με την αντίδραση:





Εικόνα 5: Διείσδυση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στον οπλισμό σκυροδέματος

Η όλη διαδικασία ονομάζεται ενανθράκωση του σκυροδέματος. Είναι αξιοσημείωτο να πούμε ότι η ενανθράκωση, η οποία για το οπλισμένο σκυρόδεμά έχει δυσμενείς επιπτώσεις, είναι η ίδια που οδηγεί στην σκλήρυνση του ασβέστη, στον ατμοσφαιρικό αέρα. Στην Εικόνα 6, φαίνεται η διαδικασία εκτίμησης του βάθους ενανθράκωσης του σκυροδέματος μετά από ψεκασμό με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης.



Εικόνα 6: Εκτίμηση βάθους ενανθράκωσης σκυροδέματος μετά από ψεκασμό με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης. Το τμήμα στο οποίο δεν παρουσιάζεται αλλαγή χρώματος (δεξιά) είναι ενανθρακωμένο (βάθος ενανθράκωσης περίπου 3 cm). Το αριστερό τμήμα (χρώμα ροζ-βυσσινί) δεν έχει ενανθρακωθεί.

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
- Ύπαρξη ρωγμών. Επιταχύνει πολύ τη διαδικασία ενανθράκωσης

- Ο λόγος N/T. Με μικρές τιμές του λόγου N/T περιορίζεται πολύ η διείσδυση υγρασίας και CO₂)
- Είδος τσιμέντου. Κατά τον **Ludwing U. & Singh N. B. (1986)**: τσιμέντα που περιέχουν σκωρίες υψικαμίνων και ποζολάνες ενανθρακώνονται πιο γρήγορα από το Portland, κατά τον **Matthews R. W. (1984)**: η προσθήκη ιπταμένων τεφρών στο τσιμέντο επιταχύνει την ενανθράκωση σε σκυροδέματα με αντοχή μικρότερη από 30 έως 35 MPa. Κατά τους **Zhu, A. R. (1982) και Tan X & Gong Y. (1983)**, η προσθήκη λιγνοσουλφόνης στο σκυρόδεμα σε ποσότητα 0.25% κ.β. μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης κατά 10 έως 30%.
- Η προσθήκη πυριτικής παιπάλης, επιταχύνει την ενανθράκωση

1.8 Μηχανισμοί διείσδυσης διαβρωτικών μέσων

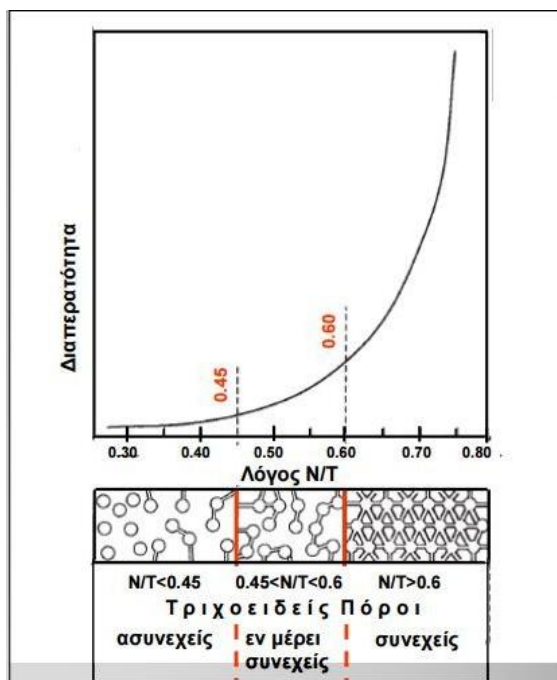
Τρεις είναι οι κύριοι μηχανισμοί με τους οποίους ξένες ουσίες μπορούν να εισχωρήσουν στο σκυρόδεμα, οι οποίοι μπορεί να δρουν είτε μεμονωμένα είτε ταυτόχρονα:

- 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)

1.8.1 Τριχοειδής απορρόφηση

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. Στην *Εικόνα 7*, φαίνεται η σχέση που υπάρχει μεταξύ τριχοειδών πόρων, υδατοδιαπερατότητας και λόγου N/T.



Εικόνα 7: Σχέση υδατοδιαπερατότητας, λόγου N/T και τριχοειδών πόρων

1.8.2 Υδατοπερατότητα

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

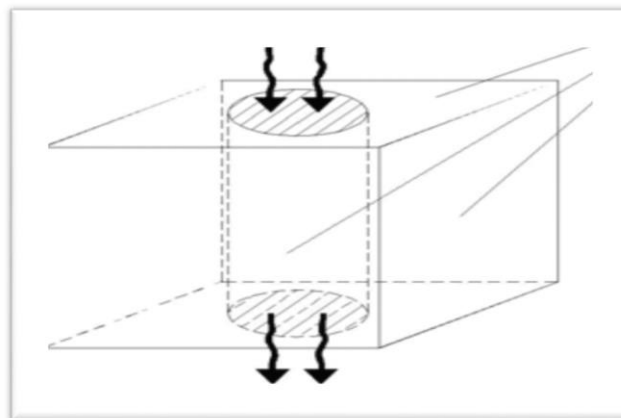
Κατά την αντίδραση ενυδάτωσης του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού, καταλυτικοί παράγοντες για την υδατοπερατότητά του είναι το μέγεθος και η συνέχεια των τριχοειδών πόρων του. Πόροι γεμάτοι με νερό σημαίνουν χαμηλή υδατοπερατότητα για το σκυρόδεμα. Αντίστοιχα, πόροι κενοί ή ακόρεστοι σημαίνουν υψηλή υδατοπερατότητα, 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

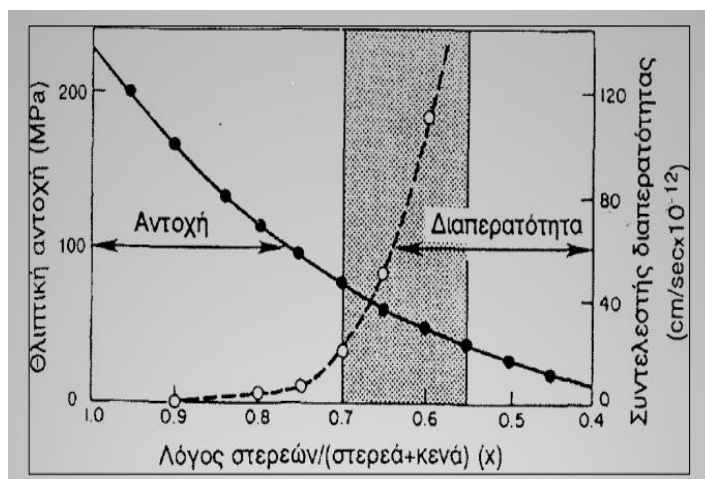
Τα αδρανή έχουν πολύ μικρότερο τριχοειδές πορώδες (συνήθως 3%, σπάνια ξεπερνάει το 10%), σε σχέση με το σκληρυθέν σκυρόδεμα. Ωστόσο, η υδατοπερατότητά τους είναι αυξημένη. Έτσι, ενώ υπάρχουν αδρανή όπως αυτά από μάρμαρο, βασάλτη, διορίτη και πυκνό γρανίτη που έχουν συντελεστή υδατοπερατότητας της τάξης του 1 έως 10×10^{-12} cm/s, κάποιες ποικιλίες από ασβεστόλιθο, ψαμμίτη και γρανίτη δίνουν τιμές δύο τάξεις 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 σκυρόδεμα, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η υδατοπερατότητά του. Στην *Εικόνα 8* απεικονίζεται σχηματικά η υδατοπερατότητα σε ένα δοκίμιο από σκυρόδεμα, ενώ στην *Εικόνα 9* φαίνεται η συσχέτιση των παραμέτρων της θλιπτικής αντοχής, της υδατοδιαπερατότητας.



Εικόνα 8: Σκαρίφημα απεικόνισης υδατοπερατότητας πρισματικού δοκιμίου



Εικόνα 9: Σχέση θλιπτικής αντοχής, υδατοδιαπερατότητας και λόγου στερεών προς στερεά και κενά

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.

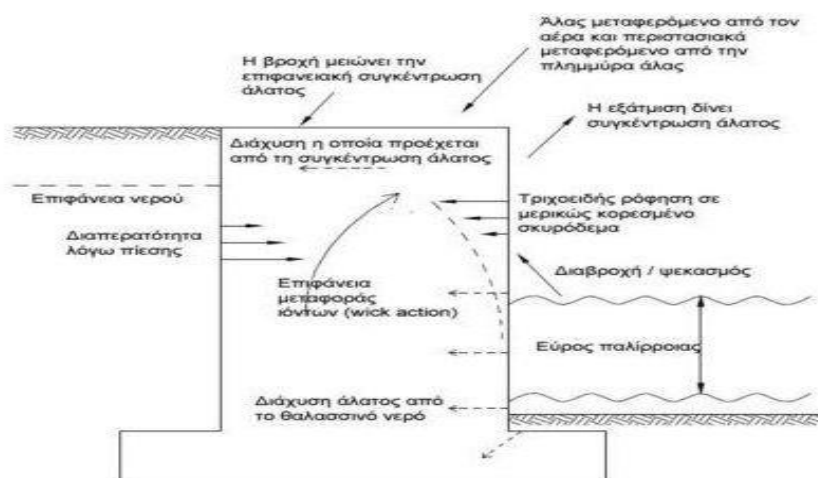
1.8.3 Μηχανισμός διείσδυσης (migration)

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 υγρή 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 αλληλεξαρτώμενες.

1.8.4 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 τη 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 διείδυση 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, στην *Εικόνα 10*, φαίνονται οι μηχανισμοί διείδυσης διαβρωτικών μέσων (Cl⁻) στο σκυρόδεμα.



Εικόνα 10: Μηχανισμοί μεταφοράς χλωριόντων στο σκυρόδεμα

1.9 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 Χ. Α. (2005)]. Πιο συγκεκριμένα:

Μέθοδοι προστασίας σκυροδέματος:

- Επιλογή του κατάλληλου πάχους επικάλυψης οπλισμού
- Διατήρηση λόγου w/c μεταξύ 0.4 έως 0.6
- Καλή διάστρωση, συμπύκνωση 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
- Καθοδική 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 την διαθεσιμότητα των υλικών 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 στη 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 και συγχρόνως μειώνεται η έκλυση CO₂ κατά την παραγωγή κλίνκερ. Τα σύνθετα τσιμέντα Portland παρουσιάζουν αναμφισβήτη βελτιωμένες ιδιότητες, οι κυριότερες από τις οποίες είναι: βελτιωμένη αντοχή έναντι θεικών και άλλων διαλυμάτων οξέων, χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης, βελτίωση χαρακτηριστικών σκυροδέματος (ανθεκτικότητα, προστασία οπλισμού), 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. Οι ποζελάνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως 'πρόσμικτα', αντικαθιστώντας κάποιο ποσοστό του τσιμέντου στο σκυρόδεμα όπου αντιδρώντας με το υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)₂), δημιουργούν αντίστοιχες τσιμεντοειδείς ενώσεις.

2.2 Ιπτάμενη Τέφρα (Fly Ash)

Η ιπτάμενη τέφρα (fly ash) (Εικόνα 11), αποτελεί το κύριο σε ποσότητα παραπροϊόν των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι ένα στερεό και κονιοδές 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 τόνοι/έτος, ενώ η συνολική παραγωγή της ιπτάμενης τέφρας έχει ξεπεράσει τους 13 x 10⁶ τόνοι/έτος.



Εικόνα 11: Ιπτάμενη τέφρα

Η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται ως πρόσμικτο στην παρασκευή σκυροδέματος, προσφέροντας στο σκυρόδεμα ενδιαφέρουσες τεχνολογικές βελτιώσεις με αποτέλεσμα να εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα κοινά τσιμέντα. Δε συμπεριφέρεται σαν απλή ποζολάνη και 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 C₃S και C₂S. 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 οξειδία 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 διευκρινιστεί 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 Μετακαολίνης (Metakaolin)

Ο μετακαολίνης (Εικόνα 12), 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% SiO_2 , 39.5% Al_2O_3 , 13.96% H_2O 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.



Εικόνα 12: μετακαολίνης

Ο καολινίτης, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 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 αργλικών 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 αλουμίτη (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 μετακαολίνη 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)].

2.4 Σκωρία Υψικαμίνου (Granulated Blast Furnace Slag)

Η σκωρία υψικαμίνου (Granulated Blast Furnace Slag) (Εικόνα 13), 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_2 , MnO , Al_2O_3 , P_2O_5 , S). Δημιουργείται όταν το μέταλλο 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 συνδυαστεί 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 13: Σκωρία Υψικαμίνου

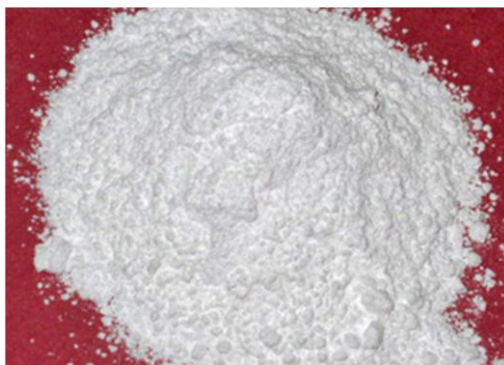
Λόγω των υδραυλικών ιδιοτήτων της σκωρίας, σωματίδια κοκκομετρίας μικρότερης από τα 10 μm συνεισφέρουν στις πρώιμες αντοχές, ενώ σωματίδια μεγαλύτερα από 10 μm και μικρότερα από 45 μm συνεισφέρουν στις τελικές αντοχές. Σωματίδια κοκκομετρίας μεγαλύτερης των 45 μm είναι δύσκολο να ενυδατωθούν. Η σκωρία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

Η σκωρία υψικαμίνου έχει πολλά πλεονεκτήματα ως πρόσθετο στο σκυρόδεμα, 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 Α. (2009)].

2.5 Πυριτική Παιπάλη (Silica Fume)

Η πρώτη δοκιμή της πυριτικής παιπάλης (Εικόνα 14) σε σκυροδέματα, πραγματοποιήθηκε το 1952. Το μεγαλύτερο εμπόδιο για τη διερεύνηση των ιδιοτήτων της πυριτικής παιπάλης ήταν η έλλειψη του υλικού, με το οποίο επρόκειτο να πειραματιστούν.



Εικόνα 14: Πυριτική παιπάλη

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 [Kanellopoulos et al (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 τσιμέντου 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^-), και προστατεύει το χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος από τη διάβρωση, ειδικά σε περιβάλλον πλούσιο σε χλωριόντα, όπως παράκτιες περιοχές αλλά και οδοστρώματα (λόγω της χρήσης των αποπαγωτικών αλάτων) ή και γέφυρες πάνω από τη θάλασσα.

3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

3.1 Εισαγωγή

Η ανθεκτικότητα είναι ένα θέμα που ενδιαφέρει ιδιαίτερω τον κατασκευαστικό κλάδο. Γι' αυτό το λόγο, έχει πραγματοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός ερευνών σε παγκόσμιο επίπεδο από επιστήμονες, μηχανικούς, πανεπιστημιακούς και φοιτητές, σχετικά με τους παράγοντες που την επηρεάζουν, με στόχο την επίτευξη της διατήρησης της αντοχής και της λειτουργικότητας των κατασκευών σε όλη η διάρκεια της ζωής τους.

Τα τελευταία χρόνια η ανάμιξη πρόσθετων υλικών σαν υποκατάστατα του τσιμέντου, ολοένα και αυξάνεται. Υλικά όπως η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία υψικαμίνου, η πυριτική παιπάλη και ο μετακαολίνης, έχουν κινήσει το ενδιαφέρον σε πολλούς για να μελετήσουν την επιρροή τους στην ανθεκτικότητα των κατασκευών. Παρακάτω ακολουθεί η παράθεση κάποιων ερευνών, σχετικά με την θλιπτική αντοχή, το ανοιχτό πορώδες, την τριχοειδή απορρόφηση, την διείδυση χλωριόντων και την πρόβλεψη διάρκειας ζωής σκυροδέματος.

3.2 Τρέχουσα ερευνητική δραστηριότητα

3.2.1 Θλιπτική αντοχή

Οι μελετητές **Khatib, J. M. & Hibbert, J. J.** το 2005, μελέτησαν την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος χρησιμοποιώντας σκωρία υψικαμίνου (granulated blast furnace slag, GBFS) και μετακαολίνη (metakaolin, MK). Ειδικότερα, για την παρασκευή του σκυροδέματος, χρησιμοποιήθηκαν τσιμέντο Portland (PC), σκωρία υψικαμίνου (GBFS), μετακαολίνης (MK), συλλεκτά και θραυστά αδρανή. Η αναλογία νερού με τα τσιμεντοειδή υλικά παρέμεινε 0.5 σε όλα τα μίγματα. Για τις δοκιμές θλιπτικής αντοχής λήφθηκαν κύβοι των 100 mm και παρασκευάστηκαν βάσει της μεθόδου BS1881-Part 116: 1983. Δημιουργήθηκαν 3 κύβοι με ποσοστό 40%, 60% και 80% GBFS, όπου παρατηρήθηκε ότι υπήρξε συστηματική μείωση στην θλιπτική αντοχή κατά τη διάρκεια των πρώτων ημερών όσο αυξανόταν το ποσοστό της GBFS. Από τις 28 μέρες και μέχρι τις 90 μέρες όμως, υπήρξε βελτίωση της στα σκυροδέματα με ποσοστό 40-60% σε σχέση με το αυτό που περιείχε μόνο PC. Παρ' όλα αυτά, το μείγμα με ποσοστό 80% GBFS είχε μειωμένη αντοχή σε όλη τη χρονική διάρκεια ωρίμανσης. Για τις συνθέσεις με υποκατάσταση 10% και 20% κατά βάρος του PC με MK, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αυξήθηκε σε όλες τις χρονικές περιόδους. Ειδικότερα παρατηρήθηκε ότι ο MK είναι ιδιαίτερα δραστικός τις πρώτες 14 μέρες όπου ο ρυθμός αύξησης της αντοχής είναι αρκετά υψηλότερος από αυτόν στο αμιγές σκυρόδεμα. Μετά τις 14 ημέρες, ο ρυθμός αύξησης παραμένει σταθερός. Τελικώς, οι μελετητές συμπέραναν ότι η χρήση της GBFS μέχρι και 60% μακροχρόνια είναι θετική για την θλιπτική αντοχή ενώ η χρήση του MK μέχρι 20% κ.β. είναι αποδοτική από τις πρώτες μέρες.

Οι **Beycioğlu A. & Aruntas H. Y.** το 2014 μελέτησαν την επίδραση της ιπτάμενης τέφρας χαμηλού ασβεστίου (low lime fly ash, LLFA), σκωρίας υψικαμίνου (granulated blast furnace slag, GBFS) και του μικρονισμένου ασβεστίτη (micronized calcite, MC) στις μηχανικές ιδιότητες αυτοσυμπικνούμενου σκυροδέματος (SCC). Συγκεκριμένα,

αντικαταστάθηκε το τσιμέντο Portland από LLFA και GBFS σε ποσοστό 20%, 40% και 60% κατά βάρος. Για τις δοκιμές θλιπτικής αντοχής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος **BS EN 12390-3**. Οι μελετητές συμπεράναν ότι αντικαθιστώντας σε μεγάλο ποσοστό το τσιμέντο με LLFA και GBFS, μέχρι και 60% κατά βάρος, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος μειώθηκε τις πρώτες μέρες αλλά οι μειώσεις αυτές σταμάτησαν στις 90 μέρες. Επίσης ακόμα και στην αντικατάσταση με 60% κ.β. βρήκαν ότι μπορεί να παραχθεί αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα συμβατικής αντοχής στις 28 μέρες.

Το 2017, οι **Gill A. S. & Siddique R.** μελέτησαν την αντοχή και την μικροδομή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος χρησιμοποιώντας μετακαολίνη (metakaolin, MK) και τέφρα φλοιού ρυζιού (rice husk ash, RHA). Ειδικότερα, υπήρξε αντικατάσταση του τσιμέντου με τον μετακαολίνη σε ποσοστό 5%, 10% και 15% κατά βάρος. Οι δοκιμές θλιπτικής αντοχής έγιναν στις 7 και στις 28 μέρες. Από παλιότερες μελέτες οι ερευνητές περίμεναν μία αύξηση της τάξης του 24% στις 28 μέρες σε συσχέτιση με το μίγμα ελέγχου. Όντως είχαν παρόμοια αποτελέσματα καθώς βρήκαν ότι υπήρξε αύξηση 25% και πως η βέλτιστη θλιπτική αντοχή παρουσιάζόταν όταν το ποσοστό του μετακαολίνη ήταν 10-15%.

Οι μελετητές **Stratoura M., Iaz D. R. & Badogiannis E.**, το 2018 μελέτησαν 9 διαφορετικά ελαφριά κονιάματα με ελαφρόπετρα σαν αδρανές. Για τα μίγματα εκτός από τσιμέντο Portland ASTM C-150 type I/II, χρησιμοποιήθηκαν και 4 τσιμεντοειδή υλικά σαν υποκατάστατα, σε ποσοστά 10% και 20% κ.β. ο μετακαολίνης (meakaolin, MK), η ιπτάμενη τέφρα (flying ash, FA), η σκωρία υψικαμίνου (granulated blast furnace slag, GBFS) και η πυριτική παίπαλη (silica fume, SF). Οι δοκιμές θλιπτικής αντοχής έγιναν σε κυβοειδή δοκίμια, 3 ανά σύνθεση, μετά από 2, 7, 14, 28 και 90 ημέρες, ενώ τα δοκίμια διατηρούνταν στο νερό. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών παρατηρήθηκε ότι την μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή την παρουσιάζει το μίγμα που περιέχει 20% MK. Το μίγμα που περιείχε 20% SF ενώ είχε τη μικρότερη αντοχή τις 2 πρώτες μέρες στις 90 μέρες είχε την δεύτερη μεγαλύτερη, ενώ σε σύγκριση με το 10% MK (είχε την τρίτη μεγαλύτερη αντοχή) είχαν την ίδια περίπου στις 28 μέρες αλλά με μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης. Στις 90 μέρες τα μίγματα με 10% FA, SF και GBFS είχαν περίπου την ίδια αντοχή, ενώ τα μίγματα με 20% των παραπάνω παρουσίασαν αύξηση αυτής από τις 28 μέχρι τις 90 ημέρες, έχοντας επίσης παρόμοιες τιμές. Άρα συμπερασματικά, βάση των δοκιμών, η πρόσθεση των FA και SF σε υψηλά ποσοστά μειώνει την θλιπτική αντοχή τις πρώτες μέρες αλλά με την πάροδο του χρόνου και τα 4 υλικά, SF, MK, FA, GBFS βοηθούν στην αύξησή της σε σχέση με το κονίαμα αναφοράς, όπου χρησιμοποιήθηκε μόνο PC.

3.2.2 Ανοιχτό πορώδες

Το 2019, οι μελετητές **Saboo N., Shivhare S., Kori K. K., & Chandrappa A. K.** (2019) μελέτησαν την επίπτωση που θα έχει η χρησιμοποίηση ιπτάμενης τέφρας (FA) και μετακαολίνης (MK), ως υποκατάστατα του τσιμέντου Portland, στις μηχανικές ιδιότητες διαπερατού σκυροδέματος (previous concrete). Το ποσοστό της FA ποίκιλλε από 0-20%, ενώ το ποσοστό του MK περιορίστηκε από 0-2% για να αποφευχθεί η πιθανότητα να υπάρξει μειωμένη εργασιμότητα ή αύξηση κολλώδους περιεκτικότητας του σκυροδέματος. Η αναλογία νερού με τσιμεντοειδή υλικά διατηρήθηκε 0.3 σε όλα τα σκυροδέματα. Για τον καθορισμό του πορώδους χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο ASTM C1754. Με την αύξηση του μετακαολίνης αλλά και της ιπτάμενης τέφρας, το πορώδες έδειξε

μία τάση μείωσης. Ειδικότερα υπήρξε μια μεγάλη μείωση στο πορώδες της τάξης του 10% όταν χρησιμοποιήθηκε ο μετακαολίνης σε ποσοστό 2%. Επίσης παρατηρήθηκε μεγαλύτερη μείωση του στο μίγμα που περιείχε 15% FA από αυτό που περιείχε FA 5%.

Οι μελετητές **Sfikas I. P., Kanellopoulos A., Trezos K. G., & Petrou M. F.**, το 2012 μελέτησαν, σε δύο διαφορετικά εργαστήρια, τις ρεολογικές παραμέτρους, τα μηχανικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες ανθεκτικότητας αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (SCC) και συμβατικού συμπυκνούμενου σκυροδέματος (NVC). Στο κάθε εργαστήριο υπήρχαν 6 μίγματα SCC με διαφορετική αναλογία νερού/τσιμεντοειδών υλικών και διαφορετικά ποσοστά πυριτικής παιπάλης (SF) ως υποκατάστατο του τσιμέντου, καθώς και 2 μίγματα NVC. Στα 2 εργαστήρια χρησιμοποιήθηκαν παρόμοια αδρανή, τσιμέντο Portland και SF σε ποσοστά 0-20% κ.β. Συγκεκριμένα τα 3 μίγματα SCC είχαν διαφορετική αναλογία νερού/τσιμέντου (PC), 0.45, 0.5 και 0.6 και τα άλλα 3 μίγματα SCC είχαν ίδια αναλογία νερού/τσιμεντοειδών υλικών, 0.5, αλλά διαφορετικά ποσοστά SF, 7%, 15%, 20% κ.β. Για τον υπολογισμό του πορώδες, για κάθε μίγμα χρησιμοποιήθηκε ένας κύβος διαστάσεων 100 mm, σύμφωνα με το ASTM C642-97. Παρατηρήθηκε ότι υπήρξε αύξηση του πορώδες με την αύξηση της αναλογίας νερού/τσιμέντου. Αντίθετα με την αύξηση του ποσοστού της SF υπήρξε μείωσή του, εκτός από το μίγμα με SF 15% στο ένα εργαστήριο όπου παρατηρήθηκε πολύ μεγάλη αύξηση. Η συγκεκριμένη μέτρηση δεν λήφθηκε υπόψιν καθώς θεωρήθηκε υπερεκτιμημένη.

Οι μελετητές **Badogiannis E. G., Sfikas I. P., Voukia D. V., Trezos K. G. & Tsivilis S. G.**, το 2015 μελέτησαν την ανθεκτικότητα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (SCC) ενσωματώνοντας σε αυτό μετακαολίνη (MK). Για την προετοιμασία του μείγματος, αντικατέστησαν σε διάφορα ποσοστά είτε το τσιμέντο, είτε το λεπτομερές υλικό (filler) με αυτόν. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 9 μείγματα. Το πρώτο, το αμιγές, περιείχε μόνο τσιμέντο και ασβεστολιθικό φίλερ. Στα επόμενα 4 αντικατέστησε σε διάφορα ποσοστά ο μετακαολίνης το τσιμέντο, ενώ στα 4 τελευταία το λεπτομερές υλικό. Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε ήταν CEM II/B-M (P-W-L) 42.5 N και το λεπτομερές υλικό περιείχε 97.6% ανθρακικό ασβέστιο, χαρακτηρίζοντάς την υψηλής ποιότητας. Η αναλογία νερού/τσιμεντοειδών υλικών παρέμεινε σταθερή, 0.6, σε όλα τα μείγματα. Υπολογίστηκε το ανοιχτό πορώδες και παρατηρήθηκε μία βελτίωση όταν χρησιμοποιήθηκε MK σαν πρόσθετο σε σχέση με το αμιγές μείγμα. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη μείωση στο πορώδες όταν αντικαταστάθηκε το τσιμέντο από τον MK, με ελάχιστη τιμή όταν ο λόγος του MK προς το τσιμέντο ήταν 14%. Για τα μείγματα όπου ο MK αντικατέστησε την ασβεστολιθική σκόνη, η μείωση του πορώδες είναι μεγαλύτερη σε αυτά που είχαμε μικρότερη αντικατάσταση.

Οι μελετητές **Stratoura M., Iaz D. R. & Badogiannis E.**, το 2018 υπολόγισαν το ανοιχτό πορώδες στο κάθε μίγμα σύμφωνα με το American Standard ASTM C 642 όπου τα δείγματα ζυγίζονται κορεσμένα κάτω από το νερό, στον αέρα και αφού ξηραθούν στο φούρνο στους 105 °C. Συμπερασματικά, τα περισσότερα τσιμεντοειδή που χρησιμοποιήθηκαν δεν το επηρέασαν σημαντικά. Από την στιγμή που χρησιμοποιήθηκαν ελαφριά αδρανή στα κονιάματα ήταν αναμενόμενο ένα μεγάλο πορώδες. Το κονίαμα με τον μετακαολίνη σε ποσοστό 20% παρουσίασε το χαμηλότερο, ακολουθούμενο από αυτό με την σκωρία σε ποσοστό 20%.

3.2.3 Τριχοειδής απορρόφηση

Οι μελετητές **Güneyisi E., Gesoğlu M., Karaoğlu S., & Mermerdaş K.** το 2012 μελέτησαν την επιρροή του μετακαολίνης (MK) και της πυριτικής παιπάλης (SF), σαν υποκατάστατα του τσιμέντου, στις μηχανικές ιδιότητες, στην συρρίκνωση και στην διαπερατότητα σκυροδέματος υψηλής απόδοσης (HPC). Εκτός από τα 2 παραπάνω, χρησιμοποιήθηκαν τσιμέντο Portland (PC) CEM I 42.5R, θραυστά και συλλεκτά αδρανή, όπως άμμος και χαλίκι, καθώς και πολυκαρβοξυλικός αιθέρας σαν ρευστοποιητής. Συνολικά δημιουργήθηκαν 10 σκυροδέματα, χωρισμένα σε 2 ομάδες, με την πρώτη ομάδα να έχει αναλογία νερού/τσιμεντοειδών υλικών 0.25 και την δεύτερη 0.35. Στην κάθε ομάδα υπήρξε ένα σκυρόδεμα μόνο με PC, αμιγές σκυρόδεμα, δύο με 5% και 15% κατά βάρος MK και δύο με 5% και 15% κ.β. SF. Για τον υπολογισμό της τριχοειδούς απορρόφησης λήφθηκαν από κάθε σκυρόδεμα 3 κύβοι διαστάσεων 100mm. Γενικά παρατηρήθηκε ότι τα σκυροδέματα με MK και SF παρουσίασαν βελτίωση σε σχέση με τα αμιγή στην απορρόφηση του νερού. Συγκεκριμένα, υπήρξε μία τάση μείωσης της τριχοειδούς απορρόφησης όσο μικρυνε η αναλογία νερού/τσιμεντοειδών υλικών, της τάξης του 20%, και όσο αυξανόταν τα ποσοστά του MK και της SF. Ειδικότερα, στο MK15 υπήρξε μείωση 29% και στις 2 ομάδες ενώ στο SF15 υπήρξε μείωση 30% και 20% στις αναλογίες 0.25 και 0.35 αντιστοίχως. Άρα, οι μελετητές συμπέραναν ότι τα σκυροδέματα με SF παρουσίαζαν μεγαλύτερη ευαισθησία στις αλλαγές της αναλογίας νερού/τσιμεντοειδών υλικών.

Το 2016, οι μελετητές **Leung H. Y., Kim J., Nadeem A., Jaganathan J. & Anwar M. P.** μελέτησαν την τριχοειδής απορρόφηση για αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα που περιείχαν ιπτάμενη τέφρα (FA) και πυριτική παιπάλη (SF) σαν υποκατάστατα του τσιμέντου. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Portland σαν το κύριο συνδετικό υλικό, πυριτική άμμος σαν συλλεκτό αδρανές και θραυσμένος γρανίτης, με μέγιστη διάμετρο 10 mm, σαν θραυστό αδρανές και ένα καρβοξυλικό πολυμερές σαν ρευστοποιητής. Δημιουργήθηκαν 2 ομάδες σκυροδεμάτων. Στην πρώτη ομάδα το τσιμέντο αντικαταστάθηκε από FA σε ποσοστά 0% (αμιγές σκυρόδεμα), 12.9%, 20%, 30%, 40% και 50% κατά βάρος και στη δεύτερη ομάδα διατηρήθηκε η FA σε ποσοστό 25% κ.β. αντικαταστάθηκε το τσιμέντο από SF σε ποσοστά 0%, 5%, 10% και 15%. Η αναλογία νερού/τσιμεντοειδών υλικών διατηρήθηκε στο 0.38 για όλες τις συνθέσεις. Παρατηρήθηκε ότι το αμιγές σκυρόδεμα έχει και την μεγαλύτερη τριχοειδής απορρόφηση καθώς η παρουσία FA και SF την μειώνει. Μάλιστα αν η παρουσία των δύο αυτών υποκατάστατων ξεπερνά το 40% κ.β. παρουσιάζεται μία μείωση μεγαλύτερη από 50%. Στις συνθέσεις όπου χρησιμοποιήθηκε μόνο FA η μείωση έγινε αισθητή όταν το ποσοστό της ξεπέρασε το 20%. Επίσης, η παρουσία και των δύο υποκατάστατων στο σκυρόδεμα έδειξε μεγαλύτερη μείωση από την παρουσία μόνο της FA, άρα η SF επηρεάζει περισσότερο την τριχοειδή απορρόφηση.

Οι **Majhi R. K., & Nayak A. N.** το 2019 μελέτησαν την επιρροή σκωρίας υψικαμίνου (GBFS) σαν υποκατάστατο του τσιμέντου, σε σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα αδρανή (recycled aggregate concrete, RAC). Το κύριο συνδετικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν τσιμέντο (Original Portland Cement of 43 Grade, OPC). Για συμβατικά αδρανή χρησιμοποιήθηκε πυριτική άμμος σαν συλλεκτό και θραυσμένος γρανίτης σαν θραυστό, ενώ για ανακυκλώσιμο, θράυστηκε σκυρόδεμα προκατασκευασμένων στοιχείων ηλικίας 9 χρόνων 20 mm, συνδεδεμένο με παλιό κονίαμα

τσιμέντου (recycled coarse aggregate, RCA). Για τη μελέτη δημιουργήθηκαν 7 σκυροδέματα. Το πρώτο ήταν το αμιγές, όπου περιείχε μόνο OPC και συμβατικά αδρανή. Τα υπόλοιπα 6 RAC παράχθηκαν χρησιμοποιώντας GBFS σε ποσοστά 0%, 40% και 60% κ.β. σαν υποκατάστατο του OPC, με την κάθε σύνθεση να αποτελείται από 50% ή 100% RCA διαδοχικά. Το πείραμα της τριχοειδής έγινε σύμφωνα με το ASTM C1585, στις 28 και στις 90 ημέρες. Παρατηρήθηκε ότι οι διαφορές ανάμεσα στις συνθέσεις στις 28 και στις 90 ημέρες είναι παρόμοιες. Με την χρησιμοποίηση των RCA 50% και 100% η απορρόφηση του νερού αυξήθηκε σε σχέση με το αμιγές σκυρόδεμα και στις 2 χρονικές περιόδους. Όμως με την χρησιμοποίηση GBFS, τόσο σε ποσοστό 40%, όσο και σε 60%, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της και στις 2 χρονικές περιόδους. Όλοι οι συνδυασμοί της GBFS με RCA έδειξαν μείωση της απορρόφησης σε σχέση με το αμιγές σκυρόδεμα. Άρα οι μελετητές θεώρησαν την συνεργασία αυτών των δύο υλικών ιδιαίτερα ικανοποιητική.

Στην μελέτη των **Stratoura M., Iaz D. R. & Badogiannis E**, το 2018 για τον υπολογισμό της τριχοειδής απορρόφησης για κάθε σύνθεση χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια κονιάματος, διαμέτρου 100 mm και ύψους 50 mm. Η δοκιμή έγινε στις 28 ημέρες. Παρατηρήθηκε ότι η χαμηλότερη τιμή παρουσιάστηκε στη σύνθεση με τον μετακαολίνη σε ποσοστό 10%. Επίσης οι συνθέσεις με SF 10% και 20% είχαν σχεδόν τις ίδιες τιμές, οπότε το ποσοστό της δεν επηρεάζει την τριχοειδής απορρόφηση και τα κονιάματα που περιείχαν FA 20% και GBFS 20% έδειξαν μείωση στην τιμή της, σε σχέση με αυτά που περιείχαν 10%, αντίστοιχα.

3.2.4 Διείσδυση χλωριόντων

Οι μελετητές **Teng S., Lim T. Y. D. & Divsholi B. S.**, το 2012 μελέτησαν την επιρροή της υπέρλεπτης σκωρίας υψικαμίνου (UFGGBS) στις μηχανικές ιδιότητες και στην ανθεκτικότητα συμβατικού σκυροδέματος. Στην συγκεκριμένη μελέτη δημιουργήθηκαν 4 συνθέσεις, χρησιμοποιώντας τσιμέντο Portland (OPC). Οι συνθέσεις A και B είχαν αναλογία νερού/τσιμεντοειδών υλικών 0.35, με την πρώτη να είναι το αμιγές σκυρόδεμα και την δεύτερη να έχει σαν υποκατάστατο του τσιμέντου την UFGGBS σε ποσοστό 30% κατά βάρος, ενώ οι συνθέσεις Γ και Δ είχαν αναλογία νερού/τσιμεντοειδών υλικών 0.28, με την Δ να έχει 30% UFGGBS κ.β. σαν υποκατάστατο τσιμέντου. Για τον υπολογισμό του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων χρησιμοποιήθηκε το NordTest BUILD 492, με τις δοκιμές να γίνονται στις 3, 28, 56 και 90 ημέρες, χρησιμοποιώντας για την κάθε σύνθεση 3 κυλίνδρους ύψους 50 mm. Οι κύλινδροι υποβλήθηκαν στην μέθοδο της επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων (Rapid Chloride Migration Test, RCMT). Παρατηρήθηκε ότι οι συνθέσεις με τη UFGGBS παρουσίαζαν μικρότερους συντελεστές διείσδυσης χλωριόντων από αυτές που αποτελούνταν μόνο από τσιμέντο, ανεξαρτήτου της χρονικής περιόδου των πειραμάτων. Επίσης οι τιμές τους μειωνόταν με την πάροδο του χρόνου. Συγκεκριμένα από τις 3 μέχρι τις 28 ημέρες η σύνθεση B παρουσίασε μεγαλύτερη βελτίωση από την σύνθεση A, σε ποσοστό 25%, ενώ η σύνθεση Δ 88% σε σχέση με τη σύνθεση Γ. Στις 28 ημέρες η αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων χαρακτηρίστηκε «μέτρια», «υψηλή», «υψηλή» και «εξαιρετικά υψηλή» αντίστοιχα για κάθε σύνθεση, ενώ μεγάλωνε με την πάροδο του χρόνου και για τις 4. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η παρουσία της UFGGBS σε ποσοστό 30% κ.β. συνέβαλε περισσότερο στην αντίσταση από την μείωση της αναλογίας νερού/τσιμεντοειδών υλικών από 0.35 σε 0.28.

Το 2018, οι **Nadesan M. S. & Dinakar P.** μελέτησαν την πιθανότητα να κατασκευαστεί σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης με ελαφριά αδρανή, χρησιμοποιώντας σαν αδρανές φρύγματα ιπτάμενης τέφρας, καθώς και την επιρροή της πυριτικής παιπάλης (SF) και του μετακαολίνης (MK) σε αυτό. Εκτός από τα παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Portland (Ordinary Portland cement, 53 grade) σαν κύριο συνδετικό υλικό, άμμος σαν συλλεκτό αδρανές και η ιπτάμενη τέφρα σαν θραυστό. Δημιουργήθηκαν 10 διαφορετικές συνθέσεις, οι 5 με αναλογία νερού/τσιμενοειδών υλικών 0.25 και οι άλλες 5 με 0.35. Σε κάθε μία από αυτές τις 2 ομάδες υπήρχε μία σύνθεση μόνο με τσιμέντο, αμιγές σκυρόδεμα, 2 με ποσοστό μετακαολίνης 10% και 15% κατά βάρος, σαν υποκατάστατο του τσιμέντου, και άλλες 2 με ποσοστό πυριτικής παιπάλης 10% και 15% κ.β. Για τον υπολογισμό του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων (RCMT) σύμφωνα με το NordTest BUILD 492. Οι δοκιμές έγιναν στις 28 και στις 90 ημέρες, χρησιμοποιώντας 3 δίσκους για κάθε σύνθεση διαμέτρου 100 mm και ύψους 50 mm. Παρατηρήθηκε ότι η παρουσία των 2 τσιμεντοειδών υλικών είχε θετική δράση και για τις 2 ομάδες συνθέσεων. Αυτές που περιείχαν MK15 ή SF15 παρουσίασαν τους μικρότερους συντελεστές και μάλιστα η αντίσταση τους στην διείσδυση χλωριόντων χαρακτηρίστηκε «πολύ υψηλή» στις 90 ημέρες. Και στις 2 αναλογίες νερού-συνδετικού υλικού τα σκυροδέματα με SF παρουσίασαν καλύτερη συμπεριφορά από αυτά με MK. Συμπερασματικά, η αναλογία νερού-συνδετικού υλικού, το είδος του συνδετικού υλικού και ο χρόνος συντήρησης του σκυροδέματος παίζουν σημαντικό ρόλο στην διείσδυση των χλωριόντων. Μάλιστα, στο αμιγές σκυρόδεμα μειώθηκε στο μισό από τις 28 μέχρι τις 90 ημέρες, υποδεικνύοντας ότι ο χρόνος συντήρησης είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας από αυτούς.

Οι **Stratoura M., Iaz D. R. & Badogiannis E.**, το 2018 εκτίμησαν την διείσδυση των χλωριόντων σε κάθε κονίαμα υπολογίζοντας τον συντελεστή διείσδυσης βάσει του NordTest BUILD 492 με τη μέθοδο της επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων (RCMT). Για κάθε σύνθεση ένας δίσκος πάχους 50 mm λήφθηκε από τη μέση κάθε κυλίνδρου διαμέτρου 100 mm, στις 28 ημέρες. Παρατηρήθηκε ότι η αντίσταση στα χλωριόντα ήταν «υψηλή» ή ακόμα και «αρκετά υψηλή» σε κάποιες περιπτώσεις. Οι συνθέσεις που προστέθηκε ο μετακαολίνης παρουσίασαν μικρότερη αντίσταση από αυτές που περιείχαν τα υπόλοιπα τσιμεντοειδή, αν και ήταν αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του αμιγές κονιάματος. Αυτές, ειδικότερα, που περιείχαν 20% κ.β. υποκατάστατα τσιμεντοειδών έδειξαν μεγαλύτερη αντίσταση στα χλωριόντα από τις αντίστοιχες που περιείχαν 10%. Ο μικρότερος συντελεστής εμφανίστηκε στο κονίαμα που περιείχε SF 20% κατά βάρος σαν υποκατάστατο του τσιμέντου, όπως αναμενόταν, λόγω της ιδιότητας του να πληρώνει τους πόρους.

Οι μελετητές **Yu B., Ma Q., Huang H. C., & Chen Z.** το 2019 μελέτησαν την επιρροή σημαντικών παραμέτρων, όπως η αναλογία νερού/συνδετικού υλικού και η χρησιμοποίηση ιπτάμενης τέφρας (FA) και σκωρίας (SG) ως υποκατάστατα του τσιμέντου, στην τιμή του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων. Συνολικά, εξετάστηκαν 295 δοκίμια με τη μέθοδο της γρήγορης εισχώρησης χλωριόντων (RCMT), βασισμένη στο NT Build 492 και στο IBAC, στις 28 ημέρες. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια είχαν αναλογία νερού/τσιμεντοειδών υλικών από 0.3 μέχρι 0.6, το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τσιμέντο Portland (OPC), το ποσοστό ιπτάμενης τέφρας σαν υποκατάστατο του τσιμέντου κυμαινόταν από 0 μέχρι 70% κατά βάρος, το ποσοστό σκωρίας από 0 έως 80% κ.β. ενώ στις συνθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν και τα 2 τσιμεντοειδή υλικά το συνολικό ποσοστό και των 2 ανερχόταν από 0-75% κ.β. με τη FA να είναι από 0-45%. Παρατηρήθηκε ότι όσο

αυξανόταν η αναλογία νερού τσιμέντου, τόσο αυξανόταν και ο συντελεστής διείδυσης χλωριόντων. Αντίθετα με την αύξηση της SG υπήρξε μείωση του. Στις συνθέσεις όπου υπήρξε FA, ο συντελεστής παρουσίαζε μείωση όσο αυξανόταν το ποσοστό της μέχρι περίπου το 30% κ.β. Στη συνέχεια με την αύξηση του ποσοστού της, υπήρξε και αύξηση στην τιμή του συντελεστή.

3.2.5 Πρόβλεψη διάρκειας ζωής σκυροδέματος

Οι μελετητές **Yu Z. & Ye G.**, το 2013 προσπάθησαν να καθορίσουν τον χρόνο αναφοράς σκυροδέματος με ιπτάμενη τέφρα (FA) για την πρόβλεψη διάρκειας ζωής του, καθώς η FA δεν έχει πλήρως ενεργοποιηθεί μετά τις πρώτες 28 ημέρες, σε αντίθεση με το τσιμέντο ή κάποια άλλα πρόσθετα, όπως την πυριτική παιπάλη ή την σκωρία υψικαμίνου. Το ποσοστό FA σαν υποκατάστατο του τσιμέντου Portland ήταν 30% και 50% κατά βάρος και η αναλογία νερού τσιμεντοειδών υλικών 0.4, 0.5 και 0.6. Η επιταχυνόμενη διείδυση χλωριόντων έγινε σύμφωνα με το NT Build 492, στις 28, 90, 180, 360 και 720 ημέρες. Στις συνθέσεις χωρίς FA, η διαφορά του συντελεστή διείδυσης χλωριόντων είναι πολύ μικρή με την πάροδο του χρόνου μετά τις 28 ημέρες. Αντίθετα σε αυτές με FA υπήρχε μία μεγάλη μείωσή του. Επίσης με την μείωση της αναλογίας νερού/τσιμεντοειδών βλέπουμε μια μείωση του συντελεστή. Από τις 28 ημέρες μέχρι τις 720 η σχέση μεταξύ του συντελεστή και της αναλογίας είναι γραμμική στα σκυροδέματα με FA. Στις 180 ημέρες παρατηρήθηκε ότι σε αυτά υπήρξε μία σχετική σταθερότητα ως προς τη δομή τους, έτσι οι μελετητές αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σαν χρόνο αναφοράς για την πρόβλεψη των χρόνων ζωής τους. Για την πρόβλεψη χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο DuraCrete, για την σύνθεση με 50% κ.β. FA και αναλογία νερού/τσιμεντοειδών 0.4, σε συνθήκες θαλάσσιου περιβάλλοντος. Με χρόνο αναφοράς τις 28 ημέρες το μοντέλο προέβλεψε χρόνο ζωής του σκυροδέματος τα 33 χρόνια, ενώ με χρόνο αναφοράς τις 180, προέβλεψε 620 χρόνια. Συμπερασματικά, η διάρκεια ζωής του σκυροδέματος με FA υποτιμείται σε μεγάλο βαθμό, με χρόνο αναφοράς τις 28 ημέρες.

Το 2013, οι **Van den Heede P., Maes M. & De Belie N.** μελέτησαν τη διάρκεια ζωής οπλισμένου ρηγματωμένου σκυροδέματος με τσιμεντοειδή πρόσθετα, πυριτική παιπάλη (SF) και ιπτάμενη τέφρα (FA), σε θαλάσσιες συνθήκες. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν 2 συνθέσεις. Στην πρώτη χρησιμοποιήθηκε μόνο τσιμέντου Portland (OPC) και αναλογία νερού/τσιμέντου 0.45 (T(0.45)) και θεωρήθηκε το αμιγές σκυροδέμα. Στην δεύτερη το συνδετικό υλικό αποτελούνταν από τρία υλικά, OPC, FA και SF, σε ποσοστά κατά βάρος 50%, 40% και 10%, αντίστοιχα, με αναλογία νερού/τσιμεντοειδών υλικών 0.35 (SF(0.35)). Μετρήθηκαν οι συντελεστές διείδυσης χλωριόντων σύμφωνα με το NT Build 492, στις 28 ημέρες. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας αυτούς τους συντελεστές, υπολογίστηκε η διάρκεια ζωής τους, με τη βοήθεια ενός σχεδιαστικού κώδικα που παρέχει τα απαραίτητα πιθανοτικά μοντέλα, τον Fib Bulletin 34. Παρατηρήθηκε ότι η διάρκεια ζωής του T(0.45) είναι πολύ μικρότερη από 100 χρόνια (25 χρόνια), ενώ του SF(0.35) ξεπερνούσε τα 100 χρόνια. Άρα ένα σκυροδέμα, αποτελούμενο μόνο από OPC θα χρειαστεί ένα μεγάλο αριθμό επεμβάσεων αποκατάστασής του κατά τη διάρκεια των 100 χρόνων, αντίθετα με ένα σκυροδέμα όπως το SF(0.35), όπου τα 100 χρόνια ζωής είναι εύκολα επιτεύξιμα.

Οι **Stambaugh N. D., Bergman T. L., & Srubar III W. V.**, το 2017 δημιούργησαν ένα μοντέλο πρόβλεψης της διάρκειας ζωής ενισχυμένου σκυροδέματος με

ανακυκλωμένα αδρανή, σε περιβάλλον εκτεθειμένο σε χλωριόντα. Στο μοντέλο αυτό, λήφθηκαν υπόψιν οι προσθήκες τσιμεντοειδών υλικών, όπως ιπτάμενη τέφρα (FA), σκωρία (SG), πυριτική παιπάλη (SF) και μετακαολίνης (MK) και ανακυκλωμένα αδρανή, εκτεθειμένα και μη εκτεθειμένα σε χλωριόντα από την προηγούμενη έκθεσή τους. Επίσης προέβλεπε τον χρόνο προσβολής του σκυροδέματος σε δύο διαφορετικές τοποθεσίες, την Αλάσκα (AK) και το Los Angeles (LA), σε πέντε διαφορετικά ζώνες σε σχέση με τη θάλασσα. Η πρώτη ζώνη ήταν μέσα στη θάλασσα, η δεύτερη στην ακτή, η τρίτη σε απόσταση 800 m από την ακτή, η τέταρτη σε απόσταση 1.5 km από την ακτή και η πέμπτη σε ένα κτίριο στάθμευσης αυτοκινήτων σε απόσταση μεγαλύτερη του 1.5 km από την ακτή. Ακόμα, χρησιμοποιήθηκαν σαν μεταβλητές, εκτός από τα παραπάνω, το μέγεθος των ανακυκλωμένων αδρανών, το ποσοστό συμμετοχής τους, ο βαθμός έκθεσής τους σε χλωριόντα πριν την χρήση τους και η αναλογία νερού/τσιμεντοειδών υλικών. Συγκεκριμένα για τα τσιμενοειδή πρόσθετα, μελετήθηκε το ποσοστό κατά βάρος που θα έπρεπε να υποκαταστήσουν το τσιμέντο, ώστε το σκυρόδεμα να φτάσει τα 50 χρόνια ζωής. Το μοντέλο βασίστηκε σε ένα ήδη υπάρχον πιθανοτικό μοντέλο πρόβλεψης διάρκειας ζωής, το Life-365TM, για σκυρόδεμα με συμβατικά αδρανή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, όπως και με τα συμβατικά αδρανή, την μεγαλύτερη επιρροή στη διάρκεια ζωής του σκυροδέματος έχουν οι συνθήκες έκθεσης του, όπως η θερμοκρασία και η έκθεση σε χλωριόντα. Οι αυξήσεις στην αναλογία νερού/τσιμεντοειδών υλικών και στο ποσοστό χρησιμοποίησης ανακυκλωμένων αδρανών προκαλούν μείωση στη διάρκεια ζωής του, ενώ το μέγεθος των αδρανών και το ποσοστό έκθεσής τους σε χλωριόντα πριν την χρήση τους, δεν έδειξαν να την επηρεάζουν. Όσο αναφορά τα πρόσθετα τσιμεντοειδή υλικά, βρέθηκε ότι η πυριτική παιπάλη ήταν αυτή που είχε τα πιο αξιοσημείωτα αποτελέσματα σε μικρά ποσοστά προσθήκης, όμως η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία ήταν τα πιο ευεργετικά, ειδικότερα στις περιοχές μεγάλης έκθεσης στα χλωριόντα, όπως η πρώτη και η δεύτερη ζώνη, για την επίτευξη των 50 χρόνων διάρκειας ζωής. Συμπερασματικά, οι μελετητές αποφάνθηκαν ότι το σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα αδρανή είναι καλύτερο να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ιπτάμενη τέφρα και σε ψυχρότερα κλίματα, καθώς καθυστερούν την διείσδυση των χλωριόντων σε αυτό.

4. Πειραματικό μέρος

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται μια διερεύνηση σχετικά με την επιρροή στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος 4 διαφορετικών τσιμεντοειδών υλικών (supplementary cementitious materials, SCM). Τα υλικά αυτά είναι ο μετακαολίνης (metakaolin, MK), η πυριτική παιπάλη (silica fume, SF), η ιπτάμενη τέφρα (fly ash, FA) και η σκωρία υψικαμίνου (granulated blast furnace slag, GBFS), όπου χρησιμοποιήθηκαν σαν υποκατάστατα του τσιμέντου σε ποσοστό 10% και 20% κατά βάρος. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε α) η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, β) η υδατοαπορροφητικότητα μέσω i) του υπολογισμού του ανοιχτού πορώδους και ii) του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης και γ) η διαπερατότητα σε χλωρίοντα μέσω του υπολογισμού του συντελεστή διείσδυσης των χλωριόντων σύμφωνα με το πρότυπο NT Build 492, στις 6 και στις 24 ώρες.

Παρακάτω, περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία και η μεθοδολογία ανάλυσης των αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό των παραπάνω ιδιοτήτων. Η διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

4.2 Υλικά και Συνθέσεις Δοκιμίων

Συνολικά παράχθηκαν 10 συνθέσεις σκυροδέματος με την προσθήκη των προαναφερθεισών τσιμεντοειδών υλικών. Συγκεκριμένα, παράχθηκαν 2 συνθέσεις με τη χρησιμοποίηση μόνο τσιμέντου, συνθέσεις αναφοράς με αμιγές σκυρόδεμα, έχοντας διαφορετική αναλογία νερού/συνδετικού υλικού (N/T), 0.5 και 0.55 και άλλες 8 με την προσθήκη των 4 τσιμεντοειδών υλικών σε ποσοστό 10% και 20% κ.β. με ίδια αναλογία (N/T), 0.5. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι κωδικοποιήσεις των συνθέσεων, καθώς και τα χαρακτηριστικά τους. Η κωδικοποίηση για τις συνθέσεις αναφοράς, έγινε χρησιμοποιώντας τα γράμματα REF, από την αγγλική λέξη reference, μαζί με τον λόγο (N/T), π.χ. REF-0.50. Η κωδικοποίηση για τις συνθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν τα τσιμεντοειδή υλικά σαν υποκατάστατα, έγινε με τα πρώτα γράμματα από το τσιμεντοειδές στην αγγλική γλώσσα και με το ποσοστό προσθήκης του. Για παράδειγμα η σύνθεση που χρησιμοποιήθηκε μετακαολίνης σε ποσοστό 20% κ.β. ονομάστηκε MK20.

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις συνθέσεις ήταν κατηγορίας CEM I 42N. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν για όλες τις συνθέσεις ήταν ασβεστολιθική άμμος, διαμέτρου 0-2 mm, ρυζάκι, 4-8 mm και γαρμπίλι, 8-16 mm. Εκτός από νερό, προστέθηκε σε κάθε σύνθεση και ρευστοποιητής SIKA C-ultra 560xs, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή κάθιση. Για κάθε νωπό σκυρόδεμα που παρασκευάστηκε, μετρήθηκε η κάθιση και η πυκνότητά του. Οι ποσότητες των υλικών και τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Ποσότητες υλικών ανά σύνθεση και ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

	REF-0.55	REF-0.50	FA20	FA10	MK20	MK10	GS20	GS10	SF20	SF10
	S1	S2	S3	S10	S4	S8	S5	S9	S6	S7
ενεργ. Ν/Τ	0.55	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ΤΣΙΜΕΝΤΟ (Kg/m ³)	350	350	280	315	280	315	280	315	280	315
SCM (Kg/m ³)	0	0	70	35	70	35	70	35	70	35
ΑΜΜΟΣ (Kg/m ³)	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925
ΡΙΖΑΚΙ (Kg/m ³)	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555
ΓΑΡΜΠΙΛΙ (Kg/m ³)	370	370	370	370	370	370	370	370	370	370
ΕΝΕΡΓ. ΝΕΡΟ (Kg/m ³)	192.5	175	175	175	175	175	175	175	175	175
ΣΥΝ ΝΕΡΟ (Kg/m ³)	220.62	203.12	203.12	203.12	203.12	203.12	203.12	203.12	203.12	203.12
ΣΥΝΟΛΟ (Kg/m ³)	2393	2375	2375	2376	2376	2375	2376	2376	2376	2376
ΡΕΥΣΤ/ΤΗΣ (% Κ.Β. CEMENT)	0.12	0.30	0.49	0.57	1.01	0.42	1.08	0.53	1.14	0.53
Κάθιση (mm)	60	80	60	30	35	25/35	200/100	100/130	20/110	130
Μοναδιαίο βάρος (Kg/m ³)	2349	2347	2329	2331	2305	2364	2356	2271	2231	2216

Για κάθε σύνθεση παρασκευάστηκαν 6 κυβικά δοκίμια, με διαστάσεις 100 mm και 2 κυλινδρικά δοκίμια ύψους 200 mm και διαμέτρου 100mm (Εικόνα 15), όπου τους δόθηκε η κωδική ονομασία S και ένας αριθμός από το 1 μέχρι το 10, ανάλογα με τη σειρά παραγωγής της σύνθεσης (Πίνακας 2). Τα 3 κυβικά δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του κάθε σκυροδέματος στις 28 ημέρες ωρίμανσης και τα υπόλοιπα 3 στις 110 ημέρες. Στο κάθε κυλινδρικό δοκίμιο κάθε σύνθεσης δόθηκε επίσης το γράμμα A ή το γράμμα B, αντίστοιχα. Για παράδειγμα, οι 2 κύλινδροι της πρώτης σύνθεσης ονομαζόταν S1A και S1B. Στη συνέχεια το κάθε κυλινδρικό δοκίμιο κόπηκε από κάτω προς τα πάνω σε 5 ίσα τεμάχια ύψους περίπου 40 mm το καθένα. Τα 4 χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη της διεύδυσης των χλωριόντων και το τελευταίο για τη μελέτη του ανοιχτού πορώδους και της τριχοειδής απορρόφησης. Τα δοκίμια ωρίμασαν και συντηρήθηκαν μέσα στο νερό.



Εικόνα 15: Παρασκευή κυλινδρικών και κυβικών δοκιμίων



Εικόνα 16: Συντήρηση δοκιμίων σε νερό

4.3 Μέτρηση θλιπτικής αντοχής

Οι δοκιμές μέτρησης της θλιπτικής αντοχής έγιναν στις 28 και στις 110 ημέρες για κάθε σύνθεση. Χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε μέτρηση 3 κυβικά δοκίμια, ακμής 100mm, συντηρημένα σε νερό. Αρχικά το κάθε δοκίμιο ζυγίστηκε για να υπολογιστεί το βάρος του (*Εικόνα 17*) και στην συνέχεια υποβλήθηκε σε μονοαξονική θλίψη ώστε να βρεθεί η θλιπτική του αντοχή f_c .



Εικόνα 17: Ζύγιση κυβικού δοκιμίου

Η θλιπτική του αντοχή δίνεται από την σχέση (1):

$$f_c = \frac{P_{max}}{bd} \quad (1)$$

όπου:

f_c : η θλιπτική αντοχή σε MPa (N/mm^2)

P_{max} : το μέγιστο φορτίο που ασκείται μέχρι την αστοχία του δοκιμίου σε N

bd : το εμβαδόν της επιφάνειας του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την πλάκα φόρτισης σε mm^2 , με $b=d=100\text{ mm}$

Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε η διάταξη WykyhamFarance. (Εικόνα 18)



Εικόνα 18: Διάταξη δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής f_c

4.4 Ανοιχτό πορώδες

Για τον υπολογισμό του ανοιχτού πορώδες χρησιμοποιήθηκαν τα 2 τελευταία τεμάχια των κυλινδρικών δοκιμίων από κάθε σύνθεση, στις 28 και στις 110 ημέρες ωρίμανσης. Η κωδική ονομασία τους ήταν η κωδικοποίηση της σύνθεσης που ανήκαν και το γράμμα Α ή Β. Για παράδειγμα τα 2 τεμάχια της πρώτης σύνθεσης ονομάστηκαν S1A και S1B.

Ο υπολογισμός του έγινε σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο **ASTM C 642 (1997)**. Στην αρχή μετρήθηκε το βάρος των τεμαχίων σε κορεσμένη κατάσταση (M_{sat}), αμέσως μετά την έξοδο τους από την δεξαμενή νερού, σε περιβάλλον αέρα με επιφανειακά στεγνές επιφάνειες (Εικόνα 19). Για την επίτευξη των στεγνών επιφανειών, η επιφάνεια σκουπίστηκε πριν τη ζύγιση του κάθε δίσκου. Στην συνέχεια, ζυγίστηκαν μέσα σε μία δεξαμενή νερού υπό άνωση (M_{imm}), βυθισμένα ολόκληρα μέσα σε αυτό (Εικόνα 20). Η τελευταία ζύγιση πραγματοποιήθηκε έπειτα από ξήρανση των τεμαχίων, μέχρι να σταθεροποιηθεί το βάρος τους, σε περιβάλλον αέρα (M_{dry}). Η ξήρανσή τους έγινε σε φούρνο στους 105°C για διάστημα περίπου 7-8 ημερών. Για να θεωρηθεί ότι το βάρος τους σταθεροποιήθηκε, η διαφορά της τιμής του σε διάστημα 24±2 ωρών δεν έπρεπε να ξεπερνάει το 0.1%. Ο υπολογισμός του ανοιχτού πορώδες έγινε βάσει των εξισώσεων (2)-(5):

$$V_o = \frac{M_{sat} - M_{dry}}{\rho} \quad (2)$$

όπου:

V_o : ο όγκος ανοιχτών πόρων (m^3)

ρ_w : το ειδικό βάρος του νερού σε συνήθη θερμοκρασία (18°C), το οποίο λήφθηκε για τους υπολογισμούς 1000 kg/m^3

$$V_\varphi = \frac{M_{sat} - M_{imm}}{\rho_w} \quad (3)$$

όπου:

V_φ : ο φαινόμενος όγκος (m^3)

$$d_\varphi = \frac{\rho_w * M_{dry}}{M_{sat} - M_{imm}} \quad (4)$$

όπου:

d_φ : η φαινόμενη πυκνότητα (kg/m^3)

$$OP = \frac{100 * (M_{sat} - M_{dry})}{M_{sat} - M_{imm}} \quad (5)$$

όπου:

ΟΡ: το ανοικτό πορώδες



Εικόνα 19: Μέτρηση μάζας επιφανειακώς στεγνού δοκιμίου (M_{sat})



Εικόνα 20: Μέτρηση μάζας υπό άνωση (M_{imm})

4.5 Τριχοειδής απορρόφηση

Για τον υπολογισμό του συντελεστή τριχοειδής απορρόφησης για κάθε σύνθεση χρησιμοποιήθηκαν τα τεμάχια που χρησιμοποιήθηκαν στο ανοικτό πορώδες, δηλαδή το τελευταίο τεμάχιο από κάθε κυλινδρικό δοκίμιο, με περίοδο ωρίμανσης στο νερό 28 ημέρες. Μετά την ξήρανσή τους τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα μέχρι την έναρξη του πειράματος. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την οδηγία της **RILEM (TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability)**.

Τα τεμάχια καλύφθηκαν περιμετρικά με μονωτική ταινία, ζυγίστηκαν, και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε μία δεξαμενή με νερό, πάνω σε μία μεταλλική σχάρα, έτσι ώστε η πλευρά έδρασής τους να βρέχεται εξολοκλήρου και η στάθμη του νερού να είναι 3-5 mm πάνω από αυτή. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ζυγίζονταν και επανατοποθετούνταν στη δεξαμενή νερού. Από τη διαφορά μεταξύ των διαδοχικών μετρήσεων για το ίδιο τεμάχιο, προέκυψε η μάζα νερού που απορροφήθηκε. Οι πειραματικές διατάξεις φαίνονται στις *Εικόνες 21-22*.



Εικόνα 21: Διεξαγωγή πειράματος τριχοειδούς απορρόφησης



Εικόνα 22: Δοκίμια κατά την διάρκεια και με το πέρας του πειράματος της τριχοειδούς απορρόφησης

4.6 Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης

Ο προσδιορισμός της αντίστασης στη διείσδυση των χλωριόντων για κάθε σύνθεση σκυροδέματος βασίστηκε στην επιταχυνόμενη δοκιμή **NordTest Build 492 (1999)**. Με βάση τη μέθοδο αυτή υπολογίστηκαν για κάθε σύνθεση, στις 28 και στις 110 ημέρες ωρίμανσης του κάθε σκυροδέματος, 2 συντελεστές διείσδυσης χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης (non-steady chloride migration coefficient), D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m²/s). Για την εύρεση του πρώτου συντελεστή η πειραματική διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω διήρκησε 24 ώρες ενώ για την εύρεση του δεύτερου διήρκησε 6 ώρες.

Για το κάθε πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 2 κυλινδρικά τεμάχια από κάθε σύνθεση, ύψους περίπου 40 mm και διαμέτρου 10 mm, ένα από κάθε κυλινδρικό δοκίμιο. Αρχικά, τα τεμάχια συντηρήθηκαν σε διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) για τουλάχιστον 24 ώρες πριν την έναρξη του πειράματος. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο λόγος που τοποθετούνται τα τεμάχια στο διάλυμα του υδροξειδίου του ασβεστίου, είναι για να επιτευχθεί μία ίση διανομή των ιόντων στους πόρους του σκυροδέματος, ώστε να υπάρξει μία ομοιόμορφη εισχώρηση των χλωριόντων σε αυτό. Στην συνέχεια, τοποθετήθηκε μονωτική ταινία Teflon περιμετρικά των τεμαχίων (Εικόνα 23) και αφού μετρήθηκε το ακριβές τους ύψος, περικλείστηκαν σε σωλήνες καουτσούκ με τη βοήθεια σφιγκτήρων και δαχτυλιδιών από ανοξείδωτο ατσάλι.



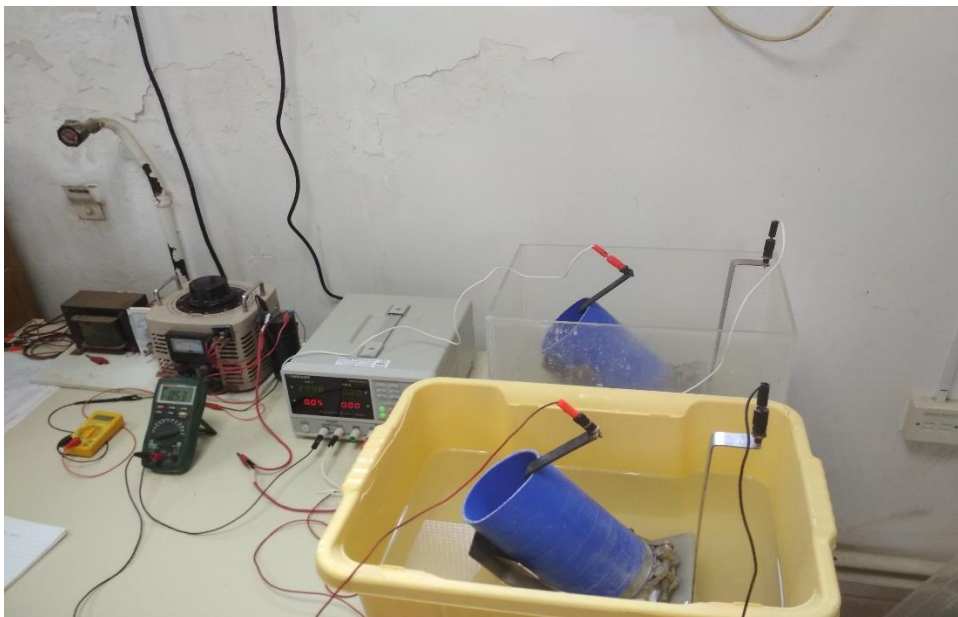
Εικόνα 23: Δοκίμια σκυροδέματος με μονωτική ταινία Teflon

Ο προσδιορισμός των συντελεστών διείσδυσης χλωριόντων τους επετεύχθη με την εξαναγκασμένη επιταχυνόμενη κίνηση των χλωριόντων, διαμέσου του κυλινδρικού τεμαχίου σκυροδέματος, μέσω κατάλληλης διάταξης. Το κάθε κυλινδρικό τεμάχιο παρέμεινε, μέσω κατάλληλης διάταξης ηλεκτροδίων, υπό σταθερή διαφορά δυναμικού, από 10 V έως 60 V, για τον καθορισμένο χρόνο πειράματος (Εικόνα 24). Η επιλογή της επιβαλλόμενης διαφοράς δυναμικού έγινε με βάση το αρχικώς διερχόμενο ρεύμα για δοκιμαστική διαφορά δυναμικού ίση με 30 V όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.

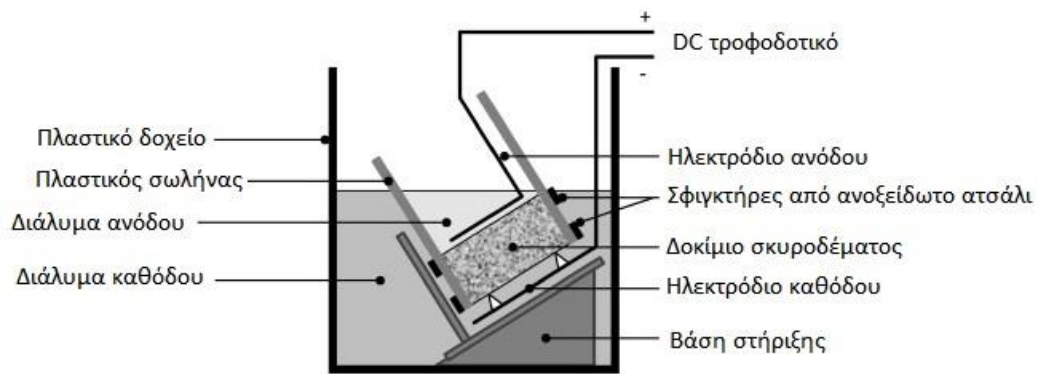
Πίνακας 3: Διαφορά δυναμικού και διάρκεια δοκιμής [NordTest Build 492 (1999)]

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

Το πείραμα βασίστηκε στην εφαρμογή διαφοράς δυναμικού στο εσωτερικό του δοκιμίου λόγω της τάσης του συνεχούς ρεύματος. Τα τεμάχια παρατίθεται μεταξύ δύο διαλυμάτων, εκ των οποίων, το διάλυμα καθόδου αποτελούταν από 10% κ.β. χλωριούχο νάτριο (NaCl), ενώ το διάλυμα ανόδου από υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) 0.3 N. Κατά την έναρξη και τη λήξη του πειράματος καταγράφηκε το διερχόμενο ρεύμα, η διαφορά δυναμικού και η θερμοκρασία του διαλύματος ανόδου (Εικόνες 24-25).



Εικόνα 24: Ηλεκτρική διάταξη δοκιμής NordTest Build 492 κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας



Εικόνα 25: Η διάταξη της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων

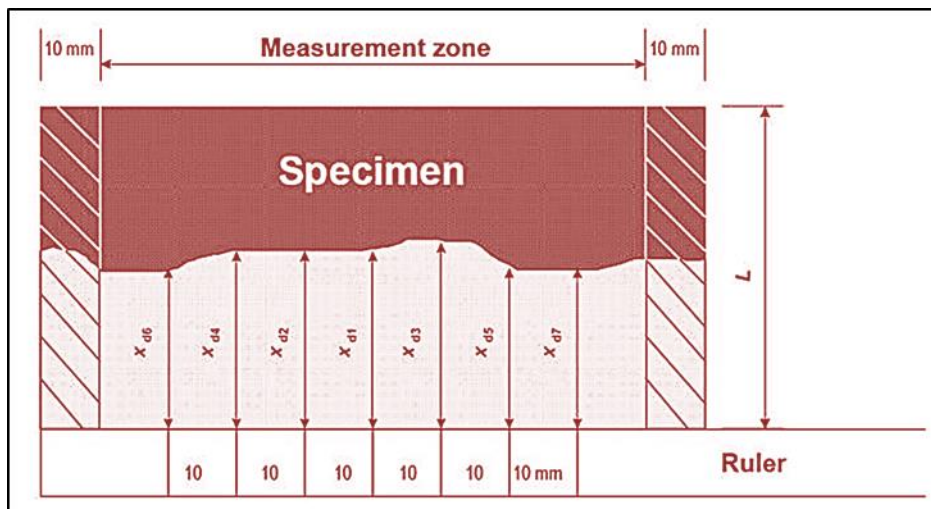
Η μέτρηση του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων έγινε με τη χρήση της χρωματογραφικής μεθόδου και μέσω αυτής υπολογίστηκε ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων. Για το σκοπό αυτό, το κάθε τεμάχιο υποβλήθηκε αρχικά, σε δοκιμή σε διάρρηξη προκειμένου να πραγματοποιηθεί διαχωρισμός του, περίπου στο μέσον του (Εικόνα 26). Η δοκιμή σε διάρρηξη επετεύχθη με την επιβολή φορτίου στα μέσα δύο απέναντι πλευρών του τεμαχίου. Αφού χωριστεί το δοκίμιο κάθετα στη μέση, τα δύο μέρη ψεκάζονται με διάλυμα 0.1M νιτρικού αργύρου AgNO_3 (Εικόνα 27). Στη συνέχεια, μετρήθηκε το βάθος διείσδυσης, δηλαδή το ύψος της περιοχής που έχει αλλάξει χρώμα μετά τον ψεκασμό με νιτρικό άργυρο, με τη χρήση χάρακα ξεκινώντας από το κέντρο του δοκιμίου και προχωρώντας προς τα έξω (Εικόνα 28). Αυτό έγινε εφικτό λόγω της παρουσίας χλωριόντων που οδηγεί σε σχηματισμό χλωριούχου αργύρου AgCl μέσω χημικών αντιδράσεων.



Εικόνα 26: Διάρρηξη του δοκιμίου



Εικόνα 27: Δοκίμια μετά τη διάρρηξη και τον ψεκάσμο με $AgNO_3$



Εικόνα 28: Υπόδειγμα μέτρησης βάθους διείσδυσης χλωριόντων

Ο συντελεστής διείσδυσης των χλωριόντων, D_{nssm} , υπολογίζεται από τις εξισώσεις (6)-(8):

$$D_{nssm} = \frac{RT}{ZFE} * x_d - \frac{a * \sqrt{x_d}}{t} \quad (6)$$

$$E = \frac{u - 2}{L} \quad (7)$$

$$a = 2 * \sqrt{\frac{RT}{ZFE}} * \text{erf}^{-1} * \frac{1 - 2 * c_d}{c_o} \quad (8)$$

όπου:

D_{nssm} : συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων (m^2/s),

Z: απόλυτη τιμή του σθένους ιόντων, για χλωριόντα, $z = 1$,

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

U: απόλυτη τιμή της εφαρμοσμένης τάσης (V),

R: παγκόσμια σταθερά αερίων, $R = 8.314 \text{ J / (V , mol)}$,

T: η μέση τιμή της αρχική και τελικής θερμοκρασίας του διαλύματος ανόδου ($^{\circ}C$)

L: το πάχος του δοκιμίου (mm),

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

t: η διάρκεια του πειράματος (hour),

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

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

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 L. (1996)** καθώς και με βάση τους **Nilsson L. O. et all (1998)**, όπως περιγράφεται στους Πίνακες 4-5.

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

Συντελεστής διείσδυσης 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 διείσδυσης [πηγή: Nilsson L. O.et all (1998)]

Συντελεστής διείσδυσης 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)

5. Παρουσίαση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

5.1 Θλιπτική αντοχή

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζεται η μέση θλιπτική αντοχή σε MPa των 3 κυβικών δοκιμίων των 10 συνθέσεων, για ηλικίες σκυροδέματος 28 και 110 ημερών.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής 28 και 110 ημερών

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΣΥΝΘΕΣΗ	ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ 28 ΗΜΕΡΩΝ (MPa)	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΑΜΙΓΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ 28 ΗΜΕΡΩΝ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ 28 ΗΜΕΡΩΝ (MPa)	ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ 110 ΗΜΕΡΩΝ (MPa)	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΑΜΙΓΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ 110 ΗΜΕΡΩΝ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ 110 ΗΜΕΡΩΝ (MPa)
S1	REF-0.55	51.84	-11.86	1.07	54.79	-11.03	1.39
S2	REF-0.50	58.82	-	1.44	61.58	-	1.53
S3	FA20	43.78	-25.56	0.09	52.99	-13.96	0.69
S10	FA10	56.63	-3.72	2.52	64.55	4.82	2.05
S5	GS20	66.60	13.23	2.62	72.95	18.46	3.38
S9	GS10	50.52	-14.10	3.81	57.67	-6.36	1.03
S4	MK20	76.67	30.35	0.50	77.73	26.22	3.94
S8	MK10	59.31	0.84	2.11	60.88	-1.15	0.38
S6	SF20	73.60	25.13	4.86	77.85	26.40	4.12
S7	SF10	59.05	0.39	3.43	66.24	7.56	2.71

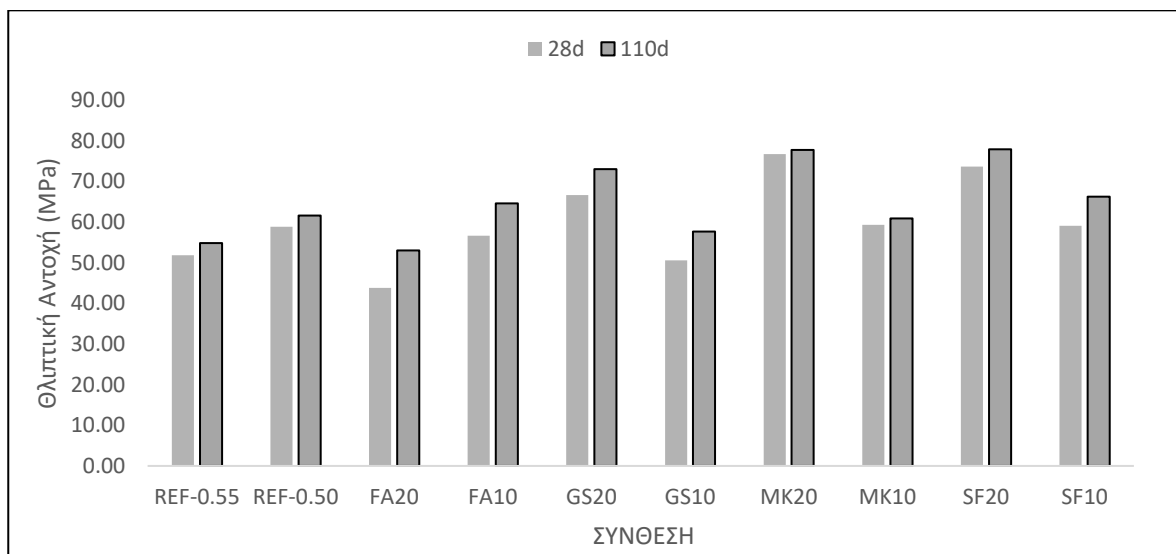
Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6 αλλά και από τα διαγράμματα του Σχήματος 1 η θλιπτική αντοχή αυξάνεται σημαντικά με την προσθήκη τσιμεντοειδών, όπως ο μετακαολίνης (MK), η πυριτική παιπάλη (SF) και η σκωρία υψικαμίνου (GS), καθώς και με τη μείωση της αναλογίας νερού/συνδετικών υλικών. Αντίθετα, με την προσθήκη ιπτάμενης τέφρας (FA), παρουσίασε μείωση.

Στην ηλικία των 28 ημερών, η μεγαλύτερη τιμή της θλιπτικής αντοχής καταγράφηκε στην σύνθεση MK20, με αυτή της SF20 και της GS20 να ακολουθούν, με τις τιμές τους να ξεπερνούν τα 75, 70 και 65 MPa, αντίστοιχα. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι με την προσθήκη του μετακαολίνη σε ποσοστό 20% κατά βάρος σαν υποκατάστατο του τσιμέντου η θλιπτική αντοχή του αυξάνεται κατά 30%, σε σχέση με το αμιγές σκυρόδεμα REF-0.50, ενώ με την προσθήκη της πυριτικής παιπάλης σε ποσοστό 20% κ.β. κατά 25%. Αντίθετα, τη μικρότερη τιμή της θλιπτικής αντοχής είχε η σύνθεση FA20 όπου η αντικατάσταση του τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστό 20% κ.β. είχε ως συνέπεια την μείωση της κατά 26%. Στις συνθέσεις όπου υπήρχε υποκατάσταση του τσιμέντου από τα τσιμεντοειδή πρόσθετα κατά 10% κ.β. η αντοχή, είτε έμεινε στις ίδιες τιμές με το αμιγές σκυρόδεμα, είτε υπήρχε μείωση στην αντοχή τους. Μάλιστα ενώ στην GS20 υπήρξε αύξηση στην τιμή της, στην GS10 υπήρξε μείωση της τάξης του 14%. Τέλος, συγκρίνοντας τις REF-0.50 και REF-0.55, η

μείωση του λόγου v/t κατά 5% είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της θλιπτικής αντοχής κατά 13%.

Στην ηλικία των 110 ημερών, η αντοχή για όλες τις συνθέσεις παρουσιάστηκε αυξημένη. Μάλιστα, η μεγαλύτερη τιμή της εμφανίστηκε στην SF20 αυτή τη φορά, αν και είχε πολύ μικρή διαφορά με αυτή της MK20 που ακολουθεί. Τις μεγαλύτερες αυξήσεις σε σχέση με τις τιμές των 28 ημερών παρουσίασαν οι συνθέσεις με ιπτάμενη τέφρα και σκωρία υψικαμίνου. Ειδικότερα, η τιμή της FA20 βελτιώθηκε περισσότερο από 9 MPa, δηλαδή κατά 21%, κάτι που αποδεικνύει ότι η ιπτάμενη τέφρα χρειάζεται χρόνο για να δράσει σε ένα σκυρόδεμα. Παρόλα αυτά, η αντοχή της FA20 είναι μειωμένη κατά 13% σε σχέση με την αμιγή σύνθεση REF-0.50. Τις μικρότερες αυξήσεις σε σχέση με τιμές των 28 ημερών, παρουσίασαν οι συνθέσεις με μετακαολίνη, άρα η επίδραση του στο σκυρόδεμα είναι πιο γρήγορη σε σχέση με τα υπόλοιπα τσιμεντοειδή πρόσθετα.

Βάσει των πειραματικών δοκιμών που έγιναν, τα αποτελέσματα συμφωνούν με την μελέτη των **J.M. Khatib et al (2004)**, ότι ο μετακαολίνης είναι ιδιαίτερα δραστικός από τις πρώτες μέρες ωρίμανσης του σκυροδέματος. Το ίδιο παρατήρησαν και οι **A. S. Gill et al (2017)**. Αντίθετα με τους **M. Stratoura et al (2018)**, που παρατήρησαν αύξηση της θλιπτικής αντοχής και για τα 4 πρόσθετα, στην συγκεκριμένη μελέτη παρατηρήθηκε μείωση με την αύξηση της ιπτάμενης τέφρας που προστέθηκε σε σχέση με το αμιγές σκυρόδεμα. Επίσης, η αύξηση αντοχής των συνθέσεων που χρησιμοποιήθηκε πυριτική πιαπάλη εμφανίστηκε από τις πρώτες 28 ημέρες.



Σχήμα 1: Μέση θλιπτική αντοχή για κάθε σύνθεση

5.2 Ανοιχτό πορώδες

Στους παρακάτω πίνακες, παρουσιάζονται όλες οι ζυγίσεις που πραγματοποιήθηκαν για όλα τα δοκίμια σε κορεσμένη, υπό άνωση και ξηρή κατάσταση, καθώς και το ανοιχτό

πορώδες για την κάθε σύνθεση, σύμφωνα με τη σχέση (5), και η ποσοστιαία μεταβολή τους ως προς το αμιγές σκυρόδεμα REF-0.50, για τις 28 και τις 110 ημέρες, αντίστοιχα.

Πίνακας 7: Μετρήσεις και αποτελέσματα δοκιμής ανοιχτού πορώδους στις 28 ημέρες

28Η						
ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΣΥΝΘΕΣΗ	ΒΑΡΟΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (gr)	ΒΑΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΥΠΟ ΑΝΩΣΗ (gr)	ΒΑΡΟΣ ΞΗΡΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ(gr)	ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ ΟΡ (%)	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΑΜΙΓΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ
S1	REF-0.55	589.78	341.23	547.40	17.06	1.40
S2	REF-0.50	629.31	366.24	585.08	16.82	-
S3	FA20	716.60	414.00	660.54	18.51	10.05
S10	FA10	728.40	421.60	678.90	16.18	-3.82
S4	MK20	600.82	348.22	556.01	16.13	-4.09
S8	MK10	666.01	378.22	626.85	16.91	0.53
S5	GS20	701.11	394.63	653.21	17.77	5.65
S9	GS10	729.65	423.57	677.90	16.66	-0.91
S6	SF20	691.54	394.84	642.10	13.61	-19.07
S7	SF10	751.88	441.70	701.69	15.64	-7.03

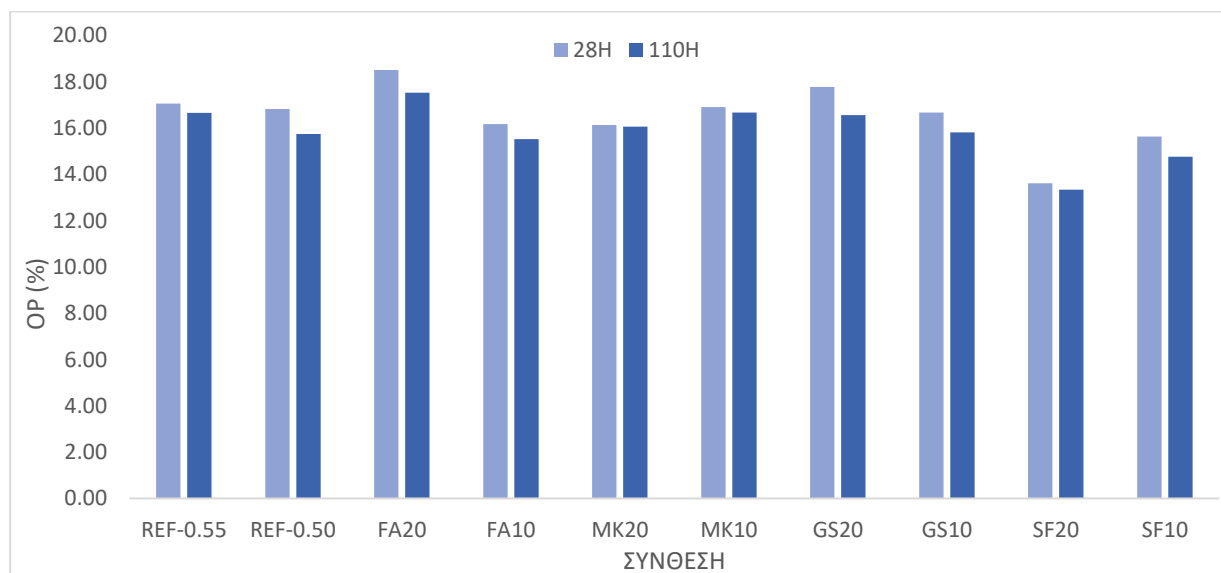
Πίνακας 8: Μετρήσεις και αποτελέσματα δοκιμής ανοιχτού πορώδους στις 110 ημέρες

110Η						
ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΣΥΝΘΕΣΗ	ΒΑΡΟΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (gr)	ΒΑΡΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΥΠΟ ΑΝΩΣΗ (gr)	ΒΑΡΟΣ ΞΗΡΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ(gr)	ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ ΟΡ (%)	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΑΜΙΓΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ
S1	REF-0.55	589.27	341.28	547.97	16.66	5.47
S2	REF-0.50	627.51	365.08	586.20	15.75	-
S3	FA20	714.47	412.34	661.46	17.53	11.32
S10	FA10	728.08	421.95	678.92	15.52	-1.45
S4	MK20	599.04	346.47	557.30	16.06	1.97
S8	MK10	662.18	374.39	623.77	16.66	5.81
S5	GS20	698.83	392.74	653.73	16.56	5.16
S9	GS10	728.85	423.54	677.98	15.81	0.41
S6	SF20	691.22	395.30	644.43	13.34	-15.28
S7	SF10	749.54	438.75	701.30	14.75	-6.30

Για τις 28 ημέρες ωρίμανσης του σκυροδέματος, από τον Πίνακα 7 φαίνεται η μείωση του πορώδους κατά 1.4%, μειώνοντας τον λόγο v/t κατά 5%. Η μικρότερη τιμή του παρατηρήθηκε στη σύνθεση SF20, με μείωση που ξεπερνάει το 19%. Αντίθετα, η μεγαλύτερη τιμή του παρουσιάστηκε στην σύνθεση FA20, όπου υπήρξε αύξηση του πορώδους κατά 10%, όπως υπήρξε αύξηση και με την αντικατάσταση του τσιμέντου από σκωρία υψικαμίνου, σε ποσοστό 20% κ.β. GS20, πάνω από 5.5%. Η σύνθεση με ποσοστό μετακαολίνη 20%, MK20, παρουσίασε μια σημαντική μείωση στο πορώδες κατά 4.2%. Γίνεται αντιληπτό, ότι η αύξηση αντικατάστασης του μετακαολίνη και της πυριτικής παιπάλης οδηγεί σε μείωση του πορώδους, ενώ η αύξηση της ιπτάμενης τέφρας και της σκωρίας υψικαμίνου οδηγεί σε αύξησή του.

Στις 110 ημέρες (Πίνακας 8) υπήρξε μείωση του πορώδους στην πλειονηφία των συνθέσεων, σε σχέση με τις 28 ημέρες. Οι συνθέσεις που αποτελούνταν από μετακαολίνη έδειξαν πολύ μικρή διαφοροποίηση στις τιμές του πορώδους τους, κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα της ταχείας ενεργοποίησής του στο σκυρόδεμα. Οι μεγαλύτερες μειώσεις παρουσιάστηκαν στο σκυρόδεμα με υψηλά ποσοστά σκωρίας υψικαμίνου και ιπτάμενης τέφρας αλλά και στο αμιγές σκυρόδεμα με λόγο v/t 0.5. Μάλιστα, η σύνθεση REF-0.50 παρουσίασε αρκετά μικρότερο πορώδες και από τις συνθέσεις με μετακαολίνη στις 110 ημέρες. Παρόλα αυτά, η σύνθεση SF20 εξακολούθησε να έχει το μικρότερο πορώδες με τη SF10 να την ακολουθεί, χρίζοντας έτσι, την πυριτική παιπάλη ως το ιδανικότερο πρόσθετο από τα 4, για την επίτευξη μειωμένου ανοιχτού πορώδους.

Στο Σχήμα 2 φαίνονται οι τιμές του ανοιχτού πορώδους όλων των συνθέσεων, τόσο στις 28, όσο και στις 110 ημέρες.



Σχήμα 2: Ανοιχτό πορώδες (%) για κάθε σύνθεση, στις 28 και 110 ημέρες

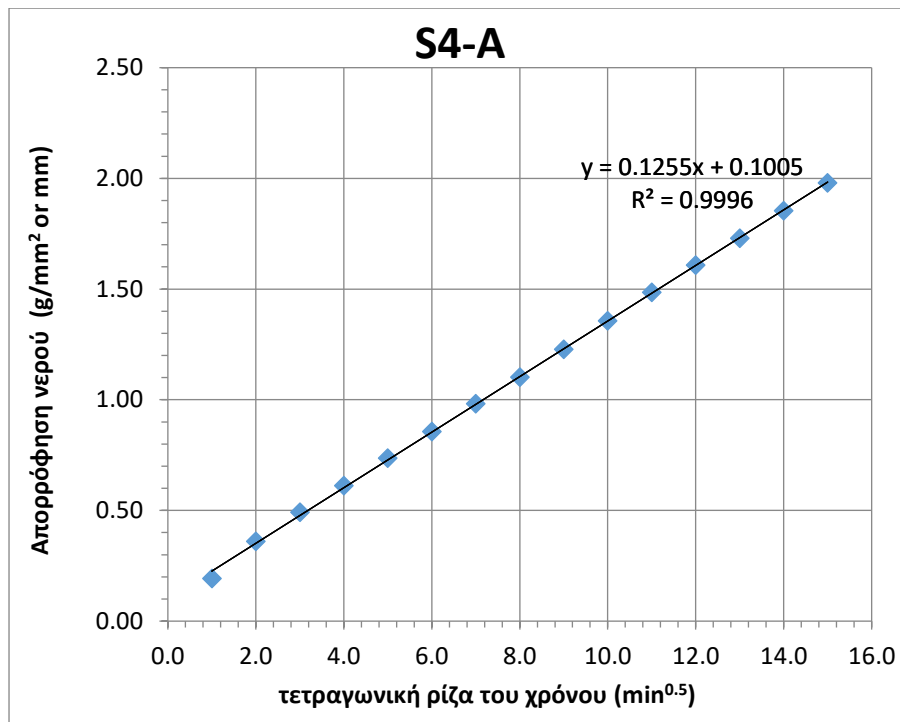
5.3 Τριχοειδής απορρόφηση

Στον Πίνακα 9 φαίνονται οι μέσες τιμές αθροιστικής απορρόφησης του νερού σε χιλιοστά $\Sigma(\Delta W/A) / \rho_w$ (mm) σε συνάρτηση με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου \sqrt{T} . Οι μέσες τιμές προέκυψαν από 2 δοκίμια Α και Β για κάθε σύνθεση. Η αθροιστική απορρόφηση του νερού σε χιλιοστά υπολογίστηκε διαιρώντας το λόγο $\Sigma(\Delta W/A)$, το αθροιστικό βάρος νερού που απορροφήθηκε προς το εμβαδόν επιφάνειας έδρασης στο νερό, με την πυκνότητα του νερού ρ_w για κάθε δοκίμιο.

Πίνακας 9: Πειραματικές μετρήσεις δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης για κάθε σύνθεση σκυροδέματος

VT	$\Sigma (\Delta W/A) / \rho_w$ (mm)									
	REF-0.55	REF-0.50	FA20	FA10	MK20	MK10	GS20	GS10	SF20	SF10
	S1	S2	S3	S10	S4	S8	S5	S9	S6	S7
1	0.24	0.21	0.21	7.71	0.18	0.13	0.18	0.46	0.19	0.13
2	0.46	0.39	0.38	7.88	0.35	0.29	0.36	0.63	0.30	0.23
3	0.69	0.57	0.58	8.05	0.47	0.45	0.52	0.80	0.41	0.31
4	0.92	0.75	0.78	8.23	0.58	0.61	0.67	0.98	0.51	0.40
5	1.15	0.91	0.96	8.42	0.70	0.77	0.81	1.15	0.59	0.48
6	1.37	1.08	1.18	8.59	0.81	0.93	0.95	1.32	0.67	0.56
7	1.57	1.23	1.35	8.77	0.93	1.10	1.08	1.49	0.75	0.63
8	1.77	1.37	1.55	8.94	1.05	1.24	1.20	1.64	0.81	0.70
9	1.95	1.51	1.73	9.10	1.17	1.39	1.32	1.81	0.88	0.78
10	2.12	1.63	1.91	9.26	1.29	1.52	1.42	1.97	0.94	0.86
11	2.27	1.75	2.12	9.41	1.41	1.66	1.52	2.13	1.00	0.93
12	2.43	1.87	2.26	9.55	1.53	1.78	1.62	2.27	1.05	1.00
13	2.57	1.98	2.42	9.69	1.65	1.90	1.71	2.44	1.09	1.06
14	2.70	2.07	2.58	9.80	1.77	2.01	1.80	2.54	1.14	1.13
15	2.82	2.17	2.73	9.92	1.89	2.11	1.87	2.67	1.25	1.19

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται ενδεικτικά η καμπύλη αθροιστικής απορρόφησης του νερού σε συνάρτηση με τη ρίζα του χρόνου για ένα δοκίμιο. Από τη μορφή του διαγράμματος, τα σημεία μπορεί να θεωρηθούν, κατά προσέγγιση, σημεία ευθείας. Η ευθεία είναι της μορφής $y = ax+b$ με $y = \Sigma (\Delta W/A)$ και $x = \sqrt{T}$. Από την κλίση της ευθείας προκύπτει η τιμή του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$). Η αξιοπιστία των τιμών για όλα τα δοκίμια είναι αρκετά μεγάλη, καθώς οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης R^2 ξεπερνάνε το 0.98. Το Σχήμα 3 ανήκει στο δοκίμιο S4-A, της σύνθεσης MK20, με συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης $S = 0.1255 \text{ mm}/\text{min}^{0.5}$ και συντελεστή γραμμικής συσχέτισης $R^2 = 0.9996$.



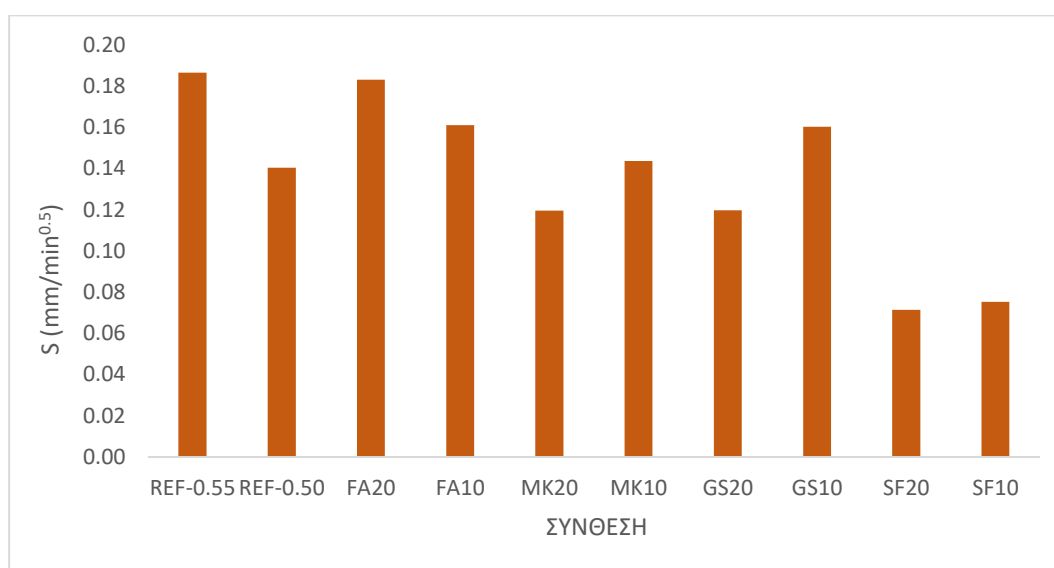
Σχήμα 3: Διάγραμμα απορρόφησης νερού συναρτήσεως της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου για το δοκίμιο S4-A

Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών τριχοειδούς απορρόφησης S για 28 ημέρες ωρίμανσης σκυροδέματος, οι ποσοστιαίες μεταβολές τους σε σχέση με αυτόν της αμιγούς σύνθεσης REF-0.50 και οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης R^2 για όλες τις συνθέσεις, ενώ στο Σχήμα 4 φαίνεται το διάγραμμα των συντελεστών τους. Από αυτά τα δύο παρατηρήθηκε ότι η χαμηλότερη τιμή του συντελεστή παρουσιάστηκε στην σύνθεση SF20, μειωμένη κατά περίπου 49% σε σχέση με αυτήν της αμιγής. Ο δεύτερος χαμηλότερος συντελεστής βρέθηκε στην SF10, όπου η μείωση του ξεπέρασε το 46%. Μείωση 15% περίπου παρουσίασαν και οι συνθέσεις που αποτελούνταν από μετακαολίνη και σκωρία υψικαμίνου σε ποσοστό 20% κ.β. Αντίθετα, μεγάλη αύξηση παρατηρήθηκε στις συνθέσεις όπου προστέθηκε ιπτάμενη τέφρα, FA20 και FA10, της τάξης του 30% και 15% αντίστοιχα αλλά και στην σύνθεση GS10 σε ποσοστό 14%. Η αντικατάσταση του τσιμέντου με μετακαολίνη σε ποσοστό 10% κ.β. δεν έδειξε να επηρεάζει σημαντικά τον συντελεστή. Η μεγαλύτερη όμως αύξηση παρατηρήθηκε στην REF-0.55, κατά 33%, αποδεικνύοντας ότι ο λόγος ν/τ είναι παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την τριχοειδή απορρόφηση.

Τα αποτελέσματα όσο αναφορά την πυριτική παιπάλη είναι παρόμοια με αυτά της μελέτης των **E. Güneyisi et al (2012)**. Αντίθετα, στην μελέτη τους βρήκαν ότι ο μετακαολίνης επηρεάζει περισσότερο την τριχοειδή απορρόφηση. Οι **H.Y. Leung et al (2016)** βρήκαν ότι η ιπτάμενη τέφρα αρχίζει να δρα θετικά ως προς την τριχοειδή απορρόφηση σε ποσοστά μεγαλύτερα από 20% κ.β. κάτι που συνάδει με τα παραπάνω αποτελέσματα. Επίσης, οι **R.K. Majhi et al (2019)** παρατήρησαν και αυτοί μία μείωση στην τριχοειδή απορρόφηση με την προσθήκη σκωρίας σε μεγάλα ποσοστά.

Πίνακας 10: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΣΥΝΘΕΣΗ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ S (mm/ $\sqrt{\text{min}}$)	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΑΜΙΓΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ (%)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ R^2
S1	REF-0.55	0.186	32.86	0.99
S2	REF-0.50	0.140	-	0.99
S3	FA20	0.183	30.42	0.99
S10	FA10	0.161	14.75	0.99
S4	MK20	0.120	-14.80	0.99
S8	MK10	0.144	2.34	0.99
S5	GS20	0.120	-14.77	0.99
S9	GS10	0.160	14.16	0.99
S6	SF20	0.071	-49.14	0.98
S7	SF10	0.075	-46.38	0.99



Σχήμα 4: Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης S (mm/min^{0.5}), ανά σύνθεση

5.4 Διείσδυση χλωριόντων

Όπως ειπώθηκε και στο κεφάλαιο 4.6, για την εύρεση της αντίστασης στην διείσδυση χλωριόντων σε κάθε σκυρόδεμα υπολογίστηκαν 2 συντελεστές D_{nssm} για τη κάθε σύνθεση, με βάση το πρότυπο NT Build 492. Για τον πρώτο συντελεστή η πειραματική διαδικασία διήρκησε όσο αναφέρει το πρότυπο, δηλαδή 24 ώρες. Για τον δεύτερο συντελεστή

εφαρμόστηκε η ίδια πειραματική διαδικασία, αλλά διήρκησε 6 ώρες. Οι 2 συντελεστές υπολογίστηκαν για κάθε σύνθεση, τόσο στις 28, όσο και στις 110 ημέρες ωρίμανσης σκυροδέματος. Σε κάθε πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 2 δοκίμια και ο συντελεστής της κάθε σύνθεσης προέκυψε από το μέσο όρο των συντελεστών αυτών των 2.

5.4.1 Πειραματική διαδικασία 24 ωρών

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται οι συντελεστές διείσδυσης χλωριόντων 24 ωρών, D_{nssm} , για κάθε σύνθεση, καθώς και οι ποσοστιαίες μεταβολές τους σε σχέση με τον συντελεστή της REF-0.50, για τις 28 και τις 110 ημέρες.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων 24 ωρών, στις 28 και στις 110 ημέρες

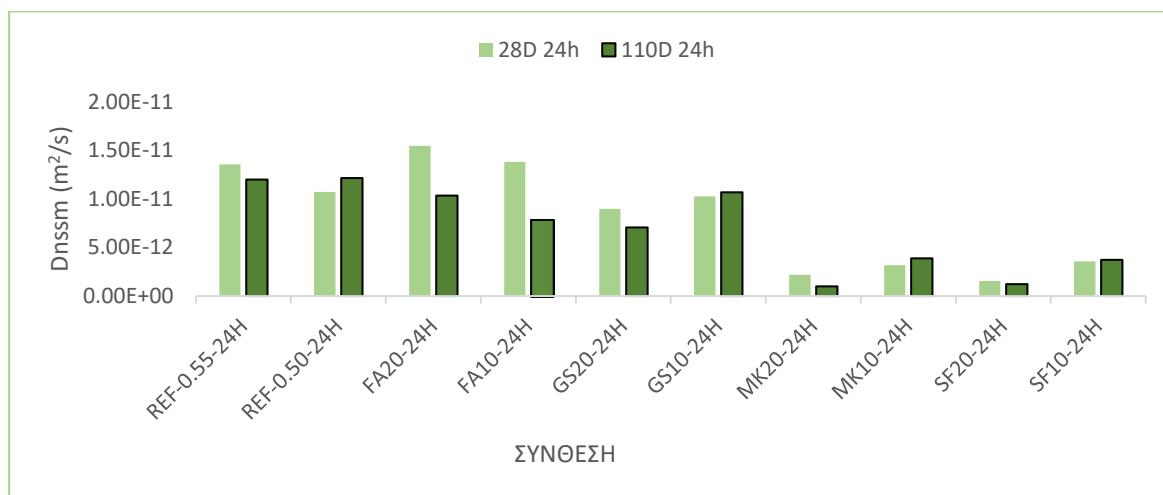
ΣΥΝΘΕΣΗ	28 ΗΜΕΡΕΣ		110 ΗΜΕΡΕΣ	
	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ D_{nssm} ($\times 10^{-12}$) 24 ΩΡΩΝ (m^2/s)	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ D_{nssm} ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΑΜΙΓΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ D_{nssm} ($\times 10^{-12}$) 24 ΩΡΩΝ (m^2/s)	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ D_{nssm} ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΑΜΙΓΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ
REF-0.55	13.56	26.56	11.99	-1.26
REF-0.50	10.71	-	12.14	-
FA20	15.45	44.21	10.34	-14.86
FA10	13.80	28.86	7.81	-35.65
GS20	8.96	-16.39	7.06	-41.89
GS10	10.27	-4.10	10.68	-12.07
MK20	2.20	-79.51	1.00	-91.79
MK10	3.17	-70.40	3.88	-68.04
SF20	1.56	-85.48	1.23	-89.88
SF10	3.56	-66.76	3.73	-69.31

Από τα αποτελέσματα των 28 ημερών του Πίνακα 11 παρατηρήθηκε μία γενική μείωση στην τιμή του συντελεστή στις συνθέσεις σε σχέση με την REF-0.50, εκτός από αυτές που περιείχαν ιπτάμενη τέφρα, κάτι που φαίνεται και στο Σχήμα 5. Ο μικρότερος συντελεστής παρουσιάστηκε στην SF20, μειωμένος πάνω από 85% σε σχέση με αυτόν της REF-0.50. Ακολούθησε αυτός της MK20 με μείωση κοντά στο 80%. Πολύ μικρές τιμές είχαν και αυτοί των SF10 και MK10, κάτι που αποδεικνύει την πολύ καλή συμπεριφορά της πυριτικής παιπάλης και του μετακαολίνη όσον αφορά την αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων στις πρώτες 28 ημέρες ωρίμανσης. Οι GS20 και GS10 παρουσίασαν και αυτές μειωμένους συντελεστές, κατά 16% και 4% αντίστοιχα. Αντίθετα στις συνθέσεις που περιείχαν ιπτάμενη τέφρα παρατηρήθηκε μία αύξηση στην τιμή του συντελεστή σε σχέση με τη REF-0.50. Συγκεκριμένα στην FA20 και στην FA10 αυξήθηκε κατά 44% και 28% αντίστοιχα. Τέλος,

συγκρίνοντας τις συνθέσεις REF-0.50 και REF-0.55, η αύξηση του λόγου v/t κατά 5% προκάλεσε μια αύξηση του συντελεστή κατά 26.5%.

Μέσω του Πίνακα 8 και του σχήματος 5 στις 110 ημέρες παρατηρήθηκε μείωση του συντελεστή στην πλειοψηφία των συνθέσεων σε σχέση με αυτούς των 28 ημερών. Η μεγαλύτερη μείωση παρουσιάστηκε στις συνθέσεις που περιείχαν ιπτάμενη τέφρα, υποδεικνύοντας την τάση της να αργεί να επιδράσει στο σκυρόδεμα. Η μικρότερη τιμή άνηκε στην MK20 με μικρή διαφορά από την SF20 που ακολούθησε, ενώ πολύ μικρές τιμές είχαν για άλλη μια φορά οι MK10 και SF10. Η μεγαλύτερη τιμή άνηκε στην REF-0.50, με την REF-0.55 να την ακολουθεί. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις 110 ημέρες όλες οι συνθέσεις με τσιμεντοειδή πρόσθετα παρουσίασαν καλύτερη αντίσταση στην διείσδυση των χλωριόντων από τις αμιγές συνθέσεις.

Συμπερασματικά, την καλύτερη συμπεριφορά ως προς την αντίσταση των χλωριόντων παρουσίασαν οι συνθέσεις που περιείχαν πυριτική παιπάλη και μετακαολίνη. Μάλιστα με την αύξηση της ποσότητας τους, η αντίσταση μεγάλωσε, κάτι που συνάδει με τη μελέτη των **M. Stratoura et al (2018)**. Αντίθετα, οι συνθέσεις με ιπτάμενη τέφρα έδειξαν μειωμένη αντίσταση τις πρώτες 28 ημέρες, με αυτήν να αυξάνεται σημαντικά στις 110, κάτι που δεν συμφωνεί με τους **B. Yu et al (2019)** οι οποίοι βρήκαν ότι αύξηση του συντελεστή υπήρχε όταν η ιπτάμενη τέφρα ξεπερνούσε το 30% κ.β. σαν αντικατάστατο του τσιμέντου. Επίσης οι **S. Teng et al (2012)**, όπως και οι **M. Stratoura et al (2018)**, παρατήρησαν ότι η προσθήκη σκωρίας βοηθάει στην αντίσταση του σκυροδέματος, κάτι που συμφωνεί με τη παρούσα μελέτη.



Σχήμα 5: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} (m^2/s) 24 ωρών, στις 28 και στις 110 ημέρες, για κάθε σύνθεση.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4 (Tang, 1996) και τον Πίνακα 5 (Nilsson et al, 1998) τα σκυροδέματα μπορούν να χαρακτηριστούν με βάση την τιμή του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων. Στον Πίνακα 12 παρουσιάζεται ο χαρακτηρισμός του κάθε σκυροδέματος στις 28 και στις 110 ημέρες.

Πίνακας 12: Χαρακτηρισμός των συνθέσεων σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση στη διείδυση χλωριόντων

ΣΥΝΘΕΣΗ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΙΣ 28 ΗΜΕΡΕΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΙΣ 110 ΗΜΕΡΕΣ
REF-0.55	Μέτρια	Μέτρια
REF-0.50	Μέτρια	Μέτρια
FA20	Χαμηλή	Μέτρια
FA10	Μέτρια	Υψηλή
GS20	Υψηλή	Υψηλή
GS10	Μέτρια	Μέτρια
MK20	Εξαιρετικά Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή
MK10	Πολύ Υψηλή	Πολύ υψηλή
SF20	Εξαιρετικά Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή
SF10	Πολύ Υψηλή	Πολύ υψηλή

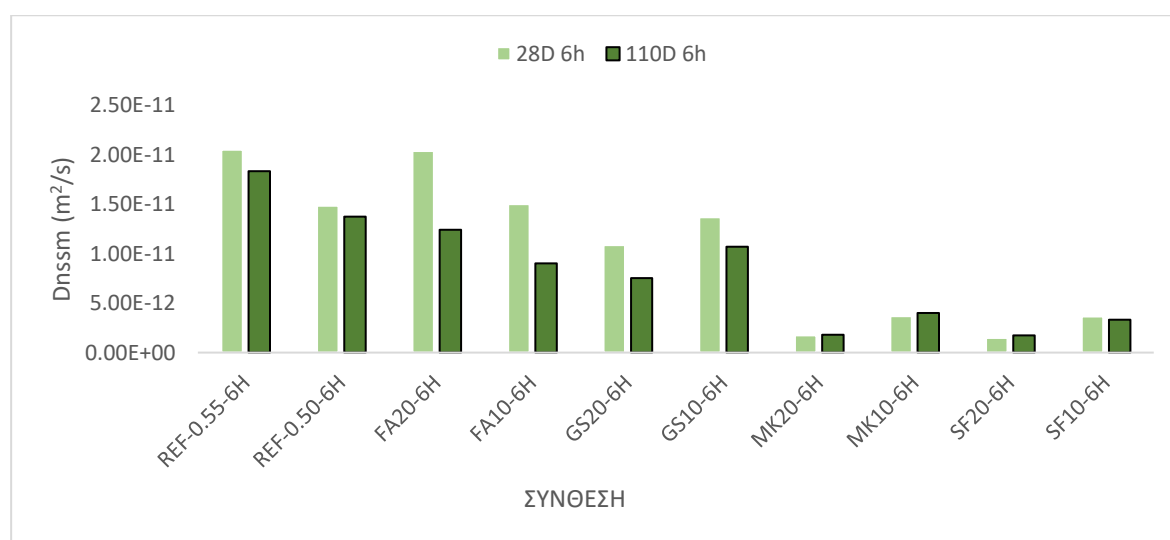
5.4.2 Πειραματική διαδικασία 6 ωρών

Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται οι συντελεστές διείδυσης χλωριόντων 6 ωρών, D_{nssm} , για κάθε σύνθεση, καθώς και οι ποσοστιαίες μεταβολές τους σε σχέση με τον συντελεστή της REF-0.50, για τις 28 και τις 110 ημέρες.

Πίνακας 13: Αποτελέσματα της δοκιμής διείδυσης χλωριόντων 6 ωρών, στις 28 και στις 110 ημέρες

ΣΥΝΘΕΣΗ	28 ΗΜΕΡΕΣ		110 ΗΜΕΡΕΣ	
	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ D_{nssm} ($\times 10^{-12}$) 6 ΩΡΩΝ (m^2/s)	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ D_{nssm} ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΑΜΙΓΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ D_{nssm} ($\times 10^{-12}$) 6 ΩΡΩΝ (m^2/s)	% ΜΕΤΑΒΟΛΗ D_{nssm} ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΑΜΙΓΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ
REF-0.55	20.55	38.22	18.35	33.29
REF-0.50	14.86	-	13.77	-
FA20	20.41	37.28	12.44	-9.66
FA10	15.04	1.16	9.03	-34.38
GS20	10.88	-26.84	7.53	-45.27
GS10	13.68	-7.94	10.70	-22.27
MK20	1.73	-88.36	1.74	-87.35
MK10	3.69	-75.15	3.32	-75.90
SF20	1.49	-90.01	1.82	-86.81
SF10	3.65	-75.48	4.00	-70.98

Από τον Πίνακα 13 αλλά και από το Σχήμα 6 βλέπουμε ότι οι συντελεστές διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} 6 ωρών, τόσο στις 28 όσο και στις 110 ημέρες είχαν παρόμοια συμπεριφορά με αυτούς των 24 ωρών. Η πλειοψηφία των σκυροδεμάτων παρουσίασε μείωση στην τιμή τους από τις 28 στις 110 ημέρες ωρίμανσης, με τις συνθέσεις με ιπτάμενη τέφρα να έχουν και πάλι την μεγαλύτερη μείωση σε αυτές. Οι συνθέσεις με μετακαολίνη και πυριτική παιπάλη είναι αυτές που παρουσίασαν και πάλι τον μικρότερο συντελεστή, ειδικότερα αυτές που περιείχαν 20% κ.β. τα συγκεκριμένα τσιμεντοειδή πρόσθετα, ενώ την υψηλότερη τιμή είχε η REF-0.55 και στις 2 χρονικές περιόδους. Οι συνθέσεις με ιπτάμενη τέφρα είχαν τις μεγαλύτερες μειώσεις των συντελεστών τους και αυτές με σκωρία υψικαμίνου έδειξαν μεγαλύτερη αντίσταση στη διείσδυση των χλωριόντων σε σχέση με την αμιγή σύνθεση, όπως και στην πειραματική διαδικασία 24 ωρών.



Σχήμα 6: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} (m^2/s) 6 ωρών, στις 28 και στις 110 ημέρες, για κάθε σύνθεση.

5.4.3 Συσχέτιση D_{nssm} 24 ωρών και D_{nssm} 6 ωρών

Χρησιμοποιώντας την μέθοδο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, μέσω του προγράμματος Excel, έγινε μία προσπάθεια συσχέτισης των συντελεστών διείσδυσης χλωριόντων των 24 ωρών σε συνάρτηση με αυτών των 6 ωρών. Η καμπύλη περιγραφής της σχέσης είναι ευθεία της μορφής $y = ax + b$. Σαν εξαρτημένη μεταβλητή y χρησιμοποιήθηκε ο D_{nssm} 24 ωρών και σαν ανεξάρτητη μεταβλητή x ο συντελεστής D_{nssm} 6 ωρών. Ο πληθυσμός του δείγματος περιλάμβανε 40 τιμές για την κάθε μεταβλητή, με την αντιστοιχία των τιμών να φαίνεται στον Πίνακα 14. Υπενθυμίζεται ότι για κάθε πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 2 δοκίμια, ένα από κάθε ομάδα Α και Β.

Πίνακας 14: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων για κάθε δοκίμιο

	ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	Dnssm-24h	Dnssm-6h
28 ΗΜΕΡΩΝ	S1A	1.283E-11	2.088E-11
	S1B	1.428E-11	2.021E-11
	S2A	1.02877E-11	1.455E-11
	S2B	1.11326E-11	1.51784E-11
	S3A	1.439E-11	1.912E-11
	S3B	1.65E-11	2.169E-11
	S4A	1.95E-12	1.97E-12
	S4B	2.44E-12	1.49E-12
	S5A	9E-12	1.169E-11
	S5B	8.91E-12	1.006E-11
	S6A	1.6E-12	1.51E-12
	S6B	1.51E-12	1.46E-12
	S7A	4.07E-12	2.94E-12
	S7B	3.05E-12	4.35E-12
	S8A	3.0276E-12	3.74426E-12
	S8B	3.31327E-12	3.64422E-12
	S9A	1.01236E-11	1.36841E-11
	S9B	1.04189E-11	2.00123E-11
	S10A	1.34686E-11	1.48166E-11
	S10B	1.41336E-11	1.52572E-11
110 ΗΜΕΡΩΝ	S1A	1.19894E-11	1.84787E-11
	S1B	1.543E-11	1.822E-11
	S2A	1.17275E-11	1.15238E-11
	S2B	1.25574E-11	1.60088E-11
	S3A	9.70874E-12	1.32327E-11
	S3B	1.09682E-11	1.16397E-11
	S4A	8.96559E-13	1.2455E-12
	S4B	1.09827E-12	2.38645E-12
	S5A	6.16156E-12	6.4485E-12
	S5B	7.95052E-12	8.61936E-12
	S6A	9.7374E-13	1.80866E-12
	S6B	1.48311E-12	1.67512E-12
	S7A	3.64973E-12	3.23687E-12
	S7B	3.80329E-12	3.39927E-12
	S8A	3.46976E-12	4.17765E-12
	S8B	4.29168E-12	3.81277E-12
	S9A	1.0743E-11	1.01542E-11
	S9B	1.06118E-11	1.12458E-11
	S10A	8.02081E-12	8.12272E-12
	S10B	7.60542E-12	9.94295E-12

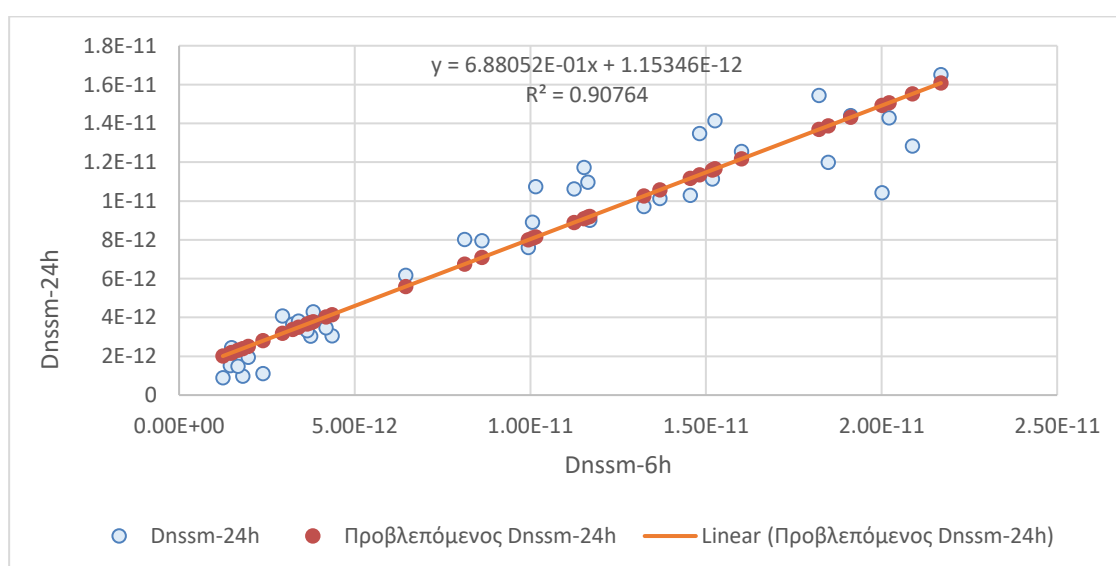
Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές και οι προβλεπόμενες τιμές, με βάση την απλή γραμμική παλινδρόμηση, των $Dnssm$ 24 ωρών, σε συνάρτηση με τους συντελεστές $Dnssm$ 6 ωρών. Επίσης φαίνεται και η ευθεία συσχέτισης αυτών των 2, η οποία είναι:

$$Dnssm24 = 1.15346E - 12 + 0.688052 * Dnssm6 \quad (9)$$

και ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης:

$$R^2 = 0.90764 \quad (10)$$

Το τυπικό σφάλμα βρέθηκε $1.484E-12$ και η σημαντικότητα $F = 2.97E-21$, η οποία εφόσον είναι πολύ μικρότερη από 1%, δείχνει ότι η επίδραση μεταξύ των 2 συντελεστών μπορεί να χαρακτηριστεί στατιστικά σημαντική. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης κρίθηκε ως αρκετά ικανοποιητικός ($0.7 < R^2 < 1$), ώστε να θεωρηθεί ότι η ευθεία δύναται να χρησιμοποιηθεί ώστε να προβλεφθεί ένας συντελεστής διείδυσης χλωριόντων 24 ωρών αν είναι γνωστός αυτός των 6 ωρών. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε ότι όταν η τιμή του συντελεστή 6 ωρών είναι μικρότερη από $5.00E-12$ η τιμή του πειραματικού συντελεστή και του προβλεπόμενου συντελεστή είχαν πολύ μικρή απόκλιση. Αντίθετα, όταν η τιμή του συντελεστή 6 ωρών ξεπερνάει το $1.00E-11$, τότε η απόκλιση δείχνει να μεγαλώνει. Άρα συμπερασματικά, στα σκυροδέματα με υψηλή αντίσταση στη διείδυση των χλωριόντων η πειραματική διαδικασία του προτύπου NT Build 492 μπορεί να διαρκέσει 6 ώρες αντί για 24, καθώς η τιμή του προβλεπόμενου συντελεστή θα είναι αρκετά κοντά με αυτή του πειραματικού. Για τα υπόλοιπα σκυροδέματα η τιμή του προβλεπόμενου συντελεστή μπορεί να μην μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια την ενδεχόμενη πειραματική τιμή, όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό τους ως προς την αντίσταση του στη διείδυση χλωριόντων, σύμφωνα με τους πίνακες 5-6, των **Tang (1996)** και **Nilson et al (1998)**. Ο χαρακτηρισμός τους βάσει των προβλεπόμενων συντελεστών, παρουσιάζεται στον Πίνακα 15.



Σχήμα 7: Διάγραμμα απλής γραμμικής παλινδρόμησης του συντελεστή $Dnssm$ 24 ωρών, σε συνάρτηση με τον συντελεστή $Dnssm$ 6 ωρών

Πίνακας 15: Χαρακτηρισμός των συνθέσεων σκυροδέματος για την αντίσταση τους στη διείσδυση χλωριόντων, βάσει των προβλεπόμενων συντελεστών διείσδυσης 24 ωρών

Σύνθεση	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΙΣ 28 ΗΜΕΡΕΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΙΣ 110 ΗΜΕΡΕΣ
REF-0.55	Χαμηλή	Μέτρια
REF-0.50	Μέτρια	Μέτρια
FA20	Χαμηλή	Υψηλή
FA10	Μέτρια	Υψηλή
GS20	Υψηλή	Υψηλή
GS10	Μέτρια	Υψηλή
MK20	Εξαιρετικά Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή
MK10	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή
SF20	Εξαιρετικά Υψηλή	Εξαιρετικά Υψηλή
SF10	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή

Συγκρίνοντας τους χαρακτηρισμούς των συνθέσεων σκυροδέματος, όπως αυτοί παρουσιάζονται στους Πίνακες 12 και 15, παρατηρείται ότι κατά βάση υπάρχει συμφωνία χαρακτηρισμών, μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών και των πειραματικών τιμών, με 3 μόνο περιπτώσεις, κατά τις οποίες υπάρχει απόκλιση.

Μάλιστα, συμφωνία παρατηρείται πάντα όταν ο χαρακτηρισμός των συνθέσεων είναι «πολύ υψηλός» ή «εξαιρετικά υψηλός». Εξαιρέση αποτελούν οι συνθέσεις REF-0.55 στις 28 ημέρες συντήρησης και οι συνθέσεις FA20 και GS10, όπου φαίνεται ότι η επιτάχυνση του πειράματος, οδηγεί σε υπερεκτίμηση της κατηγορίας της κατηγορίας αντίστασης. Φαίνεται πάντως ότι στην περίπτωση σκυροδέματος υψηλής αντίστασης, η διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, μπορεί να περιορίζεται.

6. Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είχε ως στόχο τη μελέτη τεσσάρων παραμέτρων ανθεκτικότητας σκυροδέματος με τσιμεντοειδή πρόσθετα. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η θλιπτική αντοχή, το ανοιχτό πορώδες, η τριχοειδής απορρόφηση και η αντίσταση τους στην διείσδυση χλωριόντων. Για την τελευταία, μελετήθηκε επίσης η επίδραση της διάρκειας της μεθόδου εκτίμησης (NT Build 492) στις τιμές των συντελεστών διείσδυσης χλωριόντων και ειδικότερα στον χαρακτηρισμό τους, σύμφωνα με την βιβλιογραφία. Συνολικά παράχθηκαν 10 συνθέσεις, 2 συνθέσεις αναφοράς με διαφορετικό λόγο ν/τ και 8 συνθέσεις που περιείχαν, ως υποκατάστατο του τσιμέντου, μετακαολίνη, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνου και πυριτική παιπάλη σε ποσοστά 20% και 10% κατά βάρος. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η θλιπτική αντοχή (f_c) αυξήθηκε σε όλες τις συνθέσεις από τις 28 στις 110 ημέρες. Ο μετακαολίνης, η πυριτική παιπάλη και η σκωρία υψικαμίνου βοήθησαν ιδιαίτερα στην αύξηση της σε σχέση με το αμιγές σκυρόδεμα, αντίθετα με την ιπτάμενη τέφρα. Οι συνθέσεις όπου τα τσιμεντοειδή πρόσθετα αντικατέστησαν το τσιμέντο κατά 10% κ.β. δεν την επηρέασαν σημαντικά την τιμή της. Τέλος, η μείωση του λόγου νερού/τσιμέντου επέφερε αύξηση στην αντοχή του σκυροδέματος.
- Το ανοιχτό πορώδες μειώθηκε με την πάροδο του χρόνου σε όλες τις συνθέσεις. Μεγάλη μείωση παρουσίασαν οι συνθέσεις με πυριτική παιπάλη. Αντίθετα οι υπόλοιπες το αύξησαν, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιήθηκαν σε μεγαλύτερα ποσοστά. Με την μείωση του λόγου ν/τ υπήρξε και μείωση της τιμής του πορώδους, με τη διαφορά να μεγαλώνει με την πάροδο του χρόνου.
- Ο συντελεστής τριχοειδής απορρόφησης παρουσίασε μεγάλη πτώση με την μείωση του λόγου ν/τ. Οι συνθέσεις με πυριτική παιπάλη είχαν τις μικρότερες τιμές με σημαντική διαφορά από τις υπόλοιπες. Ο μετακαολίνης και η σκωρία υψικαμίνου επηρέασαν θετικά τη τριχοειδής απορρόφηση. Αντίθετα με την προσθήκη της ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα ο συντελεστής αυξήθηκε.
- Από τη πειραματική διαδικασία 24 ωρών για την εύρεση του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} , βρέθηκε ότι γενικά υπήρξε μείωσή του από τις 28 στις 110 ημέρες. Οι συνθέσεις που περιείχαν μετακαολίνη και πυριτική παιπάλη οδήγησαν στην παρασκευή σκυροδεμάτων υψηλής αντίστασης. Επίσης η προσθήκη σκωρίας υψικαμίνου μείωσε τον συντελεστή σε σχέση με το αμιγές σκυρόδεμα. Η χρησιμοποίηση της ιπτάμενης τέφρας δεν βελτίωσε τον συντελεστή στις πρώτες 28 ημέρες, όμως στις 110 ημέρες όλες οι συνθέσεις με τσιμεντοειδή πρόσθετα παρουσίασαν καλύτερη αντίσταση σε σχέση με την αμιγή σύνθεση. Τέλος, με τη μείωση του συντελεστή ν/τ υπήρξε μείωση και στην τιμή του συντελεστή.

- Στην πειραματική διαδικασία των 6 ωρών για την εύρεση του συντελεστή διεύθυνσης χλωριόντων, παρατηρήθηκε παρόμοια συμπεριφορά στα σκυροδέματα με αυτή που παρατηρήθηκε στην πειραματική διαδικασία 24 ωρών. Η ευθεία που υπολογίστηκε μέσω απλής γραμμικής παλινδρόμησης, ώστε να προβλέπει τους συντελεστές 24 ωρών από αυτούς των 6 ωρών, παρουσίασε μεγάλη σημαντικότητα και ικανοποιητικό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ειδικότερα για τις χαμηλές τιμές του συντελεστή, που αντιστοιχούν σε σκυρόδεμα πολύ υψηλής ή εξαιρετικά υψηλής αντίστασης στη διεύθυνση Cl^- .

Συνοψίζοντας, βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων, η προσθήκη της πυριτικής παιπάλης βελτίωσε σε μεγάλο βαθμό όλες τις παραμέτρους ανθεκτικότητας που μελετήθηκαν. Οι συνθέσεις με μετακαολίνη παρουσίασαν εντυπωσιακές τιμές στην θλιπτική αντοχή και στην αντίσταση διεύθυνσης χλωριόντων, ενώ και αυτές με σκωρία υψικαμίνου παρουσίασαν ικανοποιητικές τιμές σε αυτές τις 2 παραμέτρους, αλλά και στην τριχοειδή απορρόφηση. Η ιπτάμενη τέφρα μπορεί να χαρακτηριστεί ως το λιγότερο αποδοτικό από τα 4 τσιμεντοειδή πρόσθετα, καθώς δεν αύξησε την θλιπτική αντοχή και δεν βελτίωσε την τριχοειδή απορρόφηση και το ανοιχτό πορώδες. Η επίδραση της στην αντίσταση διεύθυνσης χλωριόντων ήταν θετική στις 110 ημέρες. Τέλος, η μείωση του λόγου νερού/τσιμέντου επηρέασε θετικά και τις 4 παραμέτρους ανθεκτικότητας που μελετήθηκαν.

Φαίνεται ότι με τη χρήση συγκεκριμένων τσιμεντοειδών προσθέτων και με τη μείωση του λόγου v/t , οι κατασκευές που εκτίθενται σε διαβρωτικές συνθήκες, κυρίως λόγω θαλασσινού νερού, μπορούν να προστατευθούν εξίσου αποτελεσματικά. Αξίζει, λοιπόν, να μελετηθεί η ενδεχόμενη οικονομική και περιβαλλοντική ωφέλεια που μπορεί να υπάρξει στην κατασκευή έργων από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Βιβλιογραφία

1. Δ. Βασιλείου (2014): Επιρροή παραθαλάσσιου περιβάλλοντος στην ανθεκτικότητα μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Πτυχιακή Εργασία, Τ.Ε.Ι Πειραιά, Αθήνα.
2. Δ. Βούκια (2013): Διαπερατότητα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με μετακαολίνη, Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
3. Ε. Ι. Μακρινού (2017): Ανθεκτικότητα Κονιαμάτων Με Τσιμεντοειδή Πρόσθετα, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ.
4. ΕΛΟΤ EN 197-1 (2000): Σύνθεση, Προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα
5. Θ. Π. Τάσιος (1993): Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος. Αθήνα: Εκδόσεις Φοίβος
6. Κ. Σιδέρης (2010): Ανθεκτικότητα κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Σέλκα - 4Μ.
7. Καραστεργίου Α. (2009): Μελέτη της συνεργατικής υδροθερμικής κατεργασίας ιπτάμενης τέφρας και μεταλλουργικής σκωρίας για την παρασκευή δομικών υλικών. Διπλωματική Εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη
8. Κόλιας Σ. (2011-2012): Προχωρημένη τεχνολογία σκυροδέματος. Σημειώσεις Διατμηματικού Προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών Ε.Μ.Π. <<Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών>>, Αθήνα
9. Μ. Φαρδής (2005): Μαθήματα Οπλισμένου Σκυροδέματος. In Μέρος ΙΙΙ. Πάτρα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.
10. Π. Ε. Γκαμαράζης (2018): Μελέτη Παραμέτρων Ανθεκτικότητας Σκυροδέματος Με Τσιμεντοειδή Πρόσθετα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ
11. Παπακώστα Α, & Τσιάρα Α. (2015): Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου - με ίνες χάλυβα -σκυροδέματος σε περιβάλλον θεικών. Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
12. Τριανταφύλλου Χ Α. (2005): Δομικά Υλικά. 7η Έκδοση, Πάτρα.

13. X. M. Στρατουρά (2015): Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου σκυροδέματος. Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
14. ASTM, C. (1997). 642-97, “. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, 2(3.4), 3-9
15. Au, C. T., Roberts, M. W., & Zhu, A. R. (1982). Surface hydroxylation at a Zn (0001)-O surface. *Surface Science Letters*, 115(2), L117-L123.
16. Badogiannis, E. G., Sfikas, I. P., Voukia, D. V., Trezos, K. G., & Tsivilis, S. G. (2015). Durability of metakaolin self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 82, 133-141
17. Badogiannis, E., & Tsivilis, S. (2009). Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(2), 128-133.
18. Beycioğlu, A., & Aruntaş, H. Y. (2014). Workability and mechanical properties of self-compacting concretes containing LLFA, GBFS and MC. *Construction and building materials*, 73, 626-635.
19. BSI. (2009). BS EN 12390-3: 2009: Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens.
20. Fib Bulletin 34. (2006). Model code for service life design. *International Federation for Structural Concrete (fib)*
21. Gill, A. S., & Siddique, R. (2017). Strength and micro-structural properties of self-compacting concrete containing metakaolin and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 157, 51-64.
22. Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Karaoğlu, S., & Mermerdaş, K. (2012). Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. *Construction and Building Materials*, 34, 120-130
23. Kanellopoulos, A., Ioannou, I., & Petrou, M. F. (2009). Towards more sustainable and environmentally-friendly concretes: the use of silica fume. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 120, 265-270.
24. Khatib, J. M., & Hibbert, J. J. (2005). Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin. *Construction and building materials*, 19(6), 460-472.

25. Leung, H. Y., Kim, J., Nadeem, A., Jaganathan, J., & Anwar, M. P. (2016). Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials*, 113, 369-375.

26. Ludwing U, & Singh N B. (1986). *Cement- Kalk- Gips*. Vol 39

27. Majhi, R. K., & Nayak, A. N. (2019). Bond, durability and microstructural characteristics of ground granulated blast furnace slag based recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 212, 578-595.

28. Mather, B. (1982). Concrete in sea water. *Concrete International*, 4(3), 28-34.

29. Matthews, R. W. (1984). Hydroxylation reactions induced by near-ultraviolet photolysis of aqueous titanium dioxide suspensions. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 80(2), 457-471.

30. Nadesan, M. S., & Dinakar, P. (2018). Influence of type of binder on high-performance sintered fly ash lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 176, 665-675

31. 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.

32. NT Build 492 NT BUILD 492. (1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. *Nordtest method*.

33. Regourd, M., Thomassin, J. H., Baillif, P., & Touray, J. C. (1983). Blast-furnace slag hydration. Surface analysis. *Cement and Concrete Research*, 13(4), 549-556.

34. Rilem, T. C. (1999). 116-PCD. Permeability of concrete as a criterion of its durability. *Materials and Structures*, 32(4), 174-179.

35. Saboo, N., Shivhare, S., Kori, K. K., & Chandrappa, A. K. (2019). Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties. *Construction and Building Materials*, 223, 322-328.

36. Sfikas, I. P., Kanellopoulos, A., Trezos, K. G., & Petrou, M. F. (2013). Durability of similar self-compacting concrete batches produced in two different EU laboratories. *Construction and Building Materials*, 40, 207-216

37. Stambaugh, N. D., Bergman, T. L., & Srubar III, W. V. (2018). Numerical service-life modeling of chloride-induced corrosion in recycled-aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 161, 236-245.

38. Stratoura, M., Iaz, D. R., & Badogiannis, E. (2018). Chloride penetration in lightweight aggregate mortars incorporating supplementary cementing materials. *Advances in Civil Engineering*, 2018.

39. Tan X, & Gong Y. (1983). Priliminary analysis on BOS slag use in Bao Steelworks. Internal information for design of Bao Steelworks. (8pp.).

40. Tang L. (1996). Chloride Transport in Concrete - Measurement and Prediction. Doctoral work, Chalmers University of Technology, Göteborg.

41. 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.

42. Teng, S., Lim, T. Y. D., & Divsholi, B. S. (2013). Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 40, 875-881.

43. Thomas, M. D. A., & Bentz, E. C. (2001). LIFE-365TM Service Life Prediction Model, Users Manual. *Silica Fume Association*

44. Van den Heede, P., Maes, M., & De Belie, N. (2014). Influence of active crack width control on the chloride penetration resistance and global warming potential of slabs made with fly ash+ silica fume concrete. *Construction and Building Materials*, 67, 74-80

45. Yu, B., Ma, Q., Huang, H. C., & Chen, Z. (2019). Probabilistic prediction model for chloride diffusion coefficient of concrete in terms of material parameters. *Construction and Building Materials*, 215, 941-957.

46. Yu, Z., & Ye, G. (2013). The pore structure of cement paste blended with fly ash. *Construction and Building Materials*, 45, 30-35.

Παράρτημα

Θλιπτική αντοχή

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ		ΒΑΡΟΣ (gr)	ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	
			(kN)	(MPa)
S1	S1-A	2354.99	525.169	52.517
	S1-B	2359.45	506.027	50.603
	S1-C	2393.97	523.962	52.396
S2	S2-A	2346.00	604.056	60.406
	S2-B	2362.00	575.833	57.583
	S2-C	2380.00	584.625	58.463
S3	S3-A	2381.00	437.302	43.730
	S3-B	2357.00	437.322	43.732
	S3-C	2341.00	438.809	43.881
S4	S4-A	2388.06	708.599	70.860
	S4-B	2371.44	799.249	79.925
	S4-C	2347.35	792.114	79.211
S5	S5-A	2395.10	693.05	69.305
	S5-B	2358.30	664.21	66.421
	S5-C	2357.70	640.78	64.078
S6	S6-A	2354.32	770.334	77.033
	S6-B	2347.86	613.369	61.337
	S6-C	2324.20	701.615	70.162
S7	S7-A	2315.57	552.901	55.290
	S7-B	2236.55	598.416	59.842
	S7-C	2262.59	620.058	62.006
S8	S8-A	2361.06	570.457	57.046
	S8-B	2393.90	612.243	61.224
	S8-C	2395.47	596.682	59.668
S9	S9-A	2341.67	540.158	54.016
	S9-B	2398.41	510.925	51.093
	S9-C	2323.12	464.579	46.458
S10	S10-A	2397.35	594.948	59.495
	S10-B	2382.85	547.623	54.762
	S10-C	2361.88	556.365	55.637

Σχήμα ΠΙ: Ενδεικτικός πίνακας μετρήσεων θλιπτικής αντοχής στις 28 ημέρες

Τριχοειδής απορρόφηση

Πίνακας : Τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity)									
Αριθμός δοκιμίου :		A							
Σύνθεση :		S4							
Ημερομηνία :		29/May/19							
W _o (g) :		674.70							
A/A	T(h)	T(min)	t ^{0.5}	W (gr)	dW (g)	i (mm)	S (mm/min ^{0.5})		
1	0:01:00	1	1	676.21	1.51	0.192259	0.1923		
2	0:04:00	4	2	677.53	2.83	0.360327	0.1802		
3	0:09:00	9	3	678.56	3.86	0.49147	0.1638		
4	0:16:00	16	4	679.50	4.80	0.611155	0.1528		
5	0:25:00	25	5	680.48	5.78	0.735932	0.1472		
6	0:36:00	36	6	681.42	6.72	0.855617	0.1426		
7	0:49:00	49	7	682.41	7.71	0.981668	0.1402		
8	1:04:00	64	8	683.35	8.65	1.101352	0.1377		
9	1:21:00	81	9	684.34	9.64	1.227403	0.1364		
10	1:40:00	100	10	685.35	10.65	1.356	0.1356		
11	2:01:00	121	11	686.36	11.66	1.484597	0.1350		
12	2:24:00	144	12	687.33	12.63	1.608102	0.1340		
13	2:49:00	169	13	688.28	13.58	1.729059	0.1330		
Regression analysis									
14	3:16:00	196	14	689.26	14.56	1.853837	0.1324	R square :	0.9996
15	3:45:00	225	15	690.25	15.55	1.979887	0.1320	S (mm/min^{0.5}) :	0.1255
16	4:16:00	256	16					S (mm/min^{0.5})_{avg} :	0.1463

Σχήμα Π2: Ενδεικτική τεχνική αναφορά όπως αυτή συμπληρώθηκε κατά την διεξαγωγή του πειράματος τριχοειδούς απορρόφησης.

Διείσδυση Χλωριόντων

ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ					
ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	S2-A(1)		ΚΩΔΙΚΟΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	TAX.S2-A(1).Ca(OH)2.28-24	
ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	Ca(OH) ₂		ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ/ΕΣ	ΠΟΤΕΤΣΙΑΝΑΚΗΣ Ε	
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	11/4/2019			ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ Ε	
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗΣ	14/3/2019				
ΗΛΙΚΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (ημέρες)	28				
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ (ώρες)	24				
ΔΙΑΛΥΜΑ ΚΑΘΟΔΟΥ			ΔΙΑΛΥΜΑ ΑΝΟΔΟΥ		
ΝΕΡΟ ΔΙΚΤΥΟΥ (g)	12000.00		ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ (g)	365.00	
ΧΛΩΡΙΟΥΧΟ ΝΑΤΡΙΟ NaCl (g)	1333.33		ΥΔΡΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΝΑΤΡΙΟΥ NaOH (g)	4.84	
ΠΟΣΟΣΤΟ NaCl ΣΤΟ ΔΙΑΛΥΜΑ (%)	10.00%		ΠΟΣΟΣΤΟ NaOH ΣΤΟ ΔΙΑΛΥΜΑ (%)	1.31%	
ΕΝΑΡΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ			ΛΗΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ		
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	29.60				
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.104				
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	4/11/2019		ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	4/12/2019	
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	11:32		ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	11:32	
ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	19.90		ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	20.40	
ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.066		ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.057	
ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	20.0		ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	18.9	
ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ			<p>Τομή Δοκιμίου: Διείσδυση Χλωριόντων</p>		
ΜΗΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm)	100.00				
ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΜΗΣ (mm)	34.00	34.00	35.00		
ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm)	34.33				
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ (kN)	22.79				
ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ (MPa)					
Xd1 (mm)	####	####	21.50		
Xd2 (mm)	####	####	22.00		
Xd3 (mm)	####	####	20.50		
Xd4 (mm)	####	####	21.50		
Xd5 (mm)	####	####	21.50		
Xd6 (mm)	####	####	20.00		
Xd7 (mm)	####	####	20.00		
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:			ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ (h)	24.00	
			ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	19.45	
			ΜΕΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ (mm)	21.00	
			ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ (m ² /s)	10.29E-12	
<p>Η μέτρηση μετά τις 6 ώρες μας έδειξε τάση 20.9V, ένταση ρεύματος 0.078A και θερμοκρασία 16.8°C</p>					

Σχήμα Π3: Ενδεικτική τεχνική αναφορά όπως αυτή συμπληρώθηκε κατά την διεξαγωγή διείσδυσης χλωριόντων.

ΕΞΟΔΟΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΟΣ															
Στατιστικά παλινδρόμησης															
Πολυώνιο R	0.95270														
R Τετράγωνο	0.90764														
Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο	0.90521														
Τυπικό σφάλμα	1.484E-12														
Μέγεθος δείγματος	40														
ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ															
	<i>βαθμιαί ελευθερίας</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Σημαντικότητα F</i>										
Παλινδρόμηση	1	8.22392E-22	8.22E-22	373.4549016	2.97099E-21										
Υπόλοιπο	38	8.36806E-23	2.2E-24												
Σύνολο	39	9.06073E-22													
	<i>Συντελεστής</i>	<i>Τυπικό σφάλμα</i>	<i>t</i>	<i>τιμή-P</i>	<i>Κατώτερο 95%</i>	<i>Υψηλότερο 95%</i>	<i>Κατώτερο 95.0%</i>	<i>Υψηλότερο 95.0%</i>							
Τεταγμένη επί την οριγή D24	1.15346E-12	4.14319E-13	2.783998	0.008322202	3.14718E-13	1.99221E-12	3.14718E-13	1.99221E-12							
D-6h	0.688052425	0.0356043	19.32498	2.97099E-21	0.615975289	0.760129562	0.615975289	0.760129562							
D24=1.15346275261363E-12 + 0.688052425027989*D6															

Σχήμα Π4: Πίνακας αποτελεσμάτων ανάλυσης απλής γραμμικής παλινδρόμησης μέσω του προγράμματος Excel

Μέγεθος δείγματος	Προβλεπόμενος D-24h	Υπόλοιπα
1	1.552E-11	-2.690E-12
2	1.506E-11	-7.790E-13
3	1.116E-11	-8.769E-13
4	1.160E-11	-4.644E-13
5	1.431E-11	8.097E-14
6	1.608E-11	4.227E-13
7	2.509E-12	-5.589E-13
8	2.179E-12	2.613E-13
9	9.197E-12	-1.968E-13
10	8.075E-12	8.347E-13
11	2.192E-12	-5.924E-13
12	2.158E-12	-6.480E-13
13	3.176E-12	8.937E-13
14	4.146E-12	-1.096E-12
15	3.730E-12	-7.021E-13
16	3.661E-12	-3.476E-13
17	1.057E-11	-4.452E-13
18	1.492E-11	-4.504E-12
19	1.135E-11	2.121E-12
20	1.165E-11	2.482E-12
21	1.387E-11	-1.878E-12
22	1.369E-11	1.740E-12
23	9.082E-12	2.875E-12
24	1.217E-11	6.839E-13
25	1.026E-11	-5.495E-13
26	9.162E-12	1.806E-12
27	2.010E-12	-1.114E-12
28	2.795E-12	-1.697E-12
29	5.590E-12	5.712E-13
30	7.084E-12	8.665E-13
31	2.398E-12	-1.424E-12
32	2.306E-12	-8.229E-13
33	3.381E-12	2.691E-13
34	3.492E-12	3.109E-13
35	4.028E-12	-5.581E-13
36	3.777E-12	5.148E-13
37	8.140E-12	2.603E-12
38	8.891E-12	1.721E-12
39	6.742E-12	1.278E-12
40	7.995E-12	-3.893E-13

Σχήμα Π5: Πίνακας υπολοίπων προβλεπόμενων συντελεστών διεύθυνσης χλωριόντων 24 ωρών