



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΑΥΤΟ-ΙΑΣΗ (SELF-HEALING)
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΠΡΟΣΜΙΚΤΩΝ.
ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΝΑΣ Θ. ΝΤΑΣΚΑ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:
Σ. ΤΣΙΒΙΛΗΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΑΥΤΟ-ΙΑΣΗ (SELF-HEALING)
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΝ ΠΡΟΣΜΙΚΤΩΝ.
ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΝΑΣ Θ. ΝΤΑΣΚΑ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Σ.ΤΣΙΒΙΛΗΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

Κ. ΤΣΑΚΑΛΑΚΗΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

Ε. ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2018

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- Τον Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κύριο Σωτήριο Τσιβιλί για την ανάθεση και την επίβλεψη της παρούσας εργασίας, αλλά και για την εμπιστοσύνη και τη στήριξη που μου παρείχε.
- Τον Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Χημικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Κωνσταντίνο Ασπιώτη για την υποστήριξη, την βοήθεια και το άριστο κλίμα συνεργασίας που δημιούργησε.
- Τον Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κύριο Ευστράτιο Μπαδογιάννη, για τη βοήθεια του στις δοκιμές διείδυσης χλωριόντων και για τις πολύτιμες συμβουλές του.
- Την Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Μαρία Στρατουρά για τη βοήθεια της στις δοκιμές διείδυσης χλωριόντων και για την υποστήριξη που μου παρείχε.
- Τους Διδάκτορες της Σχολής Χημικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Δημήτριο Κιούπη, Αγγελική Σκαροπούλου για το ομαλό κι ευχάριστο κλίμα που ειχαμε όλο αυτό το διάστημα.
- Την οικογένεια και τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη καθόλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Αυτό-ίαση Σκυροδέματος με χρήση κατάλληλων προσμίκτων. Δοκιμές ανθεκτικότητας.

Ντάσκα Α.Θ. (Επιβλέπων: Τσιβιλής Σ.)

Περίληψη

Αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της αυτό-ίασης (self-healing) ρωγμών που δημιουργήθηκαν τεχνητά σε δοκίμια σκυροδέματος. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με χρήση κατάλληλου συνδυασμού προσμίκτων (εμπορικών και μη). Έγιναν πέντε διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος με χρήση εμπορικού διογκωτικού πρόσθετου (Denka CSA #20), εμπορικού κρυσταλλικού πρόσθετου (Penetron® Admix) καθώς και μίγματος καρβοξυλικών οξέων και ανθρακικού νατρίου. Μετά την ωρίμανση των δοκιμίων για 28 ημέρες, δημιουργήθηκαν τεχνικές ρωγμές. Τα διερρηγμένα δοκίμια συντηρήθηκαν στο νερό και σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (έως 60 ημέρες) ελέγχθηκε η πρόοδος της αυτό-ίασης των ρωγμών με στερεοσκόπιο. Ακόμη, αξιολογήθηκε η αποτελεσματικότητα της αυτο-ίασης με επιλεγμένες δοκιμές ανθεκτικότητας και ειδικότερα υδατοαπορροφητικότητα, ανοιχτό πορώδες, διείσδυση χλωριόντων λόγω διαφοράς δυναμικού, διάχυση χλωριόντων, εμβάπτιση-ξήρανση και ψύξη-απόψυξη. Παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του πλάτους των ρωγμών, ενώ σε κάποιες συνθέσεις η αυτο-ίαση ήταν σχεδόν πλήρης. Ακόμη, οι δοκιμές ανθεκτικότητας πιστοποίησαν την αποτελεσματικότητα των χρησιμοποιηθέντων προσμίκτων στην αυτο-ίαση του σκυροδέματος.

Λέξεις Κλειδιά: αυτο-ίαση, σκυρόδεμα, ανθεκτικότητα, πορώδες, υδατοαπορροφητικότητα, διάχυση χλωριόντων, εμβάπτιση-ξήρανση, ψύξη-απόψυξη.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CHEMICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF INORGANIC CHEMISTRY

**Self-healing of concrete incorporating suitable admixtures.
Durability Tests.**

Ntaska A.Th. (supervised by Tsivilis S.)

Abstract

The subject of this thesis is the self-healing of concrete specimens. Five different mixes of concrete were prepared using cement type I, polypropylene fibers, superplasticizer, two commercial additives (Penetron® Admix, Denka CSA #20), two different dicarboxylic acids and sodium carbonate. The concrete specimens were water cured for 28 days and then artificially cracked (crack width up to 400 μm) in order to study the self-healing process. After cracking the specimens were water-cured and the residual crack width was measured with stereomicroscope after 40, 50 and 60 days. Significant crack reduction was observed while in some mixes the cracks were completely sealed. In terms of durability, the specimens were subjected to sorptivity test, to open porosity test, to migration and diffusion of chloride ions tests and to wet-dry and freeze-thaw cycles. The durability tests confirmed efficient self-healing of the studied specimens. The concrete mix containing the expansive additive and the dicarboxylic acids showed the best self-healing behavior.

Keywords: self-healing, concrete, durability, open porosity, sorptivity, chloride diffusion, wet-dry, freeze-thaw.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	8
2	Τσιμεντοειδή Υλικά.....	10
2.1	Τσιμέντο.....	10
2.1.1	Παρασκευή τσιμέντου.....	10
2.1.2	Τύποι τσιμέντου.....	13
2.2	Σκυρόδεμα.....	15
2.2.1	Παρασκευή σκυροδέματος-πρώτες ύλες.....	15
2.2.2	Βασικές ιδιότητες σκυροδέματος.....	15
2.2.3	Η ανθεκτικότητα στο σκυρόδεμα.....	17
2.2.4	Ειδικά σκυροδέματα.....	19
3	Θεωρητική επισκόπηση της αυτό-ίασης τσιμεντοειδών υλικών.....	20
3.1	Αυτό-ίαση.....	20
3.1.1	Μηχανισμοί αυτοίασης.....	20
3.1.2	Τεχνικές αυτό-ίασης.....	25
3.1.3	Μέθοδοι Μέτρησης-αξιολόγησης αυτό-ίασης.....	33
3.2	Αυτό-ίαση με χρήση διογκωτικών και κρυσταλλικών προσθέτων.....	35
4	Πειραματικό Μέρος.....	45
4.1	Εισαγωγή.....	45
4.2	Μελετηθέντα δοκίμια.....	45
4.2.1	Πρώτες ύλες.....	45
4.2.2	Συνθέσεις.....	45
4.3	Στερεοσκοπική επιθεώρηση δοκιμίων.....	47
4.4	Υδατοαπορροφητικότητα και Ανοιχτό Πορώδες.....	49
4.5	Εκτίμηση συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων.....	53
4.5.1	Διείσδυση χλωριόντων κατά Nordtest Build 492.....	53
4.5.2	Διάχυση χλωριόντων κατά Nordtest Build 443.....	57
4.6	Ανθεκτικότητα σε κύκλους εμβάπτισης-ξήρασης(wet-dry).....	62
4.7	Ανθεκτικότητα σε κύκλους ψύξης-απόψυξης.....	63
5	Αποτελέσματα και Συζήτηση Αποτελεσμάτων.....	64
5.1	Στερεοσκοπική επιθεώρηση.....	64
5.1.1	Σύνθεση M1-Δοκίμια αναφοράς (OPC 100%).....	64
5.1.2	Μίγμα M2 - (OPC 88.5%, Penetron® Admix 1.5%, DENKA CSA#20 10%).....	66
5.1.3	Μίγμα M5 - (OPC 90%, DENKA CSA#20 10%).....	69
5.1.4	Μίγμα M6 - (OPC 88.8%, DENKA CSA#20 10%, DA-1 0.26%, DA-2 0.08%, Sodium Carbonate 0.80%, Calcium Sulfate 0.06%).....	71
5.1.5	Μίγμα M7 - (OPC 88.55%, DENKA CSA#20 10%, DA-1 0.10%, DA-2 0.03%, Silica Fume 1.00%, Sodium Carbonate 0.30%, Calcium Sulfate 0.02%).....	74
5.1.6	Συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της στερεοσκοπικής επιθεώρησης.....	76
5.2	Δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας.....	77
5.3	Ανοιχτό Πορώδες.....	80
5.4	Διείσδυση Χλωριόντων.....	84
5.4.1	Προσδιορισμός διείσδυσης χλωριόντων με το Πρότυπο NT Build 492.....	84
5.4.2	Προσδιορισμός συντελεστή διάχυσης χλωριόντων με το Πρότυπο Nord Test Build 443.....	94
5.4.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων των πειραματικών διαδικασιών προσδιορισμού συντελεστή διάχυσης χλωριόντων σύμφωνα με τα Πρότυπα NT Build 492 και 443.....	100
5.5	Κύκλοι ξήρασης-εμβάπτισης.....	101
5.6	Κύκλοι ψύξης-απόψυξης.....	102

6	Συμπεράσματα.....	104
7	Βιβλιογραφία.....	105

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Διαγραμματική απεικόνιση των διαδικασιών που ακολουθούνται για την Παρασκευή τσιμέντου.(Πηγή:[2]).....	11
Σχήμα 2.2: Επίδραση της γύψου στην ενυδάτωση του C ₃ A.(Πηγή:[1]).....	12
Σχήμα 2.3: Ανάπτυξη αντοχών των συστατικών του κλίνκερ. (Πηγή:[1]).....	13
Σχήμα 2.4: Επίδραση του λόγου νερού προς τσιμέντου στην μορφή των πόρων και τη διαπερατότητα.	18
Σχήμα 2.5: Διαβρωτικές δράσεις στο σκυρόδεμα (Πήγη: [3]).....	19
Σχήμα 3.2: Οι ρωγμές γεμίζουν με λευκό υπόλειμμα. (a) άσπρο υπόλειμμα μετά από συντήρηση παρατηρείται στην επιφάνεια της ρωγμής δοκιμίου πλάτους 40 mm. (b) κρυσταλλικά προϊόντα σε ρωγμή εύρους 100 μm.	21
Σχήμα 3.3: Βελτιωμένη αυτογενής ίαση.	22
Σχήμα 3.4: Αυτό-ίαση με κάψουλες. Διαρροή του θεραπευτικού παράγοντα από τις κάψουλες μέσα στη ρωγμή εξαιτίας βαρυτικών και τριχοειδών δυνάμεων. Αντίδραση σφαιρικών/κυλινδρικών ενθυλακωμένων παραγόντων (σκουρόχρωμοι) έπειτα από επαφή με (A,B) υγρασία ή αέρα ή θερμότητα (C,D) με τη τσιμεντοειδή μήτρα (E,F) με ένα δεύτερο συστατικό που βρίσκεται στη μήτρα (μικρό, ανοιχτόχρωμο) ή (G,H) με ένα δεύτερο συστατικό που προσφέρεται από πρόσθετες κάψουλες (μεγάλο, ανοιχτόχρωμο).....	24
Σχήμα 3.5: Προσεγγίσεις αγγειακής αυτό-ίασης. Διαρροή του θεραπευτικού παράγοντα από τη δεξαμενή μέσω αγγείων στη ρωγμή εξαιτίας βαρυτικών και τριχοειδών δυνάμεων και υδροστατικής πίεσης. (A): Αγγειακό σύστημα ενός καναλιού, (B): Αγγειακό σύστημα πολλαπλών καναλιών.	25
Σχήμα 3.6: (α) Κοίλες ίνες γυαλιού και (β) εικόνα βλάβης με τη χρήση κοίλων_ινών αναμεμειγμένων με φθορίζουσες χρωστικές ουσίες [24].	26
Σχήμα 3.7: Σύστημα αυτο-ίασης σκυροδέματος με επιλεκτική_θέρμανση γύρω από τις ρωγμές [20].	27
Σχήμα 3.8: a)Βασική μέθοδος μικροενθυλάκωσης και (β)διάρρηξη μικροκάψουλας.[23]28	
Σχήμα 3.9: ESEM εικόνα προϊόντων επούλωσης με χρήση διογκωτικών υλικών[28].....	29
Σχήμα 3.10: Αυτο-ίαση με χρήση βακτηρίων στο σκυρόδεμα. Οι μεγαλύτεροι κρύσταλλοι ανθρακικού ασβεστίου (μεγέθους 50-500 μm) παράγονται από τα ενσωματωμένα στην επιφάνεια των ρωγμών βακτήρια [31].	31

Σχήμα 3.11: Σύγκριση μεταξύ των τεχνικών αυτό-ίασης[5].	32
Σχήμα 3.12: Εκτίμηση της αυτό-ίασης με οπτικές μεθόδους (Πηγή:[4]).	33
Σχήμα 3.13: Εκτίμηση της αυτό-ίασης με μελέτη της ανάκτησης της αντίστασης σε περατότητα (Πηγή:[4]).	34
Σχήμα 3.14: Εκτίμηση της αυτό-ίασης με μελέτη της ανάκτησης των μηχανικών ιδιοτήτων (Πηγή:[4]).	34
Σχήμα 3.15: Διάταξη κάμψης τεσσάρων σημείων.	38
Σχήμα 3.16: Καμπτική δυσκαμψία ιασμένων SHCC.	39
Σχήμα 3.17: Επιφανειακό κλείσιμο των ρωγμών των δοκιμίων της σύνθεσης M1 σε όλες τις συνθήκες έκθεσης.	40
Σχήμα 3.18: Επιφανειακό κλείσιμο ρωγμών δοκιμίου σύνθεσης M4, σε νερό βρύσης(αριστεράκαι σε βρασμένο νερό βρύσης (δεξιά).	41
Σχήμα 3.19: Σύνθεση M4- συνθήκη EC3 (εσωτερικό).	42
Σχήμα 3.20: Σύνθεση M4- συνθήκη CC1 (εσωτερικό).	42
Σχήμα 3.21: Σύνθεση M4- συνθήκη CC2 (εσωτερικό).	43
Σχήμα 3.22: Σύνθεση M4- συνθήκη CC1 (επιφάνεια).	43
Σχήμα 4.1: Διάταξη μέτρησης περιεχόμενου αέρα στο νωπό σκυρόδεμα.	46
Σχήμα 4.2: Διάταξη μέτρησης της θλίπτικής αντοχής κυβικών δοκιμίων στις 28 ημέρες.	47
Σχήμα 4.3: Στερεοσκόπιο Leica MZ 8.	47
Σχήμα 4.4: Προϊόντα ενυδάτωσης τσιμέντου α. για υψηλό λόγο νερού προς τσιμέντο, ... β. για μικρό λόγο νερού προς τσιμέντο(Πηγή:[40]).	50
Σχήμα 4.5: Σκαρίφημα διάταξης μέτρησης υδατοαπορροφητικότητας.	51
Σχήμα 4.6: Τοποθέτηση δοκιμίων πάνω σε μεταλλικά στηρίγματα μέσα σε δοχείο με νερό για την μέτρηση της υδατοαπορροφητικότητας.	51
Σχήμα 4.7: Δομή πόρων.	52
Σχήμα 4.8: Πειραματική διάταξη διείδυσης χλωριόντων σύμφωνα με πρότυπο nordtest build 492.	53
Σχήμα 4.9: Ηλεκτρική διάταξη.	54

Σχήμα 4.10: Διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για το χωρισμό των δοκιμίων_ελέγχου σε 2 τεμάχια και των ιασμένων δοκιμίων σε 4 τεμάχια.....	55
Σχήμα 4.11: Αναπαράσταση μετρήσεων βάθους διείσδυσης χλωριόντων.	56
Σχήμα 4.12: Τοποθέτηση δοκιμίων μετά τη μόνωση τους σε υδατικό διάλυμα 10% NaCl.....	58
Σχήμα 4.13: Βρασμός υπό ανάδευση του διαλύματος.	59
Σχήμα 4.14: Διάταξη διήθησης υπό πίεση.	59
Σχήμα 4.15: Προσθήκη στυπτηρίας μέχρι το χρωματισμό του διαλύματος.	60
Σχήμα 4.16: Ανάλυση παλινδρόμησης. Οι μπάρες εκφράζουν τις μετρημένες τιμές χλωριόντων. Η καμπύλη αντιπροσωπεύει το βέλτιστοποιημένο μαθηματικό μοντέλο.....	62
Σχήμα 5.1: Εικόνες από στερεοσκόπιο για δείγμα της σύνθεσης M7 από τη κάτω πλευρά του δοκιμίου που δείχνουν το κλείσιμο της ρωγμής με τη πάροδο του χρόνου.	64
Σχήμα 5.2: Πρόοδος αυτό-ίασης για το M1.	66
Σχήμα 5.3: Πρόοδος αυτό-ίασης για το M2.	68
Σχήμα 5.4: Πρόοδος αυτό-ίασης για το M5.	71
Σχήμα 5.5: Πρόοδος αυτό-ίασης για τα δοκίμια της σύνθεσης M6.	73
Σχήμα 5.6: Πρόοδος αυτό-ίασης για τα δοκίμια της σύνθεσης M7.	76
Σχήμα 5.7: Υδατοαπορροφητικότητα S (mm/min ^{0.5}) δοκιμίων ελέγχου, ανά σύνθεση. ...	78
Σχήμα 5.8: Υδατοαπορροφητικότητα S (mm/min ^{0.5}) ιασμένων δοκιμίων, ανά σύνθεση. .	79
Σχήμα 5.9: Ανοιχτό πορώδες OP (%) για τα δοκίμια ελέγχου, ανά σύνθεση.	81
Σχήμα 5.10: Ανοιχτό πορώδες OP (%) για τα ιασμένα δοκίμια, ανά σύνθεση.....	83
Σχήμα 5.11: Τεχνική αναφορά για ιασμένο δοκίμιο M6(διείσδυση χλωριόντων κάθετα στη ρωγμή).....	84
Σχήμα 5.12: Συντελεστής διείσδυσης D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s) σύμφωνα με το ΠρότυποNT Build 492 για τα δοκίμια ελέγχου.	86
Σχήμα 5.13: Εικόνα δοκιμίου ελέγχου της σύνθεσης M1 μετά από ψεκασμό με νιτρικό άργυρο για τη μέτρηση του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων.....	86
Σχήμα 5.14: Εικόνα δοκιμίου ελέγχου της σύνθεσης M2 μετά από ψεκασμό με νιτρικό άργυρο για τη μέτρηση του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων.....	87
Σχήμα 5.15: Εικόνα δοκιμίου ελέγχου της σύνθεσης M5 μετά από ψεκασμό με νιτρικό άργυρο για τη μέτρηση του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων.....	87

Σχήμα 5.16: Εικόνα δοκιμίου ελέγχου της σύνθεσης M6 μετά από ψεκασμό με νιτρικό άργυρο για τη μέτρηση του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων.....	88
Σχήμα 5.17: Εικόνα δοκιμίου ελέγχου της σύνθεσης M7 μετά από ψεκασμό με νιτρικό άργυρο για τη μέτρηση του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων.....	88
Σχήμα 5.18: Συντελεστής διείσδυσης D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s) στη διεύθυνση παράλληλα στη ρωγμή σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492 για τα ιασμένα δοκίμια.	90
Σχήμα 5.19: Εικόνα ιασμένου δοκιμίου M1 μετά το ψεκασμό του με νιτρικό άργυρο. Με το τεμαχισμό του σε 4 τμήματα φαίνεται το μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης στο μέσον του δοκιμίου όπου βρισκόταν η ρωγμή.	91
Σχήμα 5.20: Συντελεστής διείσδυσης D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s) κατά τη διεύθυνση κάθετα στη ρωγμή σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492 για τα ιασμένα δοκίμια.	92
Σχήμα 5.21: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα συντελεστή διείσδυσης D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s) κατά το NT Build 492.....	92
Σχήμα 5.22: Ποσοστά % Cl για τα 5 βάθη από τα οποία λήφθηκε υλικό για τα δοκίμια ελέγχου.	95
Σχήμα 5.23: Ανάλυση παλινδρόμησης. %Cl (measured και estimated) συναρτήσει του βάθους για το δοκίμιο M7Cc.....	96
Σχήμα 5.24: Ποσοστά % Cl για τα 5 βάθη από τα οποία λήφθηκε υλικό για τα ιασμένα δοκίμια.....	98
Σχήμα 5.25: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα συντελεστή διάχυσης D_c (m ² /s) για όλες τις συνθέσεις.....	99
Σχήμα 5.26: Μεταβολή μάζας δοκιμίων M (g) όταν αυτά υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ξήρανης-εμβάπτισης.....	101
Σχήμα 5.27: Μεταβολή μάζας δοκιμίων M(g) κατά την επιβολή τους σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης.....	103

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Τυπική ορυκτολογική ανάλυση κλίνκερ.	11
Πίνακας 2.2: Τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1.	14
Πίνακας 2.3: Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις σύμφωνα με το EN 197-1.	14
Πίνακας 2.4: Κατηγορίες κάθισης.	16
Πίνακας 2.5: Κατηγορίες Σκυροδέματος.	17
Πίνακας 3.1: Ορυκτολογική ανάλυση των CSA-α και CSA-β.	35
Πίνακας 3.2: Χημικές αναλύσεις των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για αυτό-ίαση[8].	35
Πίνακας 3.3: Σύνθεση κονιαμάτων για αυτό-ίασης[8]	36
Πίνακας 4.1: Σύσταση συνδετικού υλικού (%wt.)	45
Πίνακας 4.2: Σύσταση σκυροδέματος (kg/m ³)	46
Πίνακας 4.3: Ιδιότητες σκυροδέματος.	46
Πίνακας 4.4: Αντιστοίχιση της αρχικής έντασης ρεύματος με την τελική_εφαρμοζόμενη τάση και τη διάρκεια του πειράματος.	55
Πίνακας 4.5: Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση του στη διείδυση χλωριόντων, για διάφορες τιμές του συντελεστή διάχυσης.	57
Πίνακας 5.1: Πρόοδος αυτό-ίασης για το M1-Μετρήσεις στις 0, 40,50,60 ημέρες.	65
Πίνακας 5.2: Βαθμός ίασης για το M1.	65
Πίνακας 5.3: Μείωση της επιφάνειας των ρωγμών του M1.	65
Πίνακας 5.4: Βήμα μείωσης επιφάνειας ρωγμών μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων για το M1.	66
Πίνακας 5.5: Πρόοδος αυτό-ίασης για το M2-Μετρήσεις στις 0, 40,50,60 ημέρες.	67
Πίνακας 5.6: Βαθμός ίασης για τη σύνθεση M2.	67
Πίνακας 5.7: Μείωση της επιφάνειας των ρωγμών της σύνθεσης M2.	68
Πίνακας 5.8: Βήμα μείωσης επιφάνειας ρωγμών μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων για το M2.	68

Πίνακας 5.9: Πρόοδος αυτό-ίασης για το M5-Μετρήσεις στις 0, 40,50,60 ημέρες.	69
Πίνακας 5.10: Βαθμός ίασης για τη σύνθεση M5.	70
Πίνακας 5.11: Μείωση επιφάνειας ρωγμών των δοκιμίων της σύνθεσης M5.	70
Πίνακας 5.12: Βήμα μείωσης επιφάνειας ρωγμών μεταξύ διαδοχικών_μετρήσεων για τη σύνθεση M5.	70
Πίνακας 5.13: Πρόοδος αυτό-ίασης για το M6-Μετρήσεις στις 0, 40,50,60 ημέρες.	72
Πίνακας 5.14: Βαθμός ίασης δοκιμίων συνθεσης M6.	72
Πίνακας 5.15: Μείωση επιφάνειας ρωγμών των δοκιμίων της σύνθεσης M6.	72
Πίνακας 5.16: Βήμα μείωσης επιφάνειας ρωγμών μεταξύ διαδοχικών_μετρήσεων για τη σύνθεση M6.	73
Πίνακας 5.17: Πρόοδος αυτό-ίασης για το M7-Μετρήσεις στις 0, 40,50,60 ημέρες.	74
Πίνακας 5.18: Βαθμός ίασης δοκιμίων συνθεσης M7.	75
Πίνακας 5.19: Μείωση επιφάνειας ρωγμών των δοκιμίων της σύνθεσης M7.	75
Πίνακας 5.20: Βήμα μείωσης επιφάνειας ρωγμών μεταξύ διαδοχικών_μετρήσεων για τη σύνθεση M7.	75
Πίνακας 5.21: Αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας των μετρήσεων της στερεοσκοπικής επιθεώρησης.	76
Πίνακας 5.22: Δείγματα αναφοράς	77
Πίνακας 5.23: Ιασμένα δοκίμια.....	78
Πίνακας 5.24: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υδατοαπορροφητικότητας S (mm/min ^{0.5}) όλων των δοκιμίων.	79
Πίνακας 5.25: Σταθεροποίηση μάζας των δοκιμίων αναφοράς πριν τη μέτρηση του πορώδους.	80
Πίνακας 5.26: Μετρήσεις μάζων και υπολογισμός πυκνοτήτων για τον προσδιορισμό του πορώδους.	80
Πίνακας 5.27: Σύγκριση ανοιχτού πορώδους των συνθέσεων με τα πρόσθετα με τη σύνθεση M1(συμβατικό σκυρόδεμα) για τα δοκίμια αναφοράς.	81
Πίνακας 5.28: Έλεγχος Δm(g) για τα ιασμένα δοκίμια, ανά σύνθεση.....	82
Πίνακας 5.29: Μετρήσεις μαζών και υπολογισμός πυκνοτήτων για τον προσδιορισμό του πορώδους, ανά σύνθεση.	82
Πίνακας 5.30: Σύγκριση του ανοιχτού πορώδους OP(%) των ιασμένων δοκιμίων των συνθέσεων με τα πρόσθετα με τη σύνθεση M1(σύνθεση αναφοράς).	82

Πίνακας 5.31: Ανοιχτό πορώδες OP(%) – Σύγκριση ιασμένων δοκιμίων με τα δοκίμια ελέγχου, ανά σύνθεση.	83
Πίνακας 5.32: Μετρήσεις και αποτελέσματα από μέτρηση διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s) στα δοκίμια ελέγχου κατά το Πρότυπο NT Build 492.	85
Πίνακας 5.33: Κατάταξη δοκιμίων ελέγχου σε κατηγορίες αντίστασης έναντι διείσδυσης χλωριόντων σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492.	85
Πίνακας 5.34: Πειραματικές μετρήσεις στα ιασμένα δοκίμια παράλληλα στο επίπεδο της ρωγμής σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492.	89
Πίνακας 5.35: Κατάταξη ιασμένων δοκιμίων σε κατηγορίες αντίστασης έναντι διείσδυσης χλωριόντων κατά τη διεύθυνση παράλληλα στη ρωγμή σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492.	89
Πίνακας 5.36: Πειραματικές μετρήσεις στα ιασμένα δοκίμια κάθετα στο επίπεδο της ρωγμής σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492.	90
Πίνακας 5.37: Κατάταξη ιασμένων δοκιμίων σε κατηγορίες αντίστασης έναντι διείσδυσης χλωριόντων κατά τη διεύθυνση κάθετα στη ρωγμή σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492.	91
Πίνακας 5.38: Συντελεστής διείσδυσης D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s) κατά το NT Build 492.	93
Πίνακας 5.39: Αποτελέσματα από πειραματική διαδικασία προσδιορισμού των χλωριόντων για τα δοκίμια ελέγχου σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 443.	94
Πίνακας 5.41: Συντελεστής διάχυσης και παράμετροι προσδιορισμού αυτού για τα δοκίμια ελέγχου σύμφωνα με το Πρότυπο NT443.	96
Πίνακας 5.42: Αποτελέσματα από πειραματική διαδικασία προσδιορισμού των χλωριόντων για τα ιασμένα δοκίμια σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 443.	97
Πίνακας 5.43: Συντελεστής διάχυσης D_c (m ² /s) και παράμετροι προσδιορισμού αυτού για τα ιασμένα δοκίμια σύμφωνα με το Πρότυπο NT 443.	98
Πίνακας 5.44: Σύγκριση συντελεστή διάχυσης D_c (m ² /s) σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 443 μεταξύ των δοκιμίων ελέγχου και των ιασμένων δοκιμίων.	99
Πίνακας 5.45: Δείγματα Ελέγχου- Σύγκριση συντελεστών διάχυσης για τα Πρότυπα NT492 και NT443.	100
Πίνακας 5.46: Ιασμένα δείγματα-Σύγκριση συντελεστών διάχυσης για τα Πρότυπα NT492 και NT443.	100
Πίνακας 5.47: Μάζες των δοκιμίων κατά τη δοκιμή ξήρανσης-εμβάπτισης.	101
Πίνακας 5.48: Μάζες δοκιμίων κατά την επιβολή τους σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης.	102

1 Εισαγωγή

Τα τσιμεντοειδή υλικά είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κατασκευαστικά υλικά στο κόσμο. Ωστόσο, εξαιτίας της αναπόφευκτης υποβάθμισης που υφίστανται, απαιτούνται εργασίες συντήρησης και επισκευών. Συγκεκριμένα, ένα σημαντικό μειονέκτημα του σκυροδέματος είναι η μειωμένη αντοχή σε εφελκυσμό που οδηγεί σε ρηγμάτωση αυτού έπειτα από έμμεση/άμεση φόρτιση και υπό την επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων. Μέσω των ρωγμών αυτών είναι δυνατή η είσοδος βλαβερών παραγόντων οι οποίοι οδηγούν σε μείωση του χρόνου ζωής των κατασκευών από σκυρόδεμα. Το κόστος επισκευής των ρωγμών είναι σημαντικό, ενώ πολλές φορές η επιθεώρηση και η επισκευή τους είναι δύσκολη με αποτέλεσμα να δημιουργείται η ανάγκη «πρόβλεψης», δηλαδή η εξ' αρχής παρασκευή σκυροδέματος με ικανότητα αυτο-ίασης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ικανότητα αυτο-ίασης του σκυροδέματος οδηγεί και σε σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Έχουν αναπτυχθεί ποικίλες στρατηγικές αυτο-ίασης, μια εκ των οποίων είναι η ενσωμάτωση διογκωτικών και κρυσταλλικών προσθέτων.

Στην παρούσα διπλωματική μελετάται η αυτο-ίαση σκυροδέματος με χρήση κατάλληλου συνδυασμού προσμίκτων, ανάμεσα τους και το διογκωτικό πρόσθετο Denka και το κρυσταλλικό πρόσθετο Penetron. Συγκεκριμένα, μελετάται η πρόοδος της αυτο-ίασης δοκιμίων σκυροδέματος πέντε διαφορετικών συνθέσεων με αναλυτικές τεχνικές, ενώ παράλληλα αξιολογείται η αποτελεσματικότητα της αυτο-ίασης με επιλεγμένες δοκιμές ανθεκτικότητας. Τα δοκίμια αφού παρασκευάστηκαν και ωρίμασαν στο εργαστήριο, ρηγματώθηκαν τεχνητά και συντηρήθηκαν σε νερό προκειμένου να επιδιορθωθούν οι ρωγμές μέσω αυτο-ίασης. Τα δοκίμια επιθεωρήθηκαν οπτικά με χρήση στεροσκοπίου, ενώ υποβλήθηκαν σε δοκιμές υδατοαπορροφητικότητας, μέτρηση ανοιχτού πορώδους, διείσδυση και διάχυση χλωριόντων, κύκλους ξήρανσης-εμβάπτισης και ψύξης-απόψυξης για τη μελέτη της ανθεκτικότητας τους. Ακολούθησε συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των ιασμένων δοκιμίων και των δοκιμίων ελέγχου, τα οποία δε ρηγματώθηκαν, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αποκατάσταση των ιδιοτήτων των δοκιμίων σκυροδέματος.

Πιο συγκεκριμένα η δομή της διπλωματικής εργασίας διαμορφώθηκε ως εξής:

- Κεφάλαιο 1 «Εισαγωγή»: Παρατίθενται εισαγωγικά στοιχεία για την εργασία.
- Κεφάλαιο 2 «Συμβατικά δομικά υλικά»: Παρουσιάζονται ο ορισμός, η σύσταση, η κωδικοποίηση καθώς και οι σημαντικότερες ιδιότητες του τσιμέντου και του σκυροδέματος καθώς επίσης και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα τους.
- Κεφάλαιο 3 «Θεωρητική επισκόπηση στην έννοια της αυτο-ίασης τσιμεντοειδών»: Παρουσιάζονται οι τεχνικές αυτο-ίασης και αξιολόγησης της αυτο-ίασης τσιμεντοειδών υλικών και αναπτύσσονται πιο αναλυτικά συγκεκριμένοι μηχανισμοί.
- Κεφάλαιο 4 «Πειραματικό Μέρος»: Περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε.
- Κεφάλαιο 5 «Αποτελέσματα και συζήτηση αποτελεσμάτων»: Παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της οπτικής επιθεώρησης και των δοκιμών ανθεκτικότητας.

- Κεφάλαιο 6 «Συμπεράσματα»: Παρατίθενται τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας.
- Τέλος, παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

2 Τσιμεντοειδή Υλικά

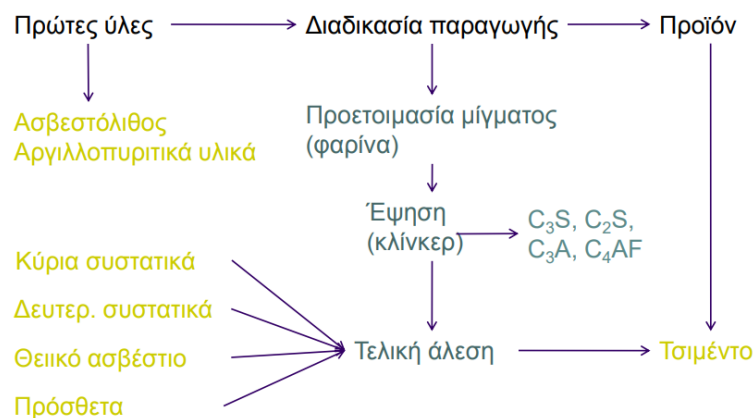
2.1 Τσιμέντο

Για τη περιγραφή του όρου τσιμέντο είναι αναγκαίο να αναφερθούμε πρωτίστως στον όρο κονία. Ως *κονία* χαρακτηρίζεται κάθε υλικό το οποίο με κατάλληλη προεργασία γίνεται πλαστικό και εκδηλώνει συγκολλητικές ιδιότητες και το οποίο βαθμιαία στερεοποιείται έως ότου σχηματίσει σκληρή και συμπαγής μάζα. Η κονία είναι μία συνδετική ύλη. Αερικές κονίες είναι αυτές που σκληρύνονται μόνο σε επαφή με τον αέρα. Τυπικό παράδειγμα αερικής κονίας είναι ο ασβέστης. Υδραυλικές κονίες είναι αυτές που σκληρύνονται και παραμένουν σκληρές χωρίς την παρουσία αέρα, ακόμα και κάτω από το νερό. Η χαρακτηριστικότερη υδραυλική κονία είναι το τσιμέντο. Το τσιμέντο είναι ένα λεπτοαλεσμένο ανόργανο υλικό, το οποίο όταν αναμειχθεί με νερό σχηματίζει μία πάστα που λόγω των *αντιδράσεων ενυδάτωσης* πήζει (παύει να έχει υδραυλικές ιδιότητες) και σκληρύνεται (αναπτύσει τις αντοχές του μετά την πήξη) έχοντας έκτοτε την ικανότητα να διατηρεί τις αντοχές της και τη σταθερότητα της ακόμα και κάτω από το νερό[1].

2.1.1 Παρασκευή τσιμέντου

Στη παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Πόρτλαντ, ένα προϊόν που προκύπτει μετά την έψηση σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης (1380-1420°C) ενός πλήρως ομοιογενοποιημένου μίγματος που αποτελείται από ασβεστολιθικά υλικά σε ποσοστό της τάξεως του 35% και από αργιλοπυριτικά υλικά της τάξεως του 25% και συνάλεση του προκύπτοντος προϊόντος που καλείται *κλίνκερ* με κατάλληλη ποσότητα *γύψου*. Πιο συγκεκριμένα, το κλίνκερ του τσιμέντου Πόρτλαντ παρασκευάζεται με έψηση σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης (1380-1420°C) ενός σωστά επιλεγμένου, πλήρως ομοιογενοποιημένου και κατάλληλα αλεσμένου μίγματος (φαρίνα) πρώτων υλών που περιέχει CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ και μικρές ποσότητες από άλλα στοιχεία. Η παραπάνω διαδικασία απεικονίζεται στο **Σχήμα 2.1**. Το κλίνκερ του τσιμέντου Πόρτλαντ (Κ) είναι ένα υδραυλικό υλικό που συνίσταται τουλάχιστο κατά τα 2/3 κ.β. από C₃S και C₂S ενώ το υπόλοιπο κατά κύριο λόγο συνίσταται από τις αργλικές και σιδηραργλικές φάσεις του κλίνκερ. Για απλούστευση της αναπαράστασης των αντιδράσεων ενυδάτωσης χρησιμοποιούνται οι εξής συντμήσεις:





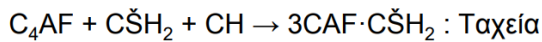
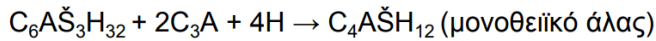
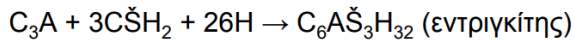
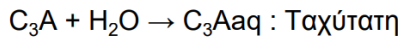
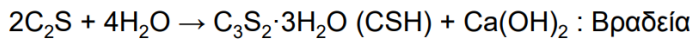
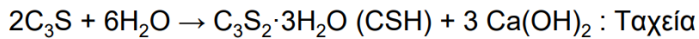
Σχήμα 2.1: Διαγραμματική απεικόνιση των διαδικασιών που ακολουθούνται για την Παρασκευή τσιμέντου. (Πηγή: [2])

Με βάση τις συντημήσεις που δόθηκαν παραπάνω παρουσιάζονται σε απλουστευμένη μορφή τα ορυκτολογικά συστατικά του κλίνκερ (**Πίνακας 2.1**).

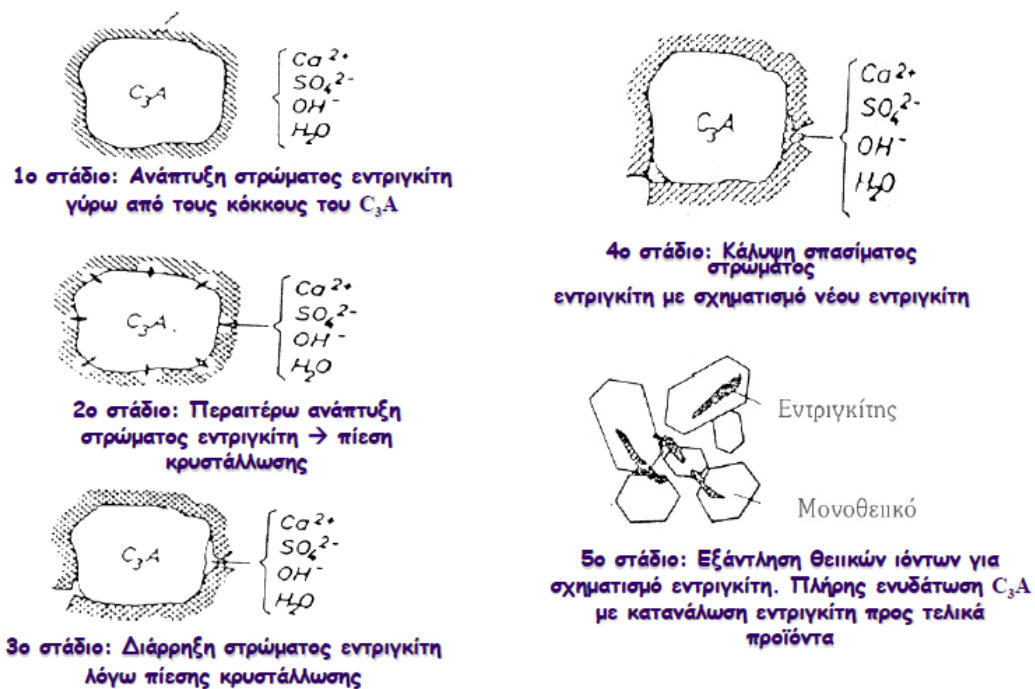
Πίνακας 2.1: Τυπική ορυκτολογική ανάλυση κλίνκερ (Πηγή: [2]).

	C_3S	βC_2S	C_3A	C_4AF
Τύπος	$3CaO \cdot SiO_2$	$2CaO \cdot SiO_2$	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$
Κοινή ονομασία	Αλίτης	Βελίτης	Αργιλική φάση	Φερριτική φάση
Προσμίξεις	MgO, Al_2O_3, Fe_2O_3	MgO, Al_2O_3, Fe_2O_3	$SiO_2, MgO, αλκάλια$	SiO_2, MgO
Περιεκτικότητα (%)	35-65	10-40	0-15	5-15
Μέση περιεκτικ. (%)	50	25	8	8
Αντίδραση με το νερό	μέση	αργή	γρήγορη	Μέση
Συμβολή στις αντοχές	Πρώιμες ηλικίες	καλή	μικρή	καλή
	Ωριμες ηλικίες	καλή	άριστη	μέση
Θερμότη. ενυδάτ.	Ρυθμός	μέσος	μικρός	μεγάλος
	cal/g	120	60	320

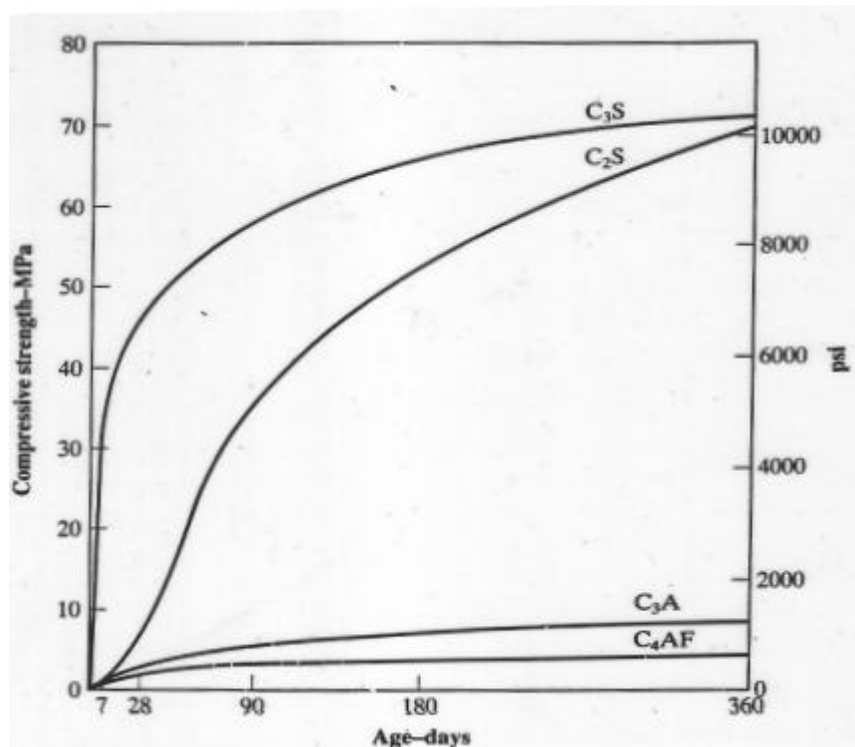
Οι αντιδράσεις ενυδάτωσης των ορυκτολογικών συστατικών του κλίνκερ σε απλουστευμένη μορφή είναι οι εξής:



Στο **Σχήμα 2.3** παρουσιάζεται διαγραμματικά η συνεισφορά καθενός εκ των συστατικών του κλίνκερ στην ανάπτυξη αντοχών με τη πάροδο του χρόνου. Παρατηρούμε ότι η αντίδραση του C_3S είναι η πιο ταχεία και μάλιστα συνεισφέρει στο μεγαλύτερο ποσοστό στις αντοχές. Αρκετά ταχεία είναι και η αντίδραση του C_4AF . Η αντίδραση του C_2S είναι βραδεία με αποτέλεσμα σε πρώτη φάση να συνεισφέρει λιγότερο στις πρώιμες αντοχές, όμως με τη πάροδο του χρόνου η συνεισφορά του αυξάνει. Κατά την ενυδάτωση του C_3A , κυρίαρχο ρόλο παίζει η παρουσία της γύψου (θειικά), όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.2**.



Σχήμα 2.2: Επίδραση της γύψου στην ενυδάτωση του C_3A . (Πηγή: [1])



Σχήμα 2.3: Ανάπτυξη αντοχών των συστατικών του κλίνκερ. (Πηγή:[1])

2.1.2 Τύποι τσιμέντου

Το τσιμέντο που καλύπτεται από το πρότυπο EN 197-1 και ονομάζεται CEM, μπορεί, όταν αναμειχθεί με κατάλληλη αναλογία νερού και αδρανών, να δώσει σκυρόδεμα ή κονίαμα που διατηρεί την εργασιμότητά του για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια αποκτά συγκεκριμένα επίπεδα αντοχών σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ παράλληλα έχει αέναως σταθερότητα όγκου. Ο υδραυλικός χαρακτήρας των τσιμέντων CEM οφείλεται κυρίως στην ενυδάτωση των ασβεστοπυριτικών ενώσεων. Ωστόσο, και άλλες χημικές ενώσεις, όπως αυτές του αργιλίου συμμετέχουν στην ανάπτυξη των αντοχών. Το τσιμέντο συνίσταται από τα κύρια συστατικά του, τα δευτερεύοντα συστατικά του, το θειϊκό ασβέστιο και τα πρόσθετα. Τα κύρια συστατικά του τσιμέντου είναι ειδικά επιλεγμένα ανόργανα υλικά, τα οποία προστίθενται σε κάποια φάση της παραγωγικής διαδικασίας του (συνήθως κατά την τελική άλεση) σε ποσοστό που ξεπερνά το 5% κ.β. της συνολικής ποσότητας κυρίων και δευτερευόντων συστατικών. Ως κύρια συστατικά, εκτός του κλίνκερ του τσιμέντου Portland (K) χρησιμοποιούνται η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων (S), ποζολανικά υλικά φυσικά (P) ή φυσικά ψημένα (Q), τέφρες πυριτικές (V) ή ασβεστούχες (W), ψημένος σχιστόλιθος (T), ασβεστόλιθος (L ή LL) και πυριτική παιπάλη (D). Δεν πρέπει να γίνεται σύγχυση μεταξύ των κύριων και των δευτερευόντων συστατικών, τα οποία επιτρέπεται να προστεθούν σε μικρά ποσοστά. Ως τσιμέντα Πόρτλαντ (αμιγή) χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ και γύψου (Πίνακας 2.2). Στα τσιμέντα αυτά επιτρέπεται η προσθήκη φίλλερ μέχρι 3% κατά βάρος σύμφωνα με το ελληνικό Πρότυπο, (και 5% σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο), οπότε το κλίνκερ μαζί με το γύψο πρέπει να είναι τουλάχιστον το 97% κατά βάρος.

Σύμφωνα με το Πρότυπο EN 197-1 διακρίνονται οι εξής τύποι τσιμέντου (**Πίνακας 2.2**):

- CEM I, Τσιμέντα Πόρτλαντ
- CEM II, Σύνθετα τσιμέντα Πόρτλαντ
- CEM III, Σκωριοτσιμέντα
- CEM IV, Ποζολανικά τσιμέντα
- CEM V, Σύνθετα τσιμέντα

Πίνακας 2.2: Τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1.

Τύπος	Ονομασία	Κύρια συστατικά*										Δευτ. συστ.
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L		
ΤΣΙΜΕΝΤΑ PORTLAND**												
CEM I	I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ PORTLAND												
CEM II	II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/A-P	80-90	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/A-Q	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/B-Q	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
II/A-M	80-94	6-20									0-5	
II/B-M	65-79	21-35									0-5	
ΣΚΩΡΙΟΤΣΙΜΕΝΤΑ												
CEM III	III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ												
CEM IV	IV/A	65-89	-	11-35				-	-	-	-	0-5
	IV/B	45-64	-	36-55				-	-	-	-	0-5
ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ												
CEM V	V/A	40-64	18-30	-	16-30			-	-	-	-	0-5
	V/B	20-39	31-50	-	31-50			-	-	-	-	0-5

Μια ακόμα διάκριση των τσιμέντων γίνεται με βάση τις μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις (**Πίνακας 2.3**).

Πίνακας 2.3: Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις σύμφωνα με το EN 197-1.

Κατηγορία αντοχών (ονομαστική)	Αντοχή σε θλίψη (Μρα)			Αρχή πήξης (min)	Διόγκωση (mm)
	2 ημέρες	7ημέρες	28ημέρες		
32.5N	-	≥ 16	32.5-52.5	≥75	≤10
32.5R	≥ 10	-	32.5-52.5		
42.5N	≥ 10	-	42.5-62.5	≥60	≤10
42.5R	≥ 20	-	42.5-62.5		
52.5N	≥ 20	-	≥52.5	≥45	≤10
52.5R	≥ 30	-	≥52.5		

2.2 Σκυρόδεμα

2.2.1 Παρασκευή σκυροδέματος-πρώτες ύλες

Το *σκυρόδεμα* είναι το υλικό που σχηματίζεται από την ανάμιξη *τσιμέντου*, *χονδρόκοκκων* και *λεπτόκοκκων αδρανών* και *νερού* (με ή χωρίς την ενσωμάτωση βελτιωτικών ή προσθέτων), το οποίο αναπτύσει τις ιδιότητες του με τη σκλήρυνση της πάστας του τσιμέντου (τσιμέντο & νερό) (EN 206)[3], όπως άλλωστε υποδηλώνεται από την ονομασία του αφού η συνδετική κονία (τσιμέντο+νερό) *δένουν* τα *σκόρα* (αδρανή).

Ασφαλώς ο τύπος του *τσιμέντου* που θα επιλεγθεί επηρεάζει τις ιδιότητες του σκυροδέματος, γι' αυτό το λόγο τίθενται και όρια από το Κανονισμό EN 197-1, ως προς την αρχή της πήξης και τη δίογκωση του τσιμέντου (φυσικές απαιτήσεις) ανάλογα με την κατηγορία αντοχών στις οποίες στοχεύουμε (μηχανικές απαιτήσεις, **Πίνακας 2.3**).

Ως προς τα *αδρανή*, όπως υποδηλώνεται και από την ονομασία τους δεν λαμβάνουν μέρος σε κάποια αντίδραση και ουσιαστικά συνεισφέρουν στο σκυρόδεμα με τις αντοχές τους. Υπάρχουν επτά κατηγορίες αδρανών ανάλογα με τη χρήση τους. Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή σκυροδέματος καθορίζονται από το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN12620. Στο σκυρόδεμα έχουμε 3 κατηγορίες αδρανών ανάλογα με το μέγεθος τους και αυτά είναι το χαλίκι, το γαρμπίλι και η άμμος. Με βάση το καινούργιο Πρότυπο ώστόσο ορίζονται 2 κατηγορίες: τα χονδρόκοκκα (χαλίκι, γαρμπίλι), και τα λεπτόκοκκα (άμμος). Ο ΚΤΣ 97 ορίζει κάποιες πρότυπες καμπύλες που καθορίζουν την αναλογία των κλασμάτων των αδρανών, ώστε να υπάρχει ποικιλία στο μέγεθος των κόκκων, που θα αλληλομπλέκονται κλείνοντας τα κενά και δημιουργώντας μια πυκνή δομή και προσφέροντας καλύτερη μηχανική απόδοση. Επομένως επιθυμούμε ομαλή κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και εξετάζουμε αν πληρείται αυτή η απαίτηση μέσω της *φαινόμενης πυκνότητας στοιβής*. Μερικές ακόμα σημαντικές φυσικές ιδιότητες των αδρανών είναι το *πορώδες* (ανοιχτό ή κλειστό) και η *υγρασιακή κατάσταση* των αδρανών (ξήρανση σε φούρνο, ξήρανση σε αέρα, κορεσμένος κόκκος, κορεσμένος κόκκος επιφανειακά στεγνός). Μια ιδιότητα των αδρανών μέσω της οποίας συσχετίζουμε τη μάζα και τον όγκο είναι η πυκνότητα των κόκκων η οποία διακρίνεται σε *πυκνότητα κόκκων σε ξηρή κατάσταση* ($\rho_{\xi\eta\rho} 110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$), σε *πυκνότητα κόκκων σε κορεσμένη επιφανειακά στεγνή κατάσταση* ($\rho_{\text{ΚΕΣ}}$ ή SSD) και σε *φαινόμενη πυκνότητα κόκκων* ($\rho_{\text{φαιν}}$). Η φαινόμενη πυκνότητα κόκκων είναι πάντα μεγαλύτερη από τις άλλες δύο, καθώς είναι ο λόγος της μάζας δείγματος κόκκων προς τον όγκο που καταλαμβάνουν οι κόκκοι αυτοί αν αφαιρέσουμε τον όγκο των προσβάσιμων από το νερό πόρων.

Ως προς τα βελτιωτικά διακρίνουμε τις εξής βασικές κατηγορίες: ρευστοποιητές-υπερευστοποιητές, επιβραδυντές, επιταχυντές, στεγανοποιητικά και αερακτικά.

2.2.2 Βασικές ιδιότητες σκυροδέματος

Για τη μελέτη των ιδιοτήτων του σκυροδέματος απαραίτητη είναι η διακρίση του σε νωπό σκυρόδεμα και σκληρυμένο.

Νωπό σκυρόδεμα (fresh concrete) χαρακτηρίζεται το σκυρόδεμα που μόλις έχει παρασκευαστεί, περιέχοντας όλα τα συστατικά του. Το νωπό σκυρόδεμα παραμένει στη ρευστή του κατάσταση και δύναται να συμπυκνωθεί και να μορφοποιηθεί σε καλούπια, διατηρώντας την ομοιογένεια του.

Οι βασικές ιδιότητες που μας ενδιαφέρουν και εξετάζουμε στο νωπό σκυρόδεμα είναι:

- Η *εργασιμότητα* του, δηλαδή η ποσότητα του έργου που απαιτείται ώστε το σκυρόδεμα να αναμιχθεί πλήρως, να αποκτήσει τη μέγιστη δυνατή συμπύκνωση και να διαστρωθεί χωρίς απόμιξη. Απόμιξη (segregation) είναι η διαφορεική καθ' ύψος κατανομή των αδρανών.
- Η *πυκνότητα ή μοναδιαίο βάρος* που εκφράζει το ρυθμό συμπύκνωσης και σχετίζεται άμεσα με την τιμή της αντοχής.

Για τη μελέτη των ιδιοτήτων του νωπού σκυροδέματος το υποβάλλουμε σε κάποιες δοκιμές. Ιδιαίτερα σημαντικές είναι η δοκιμή κάθισης και η δοκιμή εξάπλωσης, ενώ απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός του μοναδιαίου βάρους και του συντελεστή συμπύκνωσης. Παρακάτω παρατίθενται οι κατηγορίες κάθισης όπως αυτές ορίζονται από το ΚΤΣ 97 (**Πίνακας 2.4**).

Πίνακας 2.4: Κατηγορίες κάθισης.

Κατηγορία κάθισης	Κάθιση (mm)
S1	10-40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	≥ 220

Μέσω της δοκιμής κάθισης λαμβάνουμε μια πρώτη ένδειξη ότι η σύνθεση μας είναι ικανοποιητική και ότι προστέθηκε η κατάλληλη ποσότητα νερού. Η ποσότητα του νερού παίζει καθοριστικό ρόλο στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος καθώς, το πλεονάζων νερό που δεν θα αντιδράσει με το τσιμέντο θα αφήσει πίσω του κενά όταν θα φύγει από τους πόρους, και έτσι θα είναι πιο εύκολη η είσοδος βλαβερών ουσιών μέσω των πόρων αυτών. Ασφαλώς από την άλλη πλευρά το σκυρόδεμα θα πρέπει να έχει αρκετό νερό ώστε να επιτευχθεί καλή ανάμιξη και εργασιμότητα αυτού, ώστε να μπορεί να διαστρωθεί στα καλούπια χωρίς να αφήσει κενά. Προκειμένου να ικανοποιούνται όλες αυτές οι απαιτήσεις οδηγούμαστε στη χρήση ρευστοποιητών που μειώνουν την απαιτούμενη ποσότητα νερού καθώς προσδίδουν εργασιμότητα στο σκυρόδεμα.

Όσο αφορά στο *σκληρωμένο σκυρόδεμα (hardened concrete)* είναι το σκυρόδεμα που έχει στερεοποιηθεί και έχει αναπτύξει μηχανικές αντοχές. Οι ιδιότητες που μας ενδιαφέρουν στο σκληρωμένο σκυρόδεμα είναι οι μηχανικές του αντοχές και η σταθερότητα του όγκου του.

Η *μηχανική αντοχή* εκφράζει την ικανότητα του σκυροδέματος να αντεπεξέλθει στη μηχανική καταπόνηση που υπόκειται και η μονάδα μέτρησης της είναι MPa(N/mm²) (**Πίνακας 2.5**).

Η *σταθερότητα όγκου* στο σκυρόδεμα σχετίζεται με τη μετακίνηση του περιεχόμενου νερού προς το περιβάλλον ή εντός του σκυροδέματος, με τις θερμοκρασιακές μεταβολές και και με την ανεπιθύμητη δράση διαφόρων συστατικών που μεταφέρονται στο σκυρόδεμα μέσω του νερού ή του αέρα.

Πίνακας 2.5:Κατηγορίες Σκυροδέματος.

Κατηγορία σκυροδέματος	Ελάχιστη χαρακτηριστική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου (N/ mm ²)	Ελάχιστη χαρακτηριστική αντοχή κυβικού δοκιμίου (N/ mm ²)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/40	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

2.2.3 Η ανθεκτικότητα στο σκυρόδεμα

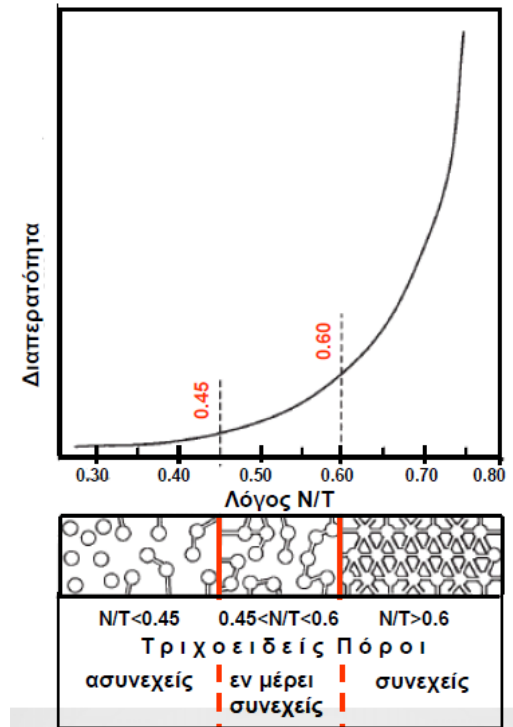
Ανθεκτικότητα μιας κατασκευής είναι η ικανότητα της να ανθίστανται στις *περιβαλλοντικές επιδράσεις* (φυσικές ή χημικές) κατά τη διάρκεια του χρόνου χωρίς να παρουσιάζει απώλεια της *επιτελεστικότητας* της κάτω από ένα ανεκτό όριο. Προκειμένου να εξασφαλίσουμε τα επιθυμητά όρια επιτελεστικότητας θα πρέπει να πληρούνται οι εξής απαιτήσεις: ασφάλεια, λειτουργικότητα, αισθητική εμφάνιση. Τα σκυροδέματα διακρίνονται, ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε έργου και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, στις εξής κατηγορίες: σκυρόδεμα χωρίς ειδικές απαιτήσεις, σκυρόδεμα ανθεκτικό σε επιφανειακή φθορά, σκυρόδεμα μειωμένης υδατοπερατότητας, σκυρόδεμα μέσα σε νερό (όχι διαβρωτικό), σκυρόδεμα στη θάλασσα, σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε αέρα κορεσμένο με θαλάσσια άλατα (παραθαλάσσιο περιβάλλον), σκυρόδεμα ανθεκτικό σε χημικές προσβολές.

Κατανοούμε πως όπως όλες οι κατασκευές, έτσι και εκείνες από σκυρόδεμα φθείρονται με το χρόνο. Ο στόχος είναι να επιτευχθεί κατά το μέγιστο η σχεδιασμένη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Επομένως γίνεται φανερό πως πρέπει να εξεταστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Οι βασικοί παράγοντες της ανθεκτικότητας είναι:

Συνδεδεμένοι πόροι και ρωγμές.

Το πορώδες δημιουργείται από το νερό σύνθεσης και από τον περιεχόμενο αέρα. Ανάλογα με την ακτίνα τους οι πόροι διακρίνονται σε μικρό-ποροι (πόροι πήγματος), τριχοειδείς πόροι και μακρό-ποροι (πόροι αέρα από αερακτικό, κενά συμπύκνωσης). Η κατανομή του μεγέθους των πόρων επηρεάζει τα *φαινόμενα μεταφοράς* και επομένως και την ανθεκτικότητα. Η μεταφορά γίνεται με διάχυση υγρών και ιόντων (Cl⁻, SO₄²⁺) μέσα σε υγρά (2^{ος} Νόμος Fick), διάχυση αερίων (O₂, CO₂) και ατμών (μετακίνηση υγρασίας, 1^{ος} Νόμος Fick), τριχοειδή αναρρόφηση (π.χ. Cl⁻ μέσα στο νερό, Νόμος Laplace), πίεση (διαβρωτικές ουσίες σε υπόγεια νερά, ψύξη-απόψυξη, Νόμος Darcy).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το **Σχήμα 2.4**, στο οποίο παρατηρούμε πως ο λόγος νερού προς τσιμέντο επηρεάζει τη μορφή των τριχοειδών πόρων, καθώς όσο μεγαλώνει, οι πόροι τείνουν να γίνουν συνεχείς με αποτέλεσμα της αύξηση της διαπερατότητας άρα τη μείωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος.



Σχήμα 2.4: Επίδραση του λόγου νερού προς τσιμέντο στην μορφή των πόρων και τη διαπερατότητα.

Ως προς τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος αυτή λαμβάνει χώρα όταν οι εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται είναι μεγαλύτερες από την εφελκυστική αντοχή. Οι μηχανισμοί που δημιουργούν εφελκυστικές τάσεις είναι οι εξής:

- Κινήσεις εντός του σκυροδέματος, όπως συστολή ξήρανσης, διαστολή διαβροχής, θερμοκρασιακές μεταβολές όγκου.
- Διόγκωση δομικών συστατικών κατασκευής, όπως διάβρωση του χάλυβα στον οπλισμό του σκυροδέματος.
- Επιβολή εξωτερικών φορτίων, όπως παραμόρφωση από επιβολή εξωτερικών φορτίων, υποχώρηση θεμελίωσης.

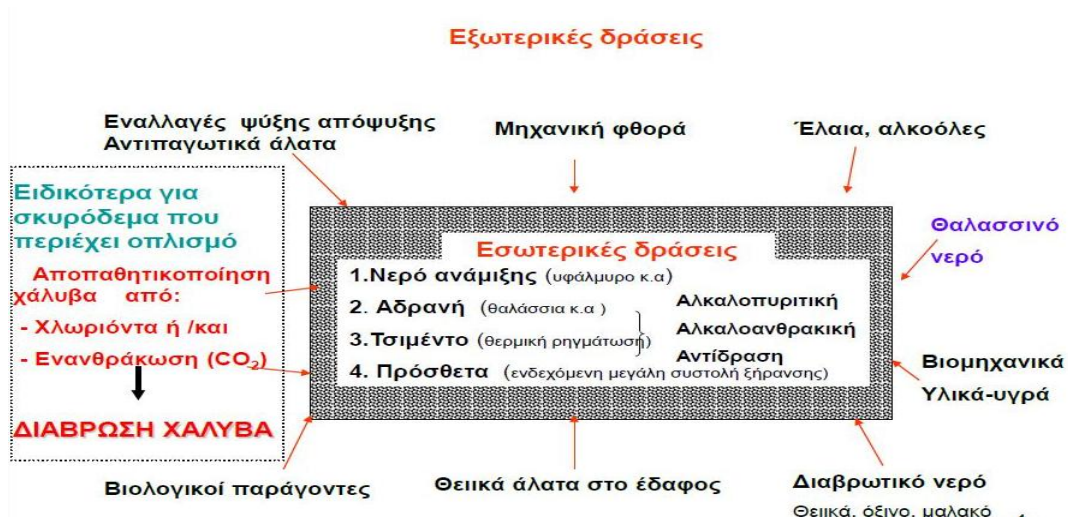
Νερό

Το νερό επηρεάζει την ανθεκτικότητα με ποικίλους τρόπους. Επηρεάζει το πορώδες, καθώς όπως αναφέρθηκε και παραπάνω για αυξημένο λόγο νερού προς τσιμέντο έχουμε αυξημένη παρουσία τριχοειδών πόρων. Επίσης αποτελεί το μέσο διάχυσης διαβρωτικών ουσιών στους πόρους του σκυροδέματος, ενώ αποτελεί και το διαλύτη των διαβρωτικών μέσων. Ακόμα συμμετέχει στην αντίδραση διάβρωσης του οπλισμού και στην καταστροφή της παθητικής του προστασίας. Τέλος συμμετέχει στην αλκαλοπυριτική αντίδραση και στην ενανθράκωση.

Κρίνεται αναγκαίο οι κατασκευές από σκυρόδεμα να κατατάσσονται σε κατηγορίες έκθεσης και να λαμβάνονται τα αντίστοιχα μέτρα όπως αυτά ορίζονται από το EN 206-1 (ελάχιστη κατηγορία αντοχής, ελάχιστη επικάλυψη οπλισμού, ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, μέγιστος λόγος νερού προς τσιμέντο κ.α.), ώστε να εξασφαλιστεί η ανθεκτικότητα της κατασκευής[3].

Διαβρωτικό περιβάλλον

Η επίδραση των διαβρωτικών δράσεων στο σκυρόδεμα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.5**.



Σχήμα 2.5: Διαβρωτικές δράσεις στο σκυρόδεμα (Πήγη: [3])

2.2.4 Ειδικά σκυροδέματα

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας έχουν αναπτυχθεί ορισμένοι τύποι σκυροδεμάτων με βελτιωμένες ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Μερικά εξ'αυτών είναι [3],[4]:

Το αφροσκυρόδεμα (foamed concrete), το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (self compacting concrete), το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (sprayed concrete), το αυτοσυντηρούμενο σκυρόδεμα (self-cure concrete), το αυτορυθμιζόμενο σκυρόδεμα (self-adjusting), σκυρόδεμα αυτοανίχνευσης (self-sensing), αυτό-καθαριζόμενο σκυρόδεμα (self-cleaning), αυτοθερμαινόμενο σκυρόδεμα (self-heating), σκυρόδεμα θωράκισης-απορρόφησης ενέργειας (shielding/absorbing concrete), σκυρόδεμα συγκομιδής ενέργειας (energy harvesting), σκυρόδεμα διαβίβασης φωτός (light-transmitting), σκυρόδεμα ανάσχεσης αεροσκαφών (aircraft arresting) και τέλος το αυτό-ιούμενο σκυρόδεμα (self-healing concrete) που αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

3 Θεωρητική επισκόπηση της αυτό-ίασης τσιμεντοειδών υλικών.

3.1 Αυτό-ίαση

3.1.1 Μηχανισμοί αυτοίασης

Η αυτοίαση στα τσιμεντοειδή υλικά μπορεί να διακριθεί σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: Την *εγγενή ίαση* (intrinsic healing), *ίαση με κάψουλες* (capsule based healing) και την *αγγειακή ίαση* (vascular healing). Κάθε μια από αυτές τις προσεγγίσεις διαφέρει ως προς το μηχανισμό μέσω του οποίου γίνεται η ίαση στην κατεστρεμμένη περιοχή[4].

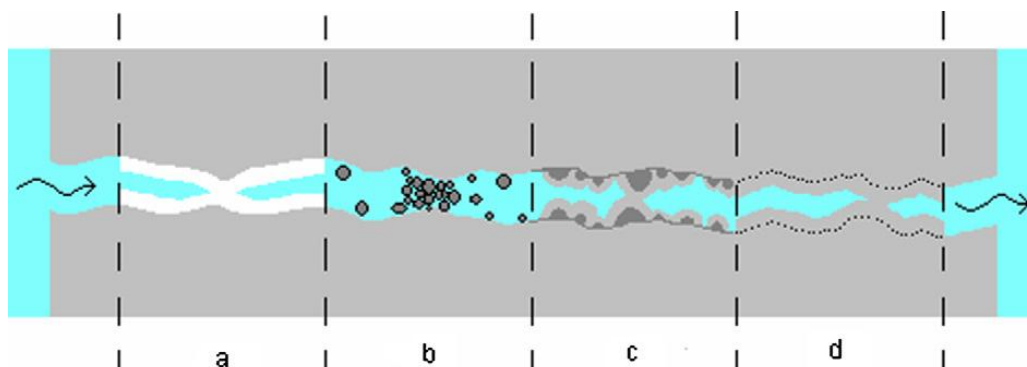
Εγγενής ίαση

Η εγγενής ίαση μπορεί να διακριθεί στις εξής υποκατηγορίες: *αυτογενής ίαση* (autogenous Healing), *βελτιωμένη αυτογενής ίαση* (Improved Autogenous Healing), *ίαση σε σκυρόδεμα τροποποιημένο με πολυμερές* (Healing in Polymer Modified Concrete).

Η *αυτογενής* ίαση μπορεί να αποδοθεί στους εξής μηχανισμούς[5]:

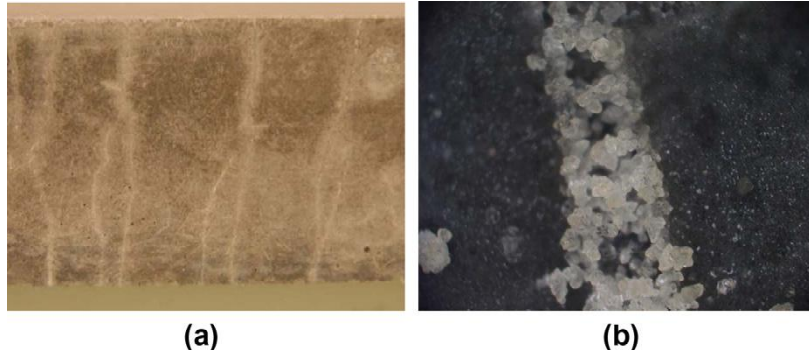
- Σχηματισμός ανθρακικού ασβεστίου ή υδροξυλίου του ασβεστίου.
- «Μπλοκάρισμα» των ρωγμών από ακαθαρσίες του νερού και μέσω σωματιδίων του σκυροδέματος που έχουν προκύψει από τη ρωγμή.
- Περαιτέρω ενυδάτωση του τσιμέντου ή τσιμεντοειδών υλικών που δεν έχουν αντιδράσει.
- Διόγκωση της ενυδατωμένης μάζας τσιμέντου στη θέση της ρωγμής («φούσκωμα» του C-S-H).

Ακολουθεί σκαριφηματική απεικόνιση των μηχανισμών αυτών στο **Σχήμα 3.1**:



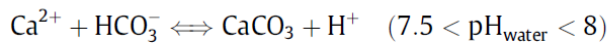
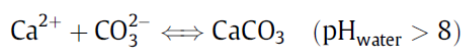
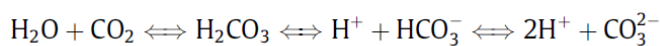
Σχήμα 3.1: Πιθανοί μηχανισμοί αυτό-ίασης σε τσιμεντοειδή υλικά. (Πηγή:[5])

Από τους μηχανισμούς που αναφέρθηκαν ο βασικότερος μηχανισμός αποδίδεται στην κρυστάλλωση του ανθρακικού ασβεστίου. Αυτή η άποψη υποστηρίζεται από πειραματικά ευρήματα, καθώς έχει αναγνωρισθεί ανθρακικό ασβέστιο στην εξωτερική επιφάνεια των ρωγμών ως άσπρο υπόλλειμα, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.2**.



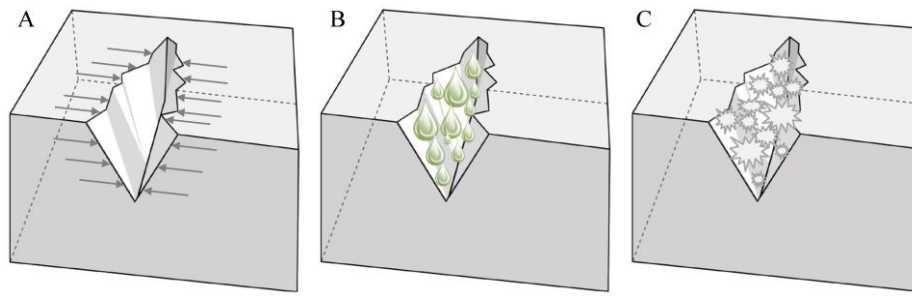
Σχήμα 3.2: Οι ρωγμές γεμίζουν με λευκό υπόλειμμα. (a) άσπρο υπόλειμμα μετά από συντήρηση παρατηρείται στην επιφάνεια της ρωγμής δοκιμίου πλάτους 40 mm. (b) κρυσταλλικά προϊόντα σε ρωγή εύρους 100 μm.

Καθώς ένα από τα προϊόντα της ενυδάτωσης του τσιμέντου διαλύεται στο νερό, το υδροξύλιο του ασβεστίου απελευθερώνεται και διαχέεται στη ρηγματωμένη επιφάνεια. Τότε ελεύθερα ιόντα ασβεστίου από την ενυδάτωση του τσιμέντου αντιδρούν με το διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα, και έτσι αυτό-ιούμενοι κρύσταλλοι σχηματίζονται στις επιφάνειες των ρωγμών γεμίζοντας έτσι τα κενά. Οι χημικές αντιδράσεις που περιγραφηκαν είναι οι εξής:



Αποδείχτηκε ότι ο σχηματισμός του ανθρακικού ασβεστίου είναι ο πιο συνήθης τρόπος αυτό-ίασης σε μεγαλύτερες ηλικίες. Αντιθέτως, σε πρώιμες ηλικίες λόγω του ότι δεν έχουν προλάβει να ολοκληρωθούν οι αντιδράσεις ενυδάτωσης, ο κύριος μηχανισμός αυτογενούς ίασης είναι η περαιτέρω ενυδάτωση των μη ενυδατωμένων τσιμεντοειδών συστατικών. Ενώ υπάρχουν πολλές διαφορετικές απόψεις σχετικά με το ποιος είναι ο κύριος μηχανισμός αυτογενούς ίασης υπάρχει ένα γεγονός κοινώς αποδεκτό από όλους τους ερευνητές: η παρουσία του νερού για καθέναν από αυτούς τους μηχανισμούς είναι ουσιώδης[5].

Αξίζει να σημειωθεί ότι η αυτογενής ίαση είναι αποτελεσματική σε περιορισμένο εύρος ρωγμών και η απόδοση της είναι *βελτιωμένη* αν με κάποιο τρόπο περιοριστεί το εύρος της ρωγμής (restriction of the crack width, **Σχήμα 3.3A**), ή αν υπάρχει παροχή νερού (water supply, **Σχήμα 3.3B**) ή βελτιωμένη ενυδάτωση και κρυστάλλωση (improved hydration and crystallization, **Σχήμα 3.3C**).



Σχήμα 3.3: Βελτιωμένη αυτογενής ίαση.

A. Ο περιορισμός του εύρους ρωγμών μπορεί να επιτευχθεί με χρήση σύνθετου τσιμέντου ενισχυμένου με ίνες (ECC: Engineered cementitious composite). Για το σκοπό αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα υλικά, όπως καλώδια χάλυβα, πολυπροπυλένιο (PP), ίνες πολυαιθυλενίου. Διαπιστώθηκε πως η καλύτερη λύση είναι η χρήση πολυμερών καθώς οι ίνες χάλυβα δεν είχαν μεγάλη αποτελεσματικότητα λόγω της διάβρωσης τους μέσα στη ρωγμή. Αντιθέτως οι ίνες PVA προώθησαν την απόθεση προϊόντων κρυστάλλωσης, καθώς ομάδες υδροξυλίου, που συνδέονται με τις ίνες της κατασκευής, προσέλκυσαν ιόντα ασβεστίου. Μια άλλη προσέγγιση είναι το εύρος των ρωγμών να μην περιοριστεί κατά τη δημιουργία της ρωγμής αλλά κατά την αποφόρτιση, μέσω της ελαστικής συμπεριφοράς μνημονικών ως προς το σχήμα κραμάτων (SMA)[7].

B. Η παροχή νερού μπορεί να λάβει χώρα μέσω έντονα απορροφητικών πολυμερών (SAP: Super Absorbent Polymers). Η ικανότητα διόγκωσης τους εξαρτάται από την αλκαλικότητα και την ιοντική συγκέντρωση του διαλύματος με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μειωμένη διόγκωση όταν αναμιγνύονται σε φρέσκο σκυρόδεμα. Προκειμένου τα πολυμερή να μην διογκωθούν κατά την ανάμιξη του σκυροδέματος και να αποφευχθεί ο ανεπιθύμητος σχηματισμός πόρων έγινε τροποποίηση των πολυμερών ώστε να διογκώνονται μόνο σε μειωμένο pH.

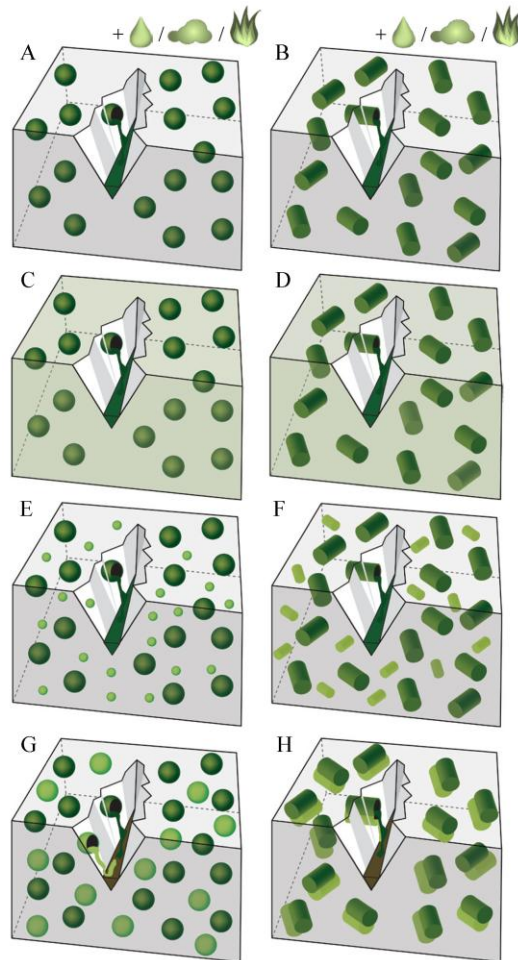
Γ. Βελτιωμένη αυτογενής ίαση επιτυγχάνεται μέσω βελτίωσης της ενυδάτωσης ή της κρυστάλλωσης. Έχει μελετηθεί η αντικατάσταση μερους τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα ή σκυρία υψικαμίνου που είναι ποζολανικά και υδραυλικά υλικά αντίστοιχα. Καθώς μεγάλο μέρος αυτών των συνδετικών ουσιών δεν έχουν ενυδατωθεί, προάγεται η αυτογενής ίαση λόγω περαιτέρω ενυδάτωσης. Άλλοι ερευνητές ενσωμάτωσαν ασβεστο-αργιλοπυριτικά πρόσθετα και κρυσταλλικά πρόσθετα (calcium sulfo aluminate based agents and crystalline admixtures) στο σκυρόδεμα[7]. Μετά την είσοδο νερού στη ρωγμή, σχηματίστηκαν κρύσταλλοι εντριγκίτη οι οποίοι πλήρωσαν τη ρωγμή. Ωστόσο δημιουργήθηκαν κάποιες μικρορωγμές στη διεπιφάνεια μεταξύ της μήτρας και των αδρανών, εξαιτίας της διογκωτικής αντίδρασης. Για το λόγο αυτό πρότειναν την ενθυλάκωση των στελεχών που παράγουν τον εντριγκίτη έτσι ώστε να μειώσουν τον κίνδυνο της ανεξέλεκτης διόγκωσης και της επιπρόσθετης δημιουργίας ρωγμών[8]. Το φαινόμενο της κρυστάλλωσης και η ευνοϊκή της επίδραση στην αυτό-ίαση μελετήθηκε και από τους ερευνητές Ahn and Kishi, οι οποίοι αντικατέστησαν 10% του τσιμέντου με ένα μίγμα διογκωτικών παραγόντων, γεω-υλικών και χημικών παραγόντων. Με την είσοδο του νερού στη ρωγμή, τα διογκωτικά στελέχη επεκτάθηκαν, τα γεω-υλικά διογκώθηκαν και τα χημικά στελέχη προκάλεσαν κατακρήμνιση κρυστάλλων με αποτέλεσμα το κλείσιμο των ρωγμών[9],[10]. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σημαντικό μειονέκτημα της εφαρμογής σωματιδίων που ενυδατώνονται ή κρυσταλλώνονται είναι το γεγονός ότι η λειτουργικότητα τους σχετικά με την ίαση περιορίζεται καθώς το ίδιο το επουλωτικό

στέλεχος καταναλώνεται κατά τη διαδικασία αυτή. Οι ερευνητές Jonkers [11] δήλωσαν ότι μια λύση είναι οι σπόροι βακτηριδίων οι οποίοι οδηγούν στη κατακρήμνιση ανθρακικού ασβεστίου καθώς απλώς μεσολαμβάνουν στην διαδικασία αυτό-ίασης χωρίς οι ίδιοι να μετατρέπονται. Ωστόσο τα βακτήρια πεθαίνουν όταν τα κύτταρα γεμίζουν με κρυστάλλους ανθρακικού ασβεστίου και η βακτηριακή δράση τερματίζεται όταν τα θρεπτικά συστατικά καταναλωθούν. Έτσι, ακόμα και στη προσέγγιση με τα βακτήρια δεν επιτυγχάνεται μια ατέρμονη διαδικασία ίασης. Αρχικά οι ερευνητές [11,12,13] εφάρμοσαν βακτηριακούς σπόρους και θρεπτικά συστατικά σε νωπό σκυρόδεμα. Όταν μια ρωγμή εμφανιζόταν, οι σπόροι και τα θρεπτικά συστατικά διαλύονταν με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση των βακτηριακών σπόρων. Τότε, τα βακτήρια ξεκινούν τα παραγωγή κρυστάλλων CaCO_3 οι οποίοι καθιζάνουν στο μέτωπο της ρωγμής. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), που έχει απελευθερωθεί εξαιτίας της μεταβολικής μετατροπής μέσω των βακτηρίων αντιδρά με το υδροξύλιο του ασβεστίου Ca(OH)_2 που έχει διαρρέυσει από τη τσιμεντοειδή μάζα και σχηματίζει επιπρόσθετους κρυστάλλους CaCO_3 . Ωστόσο τα πειράματα έδειξαν ότι οι σπόροι παραμένουν βιώσιμοι για περιορισμένο χρονικό διάστημα καθώς τα κύτταρα καταρρέουν εξαιτίας της συνεχόμενης ενυδάτωσης του τσιμέντου με αποτέλεσμα τη δημιουργία πόρων στη μάζα διαμέτρου μικρότερης από τους βακτηριακούς σπόρους μεγέθους 1 μm . Έτσι, σε μεταγενέστερα πειράματα οι ερευνητές ενθυλάκωσαν τα βακτήρια μέσα σε κάψουλες.

Η εγγενής ίαση μπορεί να επιτευχθεί μέσω σκυροδέματος, κατά την παραγωγή του οποίου μαζί με το νερό ανάμιξης διασπείρονται *οργανικά πολυμερή* (PMC: Polymer Modified Concrete). Τα πολυμερή αυτά κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου συνενώνονται δημιουργώντας ένα πολυμερικό φιλμ σε όλη την έκταση της μήτρας του ενυδατωμένου σκυροδέματος. Η ίαση σε αυτό το τύπο σκυροδέματος παρατίνεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα καθώς τα πολυμερή περικλείουν σαν μεμβράνη τα σωματίδια του τσιμέντου και έτσι περισσότερο μη ενυδατωμένο τσιμέντο είναι διαθέσιμο στη μήτρα του σκυροδέματος.

Ίαση με κάψουλες

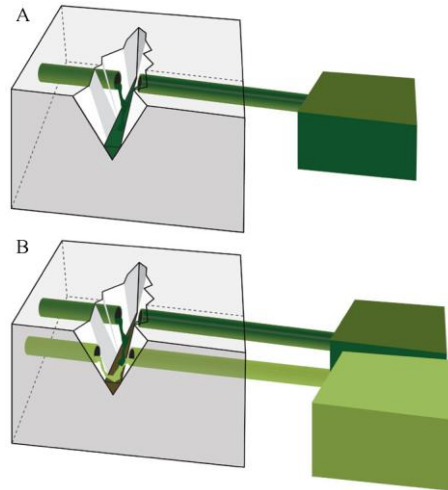
Στη προσέγγιση αυτή ένας θεραπευτικός παράγοντας τοποθετείται μέσα σε κάψουλες. Όταν οι κάψουλες διαρρηχθούν λόγω κάποιας καταστροφής, ο μηχανισμός αυτό-ίασης πυροδοτείται μέσω της απελευθέρωσης και της αντίδρασης του θεραπευτικού παράγοντα στη περιοχή της καταστροφής. Ενώ μερικά θεραπευτικά στελέχη αντιδρούν έπειτα από επαφή με υγρασία ή αέρα ή θερμότητα (**A, B**), κάποια άλλα αντιδρούν όταν έρθουν σε επαφή με την ίδια τη τσιμεντοειδή μήτρα (**C, D**), άλλα αντιδρούν όταν έρθουν σε επαφή με κάποιο δεύτερο συστατικό που υπάρχει στη μήτρα (**E, F**), ή που παρέχεται σε κάποια επιπρόσθετη κάψουλα (**G, H**) (**Σχήμα 3.4**).



Σχήμα 3.4: Αυτό-ίαση με κάψουλες. Διαρροή του θεραπευτικού παράγοντα από τις κάψουλες μέσα στη ρωγμή εξαιτίας βαρυτικών και τριχοειδών δυνάμεων. Αντίδραση σφαιρικών/κυλινδρικών ενθυλακωμένων παραγόντων (σκουρόχρωμοι) έπειτα από επαφή με (A,B) υγρασία ή αέρα ή θερμότητα (C,D) με τη τσιμεντοειδή μήτρα (E,F) με ένα δεύτερο συστατικό που βρίσκεται στη μήτρα (μικρό, ανοιχτόχρωμο) ή (G,H) με ένα δεύτερο συστατικό που προσφέρεται από πρόσθετες κάψουλες (μεγάλο, ανοιχτόχρωμο).

Αγγειακή ίαση

Η αγγειακή ίαση βασίζεται στην απομόνωση του θεραπευτικού παράγοντα σε ένα δίκτυο κοίλων σωλήνων οι οποίοι συνδέονται με το εσωτερικό και το εξωτερικό της κατασκευής. Όταν αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ενός συστατικού θεραπευτικό παράγοντα πρόκειται για αγγειακό σύστημα ενός καναλιού (**Σχήμα 3.5A**), ενώ όταν χρησιμοποιείται συνδυασμός με πολλαπλών συστατικών θεραπευτικούς παράγοντες πρόκειται για πολλαπλό αγγειακό σύστημα καναλιών (**Σχήμα 3.5B**).



Σχήμα 3.5: Προσεγγίσεις αγγειακής αυτό-ίασης. Διαρροή του θεραπευτικού παράγοντα από τη δεξαμενή μέσω αγγείων στη ρωγμή εξαιτίας βαρυτικών και τριχοειδών δυνάμεων και υδροστατικής πίεσης. (A): Αγγειακό σύστημα ενός καναλιού, (B): Αγγειακό σύστημα πολλαπλών καναλιών.

3.1.2 Τεχνικές αυτό-ίασης

Τα τσιμεντοειδή υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλο τον κόσμο, λόγω του χαμηλού κόστους και της διαθεσιμότητάς τους. Παρόλα αυτά, η φθορά τους ξεκινά πρώιμα και γι' αυτό η σωστή συντήρηση και επιδιόρθωσή τους αποτελούν βαρυσήμαντο ζητούμενο για την κοινωνία. Σε αντιστοιχία με το ανθρώπινο σώμα που έχει την ικανότητα όταν διαθέτει θρεπτικά συστατικά να παράγει νέα, που επουλώνουν τα κατεστραμμένα τμήματα, όπως κατεστραμμένο δέρμα και ιστούς, έτσι και στην αυτο-ίαση των τσιμεντοειδών υλικών, η ουσία είναι να παρέχονται τα απαραίτητα προϊόντα που μπορούν να πληρώσουν τις ρωγμές όταν αυτές δημιουργηθούν. Βασιζόμενοι σε αυτό το πλαίσιο, έχουν αναπτυχθεί ποικίλες καινοτόμες στρατηγικές και τεχνικές αυτο-ίασης. Τα έξυπνα τσιμεντοειδή υλικά με λειτουργία αυτο-ίασης που έχουν εξαρχής την ικανότητα να επιδιορθώνουν αυτόνομα τις δομικές βλάβες, ή με ελάχιστη βοήθεια από εξωτερική διέγερση, είναι υλικά πολλά υποσχόμενα σε πρακτικό επίπεδο. Η αυτο-ίαση των ρωγμών στα τσιμεντοειδή υλικά είναι ένας συνδυασμός πολύπλοκων χημικών και φυσικών διεργασιών. Οι πιθανοί μηχανισμοί μπορούν να είναι: α) η δημιουργία ανθρακικού ασβεστίου ή υδροξειδίου του ασβεστίου, που σταματάει τις ρωγμές από ακαθαρσίες στο νερό οι οποίες προκαλούνται από τα θραύσματα των ρωγμών, β) περαιτέρω ενυδάτωση του τσιμέντου ή των τσιμεντοειδών υλικών που δεν έχουν αντιδράσει, γ) διαστολή της ενυδατωμένης τσιμεντοειδούς μήτρας στην ρηγματωμένη πλευρά (φούσκωμα της C-S-H). Είναι δόκιμη η υπόθεση πως παραπάνω από μια εκ των προαναφερθέντων αιτιών, ίσως προκαλούν το φαινόμενο της αυτο-ίασης.

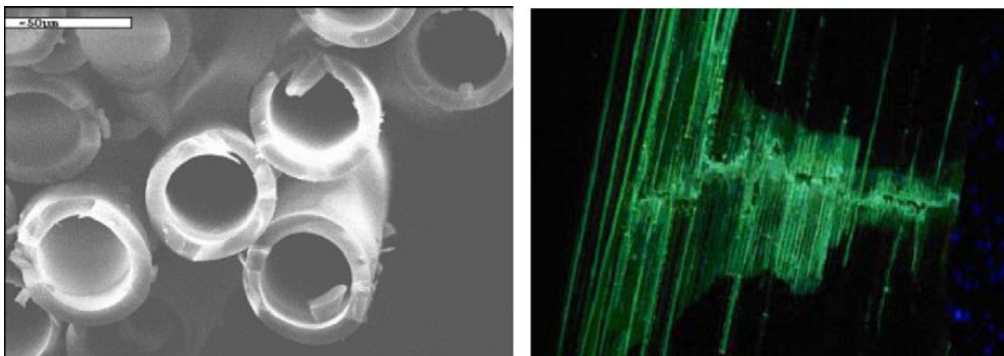
Αρκετές καινοτόμες στρατηγικές στην αυτο-ίαση για τσιμεντοειδή υλικά έχουν προταθεί και αναπτυχθεί. Οι συνήθεις προσεγγίσεις περιλαμβάνουν τη χρήση κοίλων ινών, μικροκαψουλών, διογκωτικών παραγόντων και μεταλλικών πρόσμικτων, βακτηρίων και μνημονικών ως προς το σχήμα υλικών. Να προστεθεί, πως κάποιες από αυτές τις μεθόδους επικεντρώνονται και διεισδύουν στην πιθανή εγγενή αυτο-ίαση τσιμεντοειδών υλικών,

όπως μη ενυδατωμένων εσωτερικά τσιμεντοειδών συστατικών και την ικανότητα τσιμεντοειδών μητρών να παρέχουν ιόντα ασβεστίου ενώ κάποιες έρευνες επιχειρούν να «προικίσουν» τις τσιμεντοειδής μήτρες με αυτο-ιούμενη δυνατότητα μέσω της εισαγωγής σε εξωτερικά χημικά ή λειτουργικά υλικά. Παρακάτω αναλύονται οι σημαντικότερες τεχνικές αυτο-ίασης[5]:

Κοίλες ίνες (hollow fibers)

Η χρήση των κοίλων ινών βασίζεται στη δυνατότητα τους να αποθηκεύουν στο εσωτερικό τους κάποια λειτουργικά συστατικά, τα οποία θα ενσωματωθούν σε μια σύνθετη μήτρα. Ως εκ τούτου σε περίπτωση βλάβης ή ρωγμής, τα λειτουργικά συστατικά ή καλύτερα οι παράγοντες επούλωσης ρέουν και εν συνεχεία θεραπεύουν τις ρωγμές.

Η αυτο-ίαση με τη χρήση κοίλων ινών έχει διερευνηθεί από διάφορους ερευνητές και με διάφορα υλικά (πολυμερή, πολυμερικά σύνθετα). Στις περισσότερες περιπτώσεις αποδείχθηκε η καταλληλότητα των κοίλων ινών στην απελευθέρωση επουλωτικών παραγόντων. Με σκοπό τη γρήγορη και εύκολη παρατήρηση των εσωτερικών ρωγμών των σύνθετων υλικών, οι Pang και Bond [14,15] δημιούργησαν μια οπτική μέθοδο κατά την οποία γεμίζονται ίνες με παράγοντες επούλωσης, αναμειγμένους με φθορίζουσες χρωστικές ουσίες, έτσι ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση της διαδικασίας επούλωσης (Σχήμα 3.6).

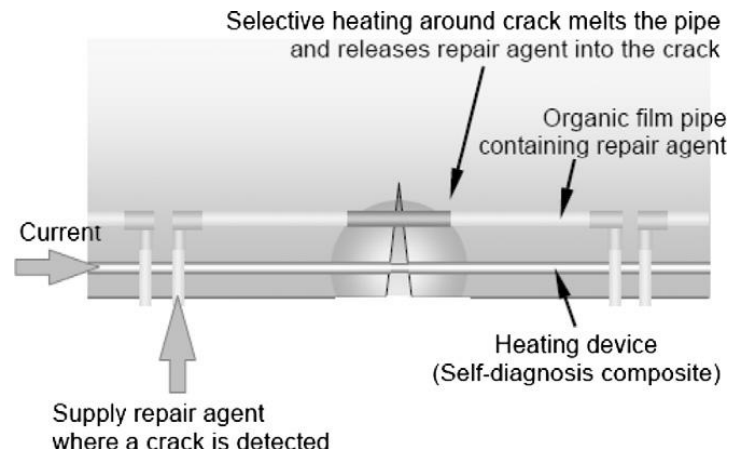


Σχήμα 3.6: (α) Κοίλες ίνες γυαλιού και (β) εικόνα βλάβης με τη χρήση κοίλων ινών αναμειγμένων με φθορίζουσες χρωστικές ουσίες [24].

Ένας ακόμα ερευνητής ο Dry[16,17,18,19], υιοθέτησε την ιδέα της βιολογικής προσέγγισης (όπως η αιμοραγία) της αυτο-ίασης στο σκυρόδεμα. Η ιδέα του περιλαμβάνει την αποθήκευση των επισκευαστικών συστατικών μέσα σε εύθραυστα αγγεία τα οποία διανέμονται μέσα σε ένα δείγμα σκυροδέματος στο οποίο κατόπιν αστοχίας, τα αγγεία σπάνε και έπειτα απελευθερώνουν το επιδιορθωτικό μεσο. Ως αγγεία, χρησιμοποιήθηκαν κοίλες πορώδεις ίνες πολυπροπυλενίου, με μεθακρυλικό μεθύλιο εντός τους. Όταν αυτό απελευθερωθεί, μειώνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος. Παιρευαίρω έρευνα πραγματοποιήθηκε στην απελευθέρωση υλικού αποκατάστασης από γυάλινες κοίλες πιπέτες που βρίσκονται μέσα στο σκυρόδεμα, το οποίο προσκολλάται στην επιφάνεια της ρωγμής κατά την διάρκεια δοκιμής κάμψης. Μετά τη συγκόλληση, το δείγμα παρουσίασε αυξημένη φέρουσα ικανότητα κατά 20% σε μεταγενέστερη δοκιμή κάμψης [14,15].

Οι Nishiwaki et al. [20] πρότειναν ένα σύστημα αυτο-ίασης που αποτελείται από ένα σύνθετο αυτοδιάγνωσης, επουλωτικό παράγοντα και ένα οργανικό μεμβρανοειδή σωλήνα

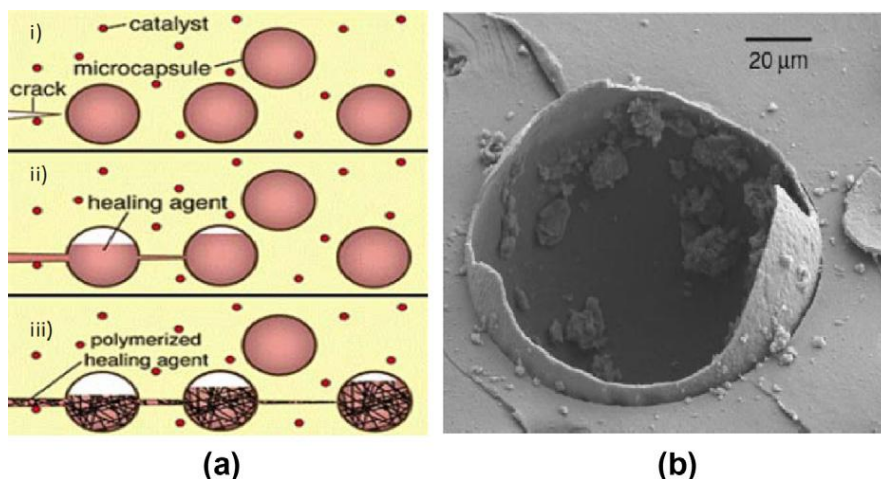
με θερμική πλαστικότητα. Το σύνθετο αυτοδιάγνωσης το οποίο μπορούσε να ανιχνεύσει την δημιουργία ρωγμών, λειτούργησε ως μία συσκευή θέρμανσης, καθώς μπορούσε να αυξήσει την ηλεκτρική αντίσταση γύρω από τις ρωγμές και να θερμάνει επιλεκτικά τα κατεστραμμένα τμήματα ηλεκτρικά. Τότε, ο θερμικά πλαστικός, οργανικός, μεμβρανοειδής σωλήνας, που περιείχε εποξική ρητίνη χαμηλού ιξώδους ο οποίος ήταν ενσωματωμένος στο σκυροδέμα δίπλα στη συσκευή θερμότητας, έλιωνε, απελευθερώνοντας τον επουλωτικό παράγοντα ο οποίος έκλεινε τις ρωγμές (**Σχήμα 3.7**).



Σχήμα 3.7: Σύστημα αυτο-ίασης σκυροδέματος με επιλεκτική θέρμανση γύρω από τις ρωγμές [20].

Μικροενθυλάκωση (Microencapsulation)

Η ενθυλάκωση υλικών έχει ξεκινήσει εμπνεόμενη από τη φύση, αρκεί να σκεφτούμε το απλό παράδειγμα ενός αυγού πουλιού ή ενός σπόρου. Η τεχνική της μικροενθυλάκωσης ξεκίνησε με την παρασκευή καψουλών οι οποίες περιέχουν χρωστικές ουσίες [21]. Η μικροενθυλάκωση μπορεί να περιγραφεί ως μια διαδικασία έγκλισης μικροσωματιδίων στερεών ή σταγονιδίων υγρού ή αερίου, σε ένα αδρανές κέλυφος, το οποίο με τη σειρά του τα απομονώνει και τα προστατεύει από ανεπιθύμητες αντιδράσεις με το εξωτερικό περιβάλλον [22]. Η τεχνική της μικροενθυλάκωσης, κατά την οποία ενσωματώνονται παράγοντες επούλωσης για την αυτο-ίαση υλικών, μελέτηθηκε από τους White et al. [23]. Όταν δημιουργηθεί ρωγμή διαρρηγνύονται οι ενσωματωμένες μικροκάψουλες, απελευθερώνοντας παράγοντες επούλωσης που αντιμετωπίζουν τη ρωγμή με τριχοειδή δράση. Στη συνέχεια, ο επουλωτικός παράγοντας έρχεται σε επαφή με τον ενσωματωμένο καταλύτη προκαλώντας πολυμερισμό και εξασφαλίζοντας το κλείσιμο των ρωγμών. (**Σχήμα 3.8**)



Σχήμα 3.8: α) Βασική μέθοδος μικροενθυλάκωσης και (β) διάρρηξη μικροκάψουλας.[23]

Οι Boh και Šumiga[24] αξιολόγησαν την εφαρμογή των πρόσθετων μικροκάψουλων στα δομικά και κατασκευαστικά υλικά. Με στόχο τη διευκόλυνση της περαιτέρω ενυδάτωσης της μήτρας, διαφορετικά πρόσθετα εγκλείστηκαν σε μικροκάψουλες οι οποίες ενσωματώθηκαν στη μήτρα. Οι Tomiuchi και Nishihama[25], εφηύραν την μικροενθυλάκωση ύδατος για την παραγωγή τσιμεντοειδών οικοδομικών δοκών με ενιαία αντοχή. Τυπικές συνθέσεις τσιμέντου αναμειχθήκαν με ίνες και μικροκάψουλες που περιείχαν νερό για την σκλήρυνση. Οι Okamoto et al. ενέκλεισαν νερό σε κάψουλες από ακρυλικό υπεραπορροφητικό πολυμερές το οποίο απελευθερώνεται από το υπεραπορροφητικό υλικό για να προάγει την ενυδάτωση του τσιμέντου γύρω του. Σε μία άλλη έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τον Nishiwaki, χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη μικροκάψουλων. Οι πρώτες γεμίζουν με εποξειδική ρητίνη ως συστατικό του παράγοντα επούλωσης (το υλικό του κελύφους τους αποτελείται από ουρία - φορμαλδεΰδη - φορμαλίνη και έχει διάμετρο 20-70 μm), ενώ οι δεύτερες περιέχουν ακρυλική ρητίνη ως σκληρυντή (το υλικό κελύφους παρασκευάζεται από ζελατίνη και έχει διάμετρο 125-297 μm). Και τα δυο υλικά, υπέστησαν δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού για να επιβεβαιωθούν πιθανά προβλήματα αυτής της μεθόδου αυτο-ίασης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι: α) ήταν δύσκολο να σκληρυνθεί ο παράγοντας επούλωσης των δύο συστατικών, β) η ποσότητα του επουλωτικού παράγοντα που γέμιζε τις κάψουλες αποδείχθηκε ανεπαρκής και γ) η αντοχή του δεσμού μεταξύ των μικροκαψουλών και της μήτρας, θα έπρεπε να είναι ισχυρότερη από την αντοχή των μικροκαψουλών. Προκειμένου να επιλυθούν τα παραπάνω προβλήματα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο επουλωτικός παράγοντας ενός συστατικού, η διάμετρος των μικροκαψουλών θα έπρεπε να ήταν μεγαλύτερη και η αντοχή δεσμού μεταξύ του υλικού του κελύφους και της τσιμεντοειδούς μήτρας θα έπρεπε να βελτιωθεί. Εάν η αντοχή του περιβλήματος της κάψουλας είναι υψηλότερη από την αντοχή του δεσμού οι μικροκάψουλες δεν θα διαρρηχθούν μετά την έναρξη της ρηγματώσης, με αποτέλεσμα ο επουλωτικός παράγοντας να μην απελευθερωθεί και η ίαση των ρωγμών να μην πραγματοποιηθεί.

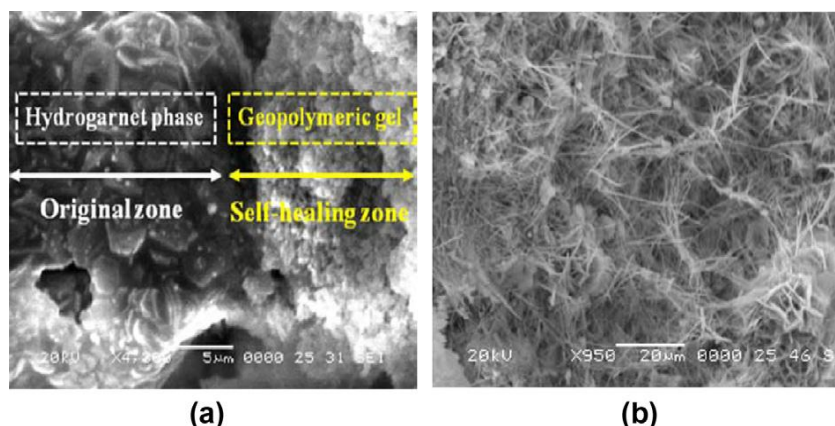
Ακόμα, μια άλλη προσέγγιση είναι η ενσωμάτωση πυριτικού νάτριο σε μικροκάψουλες. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ συμβατικού σκυροδέματος και σκυροδέματος που περιείχε 2% πυριτικό νάτριο μέσα σε μικροκάψουλες έπειτα από τη φόρτισή τους. Το δοκίμιο με το μικροενθυλακωμένο πυριτικό νάτριο παρουσίασε αντοχή σε θλίψη της τάξεως 26% των αρχικών αντοχών (πριν την τεχνητή αστοχία), ενώ το δείγμα αναφοράς είχε αντοχή σε θλίψη μόλις 10% της αρχικής αντοχής. Ο λόγος ανάκτησης αντοχής θα

μπορούσε να είναι ακόμα υψηλότερος με την αύξηση της ποσότητας του παράγοντα επούλωσης [14].

Διογκωτικά και κρυσταλλικά πρόσθετα (Expansive agents and mineral admixtures)

Έχει παρατηρηθεί ο σχηματισμός τσιμεντοειδών προϊόντων όπως αυτών του ετρινγκίτη (AFt, AFm) και του ασβεστίτη (CaCO_3) σε ρωγμές καθώς και κρυστάλλων πορτλαντίτη ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) στα κενά αέρα ρηγματωμένου σκυροδέματος. Εικάστηκε ότι αυτά τα προϊόντα ενυδάτωσης, είχαν απελευθερωθεί και ανακρυσταλλωθεί όταν το νερό εισήλθε μέσω των ρωγμών. Βασιζόμενοι σε αυτή την εικασία, οι Kishi et al. [26, 9,27,28] μελέτησαν την αποτελεσματικότητα διαφόρων παραγόντων για την αυτο-ίαση του σκυροδέματος. Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν διογκωτικά, γεω-υλικά και χημικές προσμίξεις καθώς και κάποιους συνδυασμούς αυτών.

Σε ένα πείραμα σύγκρισης που διεξήχθη, μεταξύ ενός δείγματος αναφοράς και ενός δοκιμίου στο οποίο είχε αντικατασταθεί το 10% της συνολικής μάζας τσιμέντου από διογκωτικό παράγοντα, που αποτελείται από $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$, ανυδρίτη (CaSO_4) και ασβέστη (CaO), τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ρωγμή, στο δοκίμιο με τον διογκωτικό παράγοντα, με αρχικό πλάτος 0.22 mm σχεδόν θεραπεύτηκε μετά από ένα μήνα. Μεταξύ των ρωγμών παρατηρήθηκαν προϊόντα ενυδάτωσης. Ωστόσο, στα δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος, οι ρωγμές εξακολουθούσαν να υπάρχουν, εκτός από κάποια σημεία στα οποία έκλεισαν μετά από μικρό χρονικό διάστημα. Επομένως, η ανακρυστάλλωση μέσω διογκωτικών παραγόντων αποδείχτηκε αποτελεσματικότερη ως προς την αυτο-ίαση συγκριτικά με το συμβατικό σκυροδέμα. Σε επόμενη μελέτη, μαζί με τον διογκωτικό παράγοντα προστέθηκε ένα γεω-υλικό με περιεκτικότητα 71.3% SiO_2 και σε 15.4% Al_2O_3 . Διαπιστώθηκε ότι σχηματίστηκαν γεωπολυμερή απο τον πολυμερισμό των αργυλικών και των πυριτικών ουσιών, τα οποία προήλθαν απο την διάλυση των αρχικών πηγών σε υψηλό pH με την παρουσία αλκαλικών μετάλλων. Λεπτομερείς μελέτες έδειξαν, ότι αυτή η γεωπολυμερής γέλη, είχε μέγεθος μικρότερο από 2 μm και ότι η διεπαφή της ρωγμής με τις φάσεις της αρχικής ρηγματώδους ζώνης σχημάτιζαν αρκετές hydrogarnet φάσεις. Αυτό υποδεικνύει ότι οι φάσεις hydrogarnet ή AFt, όπως παρουσιάζονται και στο **Σχήμα 3.9**, σχηματίζονται από τον διογκωτικό παράγοντα και συνεπώς έπαιξαν έναν σημαντικό ρόλο στη γεφύρωση της ρωγμής.



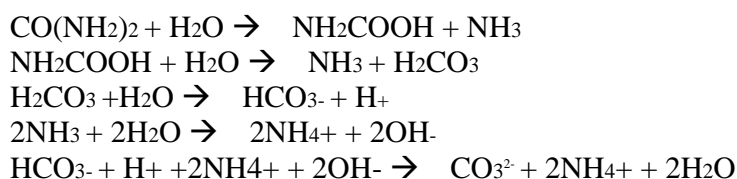
Σχήμα 3.9: ESEM εικόνα προϊόντων επούλωσης με χρήση διογκωτικών υλικών[28].

Η ανάλυση EDS, αποκάλυψε επίσης, ότι το μεγαλύτερο μέρος της τροποποιημένης γεωπολυμερούς γέλης δομήθηκε σε πυκνές φάσεις σε σύγκριση με τις φάσεις hydrogarnet. Ακόμα, με αυτή τη σειρά ερευνών μελετήθηκαν και τα χημικά πρόσθετα. Το συμπέρασμα που εξήχθη, ήταν, ότι η προσθήκη ανθρακικών αλάτων, όπως NaHCO_3 , Na_2CO_3 και Li_2CO_3 σε συμβατικό σκυρόδεμα, συνέβαλε στην αύξηση της ανακρυστάλλωσης των τσιμεντοειδών και την καθίζηση των σωματιδίων στο σκυρόδεμα. Έτσι, οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι με την χρησιμοποίηση της κατάλληλης ποσότητας ανθρακικών αλάτων και διογκωτικού παράγοντα, η ικανότητα αυτο-ίασης των ρωγμών θα μπορούσε να ενισχυθεί [14]. Θα πρέπει να επισημανθεί, ότι εάν ένα διογκωτικό πρόσθετο χωρίς προστατευτικό προαναμιχθεί με τσιμέντο, τότε μετά την προσθήκη του νερού το πρόσθετο αυτό θα ενυδατωθεί ταυτόχρονα ή ακόμα και ταχύτερα από το τσιμέντο, προς τον σχηματισμό διογκωτικών ένυδρων αλάτων. Επομένως, εάν τα διογκωτικά στελέχη καταναλωθούν πολύ νωρίς ή χωρίς να απαιτείται, όχι μόνο δεν θα μπορούν να δημιουργήσουν διογκωτικές ένυδρες ενώσεις, για να γεμίσουν τις ρωγμές όταν αυτές δημιουργηθούν, αλλά ίσως οδηγήσουν σε απροσδόκητη βλάβη στην τσιμεντοειδή μήτρα. Μία λύση, θα μπορούσε να είναι, ο συνδυασμός της τεχνικής της ενθυλάκωσης με τη χρήση διογκωτικών προσθέτων, εντός των μικροκαυσλών.

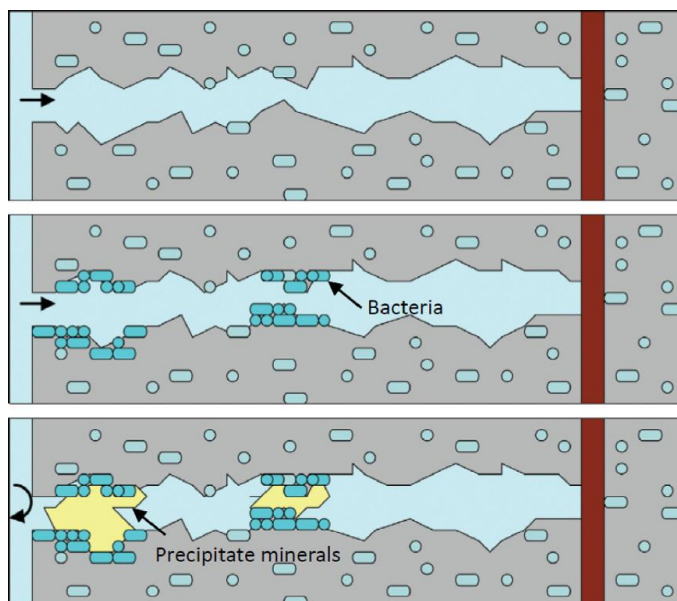
Βακτήρια (Bacteria)

Προτάθηκε από κάποιους ερευνητές η χρήση μίας βιολογικής επισκευαστικής τεχνικής στο πλαίσιο της οποίας εισάγονταν βακτήρια στο σκυρόδεμα. Η τεχνική αυτή εμφανίστηκε πρώτη φορά στα μέσα της δεκαετίας του 1990 σε μία εργασία των *Gollapudi et al* [29], οι οποίοι πρότειναν μία μέθοδο φιλική προς το περιβάλλον για την επισκευή ρωγμών. Για την πραγμάτωσή της γινόταν χρήση βακτηρίων τα οποία μεταβολίζουν την ουρία και συμβάλουν στην καταβύθιση ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) εκεί που εμφανίζονται μικρορωγμές. Η μικροβιακή κατακρήμνιση του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) καθορίζεται από παράγοντες σχετικούς με τη συγκέντρωση του διαλυμένου ανόργανου άνθρακα, το pH, τη συγκέντρωση των ιόντων ασβεστίου και την παρουσία θέσεων σχηματισμού πυρήνων. Οι τρεις πρώτοι προαναφερθέντες παράγοντες προέρχονται από τον μεταβολισμό των βακτηρίων, ενώ τα κυτταρικά τοιχώματά τους ενεργούν ως θέσεις σχηματισμού πυρήνων.

Ο Tittelboom και οι συνεργάτες του [30] διεξήγαγαν έρευνα σχετική με το σκυρόδεμα στην οποία χρησιμοποίησαν βακτήρια για την παραγωγή ουρεάσης, ένα ένζυμο που καταλύει την ουρία ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) σε αμμωνία (NH_4^+) και ανθρακική ρίζα (CO_3^{2-}). Η χημική διαδικασία είναι η ακόλουθη: 1 mol ουρίας υδρολύεται ενδοκυτταρικά προς 1 mol καρβαμικού οξέως και 1 mol αμμωνίας. Το καρβαμικό οξύ, αυθόρμητα υδρολύεται και παράγεται 1 mol αμμωνίας και 1 mol ανθρακικού οξέως. Αυτά τα προϊόντα σχηματίζουν τότε 1 mol όξινου ανθρακικού, 2 mol αμμωνίου και ιόντα υδροξειδίου. Οι δύο τελευταίες αντιδράσεις οδηγούν σε αύξηση του pH και μετατόπιση της ισορροπίας του όξινου ανθρακικού με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ανθρακικών ιόντων. Οι χημικές αντιδράσεις που περιγράφηκαν είναι οι εξής:



Λόγω του ότι το κυτταρικό τοίχωμα των βακτηρίων είναι αρνητικά φορτισμένο, τα βακτήρια μπορούν να δημιουργήσουν κατιόντα από το περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων θετικών φορτισμένων ιόντων ασβεστίου, το οποίο αποθηκεύεται στην επιφάνεια του κυτταρικού τοιχώματος. Ακολουθώντας, τα ιόντα Ca^{2+} αντιδρούν με τα ιόντα CO_3^{2-} τα οποία οδηγούν στην καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) στην κυτταρική επιφάνεια. Αυτή η κατακρήμνιση χρησιμεύει ως θέση πυρήνωσης. Με την παραπάνω μέθοδο, τα βακτήρια προκαλώντας την τοπική καθίζηση CaCO_3 , είναι σε θέση να καλύψουν τις ραγισμένες επιφάνειες. Στο **Σχήμα 3.10** παρουσιάζονται εικόνες από ESEM για το ίζημα CaCO_3 πάνω στην επιφάνεια των ρωγμών [31].



Σχήμα 3.10: Αυτο-ίαση με χρήση βακτηρίων στο σκυρόδεμα. Οι μεγαλύτεροι κρύσταλλοι ανθρακικού ασβεστίου (μεγέθους 50-500 μm) παράγονται από τα ενσωματωμένα στην επιφάνεια των ρωγμών βακτήρια [31].

Μνημονικά, ως προς το σχήμα, υλικά (Shape memory materials)

Ο τελευταίος μηχανισμός που αναφέρεται στην αυτο-ίαση, είναι η χρήση μνημονικών ως προς το σχήμα υλικών. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι προτάθηκε από ορισμένους ερευνητές, η ενσωμάτωση λειτουργικών υλικών, δηλαδή διαμορφωμένων μνημονικών κραμάτων ή πολυμερών μέσα σε τσιμεντοειδή υλικά. Η κεντρική ιδέα στην οποία στηρίχθηκε αυτό είναι ότι όταν οι ρωγμές δημιουργούνται, τα μνημονικά ως προς το σχήμα υλικά, τα οποία έχουν ένα βραχύτερο, προκαθορισμένο, απομνημονευμένο σχήμα κατά την τρέχουσα κατάσταση θα συρρικνωθούν ή θα συσταλθούν σε μία συγκεκριμένη μορφή. Έτσι, παράγεται μία δύναμη συστολής η οποία ιδανικά οδηγεί στο κλείσιμο των ρωγμών[32]. Πολλά είδη μνημονικών ως προς το σχήμα κραμάτων (SMAs) έχουν ανακαλυφθεί, μεταξύ αυτών το Nitinol, το οποίο έχει υπερ-θερμομηχανικές και θερμοηλεκτρικές ιδιότητες και είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο SMAs[33]. Παρομοίως, μνημονικά ως προς το σχήμα πολυμερή (SMP) έχουν επίσης ενσωματωθεί σε τσιμεντοειδή μήτρες[34,35]. Η βασική ιδέα είναι η εξής: 1) η ρηγμάτωση συμβαίνει στα τσιμεντοειδή υλικά λόγω της συρρίκνωσης σε πρώιμη ηλικία, εξαιτίας θερμικών φαινομένων και μηχανικής φόρτισης, 2) ο μηχανισμός συρρίκνωσης στους ενσωματωμένους πολυμερικούς ως προς το σχήμα τένοντες, ενεργοποιείται μέσω της

θέρμανσης, η οποία οδηγεί σε κλείσιμο των ρωγμών και στην ανάπτυξη θλιπτικών τάσεων, κατά μήκος των ρηγματωμένων επιφανειών που έχουν κλείσει. Το κλείσιμο των ρωγμών, μπορεί να ενισχύσει τη φυσική διαδικασία αυτο-ίασης και γενικώς εξυπηρετεί την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των δομικών στοιχείων.

Υπάρχουν αποδείξεις ότι η χρήση μνημονικών, ως προς το σχήμα, υλικών δουλεύει. Ωστόσο, λόγω ότι το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται συχνά σε πολύ μεγάλες, η μέθοδος αυτή καθίσταται ασύμφορη από πλευράς κόστους με αποτέλεσμα να αξιοποιείται εξειδικευμένο εύρος εφαρμογών. Ακόμα, αξίζει να σημειωθεί ότι η ενεργοποίηση αυτού του μηχανισμού εργασίας προκαλεί θέρμανση σε ορισμένη θερμοκρασία. Έτσι, ο τρόπος πραγμάτωσης θέρμανσης σε μία τσιμεντοειδή μήτρα με τα μνημονικά υλικά καθιστά τη διαδικασία αυτο-ίασης του συστήματος περίπλοκη. Επιπροσθέτως, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι ορισμένα προϊόντα ενυδάτωσης είναι ασταθή σε υψηλές θερμοκρασίες κάτι που οδηγεί σε σκεπτικισμό όσον αφορά την υιοθέτηση αυτής της μεθόδου [36, 37].

Στον Πίνακα 3.1 συνοψίζονται και συγκρίνονται οι μέθοδοι αυτο-ίασης που αναπτύχθηκαν παραπάνω.

Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ενθυλάκωση		
Σύστημα εξωτερικής τροφοδοσίας	<ol style="list-style-type: none"> 1.Αναγκαιότητα παράγοντα επούλωσης 2.Δυνατότητα ρύθμισης μεγάλης ποσότητας παράγοντα επούλωσης 3.Αποτελεσματικότητα κάτω από πολλαπλές καταστροφές 	<ol style="list-style-type: none"> 1.Δυσκολία στη χύτευση 2.Αρνητική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του τσιμέντου εάν ενσωματώνεται μεγάλη ποσότητα κοίλων ινών
Εσωτερική ενθυλάκωση	<ol style="list-style-type: none"> 1.Αναγκαιότητα παράγοντα επούλωσης 2.Δυνατότητα ρύθμισης μέτριας ποσότητας παράγοντα επούλωσης 3.Αποτελεσματικότητα κάτω από πολλαπλές καταστροφές 	<ol style="list-style-type: none"> 1.Δυσκολία στη χύτευση 2.Αρνητική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του τσιμέντου εάν ενσωματώνεται μεγάλη ποσότητα κοίλων ινών 3.Πιθανή δυσκολία στην θεραπεία του παράγοντα επούλωσης
Μικροκάψουλα	<ol style="list-style-type: none"> 1.Αναγκαιότητα παράγοντα επούλωσης 2.Απόκριση σε πολλές κατεστραμμένες περιοχές ταυτόχρονα 3.Αποτελεσματικότητα σε πολλαπλές ζημιές 	<ol style="list-style-type: none"> 1.Δυσκολία στη χύτευση και στην προετοιμασία της κάψουλας 2.Περιορισμένη ποσότητα θεραπευτικού παράγοντα 3.Ανησυχία σχετικά με το δεσμό κάψουλας-μήτρας 4. Αρνητική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του τσιμέντου εάν ενσωματώνεται μεγάλη ποσότητα από κάψουλες
Διογκωτικά και κρυσταλλικά πρόσθετα	<ol style="list-style-type: none"> 1.Καλή θεραπευτική ικανότητα 2.Καλή συμβατότητα μεταξύ προϊόντων επούλωσης και τσιμεντοειδούς μήτρας 	<ol style="list-style-type: none"> 1.Ανεπιθύμητη διόγκωση σε ορισμένες περιπτώσεις 2.Προβληματική αποτελεσματικότητα κάτω από πολλαπλές καταστροφές
Βακτήρια	<ol style="list-style-type: none"> 1.Βιολογική, μη μολυσματική και φυσική μέθοδος 	<ol style="list-style-type: none"> 1.Πολλά προαπαιτούμενα 2.Πρέπει να ληφθούν μέτρα για την προστασία των βακτηρίων στο σκυρόδεμα 3.Δεν είναι βέβαιη η ανάκτηση των μηχανικών ιδιοτήτων κάτω από πολλαπλές καταστροφές
Μνημονικά, ως προς το σχήμα, υλικά	<ol style="list-style-type: none"> 1.Μπορούν να χειριστούν ρωγμές μακρο-μεγέθους 2.Ανάκτηση μηχανικών ιδιοτήτων 3.Αποτελεσματικότητα σε πολλαπλές ζημιές 	<ol style="list-style-type: none"> 1.Υψηλό κόστος 2.Η θέρμανση μπορεί να οδηγήσει σε αβαιότητα

Σχήμα 3.11: Σύγκριση μεταξύ των τεχνικών αυτό-ίασης[5].

3.1.3 Μέθοδοι Μέτρησης-αξιολόγησης αυτό-ίασης.

Πλήθος ερευνητικών ομάδων έχουν προσπαθήσει να αξιολογήσουν κατά πόσο οι προσεγγίσεις και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήσαν ήταν αποτελεσματικές και οδήγησαν σε ικανοποιητική ίαση. Μπορούμε να διακρίνουμε τις μεθόδους αξιολόγησης της αυτό-ίασης σε 3 μεγάλες κατηγορίες: στις οπτικές μεθόδους (Σχήμα 3.12, visualization and determination), στις μεθόδους που μελετάται η ανάκτηση της στεγανότητας (Σχήμα 3.13, regain tightness), και σε αυτές που μελετάται η ανάκτηση των μηχανικών ιδιοτήτων (Σχήμα 3.14, regain mechanical properties).

visualization and determination	Optical microscopy + image analysis	Visualization crystal deposition + determination healing rate
	Scanning electron microscopy	Visualization crystal deposition
	Environmental scanning electron microscopy	Visualization breakage of partially embedded capsule
	Thin section analysis	Visualization crystal deposition inside crack
	X-ray radiography	Visualization release encapsulated agent from embedded capsule
	X-ray tomography	Visualization release encapsulated agent from embedded capsule in 3D
	Digital image correlation	Visualization of crack closure upon heat treatment of SMA
	X-ray diffraction analysis	Determination of crystalline materials
	Ramann spectroscopy	Determination chemical composition
	Infrared analysis	Determination of precipitated products

Σχήμα 3.12: Εκτίμηση της αυτό-ίασης με οπτικές μεθόδους (Πηγή:[4]).

regain tightness	Water permeability low pressure	Water flow through (healed) crack
	Water permeability high pressure	Water flow through (healed) crack
	Air permeability	Air flow through (healed) crack
	Capillary water uptake	Capillary water uptake by (healed) crack
	Neutron radiography	Visualize capillary water uptake by (healed) crack
	Corrosion test	Resistance against corrosion
	Frost salt scaling	Resistance against frost salt scaling
	Chloride diffusion	Resistance against chloride ingress
	Osmotic pressure	Resistance against ion ingress
	Ultrasonic transmission measurements	Continuity of material

Σχήμα 3.13: Εκτίμηση της αυτό-ίωσης με μελέτη της ανάκτησης της αντίστασης σε περατότητα (Πηγή:[4]).

regain mechanical properties	Compression test	
	Tensile test	Regain in strength, stiffness and/or energy obtained when reloading healed specimen
	3-point bending test	
	4-point bending test	Formation of new cracks <i>versus</i> reopening of old cracks
	Horizontal deformation column/frame	
	Impact loading slab	
	Acoustic emission analysis	Regain in energy/Notice capsule breakage
	Resonance frequency analysis	Regain in stiffness

Σχήμα 3.14: Εκτίμηση της αυτό-ίωσης με μελέτη της ανάκτησης των μηχανικών ιδιοτήτων (Πηγή:[4]).

3.2 Αυτό-ίαση με χρήση διογκωτικών και κρυσταλλικών προσθέτων

Σε μια προσπάθεια να ενισχύσουν την ικανότητα αυτό-ίασης τσιμεντοειδών υλικών οι K. Sisomphon, O. Corugoglu, και E.A.B. Koenders (2012) μελέτησαν συνθέσεις κονιαμάτων στα οποία ενσωμάτωσαν διαφορετικά τσιμεντοειδή υλικά[8].

Συγκεκριμένα οι ερευνητές μελέτησαν έξι διαφορετικές συνθέσεις με συμβατικό τσιμέντο Portland 42.5 N, με κρυσταλλικά και διογκωτικά πρόσθετα. Το κρυσταλλικό πρόσθετο (CA) (Xypex Admix C-1000NF) είναι ένα σύνθετο τσιμεντοειδές υλικό, το οποίο περιέχει πυριτικά αντιδρώντα και κρυσταλλικούς καταλύτες. Όσο αφορά στο διογκωτικό πρόσθετο (CSA) είναι το Denka CSA#20, Denka Corporation, Japan. Ένα τριαδικό μίγμα που συντίθεται από ασβεστοαργιλοπυριτικούς κρυστάλους, ανυδρίτη και ελεύθερη άσβεστο (free lime). Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι διογκωτικού πρόσθετου, ο CSA - α και CSA - β με διαφορετική σύσταση (Πίνακας 3.1).

Πίνακας 3.1: Ορυκτολογική ανάλυση των CSA-α και CSA-β.

Σύνθεση Ορυκτών (% wt.)	CSA - α	CSA - β
Χαουνίτης ($C_4A_3\bar{S}$)	32	10
Ασβέστης (C)	20	50
Ανυδρίτης ($C\bar{S}$)	40	30
Λοιπά	8	10

Συμπτύσεις, C = CaO, A = Al₂O₃, \bar{S} = SO₃

Παρακάτω παρουσιάζονται οι χημικές αναλύσεις των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2: Χημικές αναλύσεις των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για αυτό-ίαση[8].

Οξείδια (% wt.)	CEM I 42.5N	CSA - α	CSA - β	CA
CaO	63.30	48.09	75.00	73.40
SiO ₂	19.50	1.71	1.20	13.72
Al ₂ O ₃	5.60	12.66	3.50	3.66
Fe ₂ O ₃	2.30	0.45	1.70	2.28
Na ₂ O	0.30	0.05	0.03	1.24
K ₂ O	0.90	0.06	0.03	0.40
SO ₃	2.70	35.48	17.00	3.91
MgO	1.10	0.92	0.49	0.70

Το CSA - α είναι ένα εμπορικό πρόσθετο που χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση της συρρίκνωσης, ενώ με τροποποίηση αυτού και προσθήκη περισσότερης ελεύθερης άσβεστου (CaO) παρήχθηκε το CSA - β. Με βάση τις συμβουλές των παραγωγών και τα δοκιμαστικά μίγματα, οι μελετητές προσδιόρισαν τις κατάλληλες δόσεις των κρυσταλλικών (CA) και διογκωτικών προσθέτων (CSA) στα ποσοστά 1.5% και 10% κατά βάρος, αντίστοιχα, ως προς το σύνολο των τσιμεντοειδών υλικών.

Τα κονιάματα που παρήχθησαν στην παρούσα μελέτη σχεδιάστηκαν με λόγο νερού προς τσιμέντο (W/C) 0.25 και λόγο άμμου προς τσιμέντο (S/C) 2, ενώ έγινε χρήση υπερευστοποιητή Glenium ACE30, ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη εργασιμότητα. Οι συνθέσεις που εξετάστηκαν παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 3.3).

Πίνακας 3.3: Σύνθεση κονιαμάτων για αυτό-ίασης[8].

Μείγμα	Περιγραφή	OPC	CSA - α	CSA - β	CA	Νερό	Άμμος
M1	Αναφοράς	100	-	-	-	25	200
M2	CA 1,5	98,5	-	-	1,5	25	200
M3	CA 4	96	-	-	4	25	200
M4	CSA - α	90	10	-	-	25	200
M5	CSA - β	90	-	10	-	25	200
M6	CA 1,5 / CSA - α	88,5	10	-	1,5	25	200

Κατά τη παρασκευή των δειγμάτων ακολουθήθηκαν οι εξής διαδικασίες: ανάμιξη 2 min σε χαμηλή ταχύτητα, ανάμιξη 2 min σε υψηλή ταχύτητα, με εμπορικό αναμίκτη, χύτευση σε κυλινδρικές μήτρες διαμέτρου 75 mm και ύψους 20 mm. Προκειμένου να ανοιχτούν ρωγμές μεγάλου εύρους χωρίς να επέλθει αστοχία τα δοκίμια ενισχύθηκαν με γαλβανισμένο συρμάτινο πλέγμα το οποίο τοποθετήθηκε στο μέσο του ύψους των δοκιμίων. Έπειτα, οι πληρωμένες μήτρες, δονήθηκαν για 20 sec ενώ μετά από 24 h τα δείγματα ξεκαλουπώθηκαν και ωρίμασαν σε ελεγχόμενη θερμοκρασία 25 ± 2 °C και σχετική υγρασία 95 ± 5 % για τρεις ημέρες. Τέλος, αφέθηκαν σε εργαστηριακές συνθήκες για τις υπόλοιπες 25 ημέρες.

Μετά το πέρας της ωρίμανσης, τα δοκίμια ρηγματώθηκαν τεχνητά με τη μέθοδο της δοκιμής σε διάρρηξη (splitting tensile strength test), προκειμένου να δημιουργηθούν σε αυτά ρωγμές εύρους 100 - 400 μm.

Μετά από τη ρηγμάτωση τα δείγματα προσδέθηκαν με σωληνοειδή βραχίονα PVC διαμέτρου 75 mm προκειμένου να προσομοιωθούν οι συνήθεις συνθήκες στις κατασκευές, όπου το σκληρυμένο σκυρόδεμα βρίσκεται συνήθως υπό κάποιο περιορισμό. Για την παρακολούθηση των ρωγμών, χρησιμοποιήθηκε στερεοσκόπιο Leica MZ10 με λογισμικό ανάλυσης εικόνας Leica LAS με το οποίο μετρήθηκε το εύρος των ρωγμών στην επιφάνεια των δοκιμίων (άνω και κάτω επιφάνεια για κάθε δοκίμιο) σε πέντε διαφορετικές θέσεις, οι οποίες απείχαν μεταξύ τους περίπου 10 mm. Τα αρχικά πλάτη των ρωγμών μετρήθηκαν αμέσως μετά την τοποθέτηση του βραχίονα ενώ στη συνέχεια τα δείγματα εμβαπτίστηκαν στο νερό, το οποίο και ανανεωνόταν κάθε 7 ημέρες. Μετά από 4, 7, 14 και 28 ημέρες από την ημέρα έναρξης της διαβροχής τα πλάτη των ρωγμών ξαναμετρήθηκαν. Θα πρέπει να σημειωθεί πως τα δοκίμια με διαφορετική σύνθεση βυθίστηκαν σε ξεχωριστά δοχεία κατά τη φάση της ίασης.

Ακόμα πραγματοποιήθηκε η δοκιμή διαπερατότητας έναντι νερού στα προρηγματωμένα κονιάματα, για να διερευνηθεί κατά πόσο επηρεάζεται η διαπερατότητα των ρωγμών με την εξέλιξη της ίασης. Τα δοκίμια συνδέθηκαν με ένα πλαστικό κυλινδρικό δοχείο και στερεοποιήθηκαν σφικτά με ένα σφικτήρα από PVC, ενώ κατά μήκος της ραφής εφαρμόστηκε σιλικόνη για σφράγιση και αποφυγή της διαρροής του νερού. Καθ όλη τη διάρκεια του πειράματος η στάθμη του νερού πρέπει να παραμένει σταθερή σε ύψος 100 ± 5 mm. Προκειμένου να ικανοποιηθεί η συνθήκη αυτή γινόταν προσθήκη νερού. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν πάνω σε στηρίγματα, ώστε να διευκολύνεται η ροή. Οι ποσότητες του διερχόμενου νερού μετρήθηκαν σε διαστήματα των 4, 7, 8, 14, 15 και 28 ημερών διαβροχής και η διάρκεια της κάθε μέτρησης ήταν 10 λεπτά.

Ακόμα, με τη χρήση στερεοσκοπίου παρατηρήθηκε η επούλωση των ρωγμών στο εσωτερικό τους. Το προφίλ της ρωγμής και ο σχηματισμός των προϊόντων αποκατάστασης, μελετήθηκαν σε στιλβωμένα δείγματα. Τα δοκίμια εμποτίστηκαν σε μία χαμηλού ιξώδους φθορίζουσα εποξειδική χρωστική ουσία υπό κενό για να προστατευθούν. Έπειτα, κόπηκαν κατακόρυφα σε φέτες, εγκάρσια προς την κατεύθυνση της ρωγμής, σε ένα πάχος περίπου 10 mm με συσκευή κοπής. Μετά την κοπή, αφέθηκαν σε πυριατήριο στους 35 °C για 24 ώρες και έπειτα οι επιφάνειες λειοτριβήθηκαν μέσω του DBT Diamond Roller και Grinder/86 μονάδα λεπτών τομών, για την αρχική παρασκευή των κατεργασμένων τμημάτων. Τέλος τα δείγματα στιλβώθηκαν με πάστα διαμαντιού πάχους 6 μm, 3 μm, 1 μm και 0.25 μm αντίστοιχα.

Σημαντικό ρόλο στην αυτό-ίαση παίζει η ποσότητα των ιόντων του ασβεστίου. Για τη μελέτη του φαινομένου τα δείγματα χυτεύθηκαν σε πλαστικά δοχεία με διάμετρο 33 mm και ύψος 50 mm. Οι γεμισμένες μήτρες, δονήθηκαν για 20 sec και έπειτα τα δείγματα επεξεργάστηκαν με παρόμοιο τρόπο με τα δισκοειδή δοκίμια. Έπειτα από 28 ημέρες ωρίμανσης έγιναν τεχνητές ρωγμές μέσω της δοκιμής σε διάρρηξη. Η περιφερειακή και η κάτω επιφάνεια των δειγμάτων επικαλύφθηκε με εποξειδική ρητίνη, ενώ αφέθηκε ακάλυπτη μόνο η άνω επιφάνεια όπου είχε επέλθει η θραύση. Στη συνέχεια τα δείγματα εμβάπτιστηκαν σε 100 mL απιονισμένου νερού. Η τιμή του pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του διαλύματος μετρούνταν τακτικά. Στις 7 ημέρες, συλλέχθηκαν 5 mL του διαλύματος και εν συνεχεία αραιώθηκαν με 2% HNO₃ για να αποφευχθεί η καταβύθιση. Τέλος, η συγκέντρωση των ιόντων ασβεστίου μετρήθηκε με ICP-AES.

Σημαντικά συμπεράσματα προέκυψαν από τα παραπάνω πειράματα:

Ως προς την επιφανειακή ίαση της ρωγμής των κονιαμάτων βρέθηκε ότι η προσθήκη των κρυσταλλικών και διογκωτικών προσθέτων παίζει ευρύτερο ρόλο. Συγκεκριμένα στη περίπτωση του δείγματος αναφοράς ρωγμές εύρους έως και 150 μm έκλεισαν εντός 28 ημερών, ενώ στις συνθέσεις με CSA και CA ρωγμές εύρους έως και 250–400 μm έκλεισαν πλήρως.

Ως προς τη διαπερατότητα των κονιαμάτων, στις συνθέσεις με τα πρόσθετα παρατηρήθηκε αισθητή μείωση της διαπερατότητας σε νερό, ενώ για τις συνθέσεις M4-M6 έπειτα από 28 ημέρες άγγιξε το μηδέν.

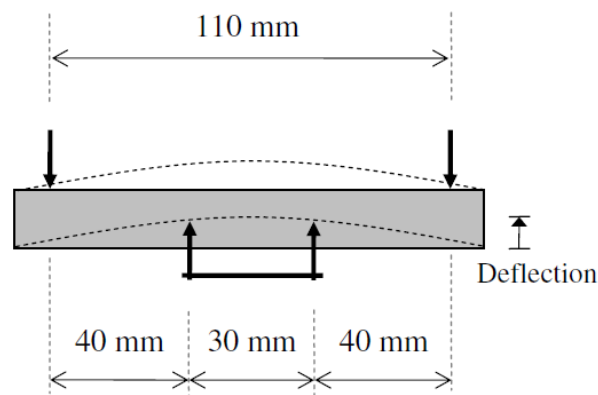
Τέλος στα συγκεκριμένα πειράματα αποδείχθηκε πως το ανθρακικό ασβέστιο (calcium carbonate) ήταν το σημαντικότερο προϊόν ίασης. Στα δείγματα με τα πρόσθετα ένα μεγάλο ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου παρατηρήθηκε, ειδικά στο χείλος της ρωγμής. Έτσι η ερευνητική ομάδα οδηγήθηκε στην υπόθεση ότι κοντά στο χείλος της ρωγμής συνυπάρχει η βελτιστη ποσότητα ταυτοχρόνως ιόντων ασβεστίου και άνθρακα.

Ως προς τις συνθέσεις, η ποσότητα των ελεύθερων ιόντων ασβεστίου Ca²⁺ από τη μάζα παίζουν σημαντικό ρόλο στη κατακρήμνιση (precipitation) του ανθρακικού ασβεστίου. Οι αναλύσεις έδειξαν ότι τα δείγματα με τα πρόσθετα CSA/CA απελευθέρωσαν περισσότερα ιόντα ασβεστίου απ' ό,τι τα δείγματα αναφοράς. Επιπλέον, στα δείγματα με πρόσθετα το αυξημένο pH ευνοεί την κατακρήμνιση του ανθρακικού ασβεστίου.

Ως προς τη χρήση κρυσταλλικών και διογκωτικών προσθέτων για την αυτό-ίαση τσιμεντοειδών υλικών αξίζει να γίνει αναφορά σε μια δεύτερη σειρά πειραμάτων που πραγματοποίησαν οι K. Sisomphon et al. (2013)[38]. Σε μια προσπάθεια για βελτίωση της ικανότητας αυτό-ίασης ενισχυμένων με ίνες τσιμεντοειδών υλικών (fiber reinforced strain hardening cementitious composite: SHCC), αξιολογήθηκαν συνθέσεις τέτοιων υλικών που περιείχαν διογκωτικά (CSA) και κρυσταλλικά πρόσθετα (CA). Ερευνήθηκε η επίδραση αυτών των προσθέτων στο επιφανειακό κλείσιμο των ρωγμών και στην ανάκτηση των μηχανικών ιδιοτήτων προρηγματωμένων δοκιμίων. Ακόμα μελετήθηκε η επίδραση των

συνθηκών έκθεσης στην ικανότητα αυτό-ίασης και τα είδη των συστατικών που σχηματίστηκαν κατά την ίαση. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν 4 διαφορετικές συνθέσεις: η σύνθεση αναφοράς (M1), η σύνθεση με 10% CSA (M2), η σύνθεση με 1.5% CA (M3) και η σύνθεση με 10% CSA και 1.5% CA mix (M4). Το κρυσταλλικό πρόσθετο (CA) που χρησιμοποιήθηκε είναι το Xypex Admix C-1000NF, Xypex Chemical Corporation, Canada, ένα συνθετικό τσιμεντοειδές υλικό το οποίο περιέχει τσιμέντο Πόρτλαντ, λεπτόκοκκο πυρίτιο και άλλα χημικά. Κάποια από τα συστατικά του αντιδρούν με το υδροξείδιο του ασβεστίου $\text{Ca}(\text{OH})_2$ προς σχηματισμό *κρυσταλλικών προϊόντων* τα οποία αποσυνδέουν τους πόρους και γεμίζουν τις ρωγμές στο σκυρόδεμα. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να υπάρχει επαρκής υγρασία. Η κύρια εφαρμογή αυτού του πρόσθετου είναι η μείωση της υδατοπερατότητας, και η στεγάνωση του σκυροδέματος, ενώ θεωρείται υδρόφιλο υλικό (water-proofing). Τα πιο σημαντικά ανόργανα συνθετικά είναι C_3S , C_2A , πορτλαντίτης (portlandite: $\text{Ca}(\text{OH})_2$) και μειονίτης (meionite).

Όσο αφορά στο διογκωτικό πρόσθετο (CSA) είναι το Denka CSA#20, Denka Corporation, Japan, το οποίο χρησιμοποιείται συνήθως ως εμπορικό προϊόν για τον έλεγχο της συρρίκνωσης (shrinkage compensation). Η δράση του ως διογκωτικό οδηγεί στη παραγωγή εντριγκίτη. Σε όλες τις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Πόρτλαντ CEM I 42,5 N. Οι ίνες PVA είχαν μήκος 8mm και διάμετρο 40μm ενώ καταλάμβαναν το 2% κατ' όγκο (1.3% κατά βάρος), ο λόγος νερού προς τσιμέντο ήταν 0.25, ενώ ο ρευστοποιητής ήταν ο Glenium ACE30. Για τη προετοιμασία των δειγμάτων όλες οι σκόνες προαναμίχθηκαν σε μίξερ Hobart σε χαμηλή ταχύτητα για 2 λεπτά και έπειτα προστέθηκε ο ρευστοποιητής και το νερό. Στη συνέχεια το μίγμα αναδεύτηκε σε χαμηλή ταχύτητα για 2 ακόμα λεπτά, και για άλλα 2 λεπτά σε υψηλή ταχύτητα ακολούθως. Στη συνέχεια προστέθηκαν οι ίνες PVA υπό συνθήκες ανάδευσης σε χαμηλή ταχύτητα και το μίγμα ανακατεύτηκε για άλλα 2 λεπτά σε υψηλή ταχύτητα. Το νωπό σκυρόδεμα σκυροδετήθηκε σε μήτρες διαστάσεων 240 mm x 60 mm x 10 mm και οι γεμισμένες μήτρες δονήθηκαν σε δονητικό τραπέζι. Μετά από 24 ώρες τα δείγματα ξεκαλουπώθηκαν και συντηρήθηκαν σε ελεγχόμενη θερμοκρασία 25 ± 2 °C και υγρασία $95 \pm 5\%$ RH για 3 ημέρες. Τέλος όλα τα δείγματα παρέμειναν εκτεθειμένα στον αέρα του εργαστηρίου για άλλες 25 μέρες. Κάθε δείγμα κόπηκε σε 4 τεμάχια, διαστάσεων 120 mm x 30 mm x 10 mm το καθένα. Για την εκτίμηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων πραγματοποιήθηκε κάμψη 4 σημείων (4-point flexural set-up) με απόσταση στηρίξεων 110 mm και απόσταση μεταξύ θέσεων επιβολής φορτίου 30mm, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.15**.



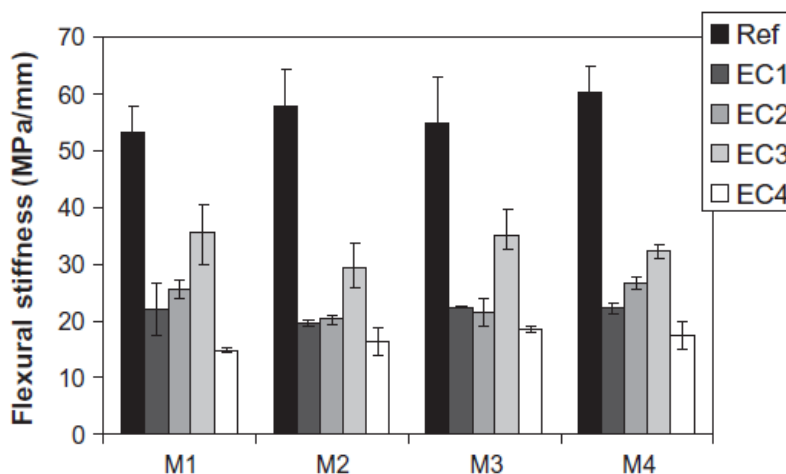
Σχήμα 3.15: Διάταξη κάμψης τεσσάρων σημείων.

Αρχικά δείγματα από όλες τις συνθέσεις υποβλήθηκαν σε δοκιμές και βρέθηκε ότι η σύνθεση χωρίς τα πρόσθετα (M1) παρουσιάζει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.

Για τη μελέτη του φαινομένου της αυτό-ίασης, τα δείγματα παραμορφώθηκαν κατά 1.2mm. Οι ρωγμές που προέκυψαν είχαν εύρος 10–50 μm . Στη συνέχεια τα ρηγματωμένα δοκίμια εκτέθηκαν στις εξής διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες για 28 μέρες:

- Συνθήκη έκθεσης 1 (EC1): τα δοκίμια βυθίστηκαν σε νερό βρύσης χωρίς ανανέωση ή προσθήκη νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου
- Συνθήκη έκθεσης 2 (EC2): τα δοκίμια βυθίστηκαν σε νερό βρύσης, το οποίο ανανεωνόταν κάθε 12 ώρες.
- Συνθήκη έκθεσης 3 (EC3): τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης που αποτελούνταν από βύθιση σε νερό βρύσης για 12 ώρες, παραμονή σε αέρα για 12 ώρες. Το νερό αντικαθιστόταν σε κάθε κύκλο.
- Συνθήκη έκθεσης 4 (EC4): τα δοκίμια εκτέθηκαν σε εσωτερικό περιβάλλον σε αέρα μέχρι να υποβληθούν σε κάποια δοκιμή. Αυτή η συνθήκη αποτέλεσε τη συνθήκη ελέγχου, στην οποία η αυτοίαση ήταν η ελάχιστη.

Μετά από 28 μέρες ίασης, η επιφάνεια των ρωγμών εξετάστηκε με στερεοσκόπιο. Τελικά όλα τα δείγματα φορτίστηκαν μέχρι τη τελική αστοχία ώστε να εξεταστούν οι μηχανικές τους ιδιότητες. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά των δειγμάτων αναφοράς που φορτίστηκαν μέχρι τελικής αστοχίας στις 28 μέρες. Παρατηρούμε ότι στη περίπτωση που τα δοκίμια παραμορφώθηκαν και αφέθηκαν να ιαθούν η σύνθεση αναφοράς M1 δεν παρουσιάζει μεγάλη διαφορά σε σχέση με τις υπόλοιπες συνθέσεις που έχουν πρόσθετα. Όσο αφορά στην αντοχή η συνθήκη EC3 είναι η ευνοϊκότερη. Ωστόσο, παρότι η αντοχή είναι αυξημένη δεν συμβαίνει το ίδιο και με τη δυσκαμψία, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 3.16**.



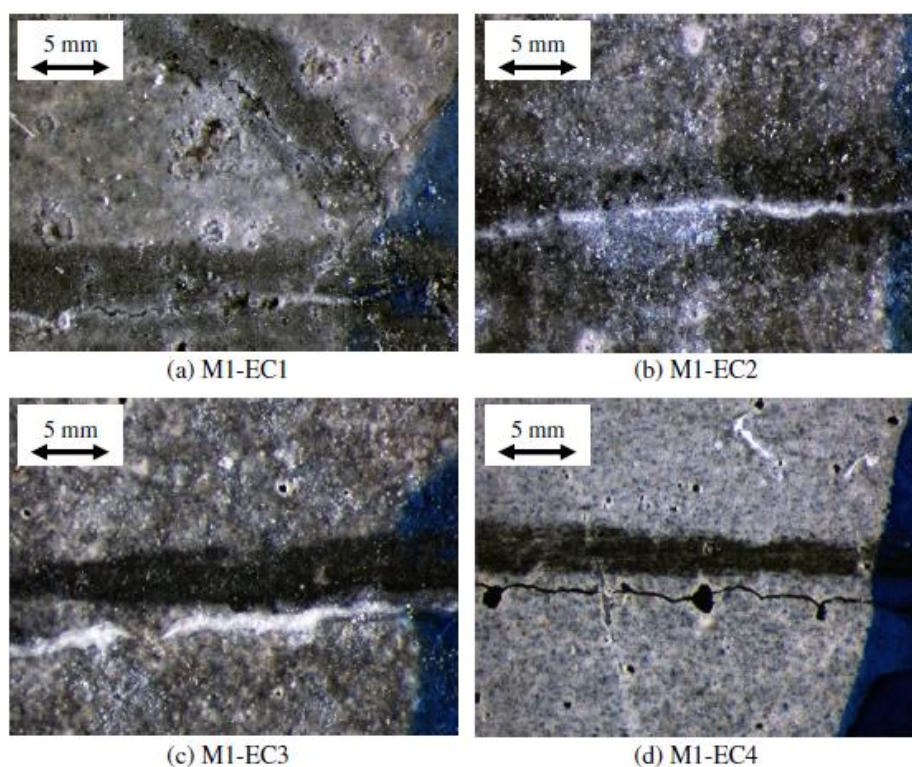
Σχήμα 3.16: Καμπτική δυσκαμψία ιασμένων SHCC.

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ως εξής: τα προϊόντα ίασης είναι συνήθως πιο αδύναμα από το CSH που παραγεται από την ενυδάτωση του τσιμέντου. Ακόμα και αν η ίαση συμβεί λόγω του μηχανισμού της περαιτέρω ενυδάτωσης του τσιμέντου που δεν είχε αντιδράσει και έτσι το προϊόν που θα σχηματιστεί εντός της ρωγμής είναι CSH, η αντοχή του δεσμού που θα δημιουργηθεί μεταξύ της επιφάνειας της ρωγμής και του νέου CSH είναι μικρότερη σε σχέση με την αντοχή της μήτρας.

Ως προς την παραμορφωσιμότητα (deflection capacity), γενικά παρατηρείται ότι ευνοϊκότερη είναι η συνθήκη EC3, καθώς παρουσιάζει τη καλύτερη ανάκτηση μηχανικών ιδιοτήτων. Κατα τη φάση ξήρανσης του κύκλου το πλεονάζων νερό εξατμίζεται και έτσι η συγκέντρωση ιόντων που βρίσκονται στο νερό στη ρωγμή αυξάνονται.

Στη περίπτωση που είχαμε συνεχώς παρουσία νερού (EC1 και EC2) είχαμε μικρότερη ανάκτηση των μηχανικών ιδιοτήτων συγκριτικά με τη συνθήκη EC3. Αυτό ίσως να οφείλεται στην υπερβολική υγρασία που υπάρχει στο εσωτερικό και στη δράση του υπερβολικού νερού μέσα στο ρηγματωμένο δοκίμιο. Τα πλεονάζοντα μόρια νερού μειώνουν την επιφανειακή ενέργεια των ενυδατωμένων προϊόντων και τους δεσμούς van der Waals μεταξύ των προϊόντων ενυδάτωσης. Τέλος, η ανάκτηση της παραμορφωσιμότητας για τα δοκίμια που συντηρήθηκαν σε αέρα (EC4), ήταν η ελάχιστη για όλες τις συνθέσεις, γεγονός αναμενόμενο λόγω της απουσίας νερού.

Στο **Σχήμα 3.17** φαίνονται ενδεικτικά οι εικόνες που έχουν ληφθεί από το στερεοσκόπιο για τη σύνθεση M1, για τις διάφορες συνθήκες έκθεσης.

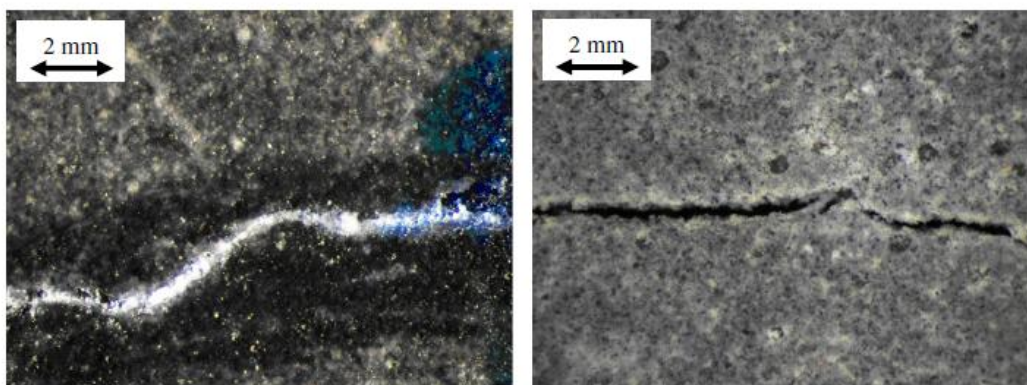


Σχήμα 3.17: Επιφανειακό κλείσιμο των ρωγμών των δοκιμίων της σύνθεσης M1 σε όλες τις συνθήκες έκθεσης.

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται για όλες τις συνθέσεις, καθώς αποτελεσματικότερο επιφανειακό σφράγισμα της ρωγμής παρατηρείται για τη συνθήκη έκθεσης EC3. Το επιφανειακό κλείσιμο της ρωγμής οφείλεται στη κατακρήμνιση ανθρακικού ασβεστίου στην επιφάνεια των δοκιμίων.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα πειράματα [8] το ανθρακικό ασβέστιο φάνηκε να είναι το κύριο συστατικό επούλωσης σε ρηγματωμένα κονιάματα. Προκειμένου λοιπόν να εξεταστεί η *επιρροή των ιόντων άνθρακα* στο νερό έκθεσης διεκπεραιώθηκε άλλη μια σειρά από πειράματα, στην οποία χρησιμοποιήθηκε μόνο η σύνθεση που έδειξε τη καλύτερη απόδοση στη πρώτη σειρά πειραμάτων (σύνθεση M4). Μετά από 28 μέρες συντήρησης τα δείγματα παραμορφώθηκαν κατά 1.6 mm και έτσι ρηγματώθηκαν. Τα ρηγματωμένα δοκίμια στη συνέχεια βυθίστηκαν σε 2 διαφορετικούς τύπους νερού: σε νερό βρύσης και σε βρασμένο νερό βρύσης για 28 μέρες. Ουσιαστικά το βρασμένο νερό ήταν νερό βρύσης το οποίο ζεστάθηκε μέχρι να βράσει για περίπου 15 λεπτά ώστε να απομακρυνθούν τα ιόντα άνθρακα. Έπειτα αφέθηκε να κρυώσει μέχρι να φτάσει σε θερμοκρασία δωματίου. Η σκληρότητα του νερού βρύσης βρέθηκε να είναι μέτρια, καθώς κυμαινόταν σε εύρος 120–240 ppm CaCO_3 , ενώ για το βρασμένο νερό η σκληρότητα ήταν αμελητέα. Τα *ανθρακικά ιόντα* ευνοούν το *επιφανειακό κλείσιμο* της ρωγμής. Η αναγνώριση των προϊόντων ίασης έγινε με τη χρήση στεροσκοπίου και ESEM εξοπλισμένο με EDS.

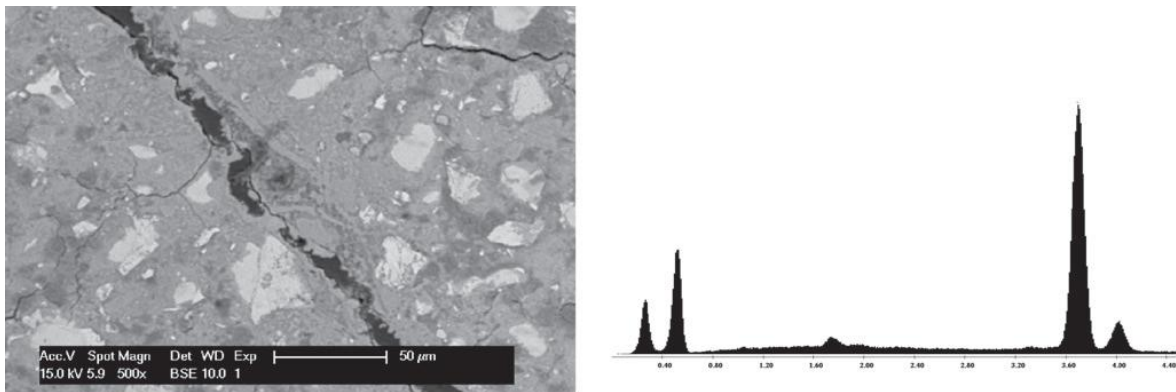
Άφθονο ανθρακικό ασβέστιο βρέθηκε στο χείλος της ρωγμής σε σύνηθες νερό βρύσης (συνθήκη CC1), ενώ στο βρασμένο νερό (συνθήκη CC2) δεν παρατηρήθηκε παρουσία ανθρακικού ασβεστίου αφού τα ανθρακικά ιόντα είχαν αφαιρεθεί με το βρασμό (**Σχήμα 3.18**).



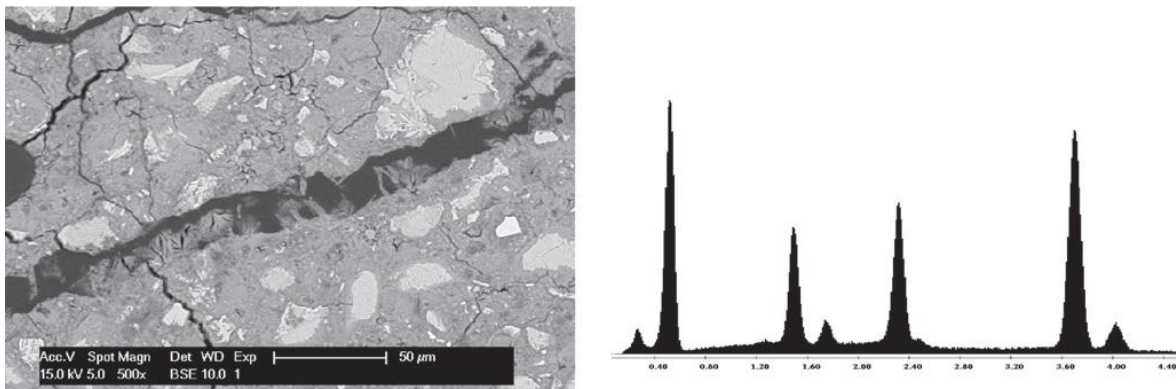
Σχήμα 3.18: Επιφανειακό κλείσιμο ρωγμών δοκιμίου σύνθεσης M4, σε νερό βρύσης (αριστερά) και σε βρασμένο νερό βρύσης (δεξιά).

Σε προηγούμενα πειράματα έχει βρεθεί ότι η διαπερατότητα σε νερό μειώθηκε στη περίπτωση που είχαμε σχηματισμό *ανθρακικού ασβεστίου*. Παρότι η σχηματισμός αυτός είναι επιθυμητός από άποψη διαπερατότητας, δείχνει να έχει δυσμενή επίδραση ως προς τις μηχανικές ιδιότητες. Έτσι η ανάκτηση των *μηχανικών ιδιοτήτων* σε απλό νερό βρύσης (που έχει ανθρακικά ιόντα) βρέθηκε μικρότερη σε σχέση με αυτή που παρατηρήθηκε όταν είχαμε έκθεση σε βρασμένο νερό. Αυτό συμβαίνει καθώς ο σχηματισμός ανθρακικού ασβεστίου μειώνει τη παραιτέρω ενυδάτωση των συστατικών που δεν έχουν αντιδράσει. Ωστόσο μεταξύ των συνθηκών έκθεσης EC1 και EC2 δεν παρατηρείται σημαντική διαφορά. Στο παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι μικροδομές και η χημική σύσταση των προϊόντων ίασης για τη σύνθεση M4 σε διάφορες συνθήκες έκθεσης. Στο **Σχήμα 3.19**, **Σχήμα 3.20** και **Σχήμα 3.21** φαίνονται τα προϊόντα ίασης στο εσωτερικό της ρωγμής, τα οποία αποτελούνται από CaCO_3 , C-S-H και εντριγκίτη. Στα δείγματα που βυθίστηκαν σε νερό βρύσης (M4-CC1) (**Σχήμα 3.20**), ασταθή προϊόντα ίασης παρατηρούνται, και η

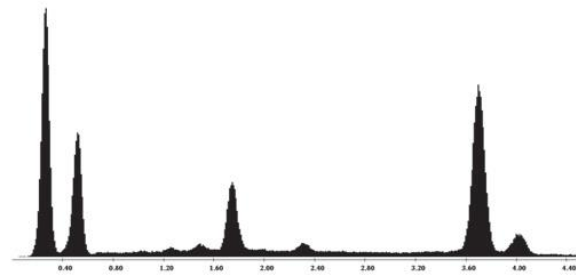
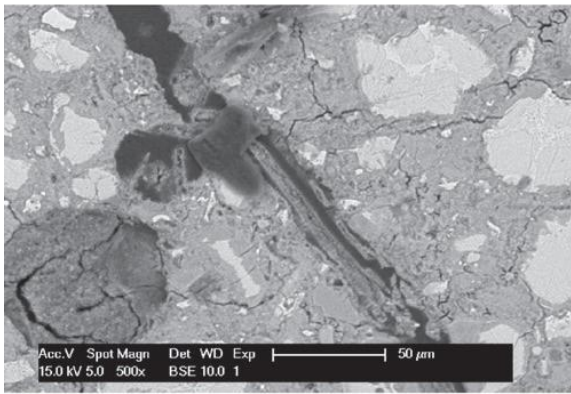
ανάλυση EDS αποκάλυψε υψηλή συγκέντρωση πυριτικών και αργιλικών. Αντίθετα, στα δείγματα που βυθίστηκαν σε βρασμένο νερό (M4-CC2)(**Σχήμα 3.21**), ένα πιο πυκνό προϊόν σχηματίστηκε το οποίο αποτελείται από κυρίως από οξείδιο του πυριτίου, ενώ οι συγκεντρώσεις των S και Al είναι χαμηλές. Μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε ότι στη περίπτωση M4-CC2 είχαμε πιο έντονο σχηματισμό C-S-H σε σύγκριση με τη περίπτωση M4-CC1, όπου είχαμε κυρίως εντρίγκιτη. Με βάση τα παραπάνω εξηγείται το γεγονός του ότι στη περίπτωση M4-CC2 είχαμε καλύτερη ανάκτηση των μηχανικών ιδιοτήτων αφού η δομή του C-S-H είναι πιο πυκνή από αυτή του εντρίγκιτη. Όσο αφορά στα προϊόντα που σχηματίστηκαν στο χείλος τη ρωγμής (crack sealing) υπήρχε μόνο ανθρακικό ασβέστιο. (**Σχήμα 3.22**).



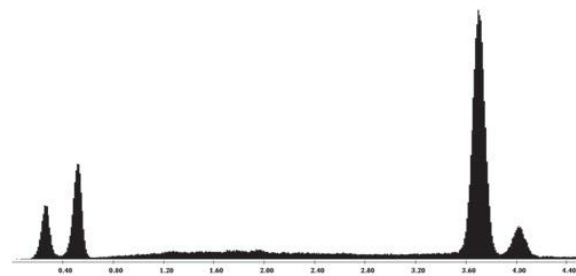
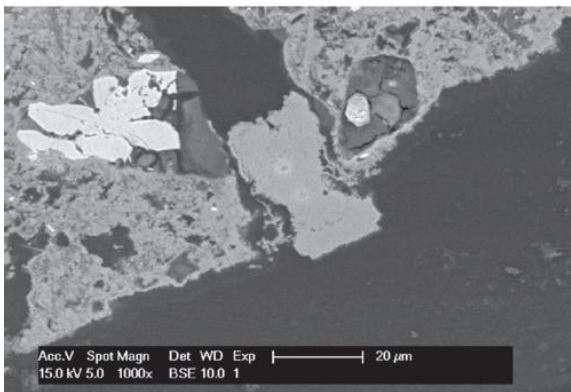
Σχήμα 3.19: Σύνθεση M4- συνθήκη EC3 (εσωτερικό).



Σχήμα 3.20: Σύνθεση M4- συνθήκη CC1 (εσωτερικό).



Σχήμα 3.21: Σύνθεση M4- συνθήκη CC2 (εσωτερικό).



Σχήμα 3.22: Σύνθεση M4- συνθήκη CC1 (επιφάνεια).

Συνοψίζοντας από τα πειράματα αυτά προέκυψαν ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα: Οι συνθήκες έκθεσης παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της αυτό-ίασης. Γενικά η συνθήκη ύγρυνας-ξηράνσης παρουσίασε τη βέλτιστη ανάκτηση μηχανικών ιδιοτήτων (EC3). Η κατάταξη με βάση την ανάκτηση των μηχανικών ιδιοτήτων είναι: $EC4 < EC1 < EC2 < EC3$.

Η σύνθεση που παρουσίασε καλύτερη ανάκτηση μηχανικών ιδιοτήτων ήταν η M4 (10% CSA, 1.5% CA). Η κατάταξη με βάση την ανάκτηση των μηχανικών ιδιοτήτων είναι: $M1(\text{αναφοράς}) < M3(\text{CA}) < M2(\text{CSA}) < M4(\text{CA} + \text{CSA})$.

Ο σχηματισμός ανθρακικού ασβεστίου είναι ευνοϊκός από άποψη διαπερατότητας, ωστόσο μειώνει τη περαιτέρω ενυδάτωση των σωματιδίων που δεν έχουν αντιδράσει, και έτσι η ανάκτηση των μηχανικών ιδιοτήτων δυσχεραίνεται.

Στο εσωτερικό της ρωγμής το υλικό πλήρωσης ήταν ένα μείγμα CaCO_3 , C-S-H και εντριγκίτη. Η αναλογία των συστατικών αυτών επηρεάζεται από της συνθήκη έκθεσης και από το είδος των τσιμεντοειδών υλικών (σύνθεση). Όσο αφορά στο επιφανειακό σφράγισμα της ρωγμής το προϊόν που σχηματίζεται είναι καθαρό ανθρακικό ασβέστιο.

Ωστόσο η χρήση των κρυσταλλικών προσθέτων μελετήθηκε και από άλλους ερευνητές στα επόμενα χρόνια. Ξεχωρίζει η έρευνα των M. Roig-Flores et. al.[39], οι οποίοι μελέτησαν την ικανότητα αυτό-ίασης του σκυροδέματος με κρυσταλλικά πρόσθετα, σε 4 διαφορετικές συνθήκες έκθεσης. Η αυτογενής ίαση του σκυροδέματος είναι ένα αβάσιμο φαινόμενο, και είναι αβεβάιο αν θα μπορέσει να προσδώσει την επιθυμητή ίαση. Γι' αυτό το λόγο οι ερευνητές στράφηκαν σε νέα “engineered healing concepts”, όπως η

μικροενθυλάκωση θεραπευτικών παραγόντων, σκυροδέματα με βακτήρια, και χρήση κρυσταλλικών προσθέτων. Τα κρυσταλλικά πρόσθετα (CA) είναι υλικά που μειώνουν τη διαπερατότητα (permeability reducer admixtures PRAs). Συγκεκριμένα είναι υδρόφιλα και έτσι αντιδρούν εύκολα με το νερό, με αποτέλεσμα να κατακάθονται αδιάλυτες ουσίες που εμποδίζουν την είσοδο του νερού στους πόρους και τις ρωγμές και αυξάνουν τη πυκνότητα του (CSH) και την αντίσταση έναντι διαπερατότητας σε νερό. Στη περίπτωση αυτή το (C₃S) αντιδρά και απαιτείται η παρουσία νερού. Τα προϊόντα αυτά σχηματίζονται από ενεργά χημικά που περιέχονται στο τσιμέντο και την άμμο τα οποία σχηματίζουν τροποποιημένο CSH, ανάλογα με τον κρυσταλλικό προωθητή, και ένα ποσοστό σχηματίζεται από ασβέστιο και μόρια νερού. Οι κρυσταλλικές κατακρημνίσεις γίνονται μέρος της μάζας τους σκυροδέματος, και σε αντιθεση με τα υδρόφιλα υλικά είναι ικανά να αντέξουν πίεση 14 bars.

Οι μεταβλητές που μελετήθηκαν στο πείραμα αυτό ήταν :η δοσολογία του κρυσταλλικού προσθέτου (0% για τα δείγματα ελέγχου, 4% κατά βάρος για τα υπόλοιπα δείγματα), οι συνθήκες έκθεσης (βύθιση σε νερό-water immersion:WI, επαφή με νερό-water contact :WC, έκθεση σε υγρασία-humidity chamber HC και έκθεση σε αέρα-air exposure at laboratory conditions: AE). Κάθε συνθήκη έκθεσης σχεδιάστηκε ώστε να προσομοιάζει πρακτικές συνθήκες. Η WI προσομοιάζει υποθαλάσσιες κατασκευές, η WC προσομοιάζει κατασκευές που βρίσκονται σε άμεση επαφή με νερό χαμηλής πίεσης, η HC προσομοιάζει κατασκευές χωρίς άμεση επαφή με νερό σε περιβάλλον με υψηλό ποσοστό υγρασίας, και η AE στοιχεία σκυροδέματος χωρίς άμεση επαφή με νερό και με μέσα επίπεδα υγρασίας. Μέσω αυτών των συνθηκών μπορεί να προσδιοριστεί αν η αυτό-ίαση είναι δυνατή σε κατασκευές σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες. Χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM II/A-L 42.5 R, ίνες χάλυβα (40 kg/m³), ρευστοποιητής ViscoCrete 5720. Για τα δείγματα προσδιορίστηκε η αντοχή σε θλιψη η οποία ήταν 15% μεγαλύτερη στα δείγματα με το κρυσταλλικό πρόσθετο, καθώς και τεστ κάθισης όπου για το σκυροδέμα αναφοράς είχαμε κάθιση 13 cm, ενώ για τη σύνθεση με το κρυσταλλικό πρόσθετο CA ήταν 15 cm. Τα δοκίμια ρηγματώθηκαν μέσω τη δοκιμής σε διάρκεια στην ηλικία των 2 ημερών, πετυχαίνοντας ένα εύρος ρωγμών 0–0.3 mm, προκειμένου να μελετηθεί η αυτό-ίαση τους.

Ως προς τις δοκιμές και τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό και τη ποσοτικοποίηση της ίασης μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

- (1) Ο βαθμός αυτό-ίασης που υπολογίστηκε μέσω των αποτελεσμάτων της υδατοαπορροφητικότητας είναι ένας καλός δείκτης για την ανάκτηση της ανθεκτικότητας.
- (2) Από τις παραμέτρους της γεωμετρίας της ρωγμής που αξιολογήθηκαν μέσω αναλύσεων εικόνων η ποσοτικοποίηση της ρηγματωμένης περιχής με μαύρα πίξελ δώσανε τα αποτελέσματα με τη μεγαλύτερη διασπορά.

Ως προς την επίδραση της σύνθεσης και των συνθηκών έκθεσης συμπεραίνεται ότι:

- (4) Τα δοκίμια με τα κρυσταλλικά πρόσθετα δείξαν πιο σταθερή και αξιόπιστη συμπεριφορά στα αποτελέσματα της ίασης, παρουσιάζοντας τη χαμηλότερη διασπορά.
- (5) Τα δοκίμια με τα κρυσταλλικά πρόσθετα που συντηρήθηκαν στο νερό είχαν τα υψηλότερα ποσοστά αυτό-ίασης της τάξεως του 0.95 ακόμα και για περιπτώσεις με μεγάλα αρχικά εύρη ρωγμών (της τάξεως των 0.25 mm), ενώ σε αρκετά εξ' αυτών παρατηρήθηκε πλήρης ίαση.
- (6) Η παρουσία του νερού είναι κρίσιμη για την αυτό-ίαση τόσο του σκυροδέματος αναφοράς, όσο και του σκυροδέματος με τα κρυσταλλικά πρόσθετα.
- (7) Οι τέσσερις συνθήκες έκθεσης κατατάσσονται ως εξής κατά φθίνοντα βαθμό ίασης με βάση τη διαπερατότητα: βύθιση σε νερό (0.90) > επαφή με νερό (0.80) > θάλαμος υγρασίας (0.15) > αέρας (κάτω από 0.15).

4 Πειραματικό Μέρος

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι συνθέσεις των δοκιμίων που σκυροδετήθηκαν και θα αναλυθούν όλες οι πειραματικές διαδικασίες στις οποίες υποβλήθηκαν τα δοκίμια αυτά προκειμένου να μελετηθεί η ικανότητα αυτό-ίασης τους.

4.2 Μελετηθέντα δοκίμια

4.2.1 Πρώτες ύλες

Για τη Παρασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν οι εξής πρώτες ύλες: τσιμέντο τύπου CEM I 52.5 N, δύο τσιμεντοειδή εμπορικά πρόσμικτα («DENKA CSA#20» και «Penetron® Admix»), αδρανή (ασβεστολιθική άμμος, γαρμπίλι, χαλίκι), δυο καρβοξυλικά οξέα, πυριτική παιπάλη, ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3), θειικό ασβέστιο (CaSO_4), νερό, υπερευστοποιητής Sika Viscocrete και ίνες PP.

4.2.2 Συνθέσεις

Με χρήση κατάλληλων ποσοτήτων και αναλογιών των πρώτων υλών που περιγράφηκαν παραπάνω σκυροδετήθηκαν δοκίμια για πέντε διαφορετικές συνθέσεις. Για καθεμιά από τις συνθέσεις αυτές παρουσιάζεται η σύσταση του συνδετικού υλικού (**Πίνακας 4.1**) καθώς και η σύσταση του σκυροδέματος (**Πίνακας 4.2**). Επίσης παρουσιάζονται οι ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος (κάθιση, μοναδιαίο βάρος, περιεχόμενος αέρας), καθώς και του σκληρυμένου σκυροδέματος (αντοχή σε θλίψη 28 ημερών) (**Πίνακας 4.3**). Τέλος στο **Σχήμα 4.1** απεικονίζεται η διάταξη με την οποία έγινε η μέτρηση του περιεχόμενου αέρα στο νωπό σκυροδέμα, ενώ στο **Σχήμα 4.2** απεικονίζεται η διάταξη μέσω της οποίας μετρήθηκε η αντοχή κυβικών δοκιμίων του σκληρυμένου πλέον σκυροδέματος στις 28 ημέρες.

Πίνακας 4.1: Σύσταση συνδετικού υλικού (% wt.)

Σύνθεση	Περιγραφή	OPC 52.5N	Τσιμεντοειδή		Καρβοξυλικά οξέα		Πυριτική Παιπάλη	SC
			CA	CSA	DA-1	DA-2		
M1	Control	100.00	-	-	-	-	-	-
M2	CA/CSA	88.50	1.50	10.00	-	-	-	-
M5	CSA	90.00	-	10.00	-	-	-	-
M6	CSA/20A	88.80	-	10.00	0.26	0.08	-	0.86
M7	CSA/20A/SF	88.55	-	10.00	0.10	0.03	1.00	0.32

Πίνακας 4.2: Σύσταση σκυροδέματος (kg/m³)

Σύνθεση	Συνδετικά Υλικά	Αδρανή			Νερό ^a	Υπερευστοποιητής ^b	Ίνες
		0-4 mm	4-8 mm	8-16 mm			
M1	350	950	570	380	184	2.50	2.00
M2	350	950	570	380	184	3.21	2.00
M5	350	950	570	380	184	2.71	2.00
M6	350	950	570	380	184	3.54	2.00
M7	350	950	570	380	184	4.49	2.00

^aΣυνολικό περιεχόμενο νερό: 184 kg/m³, νερό που έχει απορροφηθεί από τα αδρανή: 27 kg/m³, ενεργό νερό: 157 kg/m³ (W/B = 0.45 σύμφωνα με το EN 206-1)

^bΥπερευστοποιητής: Sika Viscocrete

Πίνακας 4.3: Ιδιότητες σκυροδέματος

Σύνθεση	Κάθιση (mm)	Μοναδιαίο Βάρος (kg/m ³)	Περιεχόμενος αέρας (%)	Θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)
M1	800	2350.0	3.1	58.6
M2	800	2366.0	2.6	62.9
M5	850	2330.0	3.2	59.6
M6	500	2371.0	2.0	58.4
M7	800	2351.0	3.0	63.5



Σχήμα 4.1: Διάταξη μέτρησης περιεχόμενου αέρα στο νωπό σκυρόδεμα.



Σχήμα 4.2: Διάταξη μέτρησης της θλίπτικής αντοχής κυβικών δοκιμίων στις 28 ημέρες.

4.3 Στερεοσκοπική επιθεώρηση δοκιμίων

Προκειμένου να διασαφηνιστεί το φαινόμενο της αυτο-ίασης, τα δοκίμια εξετάστηκαν μέσω στερεοσκοπίου (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Στερεοσκόπιο Leica MZ 8.

Κατά το πρώτο στάδιο, τα δοκίμια επιθεωρούνται με τη χρήση στερεοσκοπίου (Leica MZ 8) σε μεγέθυνση x50, το οποίο ήταν συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή και έφερε πρόγραμμα ανάλυσης εικόνας (**Σχήμα 4.3**). Τα δοκίμια της εκάστοτε σύνθεσης, εξετάστηκαν σε τέσσερις διαφορετικές ηλικίες, τόσο στην άνω όσο και στην κάτω επιφάνεια. Μεταξύ των μετρήσεων της κάθε ηλικίας, πραγματοποιήθηκε σύγκριση για τη διασαφήνιση της προόδου αυτο-ίασης για το ίδιο το μίγμα, αλλά και συγκριτικά στα διάφορα μίγματα, ούτως ώστε να παρατηρηθεί η βέλτιστη σύνθεση. Πέραν της οπτικής επιθεώρησης πραγματοποιήθηκε και στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Βάση αυτής, εισάγονται οι έννοιες του βαθμού ίασης (Grade of Healing - GH), του ποσοστού μείωσης της επιφάνειας της ρωγμής (Area Reduction - AR) και του βήματος μείωσης του εύρους της επιφάνειας της ρωγμής (Relative Area Reduction - RAR). Για τον υπολογισμό του βαθμού ίασης, λαμβάνονται υπόψη μόνο οι περιοχές στις οποίες η μέτρηση έδειξε ολική έκλειψη του εύρους της ρωγμής (δηλαδή πλήρης ίαση), ενώ τα σημεία στα οποία δεν παρατηρήθηκε μηδενικό άνοιγμα αγνοήθηκαν (εξίσωση (4.1)). Για το ποσοστό μείωσης της επιφάνειας της ρωγμής έγινε χρήση του αριθμητικού μέσου όρου της ποσοστιαίας μεταβολής του ανοίγματος, σε διάφορα σημεία της ρωγμής (εξίσωση (4.2)). Τέλος, το βήμα μείωσης του εύρους της επιφάνειας της ρωγμής, ορίζεται για *διαδοχικές* ηλικίες και υπολογίζεται όπως και το AR.

$$GH = \frac{HP}{n} \times 100 \quad (4.1)$$

$$AR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{ICW - FCW}{ICW} \times 100 \right) \quad (4.2)$$

Όπου:

GH (Grade of Healing): βαθμός ίασης

HP (Healing Points): σημεία πλήρους ίασης

n: συνολικός αριθμός σημείων μέτρησης

AR (Area Reduction): μείωση επιφάνειας ρωγμής

ICW (Initial Crack Width): αρχικό εύρος ρωγμής

FCW (Final Crack Width): τελικό εύρος ρωγμής.

4.4 Υδατοαπορροφητικότητα και Ανοιχτό Πορώδες.

Το σκυρόδεμα είναι ένα δομικό υλικό το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως, τόσο στην Ελλάδα, όσο και στο εξωτερικό. Πέραν της αντοχής που είναι μια βασική απαίτηση για ένα δομικό υλικό, απαιτείται και η ανθεκτικότητα του στη διάρκεια του χρόνου (durability) και στις συνθήκες του περιβάλλοντος (high performance concrete) στο οποίο βρίσκεται. Συγκεκριμένα η διαπερατότητα του σκυροδέματος σε νερό, και σε αερα, η υδατοαπορροφητικότητα και το πορώδες του σκυροδέματος παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ανθεκτικότητα του. Όσον αφορά την ευκολία διέλευσης ρευστών μέσω του τσιμέντου, πρέπει να διασαφηνιστούν τρεις μηχανισμοί. Η *διαπερατότητα (permeability)* αναφέρεται σε ροή λόγω διαφορά πίεσης. Η *διάχυση (diffusion)* αναφέρεται σε διαδικασία στην οποία ρευστό κινείται λόγω διαφοράς συγκέντρωσης. Τέλος, η *απορροφητικότητα (sorption)* είναι το αποτέλεσμα τριχοειδούς αναρρίχησης ρευστού στους πόρους τσιμέντου οι οποίοι είναι ανοιχτοί στο περιβάλλον του μέσου. Εάν οι πόροι είναι ασυνεχείς ή με άλλα λόγια αναποτελεσματικοί όσον αφορά τη μεταφορά, η διαπερατότητα του τσιμέντου είναι χαμηλή ακόμα και αν το πορώδες του είναι υψηλό.

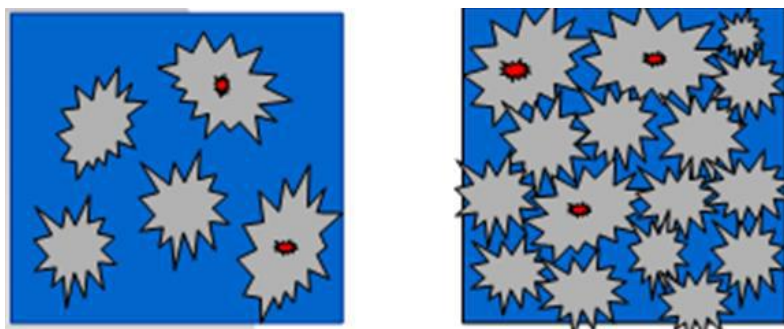
Η περατότητα του σκυροδέματος σε αέρα μας ενδιαφέρει καθώς ο αέρας περιέχει CO₂ το οποίο προκαλεί την ενανθράκωση του σκυροδέματος που έχει σαν αποτέλεσμα την ανεπιθύμητη αύξηση του όγκου του που μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ρωγμών. Ακόμα μας ενδιαφέρει η περατότητα του σκυροδέματος σε νερό, καθώς σε αυτό περιέχονται θειικά τα οποία προσβάλλουν το ίδιο το σκυρόδεμα και προκαλούν τη παραγωγή ένυδρων ασβεστοαργιλικών ενώσεων που είναι πιο ογκώδεις και χλωριόντα, τα οποία προσβάλλουν τον οπλισμό του. Πέραν των ανωτέρω αρνητική επίδραση έχει η θερμότητα ενυδάτωσης. Για το λόγο αυτό σε κάποιες περιπτώσεις τοποθετούνται σωλήνες ψύξης. Επομένως γίνεται φανερό πως το νερό έχει έντονη επίδραση στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος μιας και αποτελεί φορέα ιόντων στη μάζα του.

Δυο σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν την υδατοαπορροφητικότητα του σκυροδέματος είναι:

- Η σύνθεση του σκυροδέματος (λόγος νερού-τσιμέντου, περιεκτικότητα σε τσιμέντο)
- Τύπος/ποιότητα τσιμέντου.

Όσο αφορά στη πρώτη παράμετρο όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα σε τσιμέντο τόσο μικρότερη είναι η υδατοαπορροφητικότητα του σκυροδέματος. Αυτό συμβαίνει διότι όσο περισσότερο είναι το νερό σε σχέση με το τσιμέντο (μεγάλος N/Σ), οι βελόνες των προϊόντων ενυδάτωσης «μπλέκονται» λίγο μεταξύ τους, τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ των προϊόντων ενυδάτωσης (πορώδες) των διπλανών κόκκων είναι σχετικά μεγάλα (Σχήμα 4.4), με αποτέλεσμα:

- α) Η ικανότητα απορρόφησης νερού στη μάζα του σκυροδέματος να είναι μεγάλη.
- β) Η τάση που απαιτείται για να σπάσει αυτός ο «δεσμός», να είναι σχετικά μικρή, οπότε και η αντοχή είναι μικρή[40].



Σχήμα 4.4: Προϊόντα ενυδάτωσης τσιμέντου α. για υψηλό λόγο νερού προς τσιμέντο, β. για μικρό λόγο νερού προς τσιμέντο(Πηγή:[40]).

Ως προς τη δεύτερη παράμετρο που επηρεάζει την υδατοαπορροφητικότητα έχουν γίνει πειραματικές μετρήσεις, οι οποίες έχουν δείξει ότι η σύσταση του συνδετικού υλικού παίζει καθοριστικό ρόλο[40]. Έτσι λοιπόν μια προσέγγιση που έχει εφαρμοστεί είναι η εξ αρχής προσθήκη κατάλληλων υλικών είτε στο τσιμέντο (επιλογή κατάλληλου τύπου τσιμέντου, όπως χρήση τσιμέντου που περιέχει λιγότερα C_3A σε περιοχές που έχουν πολλά θειϊκά, καθώς τα C_3A όταν ενυδατώνονται παράγουν C-A-H που αντιδρούν με τα θειϊκά και δημιουργούν ογκώδεις ενώσεις), είτε μετέπειτα στο σκυρόδεμα που παράγεται στο εργοτάξιο ελέγχοντας τη λεπτότητα και τη ποσότητα των υλικών. Υπάρχουν διάφορα υλικά που χρησιμοποιούνται γι' αυτό το σκοπό. Μερικά εξ' αυτών είναι:

- Φυσική ποζολάνη: περιέχεται σε τσιμέντα CEM II, ποζολανικά τσιμέντα CEM III (Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν θηραϊκή γη, πλέον χρησιμοποιείται μηλαϊκή γη).
- Ιπτάμενη τέφρα: παραπροϊόν μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Σκωρία υψικαμίνου: παραπροϊόν μονάδων παραγωγής χάλυβα.
- Πυριτική παιπάλη: παραπροϊόν ανθρακοπυρίτη.
- Μετακαολίνης: έχει μεγαλύτερη δραστηριότητα από τη πυριτική παιπάλη.

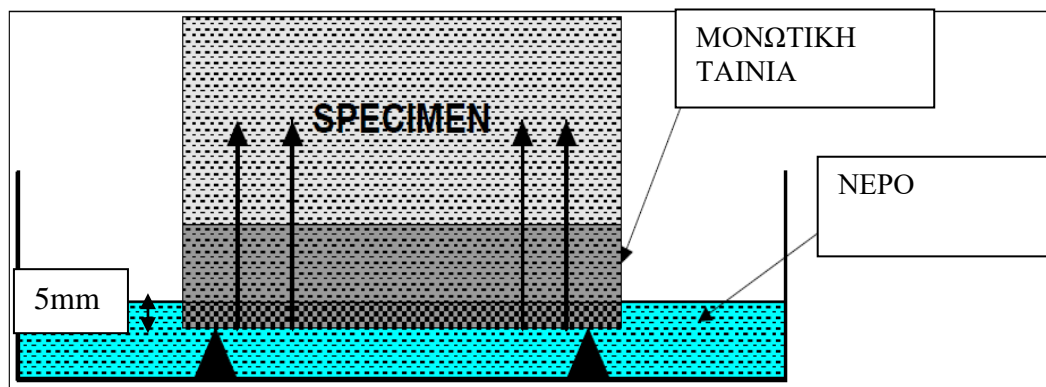
Τα παραπάνω υλικά έχουν τριπλό ρόλο: μειώνουν τη θερμότητα ενυδάτωσης και έτσι προσδίδουν ανθεκτικότητα, δεσμεύουν το υδροξείδιο του ασβεστίου και έτσι μειώνουν την ενανθράκωση, κλείνουν το πορώδες καθώς είναι λεπτόκοκκα. Μεσα από σειρά πειραματικών μετρήσεων βρέθηκε ότι αντικατάσταση μέρος του τσιμέντου με ασβεστόλιθο είχε θετική επίδραση στη διαπερατότητα (permeability) και την τριχοειδή απορρόφηση (sorptivity) καθώς έχει αυξημένη λεπτότητα [41]. Από την άλλη μεριά τα τσιμέντα που έχουν ποζολάνη φαίνεται να έχουν ακόμα καλύτερη συμπεριφορά καθώς η ποζολάνη εμποδίζει και με χημικό τρόπο την απορρόφηση νερού μέσω της ποζολανικής αντίδρασης.

Στη περίπτωση μας όλες οι συνθέσεις είχαν τον ίδιο λόγο νερού προς τσιμέντου, επομένως η υδατοαπορροφητικότητα και το πορώδες επηρεάζονται μόνο από τη χημική σύσταση του σκυροδέματος (πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν). Για καθεμία από τις δοκιμές της υδατοαπορροφητικότητας και του πορώδους χρησιμοποιήθηκαν πέντε δείγματα ελέγχου και πέντε ιασμένα δείγματα (ένα για κάθε σύνθεση). Όλα τα δείγματα είναι τμήματα δοκιμίων που χυτεύτηκαν σε κυλινδρικές μήτρες διαστάσεων $d=100\text{mm}$, $h=200\text{mm}$ και συντηρήθηκαν για 28 ημέρες στο νερό. Έπειτα ακολούθησε η κοπή κατάλληλων δοκιμίων ($h=100\text{mm}$). Από τα δοκίμια αυτά τα μισά υποβλήθηκαν σε δοκιμή διάρρηξης ώστε να ρηγματωθούν και έπειτα τοποθετήθηκαν σε νερό όπου πραγματοποιήθηκε η ίαση τους. Ακολούθησε προετοιμασία των δοκιμίων. Συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν σε πυριαντήριο στους 70°C (γιατί περιέχουν οργανικά τα οποία θα είχαν υποστεί θερμική αποικοδόμηση

σε υψηλότερες θερμοκρασίες) για κατάλληλο χρονικό διάστημα ώστε να επιτευχθεί η ξήρανση τους. Έχοντας εξασφαλίσει τη ξήρανση των δοκιμίων πραγματοποιούμε τη δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας και του πορώδους.

Δοκιμή Υδατοαπορροφητικότητας

Η κάτω πλευρική επιφάνεια του δοκιμίου καλύπτεται με μια ταινία αδιαπέρατη στο νερό και το δοκίμιο ζυγίζεται (βάρος ξηρού δοκιμίου με μονωτική ταινία). Έπειτα το δοκίμιο τοποθετείται σε ειδικά στηρίγματα έτσι ώστε να είναι βυθισμένο στο νερό σε βάθος περίπου 5mm (Σχήμα 4.5, Σχήμα 4.6). Καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής φροντίζουμε να προσθέτουμε νερό ώστε να διατηρείται σταθερή η στάθμη αυτή. Μετράται η μάζα του νερού που απορροφάται μετά από 10, 20, 30, 45, 60, 90 και 120 min από την έναρξη της δοκιμής.



Σχήμα 4.5: Σκαρίφημα διάταξης μέτρησης υδατοαπορροφητικότητας.



Σχήμα 4.6: Τοποθέτηση δοκιμίων πάνω σε μεταλλικά στηρίγματα μέσα σε δοχείο με νερό για την μέτρηση της υδατοαπορροφητικότητας.

Κατά τη δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας ουσιαστικά προσδιορίζουμε το ρυθμό απορρόφησης νερού μέσω των τριχοειδών πόρων του σκυροδέματος[42]. Συγκεκριμένα:

- Προσδιορίζουμε τη συνολική άυξηση μάζας του δοκιμίου ανά μονάδα προσρόφησης $i(g/mm^2)$ (ζυγίζουμε το δοκίμια ανα χρονικό διάστημα Δt και

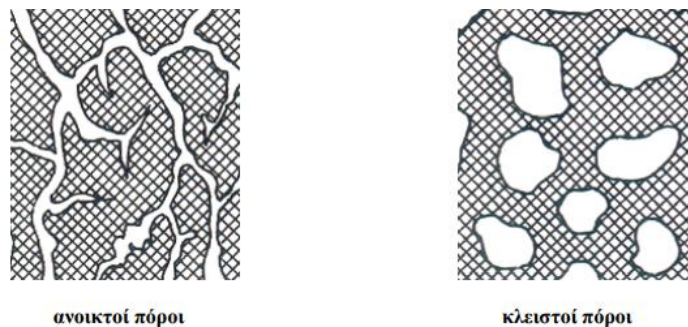
γνωρίζουμε την επιφάνεια από όπου γίνεται η προσρρόφηση αφού περιορίζεται στο πάτο του δοκιμίου.)

- Πραγματοποιούμε ζυγίσεις ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και σημειώνουμε το χρόνο $t(\text{min})$ που έχει περάσει από την αρχή του πειράματος μέχρι τη στιγμή της μέτρησης.
- Κατασκευάζουμε διάγραμμα $i-t^{0.5}$. Με τη χρήση ανάλυσης παλινδρόμησης υπολογίζουμε την υδατοαπορροφητικότητα $S(\text{mm}/\text{min}^{0.5})$, καθώς είναι η κλίση του διαγράμματος όπως υποδηλώνεται και από τη σχέση:

$$i = S * t^{0.5} \quad (4.3)$$

Ανοιχτό Πορώδες

Το πορώδες χαρακτηρίζεται από μία σειρά μεγεθών όπως το κλάσμα όγκου του υλικού που καταλαμβάνεται από πόρους, το μέγεθος, το σχήμα και η κατανομή μεγέθους των πόρων. Το πορώδες διακρίνεται σε ανοικτό ή φαινόμενο πορώδες και συνολικό πορώδες. Το ανοικτό πορώδες περιλαμβάνει τους πόρους οι οποίοι συνδέονται με την επιφάνεια του υλικού, ενώ το συνολικό πορώδες περιλαμβάνει επιπλέον και τους κλειστούς πόρους που είναι στο εσωτερικό του υλικού. Η διαπερατότητα του σκυροδέματος εξαρτάται από το συνολικό πορώδες, το είδος των πόρων (ανοιχτοί ή κλειστοί, **Σχήμα 4.7**), και το μέγεθος των πόρων που διαθέτει η ενυδατωμένη πάστα, καθώς τα αδρανή δεν συνεισφέρουν στην διαπερατότητα του σκυροδέματος αφού αυτά διαθέτουν μόνο κλειστούς πόρους [43]. Το ανοικτό πορώδες των υλικών προσδιορίζεται με διάφορες τεχνικές οι οποίες βασίζονται στην πλήρωση των πόρων με υγρά όπως νερό, υδράργυρος κ.ά. Μία εκτίμηση του ανοικτού πορώδους μπορεί να γίνει μετρώντας την υδατοαπορροφητικότητα του δείγματος, δηλαδή, το βάρος του νερού που απορροφάται στην επιφάνεια του δείγματος.



Σχήμα 4.7: Δομή πόρων.

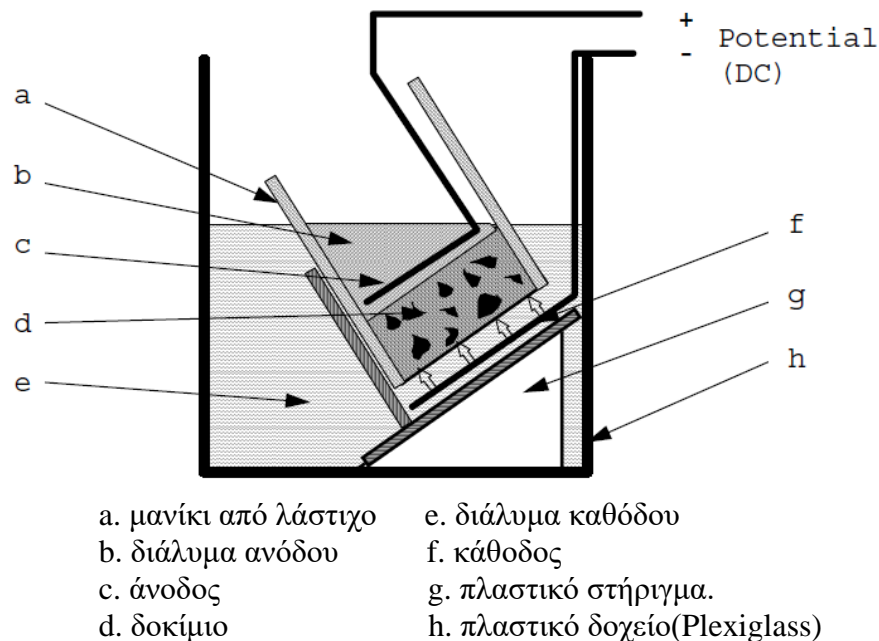
Για τον προσδιορισμό του πορώδους για κάθε δοκίμιο καταγράφεται το βάρος του με ακρίβεια 0.1 g σε τρεις διαφορετικές συνθήκες. Αρχικά ζυγίζεται το δοκίμιο μετά από τη ξήρανση του, σε περιβάλλον αέρα (β). Στη συνέχεια ζυγίζουμε το κορεσμένο δοκίμιο υπό άνωση σε περιβάλλον νερού (γ), ενώ τέλος το ζυγίζουμε και κορεσμένο (επιφανειακά στεγνό) αμέσως μετά την έξοδο του από τη δεξαμενή με το νερό, σε περιβάλλον αέρα (α). Το ανοικτό πορώδες υπολογίζεται από τη σχέση:

$$OP = \frac{\alpha - \gamma}{\alpha - \beta} \quad (4.4)$$

4.5 Εκτίμηση συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων

4.5.1 Διείσδυση χλωριόντων κατά Nordtest Build 492.

Η πειραματική διαδικασία βασίζεται στην εκτίμηση του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων μέσω της εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίου, δηλαδή λόγω διαφοράς δυναμικού (migration: the movement of ions under the action of an external electrical field). Πρόκειται για μια ταχεία μέθοδο εκτίμησης του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων, καθώς η διείσδυση των χλωριόντων στο εσωτερικό του δοκιμίου επιταχύνεται μέσω της διαφοράς δυναμικού λόγω της τάσης του συνεχούς ρεύματος (Chloride Migration Coefficient From Non-Steady-State Migration Experiments). Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε (Σχήμα 4.8) ήταν σύμφωνη με το Πρότυπο Nordtest Build 492[44], και ήταν συνδεδεμένη με την ηλεκτρική διάταξη (Σχήμα 4.9) μέσω των ηλεκτροδίων της ανόδου και της καθόδου.



Σχήμα 4.8: Πειραματική διάταξη διείσδυσης χλωριόντων

σύμφωνα με πρότυπο nordtest build 492.



Σχήμα 4.9: Ηλεκτρική διάταξη.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν παρασκευάστηκαν με χύτευση στο εργαστήριο σε κυλινδρικές μήτρες διαστάσεων 10×20 cm και τοποθετήθηκαν σε νερό ώσμωσης για 28 ημέρες ούτως ώστε να λάβει χώρα η ενυδάτωση. Στη συνέχεια έγινε κοπή των δοκιμίων σε κυλίνδρους πάχους 5 cm, και τα μισά εξ' αυτών ρηγματώθηκαν τεχνητά για τη μελέτη της ίασης. Τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε νερό ώσμωσης για 3 μήνες. Οι κύλινδροι σκυροδέματος τοποθετήθηκαν στο πυριαντήριο σε θερμοκρασία 70⁰C μέχρι σταθερού βάρους. Στη συνέχεια έλαβε χώρα η πειραματική διαδικασία της διείδυσης χλωριόντων. Αρχικά, ετοιμάστηκαν τα διαλύματα της ανόδου (0.3 M NaOH) που περιείχε 4.84 g NaOH σε 365 ml απιονισμένου νερού και το διάλυμα καθόδου (10% κατά βάρος NaCl), που περιείχε 1111.1 g NaCl εμπορίου σε 10 L νερού βρύσης και τοποθετήθηκε στο δοχείο της καθόδου μέσα στη δεξαμενή της διάταξης που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.8**. Το δοκίμιο μας τοποθετήθηκε μέσα στο λαστιχένιο μανίκι και ασφαλίστηκε με δυο σφιγκτήρες προκειμένου να μην υπάρξουν διαρροές του διαλύματος ανόδου και να μην αναμιχθεί με το διάλυμα καθόδου. Έπειτα τοποθετήθηκε πάνω στην ειδική βάση για 24 ώρες μεταξύ των διαλυμάτων της ανόδου και της καθόδου (έπειτα από ρύθμιση της τάσης σύμφωνα με τον **Πίνακα 4.4**). Μετά τη πάροδο των 24 ωρών και αφού καταγράφηκε η τελική θερμοκρασία, η τελική ένταση και η τελική τάση αποσύρουμε το καλώδιο τροφοδοσίας από τη πρίζα, ο διακόπτης του κυκλώματος τίθεται στην ένδειξη OFF και ο δρομέας του μετασχηματιστή τίθεται στο μηδέν.

Πίνακας 4.4: Αντιστοίχιση της αρχικής έντασης ρεύματος με την τελική εφαρμοζόμενη τάση και τη διάρκεια του πειράματος.

Αρχική ένταση I_{30V} (με 30V) (mA)	Επιλεγόμενη τάση V(V)	Πιθανή νέα αρχική ένταση I_0 (mA)	Διάρκεια πειράματος t (h)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

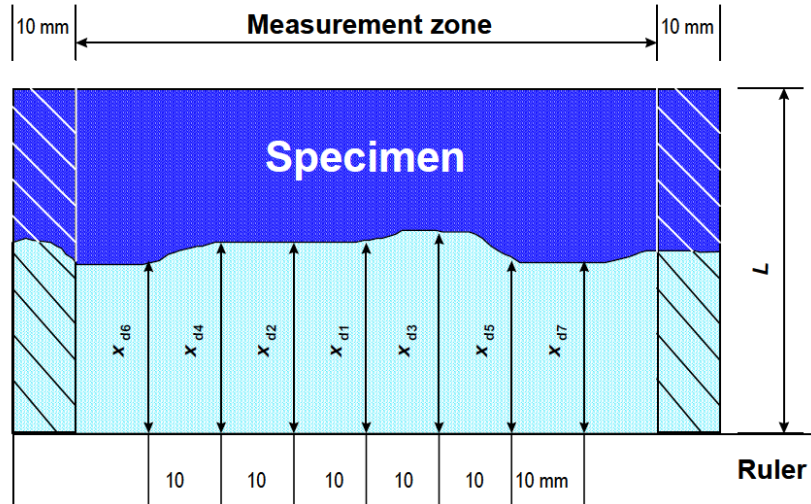
Το δοκίμιο απομακρύνθηκε και χωρίστηκε με διαμετρική θλίψη σε δύο μέρη κάθετα στο επίπεδο της ρωγμής (Σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10: Διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για το χωρισμό των δοκιμίων ελέγχου σε 2 τεμάχια και των ιασμένων δοκιμίων σε 4 τεμάχια.

Κατόπιν ψεκάστηκε με διάλυμα νιτρικού αργύρου 0.1 M (10 ψεκασμοί). Μετά από περίπου 15 λεπτά έγινε οπτικά φανερό το βάθος που τα χλωριόντα είχαν εισχωρήσει καθώς πραγματοποιήθηκε χημική αντίδραση μεταξύ του νιτρικού αργύρου και των ελεύθερων χλωριόντων και η επιφάνεια στην οποία είχαν διεισδύσει χλωριόντα είχε χρωματιστεί. Έτσι, λήφθηκαν μετρήσεις για το βάθος διείσδυσης σε διαφορετικές θέσεις της

επιφάνειας του δοκιμίου όπως αυτές ορίζονται στο **Σχήμα 4.11**. Επιπλέον τα δοκίμια που είχαν ιαθεί υπέστησαν ξανά διαμετρική θλίψη, αυτή τη φορά σε άξονα κάθετο στο επίπεδο της ρωγμής που δημιουργήθηκε προηγουμένως (δηλαδή πάνω στην ιασμένη ρωγμή) και επαναλήφθηκε η διαδικασία του ψεκασμού και της μέτρησης του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων.



Σχήμα 4.11: Αναπαράσταση μετρήσεων βάθους διείσδυσης χλωριόντων.

Ακολουθεί ο υπολογισμός του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων (non steady-migration coefficient) σύμφωνα με την εξίσωση (4.5):

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \times \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (4.5)$$

Όπου:

$$E = \frac{U-2}{L}$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \times \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)$$

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

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

F : σταθερά Faraday, $F=9.684 \cdot 10^4 J/(V \cdot mol)$

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

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

L : πάχος δοκιμίου (mm)

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

t : διάρκεια του πειράματος (h)

c_d : συγκέντρωση χλωριόντων στην οποία το χρώμα αλλάζει, $c_d=0.07N$

c_0 : συγκέντρωση χλωριόντων στο διάλυμα καθόδου, $c_0=2N$

Γνωρίζοντας ότι:

$$\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot 0.07}{2} \right) = 1.28,$$

μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη απλουστευμένη σχέση:

$$D_{nssm} = \frac{0.0239 \times (273+T) \times L}{(U-2) \times t} \left(x_d - 0.0283 \sqrt{\frac{(273+T) \times L \times x_d}{U-2}} \right) \quad (4.6)$$

Έχοντας υπολογίσει το συντελεστή διείσδυσης μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τα δοκίμια μας ως προς την αντίσταση τους σε διείσδυση (penetration) χλωριόντων (**Πίνακας 4.5**).

Πίνακας 4.5: Χαρακτηρισμός του σκυροδέματος αναφορικά με την αντίσταση του στη διείσδυση χλωριόντων, για διάφορες τιμές του συντελεστή διείσδυσης.

Συντελεστής Διείσδυσης D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	Αντίσταση Διείσδυσης Χλωριόντων
>15.0	Χαμηλή (low)
10.0-15.0	Μέτρια (moderate)
5.0-10.0	Υψηλή(high)
2.5-5.0	Πολύ υψηλή(very high)
<2.5	Εξαιρετικά υψηλή(extremely high)

4.5.2 Διάχυση χλωριόντων κατά Nordtest Build 443.

Η πειραματική διαδικασία για το προσδιορισμό του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων βασίζεται στη *διάχυση*, δηλαδή την κίνηση ιόντων λόγω διαφοράς συγκέντρωσης (*diffusion: The movement of molecules or ions under a concentration gradient or, more strictly, chemical potential, from a high concentration zone to a low concentration zone*). Για τη δοκιμή της διάχυσης χλωριόντων χρησιμοποιήθηκαν δέκα δοκίμια, πέντε ιασμένα και πέντε ελέγχου. Τα δοκίμια μονώθηκαν σε όλες τις πλευρές, εκτός από μία, με σκοπό η διάχυση των χλωριόντων να γίνεται από την ελεύθερη επιφάνεια του κάθε δοκιμίου, δεδομένου εμβαδού. Για τη μόνωση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ως στεγανοποιητικό ακρυλικό ελαστομερές Durostick No 39 και το ελαστομερές υλικό στεγανοποίησης Monoflex της Bauer [45]. Μακροσκοπικά διαπιστώθηκε ότι η συνάφεια στεγανοποιητικού υλικού και επιφάνειας δοκιμίου ήταν ικανοποιητική. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε διάλυμα NaCl 10% σύμφωνα με το πρότυπο Nordtest Test Build 443 [46]. Για την παρασκευή των διαλυμάτων χρησιμοποιήθηκε NaCl του εμπορίου. Τα δοκίμια παρέμειναν στο υδατικό περιβάλλον του χλωριούχου νατρίου για 35 μέρες προκειμένου να λάβει χώρα η διάχυση των χλωριόντων στο εσωτερικό των δοκιμίων. (**Σχήμα 4.12**)



Σχήμα 4.12: Τοποθέτηση δοκιμίων μετά τη μόνωση τους σε υδατικό διάλυμα 10% NaCl.

Μετά τη συμπλήρωση 35 ημερών από την τοποθέτηση των δοκιμίων στο διάλυμα NaCl τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από το διαβρωτικό αυτό διάλυμα και αφέθηκαν να στεγνώσουν στο περιβάλλον προκειμένου να προσδιοριστεί η συγκέντρωση των *συνολικών χλωριόντων* που περιέχονταν σε αυτά. Στη συνέχεια, με προσαρμογή των προφίλ των χλωριόντων στο 2^ο νόμο του Fick, υπολογίστηκαν οι συντελεστές διάχυσης όλων των δοκιμίων. Για το σκοπό αυτό τα δοκίμια τρυπήθηκαν σε τέσσερα σημεία, σε 6 διαφορετικά βάθη: 0-5 mm, 5-10 mm, 10-15 mm, 15-20 mm, 20-25 mm και 25-30 mm. Χρησιμοποιήθηκαν 3 διαφορετικά τρυπάνια διαμέτρου 12 mm, 10 mm και 8 mm. Όσο αυξανόταν το βάθος διείσδυσης τόσο μειωνόταν η διάμετρος του τρυπανιού ώστε η συλλογή του δείγματος να γίνεται από το επιθυμητό βάθος και να μην μολύνεται τα δείγματα με υλικό από τα προηγούμενα μικρότερα βάθη. Συγκεκριμένα, με το τρυπάνι των 12 mm συλλέχθηκε δείγμα από τα βάθη 0-5 mm και 5-10 mm. Με το τρυπάνι των 10 mm από τα βάθη των 10-15 mm και 15-20 mm, και τέλος με το τρυπάνι των 8 mm ελήφθη υλικό από τα βάθη 20-25 mm και 25-30 mm. Οι τρύπες που ανοίχτηκαν απείχαν τουλάχιστον 1 cm από τις πλευρικές επιφάνειες των δοκιμίων. Πριν τη λήψη των δειγμάτων οι επιφάνειες των δοκιμίων τρίφτηκαν με γυαλόχαρτο για την απομάκρυνση εναπομένουσας ποσότητας αλατιού. Στο τέλος, συγκεντρώθηκαν τα δείγματα των δοκιμίων από κάθε βάθος και έγιναν οι αναλύσεις προσδιορισμού των *συνολικών χλωριόντων*. Για τη μέτρηση των *συνολικών χλωριόντων* χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του προτύπου ΕΛΟΤ EN 196-2 [47].

Προσδιορισμός συνολικών χλωριόντων

Ο προσδιορισμός των *συνολικών χλωριόντων* βάσει του προτύπου EN 196-2 έγινε ακολουθώντας την παρακάτω πειραματική διαδικασία [45]. Αρχικά, ζυγίστηκε η μάζα των δειγμάτων με ακρίβεια 0.0001 g. Η αρχική αυτή μάζα του κάθε δείγματος ρίχτηκε σε ποτήρι ζέσεως των 250 mL. Έπειτα προστέθηκαν σε αυτό 50 mL απιονισμένου νερού και, υπό σύγχρονη ανάδευση με μαγνητικό αναδευτήρα, προστέθηκαν άλλα 50 mL αραιού νιτρικού οξέος 1:2. Στη συνέχεια θερμάνθηκε το μείγμα μέχρι βρασμού, υπό ανάδευση (Σχήμα 4.13). Από τη στιγμή που παρατηρήθηκε βρασμός το μίγμα παρέμεινε υπό ανάδευση και βρασμό για ακόμα 1 min. Ακολούθησε προσθήκη ποσότητας διαλύματος AgNO₃ 0.1 M και συγκεκριμένα για τα 2 πρώτα βάθη έως και τα 10 mm προστέθηκαν 15mL AgNO₃, ενώ για τα υπόλοιπα 4 βάθη 10 mL AgNO₃. Ο βρασμός συνεχίστηκε για 1 min ακόμα και το διάλυμα διηθήθηκε σε ποτήρι ζέσεως των 500 mL με ηθμό, ο οποίος προηγούμενος έχει πλυθεί με αραιό νιτρικό οξύ 1:100.



Σχήμα 4.13: Βρασμός υπό ανάδευση του διαλύματος.

Έπειτα πλύθηκαν το ποτήρι, η υάλινη ράβδος και ο ηθμός με αραιό νιτρικό οξύ 1:100 μέχρι τα υγρά διήθησης και έκπλυσης να φθάσουν τον όγκο των 200 mL (**Σχήμα 4.14**).



Σχήμα 4.14: Διάταξη διήθησης υπό πίεση.

Στο υγρό που προέκυψε από τη διήθηση αφού ψύχθηκε σε θερμοκρασία μικρότερη των 25°C ακολούθησε προσθήκη 5 mL διαλύματος δείκτη στυπτηρίας ($\text{H}_4\text{FeNO}_8\text{S}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) και ογκομέτρηση με διάλυμα NH_4SCN 0,1 M υπό ισχυρή ανάδευση μέχρι το διάλυμα να χρωματιστεί ερυθροφαίο, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.15**.



Σχήμα 4.15: Προσθήκη στυπτηρίας μέχρι το χρωματισμό του διαλύματος.

Σημειώθηκε ο όγκος V_{NH_4SCN} , που απαιτήθηκε για να επέλθει αυτή η αλλαγή χρώματος στο διάλυμα. Ο υπολογισμός των περιεχόμενων χλωριόντων έγινε με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\% Cl = \Delta V * 0.01 * (MB_{Cl} / m_{\text{δείγματος}}) \quad (4.7)$$

όπου:

$$\Delta V = V_{AgNO_3} - V_{NH_4SCN} \text{ (mL)}$$

$$MB_{Cl} = 35.5 \text{ g}$$

$m_{\text{δείγματος}}$: η μάζα του δείγματος από το κάθε βάθος

Προσδιορισμός συντελεστή διάχυσης χλωριόντων

Μετά τον προσδιορισμό των συνολικών χλωριόντων που διείσδυσαν στο εσωτερικό των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε προσαρμογή των προφίλ των χλωριόντων στο 2^ο νόμο του Fick, επιτρέποντας τον υπολογισμό των συντελεστών διάχυσης των δοκιμίων για κάθε σύνθεση. Ο προσδιορισμός των συντελεστών διάχυσης έγινε σύμφωνα με το Πρότυπο Nordtest Build 443 και γνωρίζοντας ότι ο 2ος νόμος του Fick διέπει το φαινόμενο της μεταφοράς μάζας λόγω διάχυσης. Για ένα διμερές μίγμα A και B ο ρυθμός γραμμομοριακής διάχυσης σε κάποια κατεύθυνση z είναι ανάλογος της βαθμίδας συγκέντρωσης στην κατεύθυνση αυτή (4.8):

$$J_{A,Z} = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} \quad (4.8)$$

Ο συντελεστής αναλογίας D_{AB} ονομάζεται συντελεστής διάχυσης του συστατικού A στο συστατικό B . Στο σύστημα μονάδων SI έχει διαστάσεις $m^2 s^{-1}$, τις ίδιες με το κινηματικό ιξώδες ν και το συντελεστή θερμικής διαχυτότητας α . Η παραπάνω εξίσωση ισχύει για σύστημα που βρίσκεται σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση, που έχει δηλαδή σταθερή ολική συγκέντρωση. Μια γενικότερη μορφή της εξίσωσης Fick χωρίς αυτόν τον περιορισμό είναι (4.9):

$$J_{A,Z} = -cD_{AB} \frac{dx_A}{dz} \quad (4.9)$$

όπου x_A είναι το μοριακό κλάσμα και c η ολική συγκέντρωση.

Ανάλογα με το είδος του στερεού και της διαχεόμενης ουσίας διακρίνονται τρεις βασικοί μηχανισμοί διάχυσης στα στερεά: (α) διάχυση σε κρυσταλλικό στερεό, δηλαδή η διάχυση γίνεται σε μία στερεή φάση, (β) διάχυση ενός αερίου ή υγρού μέσα από τους πόρους ενός

στερεού, όπου το διαχεόμενο ρευστό διατηρείται σε ξεχωριστή φάση από το στερεό και (γ) διάχυση σε άμορφο στερεό (π.χ. σε πλαστικό πολυμερές).

Η περίπτωση της διάχυσης των *χλωριόντων* στο σκυρόδεμα είναι εκείνη της *διάχυσης υγρού σε πορώδες στερεό*. Όταν οι πόροι του στερεού, μέσα από το οποίο περνάει το ρευστό, είναι μεγαλύτεροι από τη μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων, τότε η διάχυση ακολουθεί το *νόμο του Fick*, δηλαδή το ρευστό μίγμα περνάει μέσα από τους πόρους, όπως θα περνούσε μέσα από ένα λεπτό σωλήνα. Πρέπει να σημειωθεί, ότι ο συντελεστής διάχυσης δίνει το ρυθμό μεταφοράς ανά m^2 επιφάνειας στερεού (και όχι της ελεύθερης διατομής των πόρων) ως συνάρτηση της βαθμίδας συγκέντρωσης που εφαρμόζεται στο στερεό (και όχι κατά μήκος των διόδων).

Η συνθήκη τακτική για την εκτίμηση του *ρυθμού διείσδυσης των χλωριόντων* στο σκυρόδεμα είναι μέσω του υπολογισμού των τιμών του *συντελεστή διάχυσης των χλωριόντων (D)*. Για συνθήκες μη μόνιμης κατάστασης και μονοαξονική ροή κατά την κατεύθυνση x ο 2ος νόμος του Fick περιγράφεται από την εξίσωση (4.10):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (4.10)$$

Θεωρώντας ότι ο συντελεστής διάχυσης D παραμένει σταθερός και ότι οι αριακές μας συνθήκες είναι:

- Αρχική συνθήκη: $C(x,0)=x>0$
- Οριακή συνθήκη: $C(0,t)=C_s, t \geq 0$,

η λύση του προβλήματος οριακών τιμών δίνεται από την εξίσωση (4.11):

$$C_{(x,t)} = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \quad (4.11)$$

όπου:

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

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

x : το βάθος (m)

erf : η συνάρτηση σφάλματος (error function)

D_c : ο συντελεστής διάχυσης (m^2/s)

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

Σύμφωνα με τη μη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης κατασκευάζεται η βέλτιστη καμπύλη (**Σχήμα 4.16**), για την οποία το άθροισμα που περιγράφεται στην εξίσωση (4.12) γίνεται ελάχιστο.

$$S = \sum_{n=2}^N \Delta C^2(n) = \sum_{n=2}^N (C_m(n) - C_c(n))^2 \quad (4.12)$$

S (κατά βάρος %): άθροισμα των τετραγώνων που ελαχιστοποιείται

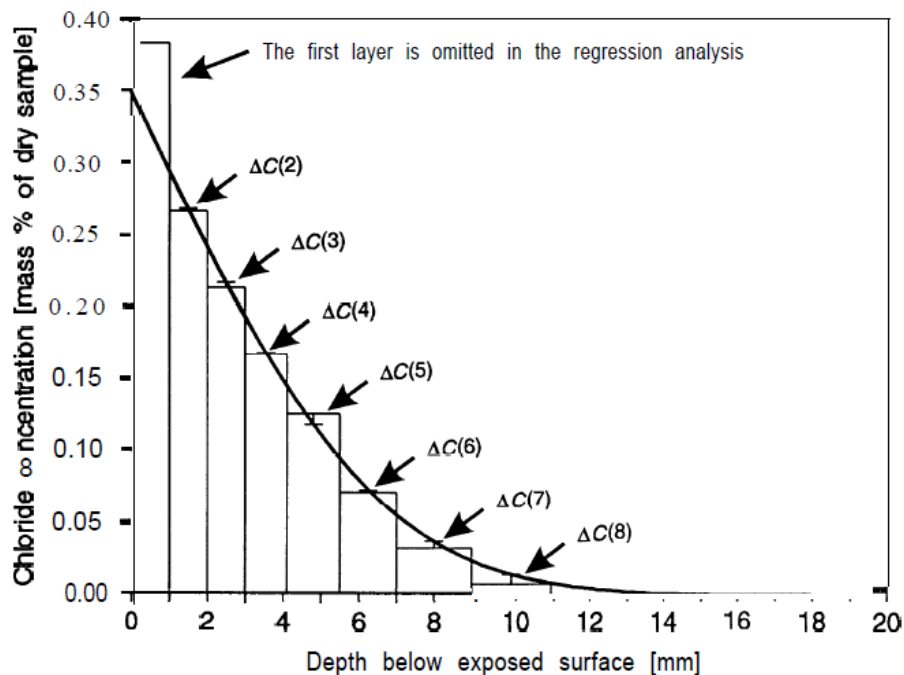
N : ο αριθμός των στρώσεων σκυροδέματος από τα οποία λαμβάνεται δείγμα

$\Delta C(n)$ (κατά βάρος %): διαφορά μεταξύ μετρημένης και εκτιμώμενης τιμής συγκέντρωσης χλωριόντων για τη n -στή στρώση

$c_m(n)$ (κατά βάρος %): μετρημένη τιμή συγκέντρωσης χλωριόντων στη n -στη στρώση.

$c_c(n)$ (κατά βάρος %): εκτιμώμενη τιμή συγκέντρωσης χλωριόντων στη n -στη στρώση.

Αφού προσδιορίσουμε τη καμπύλη παλινδρόμησης, μέσω της εξίσωσης (4.11) προσδιορίζουμε το συντελεστή διάχυσης D_e .



Σχήμα 4.16: Ανάλυση παλινδρόμησης. Οι μπάρες εκφράζουν τις μετρημένες τιμές χλωριόντων.

Η καμπύλη αντιπροσωπεύει το βέλτιστοποιημένο μαθηματικό μοντέλο.

4.6 Ανθεκτικότητα σε κύκλους εμβάπτισης-ξήρανσης(wet-dry)

Για τη δοκιμή ξήρανσης-εμβάπτισης, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά δέκα ιασμένα δοκίμια σκυροδέματος (ένα για κάθε σύνθεση) και πέντε δοκίμια αναφοράς (ένα για κάθε σύνθεση). Πριν την εφαρμογή των επαναλαμβανόμενων κύκλων, τα δοκίμια αρχικά ζυγίστηκαν και κατόπιν τοποθετήθηκαν σε νερό ώσμωσης για 3 ημέρες προκειμένου να κορεστούν. Ακολούθησε νέα ζύγιση και οι μάζες αυτές αποτέλεσαν τις μάζες αναφοράς. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν συνολικά σε 40 επαναλαμβανόμενους κύκλους ξήρανσης-εμβάπτισης. Ο κάθε κύκλος αποτελούνταν από δύο στάδια, ένα για την ξήρανση και ένα για την εμβάπτιση των δοκιμίων. Κατά το στάδιο της ξήρανσης τα δοκίμια τοποθετούνταν στο πυριαντήριο στους 80°C όπου και παρέμεναν για 4 h. Στη συνέχεια, υποβάλλονταν σε απότομη ψύξη καθώς τοποθετούνταν σε απιονισμένο νερό το οποίο βρισκόταν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για άλλες 4 h για να συντελεστεί το στάδιο της εμβάπτισης. Κατά τη διάρκεια της ημέρας λάμβανε χώρα ένας κύκλος. Στο τέλος κάθε κύκλου τα δοκίμια παρέμεναν στο νερό, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κάθε 5 κύκλους γινόταν ζύγιση των δοκιμίων κατόπιν παραμονής τους στο νερό για 2 ημέρες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

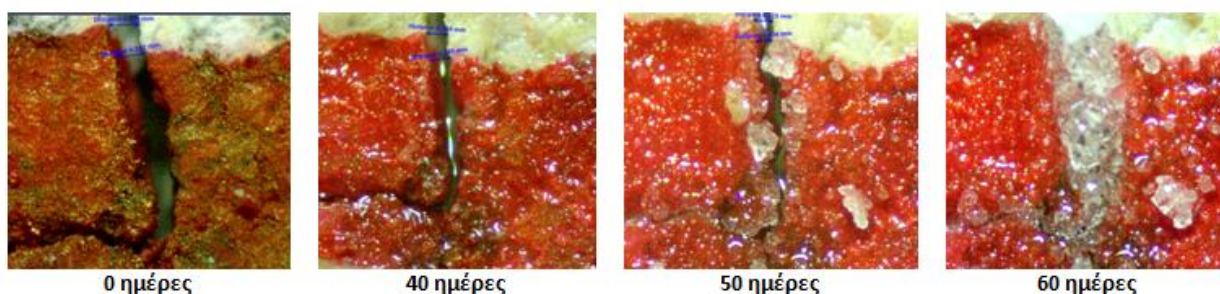
4.7 Ανθεκτικότητα σε κύκλους ψύξης-απόψυξης

Για τη δοκιμή ψύξης-απόψυξης, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά δέκα ιασμένα δοκίμια σκυροδέματος (ένα από κάθε σύνθεση) και πέντε δοκίμια αναφοράς (ένα από κάθε σύνθεση). Πριν την εφαρμογή των επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης, θα πρέπει τα δοκίμια να είναι πλήρως κορεσμένα με νερό. Για το λόγο αυτό, αφού ζυγίστηκαν, τοποθετήθηκαν σε νερό ώσμωσης για 3 ημέρες. Ακολούθησε νέα ζύγιση των δοκιμίων και οι μάζες αυτές αποτέλεσαν τις μάζες αναφοράς. Το στάδιο της ψύξης διαρκούσε 4 h όσο και το στάδιο της απόψυξης. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 666, η θερμοκρασία στο κέντρο των δοκιμίων κατά το στάδιο της ψύξης θα πρέπει να κινείται στο εύρος των $-18\pm 2^{\circ}\text{C}$ και η αντίστοιχη θερμοκρασία κατά το στάδιο απόψυξης στην περιοχή των $+4\pm 2^{\circ}\text{C}$. Σε κάθε διακοπή των κύκλων τα δοκίμια παρέμεναν σε κατάσταση κατάψυξης. Κάθε 10 επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης, τα δοκίμια ζυγίζονταν αφού τοποθετούνταν για 2 ημέρες στο νερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

5 Αποτελέσματα και Συζήτηση Αποτελεσμάτων.

5.1 Στερεοσκοπική επιθεώρηση

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της οπτικής επιθεώρησης μέσω στερεοσκοπίου. Κατά την οπτική παρατήρηση με στερεοσκόπιο έγινε λήψη φωτογραφιών με τις ρωγμές, το εύρος των οποίων μετρήθηκε με χρήση του Λογισμικού ZEN το οποίο έχει συνδεθεί με το στερεοσκόπιο. Ειδικότερα παρουσιάζεται η εξέλιξη του εύρους των ρωγμών σε με τη πάροδο του χρόνου συντήρησης, για τις πέντε (5) συνθέσεις που μελετήθηκαν. Επιπλέον, παρουσιάζονται πίνακες προόδου της αυτο-ίασης, για τη κάθε σύνθεση με το βαθμό ίασης (GH), τη μείωση της επιφάνειας της ρωγμής (AR) και το βήμα μείωσης τους εύρους της επιφάνειας της ρωγμής μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων με στερεοσκόπιο (RAR). Ακόμα δίνονται διαγράμματα με τη πρόοδο της ίασης στη πάροδο του χρόνου για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων της στερεοσκοπικής επιθεώρησης. Στο **Σχήμα 5.1** παρουσιάζεται ενδεικτικά η μέτρηση μιας ρωγμής που βρίσκεται στη κάτω πλευρά ενός εκ' των δοκιμίων της σύνθεσης M7 στις 0, 40, 50 και 60 ημέρες.



Σχήμα 5.1: Εικόνες από στερεοσκόπιο για δείγμα της σύνθεσης M7 από τη κάτω πλευρά του δοκιμίου που δείχνουν το κλείσιμο της ρωγμής με τη πάροδο του χρόνου.

5.1.1 Σύνθεση M1-Δοκίμια αναφοράς (OPC 100%)

Τα δοκίμια της σύνθεσης M1 έχουν εξολοκλήρου ως συνδετική ουσία τσιμέντο CEM I 52.5 N, λόγο νερού προς τσιμέντο (W/C) 0.45, ενώ ίνες και υπερρευστοποιητής προστέθηκαν σε 2% και 2.50 % επί το ποσοστό των τσιμεντοειδών αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι στα δοκίμια αναφοράς παρουσιάζεται αυτο-ίαση σε μερικές ρωγμές στις 50 και στις 60 ημέρες (**Πίνακας 5.1**). Ακολουθεί το **Σχήμα 5.2** με την πρόοδο ίασης των δοκιμίων. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά έχουν καταρτιστεί ο **Πίνακας 5.2**, ο **Πίνακας 5.3** και ο **Πίνακας 5.4** για τον υπολογισμό των παραμέτρων GH, AR και RAR αντίστοιχα. Από τους πίνακες αυτούς προκύπτει βαθμός ίασης 31.75% και μείωση της επιφάνειας της ρωγμής ολόένα και αυξανόμενη χωρίς όμως να ξεπερνά το 50%. Το βήμα μείωσης σταδιακά αυξάνεται, επομένως συμπεραίνουμε ότι ο ρυθμός με τον οποίο κλείνουν οι ρωγμές αυξάνεται με τη πάροδο του χρόνου.

Πίνακας 5.1: Πρόοδος αυτό-ίασης για το M1-Μετρήσεις στις 0, 40,50,60 ημέρες.

Σημεία Πλήρους ίασης							
Ημέρες	Πλευρά	n	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
			0-100	100-200	200-300	300-400	
0	Άνω	26	0	0	0	0	0
	Κάτω	37	0	0	0	0	0
	Σύνολο	63	0	0	0	0	0
40	Άνω	26	0	0	0	0	0
	Κάτω	37	0	0	0	0	0
	Σύνολο	63	0	0	0	0	0
50	Άνω	26	0	0	0	0	0
	Κάτω	37	0	1	2	1	4
	Σύνολο	63	0	1	2	1	4
60	Άνω	26	0	0	0	0	0
	Κάτω	37	0	10	8	2	20
	Σύνολο	63	0	10	8	2	20

Πίνακας 5.2: Βαθμός ίασης για το M1.

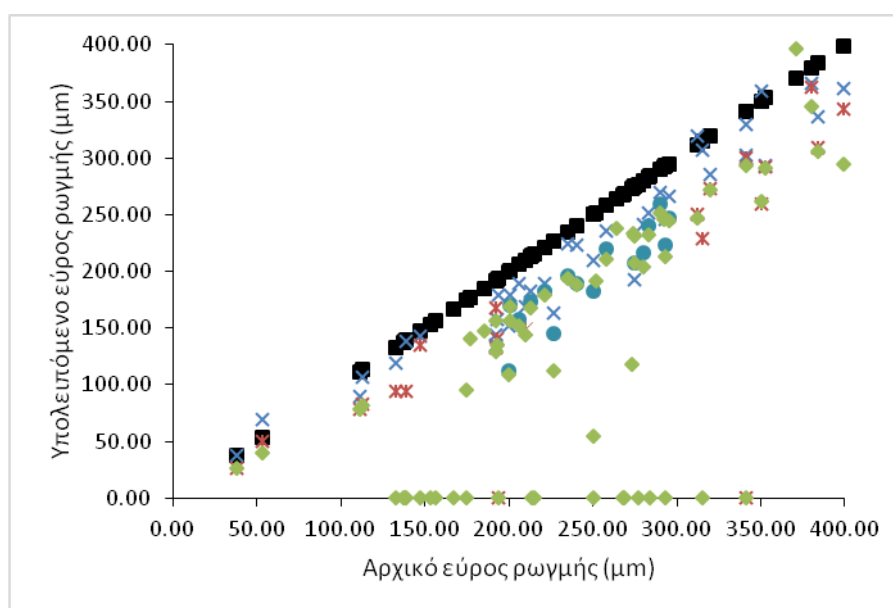
Βαθμός πλήρους ίασης GH (%)					
Ημέρες	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
	0-100	100-200	200-300	300-400	
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
50	0.00%	0.00%	6.25%	9.09%	6.35%
60	0.00%	55.56%	25.00%	18.18%	31.75%

Πίνακας 5.3: Μείωση της επιφάνειας των ρωγμών του M1.

Μείωση επιφάνειας ρωγμής AR (%)					
Ημέρες	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
	0-100	100-200	200-300	300-400	
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40	-15.09%	10.84%	11.89%	5.12%	9.55%
50	18.62%	30.12%	25.35%	22.15%	25.94%
60	28.05%	68.05%	44.75%	30.99%	48.47%

Πίνακας 5.4: Βήμα μείωσης επιφάνειας ρωγμών μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων για το M1.

Βήμα μείωσης Επιφάνειας Ρωγμής RAR (%)					
Ημέρες	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
	0-100	100-200	200-300	300-400	
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40	-15.09%	10.84%	11.89%	5.12%	9.55%
50	29.56%	20.82%	15.12%	17.49%	17.62%
60	10.00%	48.09%	19.19%	11.55%	25.82%



Σχήμα 5.2: Πρόοδος αυτό-ίσης για το M1.

5.1.2 Μίγμα M2 - (OPC 88.5%, Penetron® Admix 1.5%, DENKA CSA#20 10%)

Τα δοκίμια της σύνθεσης M2 έχουν ως συνδετική ουσία τσιμέντο CEM I 52.5 N σε ποσοστό 88.5%, Penetron® Admix σε ποσοστό 1.5% και DENKA CSA#20 σε ποσοστό 10%, λόγο νερού προς τσιμέντο (W/C) 0.45, ενώ ίνες και υπερρευστοποιητής προστέθηκαν σε 3.21% και 2 % επί το ποσοστό των τσιμεντοειδών αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι στα δοκίμια της σύνθεσης M2 παρουσιάζεται αυτο-ίαση σε μερικές ρωγμές στις 50 και στις 60 ημέρες (Πίνακας 5.5). Ακολουθεί το Σχήμα 5.3 το οποίο εμφανίζει την πρόοδο ίσης των δοκιμίων .

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά έχουν καταρτιστεί ο Πίνακας 5.6, ο Πίνακας 5.7 και ο Πίνακας 5.8 για τον υπολογισμό των παραμέτρων GH, AR και RAR αντίστοιχα.

Από τους πίνακες αυτούς προκύπτει βαθμός ίασης 26.79% και μείωση της επιφάνειας της ρωγμής ολοένα και αναξανόμενη χωρίς όμως να ξεπερνά το 50%, αφού η τιμή της φτάνει το 46.80%. Το βήμα μείωσης μέχρι τις 50 μέρες αυξάνεται ελαφρώς ενώ από το σημείο αυτό και μετά μειώνεται, οπότε συμπεραίνουμε ότι και ο ρυθμός με τον οποίο κλείνουν οι ρωγμές μειώνεται με τη πάροδο του χρόνου μετά τις 50 ημέρες.

Πίνακας 5.5: Πρόοδος αυτό-ίασης για το M2-Μετρήσεις στις 0, 40,50,60 ημέρες.

Σημεία πλήρους ίασης							
Ημέρες	Πλευρά	n	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
			0-100	100-200	200-300	300-400	
0	Άνω	31	0	0	0	0	0
	Κάτω	25	0	0	0	0	0
	Σύνολο	56	0	0	0	0	0
40	Άνω	31	0	0	0	0	0
	Κάτω	25	0	0	0	0	0
	Σύνολο	56	0	0	0	0	0
50	Άνω	31	0	0	0	0	0
	Κάτω	25	0	8	3	0	11
	Σύνολο	56	0	8	3	0	11
60	Άνω	31	0	0	0	0	0
	Κάτω	25	0	9	5	1	15
	Σύνολο	56	0	9	5	1	15

Πίνακας 5.6: Βαθμός ίασης για τη σύνθεση M2.

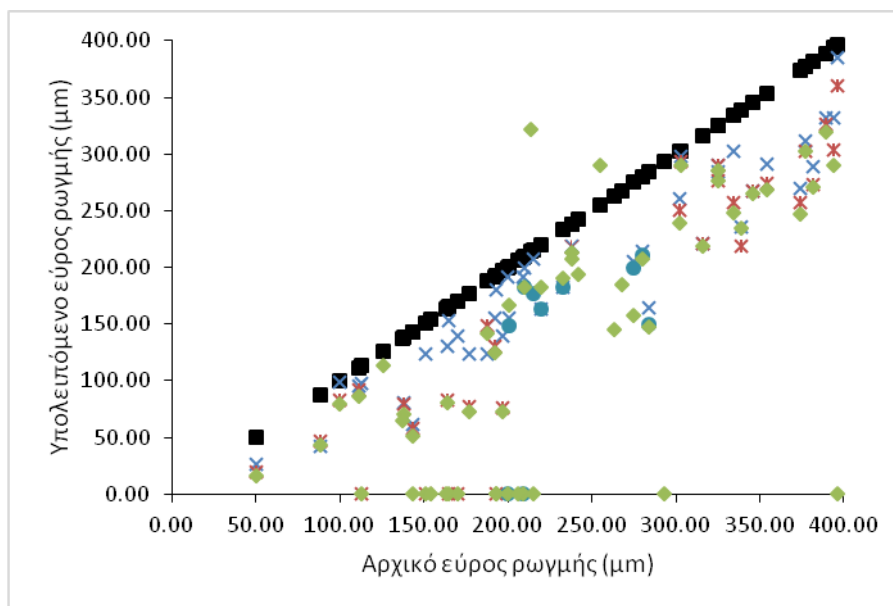
Βαθμός ίασης GH (%)					
Ημέρες	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
	0-100	100-200	200-300	300-400	
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
50	0.00%	40.00%	15.79%	0.00%	19.64%
60	0.00%	45.00%	26.32%	6.67%	26.79%

Πίνακας 5.7: Μείωση της επιφάνειας των ρωγμών της σύνθεσης M2.

Μείωση Επιφάνειας Ρωγμής AR (%)					
Ημέρες	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
	0-100	100-200	200-300	300-400	
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40	50.14%	18.11%	13.94%	16.75%	17.47%
50	54.30%	60.47%	29.55%	20.49%	39.05%
60	59.57%	67.55%	38.77%	27.59%	46.80%

Πίνακας 5.8: Βήμα μείωσης επιφάνειας ρωγμών μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων για το M2.

Βήμα Μείωσης Επιφάνειας Ρωγμής RAR (%)					
Ημέρες	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
	0-100	100-200	200-300	300-400	
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40	50.14%	18.11%	13.94%	16.75%	17.47%
50	7.51%	49.33%	17.53%	4.44%	25.02%
60	12.15%	9.03%	12.51%	7.67%	9.96%



Σχήμα 5.3: Πρόοδος αυτό-ίασης για το M2.

5.1.3 Μίγμα M5 - (OPC 90%, DENKA CSA#20 10%)

Τα δοκίμια της σύνθεσης M5 έχουν ως συνδετική ουσία τσιμέντο CEM I 52.5 N σε ποσοστό 90%, και το διογκωτικό πρόσθετο DENKA CSA#20 10%, λόγο νερού προς τσιμέντο (W/C) 0.45, ενώ ίνες και υπερρευστοποιητής προστέθηκαν σε 2% και 2.71 % επί το ποσοστό των τσιμεντοειδών αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι στα δοκίμια της σύνθεσης M5 παρουσιάζεται αυτο-ίαση σε μερικές ρωγμές στις 40, 50 και στις 60 ημέρες (**Πίνακας 5.9**). Μάλιστα οι ρωγμές που κλείνουν στις 40 ημέρες είχαν αρχικό εύρος 300-400 μm. Ακολουθεί το **Σχήμα 5.4** με την πρόοδο ίασης των δοκιμίων. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά έχουν καταρτιστεί ο **Πίνακας 5.10**, ο **Πίνακας 5.11** και ο **Πίνακας 5.12** για τον υπολογισμό των παραμέτρων GH, AR και RAR αντίστοιχα. Από τους πίνακες αυτούς προκύπτει βαθμός ίασης 29.58% και μείωση της επιφάνειας της ρωγμής ολοένα και αυξανόμενη χωρίς όμως να ξεπερνά το 50%, αφού φτάνει την τιμή 49.15%. Το βήμα μείωσης αυξάνεται αρχικά, όμως μετά τις 50 ημέρες μειώνεται επομένως συμπεραίνουμε ότι και ο ρυθμός με τον οποίο κλείνουν οι ρωγμές μειώνεται μετά τις 50 ημέρες.

Πίνακας 5.9: Πρόοδος αυτό-ίασης για το M5-Μετρήσεις στις 0, 40,50,60 ημέρες.

Σημεία πλήρους ίασης							
Ημέρες	Πλευρά	n	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
			0-100	100-200	200-300	300-400	
0	Άνω	33	0	0	0	0	0
	Κάτω	38	0	0	0	0	0
	Σύνολο	71	0	0	0	0	0
40	Άνω	33	0	0	0	0	0
	Κάτω	38	0	0	0	1	1
	Σύνολο	71	0	0	0	1	1
50	Άνω	33	0	0	0	0	0
	Κάτω	38	0	6	5	1	12
	Σύνολο	71	0	6	5	1	12
60	Άνω	33	0	0	0	0	0
	Κάτω	38	0	8	11	2	21
	Σύνολο	71	0	8	11	2	21

Πίνακας 5.10: Βαθμός ίασης για τη σύνθεση M5.

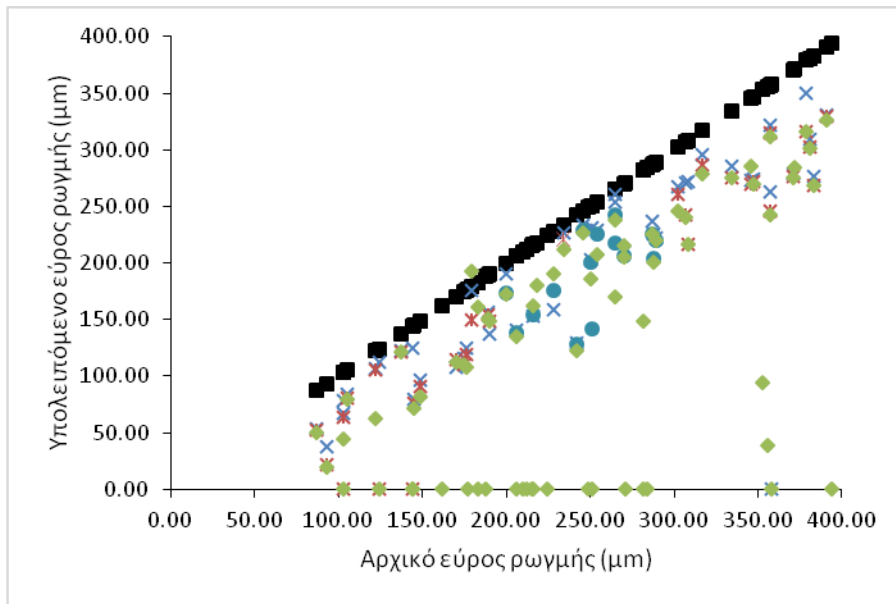
Βαθμός ίασης GH (%)					
Ημέρες	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
	0-100	100-200	200-300	300-400	
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40	0.00%	0.00%	0.00%	5.26%	1.41%
50	0.00%	28.57%	17.24%	5.26%	16.90%
60	0.00%	38.10%	37.93%	10.53%	29.58%

Πίνακας 5.11: Μείωση επιφάνειας ρωγμών των δοκιμίων της σύνθεσης M5.

Μείωση Επιφάνειας Ρωγμής AR (%)					
Ημέρες	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
	0-100	100-200	200-300	300-400	
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40	49.11%	22.79%	13.29%	19.29%	18.72%
50	58.29%	48.94%	37.20%	30.57%	39.49%
60	61.05%	56.81%	51.51%	35.81%	49.15%

Πίνακας 5.12: Βήμα μείωσης επιφάνειας ρωγμών μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων για τη σύνθεση M5.

Βήμα Μείωσης Επιφάνειας Ρωγμής RAR(%)					
Ημέρες	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
	0-100	100-200	200-300	300-400	
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40	49.11%	22.79%	13.29%	19.29%	18.72%
50	22.00%	32.73%	27.27%	12.39%	24.75%
60	8.74%	13.12%	24.01%	15.06%	17.96%



Σχήμα 5.4: Πρόοδος αυτό-ίασης για το M5.

5.1.4 Μίγμα M6 - (OPC 88.8%, DENKA CSA#20 10%, DA-1 0.26%, DA-2 0.08%, Sodium Carbonate 0.80%, Calcium Sulfate 0.06%)

Τα δοκίμια της σύνθεσης M6 έχουν ως συνδετική ουσία τσιμέντο CEM I 52.5 N σε ποσοστό 88.80%, το διογκωτικό πρόσθετο DENKA CSA#20 σε ποσοστό 10%, DA-1 0.26%, DA-2 0.08%, ανθρακικό νάτριο 0.80% και θειικό ασβέστιο 0.06%, λόγο νερού προς τσιμέντο (W/C) 0.45, ενώ ίνες και υπερρευστοποιητής προστέθηκαν σε 2% και 3.54 % επί το ποσοστό των τσιμεντοειδών αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι στα δοκίμια της σύνθεσης M6 παρουσιάζεται αυτο-ίαση σε μερικές ρωγμές μόνο στις 60 ημέρες (**Πίνακας 5.13**). Μάλιστα οι ρωγμές που κλείνουν στις 60 ημέρες ανήκουν σε όλα τα εύρη ρωγμών, από πολύ μικρές έως 400μm. Ακολουθεί το **Σχήμα 5.5** το οποίο εμφανίζει την πρόοδο ίασης των δοκιμίων. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά έχουν καταρτιστεί ο **Πίνακας 5.14**, ο **Πίνακας 5.15** και ο **Πίνακας 5.16** για τον υπολογισμό των παραμέτρων GH, AR και RAR αντίστοιχα. Από τους Πίνακες αυτούς προκύπτει βαθμός ίασης 18.03% και μείωση της επιφάνειας της ρωγμής ολοένα και αυξανόμενη, χωρίς όμως να ξεπερνά το 50%, αφού φτάνει την τιμή 33.56 %. Το βήμα μείωσης των ρωγμών παρουσιάζει απότομη μείωση από τις 40 μέχρι τις 50 ημέρες ενώ έπειτα αυξάνεται. Έτσι συμπεραίνουμε ότι ο ρυθμός ίασης στο χρονικό διάστημα από τις 40 έως τις 50 ημέρες μειώνεται, ενώ στη συνέχεια αυξάνεται.

Πίνακας 5.13: Πρόοδος αυτό-ίασης για το Μ6-Μετρήσεις στις 0, 40,50,60 ημέρες.

Σημεία Πλήρους ίασης							
Ημέρες	Πλευρά	n	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
			0-100	100-200	200-300	300-400	
0	Άνω	30	0	0	0	0	0
	Κάτω	31	0	0	0	0	0
	Σύνολο	61	0	0	0	0	0
40	Άνω	30	0	0	0	0	0
	Κάτω	31	0	0	0	0	0
	Σύνολο	61	0	0	0	0	0
50	Άνω	30	0	0	0	0	0
	Κάτω	31	0	0	0	0	0
	Σύνολο	61	0	0	0	0	0
60	Άνω	30	1	0	0	0	1
	Κάτω	31	0	2	7	1	10
	Σύνολο	61	1	2	7	1	11

Πίνακας 5.14: Βαθμός ίασης δοκιμίων σύνθεσης Μ6.

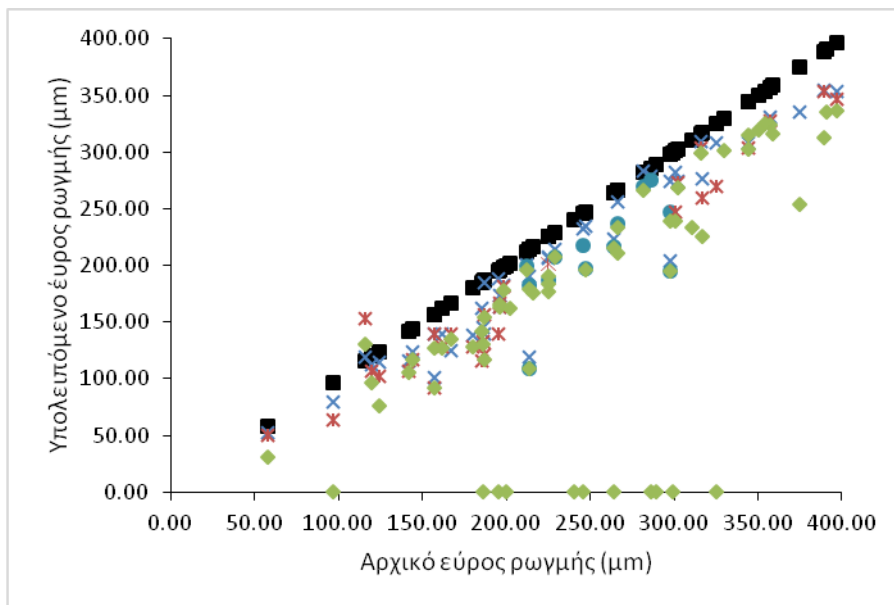
Βαθμός ίασης GH(%)					
Ημέρες	Μέγεθος(μm)				Σύνολο
	0-100	100-200	200-300	300-400	
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
50	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
60	50.00%	10.53%	30.43%	5.88%	18.03%

Πίνακας 5.15: Μείωση επιφάνειας ρωγμών των δοκιμίων της σύνθεσης Μ6.

Μείωση Επιφάνειας Ρωγμής AR (%)					
Ημέρες	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
	0-100	100-200	200-300	300-400	
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40	13.94%	12.65%	8.94%	7.05%	9.73%
50	23.91%	17.82%	14.89%	11.05%	15.03%
60	73.28%	29.12%	43.80%	19.98%	33.56%

Πίνακας 5.16: Βήμα μείωσης επιφάνειας ρωγμών μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων για τη σύνθεση Μ6.

Βήμα Μείωσης Επιφάνειας Ρωγμής RAR (%)					
Ημέρες	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
	0-100	100-200	200-300	300-400	
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40	13.94%	12.65%	8.94%	7.05%	9.73%
50	11.92%	6.02%	6.63%	4.26%	5.95%
60	69.00%	13.22%	24.49%	15.81%	20.02%



Σχήμα 5.5: Πρόοδος αυτό-ίασης για τα δοκίμια της σύνθεσης Μ6.

5.1.5 Μίγμα M7 - (OPC 88.55%, DENKA CSA#20 10%, DA-1 0.10%, DA-2 0.03%, Silica Fume 1.00%, Sodium Carbonate 0.30%, Calcium Sulfate 0.02%)

Τα δοκίμια της σύνθεσης M7 έχουν ως συνδετική ουσία τσιμέντο CEM I 52.5 N σε ποσοστό 88.55%, το διογκωτικό πρόσθετο DENKA CSA#20 σε ποσοστό 10%, DA-1 0.10%, DA-2 0.03%, ανθρακικό νάτριο 0.30% και θειϊκό ασβέστιο 0.02% και Πυριτική παιπάλη σε ποσοστό 1%, λόγο νερού προς τσιμέντο (W/C) 0.45, ενώ ίνες και υπερρευστοποιητής προστέθηκαν σε 2% και 4.49 % επί το ποσοστό των τσιμεντοειδών αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι στο δοκίμιο αναφοράς παρουσιάζεται αυτο-ίαση σε μερικές ρωγμές στις 40, 50 και 60 ημέρες (Πίνακας 5.17). Μάλιστα οι ρωγμές που κλείνουν στις 60 ανήκουν σε όλα τα εύρη ρωγμών, από πολύ μικρές έως 400μm. Ακολουθεί το Σχήμα 5.5 το οποίο εμφανίζει την πρόοδο ίασης του δοκιμίου. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά έχουν καταρτιστεί ο Πίνακας 5.18, ο Πίνακας 5.19 και ο Πίνακας 5.20 για τον υπολογισμό των παραμέτρων GH, AR και RAR αντίστοιχα. Από τους Πίνακες αυτούς προκύπτει βαθμός ίασης 35.48% και μείωση της επιφάνειας της ρωγμής ολοένα και αυξανόμενη η οποία ξεπερνάει το 50% αφού φτάνει την τιμή 54.15%. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι μέχρι τις 40 ημέρες μικρό ποσοστό ρωγμών έχουν ιαθεί (βαθμός ίασης 1.61, μείωση επιφάνειας ρωγμών κατά 22.63%), ενώ αντίθετα στις 50 ημέρες έχουμε παραπάνω από διπλασιασμό της μείωσης της επιφάνειας των ρωγμών(από 22.63% γίνεται 48.72%). Το βήμα μείωσης των ρωγμών ολοένα και αυξάνεται μέχρι και τις 50 ημέρες, ενώ στη συνέχεια μειώνεται. Έτσι συμπεραίνουμε ότι ο ρυθμός ίασης μετά τις 50 ημέρες μειώνεται.

Πίνακας 5.17: Πρόοδος αυτό-ίασης για το M7-Μετρήσεις στις 0, 40,50,60 ημέρες.

Σημεία Πλήρους ίασης							
Ημέρες	Πλευρά	n	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
			0-100	100-200	200-300	300-400	
0	Άνω	31	0	0	0	0	0
	Κάτω	31	0	0	0	0	0
	Σύνολο	62	0	0	0	0	0
40	Άνω	31	0	0	0	0	0
	Κάτω	31	0	1	0	0	1
	Σύνολο	62	0	1	0	0	1
50	Άνω	31	1	0	0	0	1
	Κάτω	31	1	11	4	1	17
	Σύνολο	62	2	11	4	1	18
60	Άνω	31	1	0	0	0	1
	Κάτω	31	1	12	5	4	22
	Σύνολο	62	2	12	5	3	22

Πίνακας 5.18: Βαθμός ίασης δοκιμίων σύνθεσης M7.

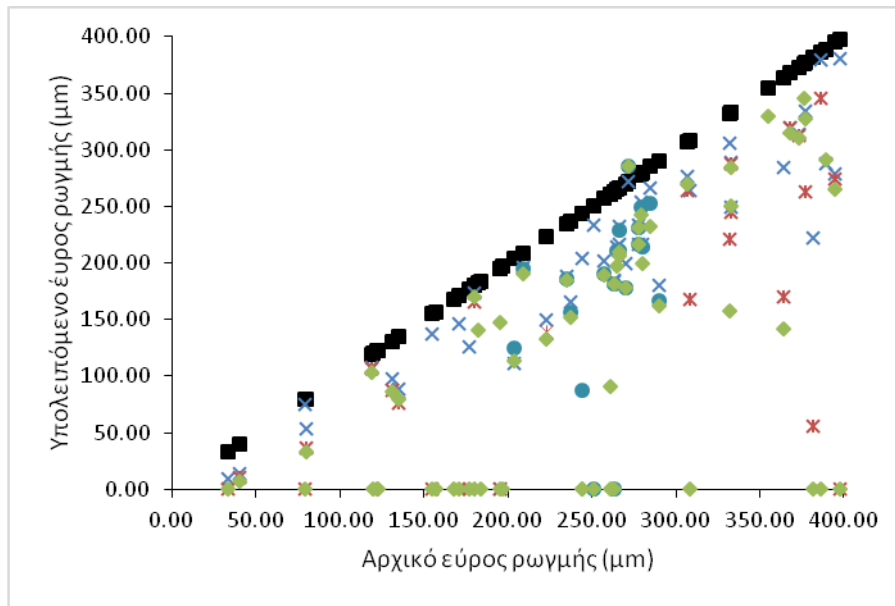
Βαθμός ίασης GH (%)					
Ημέρες	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
	0-100	100-200	200-300	300-400	
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40	0.00%	5.56%	0.00%	0.00%	1.61%
50	50.00%	61.11%	16.67%	6.25%	29.03%
60	50.00%	66.67%	20.83%	18.75%	35.48%

Πίνακας 5.19: Μείωση επιφάνειας ρωγμών των δοκιμίων της σύνθεσης M7.

Μείωση Επιφάνειας Ρωγμής AR (%)					
Ημέρες	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
	0-100	100-200	200-300	300-400	
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40	43.82%	27.62%	19.87%	15.85%	22.63%
50	82.19%	69.80%	38.12%	32.54%	48.72%
60	85.31%	74.48%	41.38%	42.64%	54.15%

Πίνακας 5.20: Βήμα μείωσης επιφάνειας ρωγμών μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων για τη σύνθεση M7.

Βήμα Μείωσης Επιφάνειας Ρωγμής RAR (%)					
Ημέρες	Μέγεθος (μm)				Σύνολο
	0-100	100-200	200-300	300-400	
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40	43.82%	27.62%	19.87%	15.85%	22.63%
50	65.01%	57.95%	22.83%	20.21%	35.07%
60	10.20%	5.53%	6.57%	25.74%	11.45%



Σχήμα 5.6: Πρόοδος αυτό-ίασης για τα δοκίμια της σύνθεσης M7.

5.1.6 Συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της στερεοσκοπικής επιθεώρησης

Συνοψίζοντας, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στερεοσκοπικής επιθεώρησης για κάθε σύνθεση (Πίνακας 5.21). Αν κατατάξουμε τις συνθέσεις μας κατά φθίνοντα βαθμό ίασης (GH) προκύπτει: $M7 > M1 > M5 > M2 > M6$, ενώ αν η κατάταξη γίνει με βάση την μείωση της επιφάνειας της ρωγμής (AR) έχουμε: $M7 > M5 > M1 > M2 > M6$.

Πίνακας 5.21: Αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας των μετρήσεων της στερεοσκοπικής επιθεώρησης, ανά σύνθεση.

Σύνθεση	GH(%)	AR(%)
M1	31.75	48.47
M2	26.79	46.80
M5	29.58	49.15
M6	18.03	33.56
M7	35.48	54.15

Ωστόσο σε προηγούμενη σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκε σε κονιάματα ίδιας σύστασης πραγματοποιήθηκε ανάλυση με μικροσκόπιο SEM, ώστε να δοθούν πληροφορίες σχετικά με τα προϊόντα που έκλεισαν τις ρωγμές [48].

Έτσι, ενώ στο δοκίμιο σκυροδέματος του M6 οι τιμές των GH(%), AR(%) είναι χαμηλότερες σε σχέση με τις υπόλοιπες συνθέσεις, στην περιβάλλουσα επιφάνεια της ρωγμής των αντίστοιχων κονιαμάτων, παρατηρούνται δύο οικογένειες κρυσταλλικών φάσεων: κρύσταλλοι αραγωνίτη (πολυμορφικό ορυκτό του ασβεστίου) και ασβεστίτη (CaCO₃), ενώ στο εσωτερικό της ρωγμής, παρατηρείται η εκατέρωθεν από το κέντρο αυτής ανάπτυξη των κρυστάλλων, οι οποίοι συγκλίνουν ούτως ώστε να πραγματοποιηθεί η ίαση. Επομένως, τα προϊόντα που κλείνουν τη ρωγμή για τη σύνθεση αυτή, είναι αξιόπιστα και σταθερά. Αντιθέτως, στο M1 ενώ εξετάζοντας τα μεγέθη GH και AR φαίνεται να πραγματοποιείται ίαση, αυτή πιθανότατα έγκειται στην καταβύθιση πορτλαντίτη στην επιφάνεια της ρωγμής, ενώ στα υπόλοιπα δοκίμια τα προϊόντα ενυδάτωσης μεταβολίζονται προς την δημιουργία των δευτερογενών φάσεων από τις οποίες προκύπτει το φαινόμενο της αυτό-ίασης.

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί πως οι τιμές των παραμέτρων GH και AR που είχαν προκύψει για τα κονιάματα ήταν αρκετά υψηλότερες σε σχέση με αυτές των σκυροδεμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν αναμενόμενα, καθώς στη παρούσα εργασία τα δοκίμια περιέχουν και αδρανή, τα οποία δεν συμμετέχουν στις αντιδράσεις που οδηγούν στη παραγωγή επουλωτικών υλικών πλήρωσης της ρωγμής. Αντιθέτως, στα δοκίμια κονιαμάτων το ποσοστό του τσιμεντοειδούς υλικού στο οποίο και αποδίδεται η αυτό-ίαση είναι μεγαλύτερο.

5.2 Δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας

Μέσω του νερού (ύδατος) που προσροφά το σκυρόδεμα είναι δυνατόν να εισέλθουν βλαβερές ουσίες εντός αυτού με αποτέλεσμα τη μείωση διάρκειας ζωής της κατασκευής.

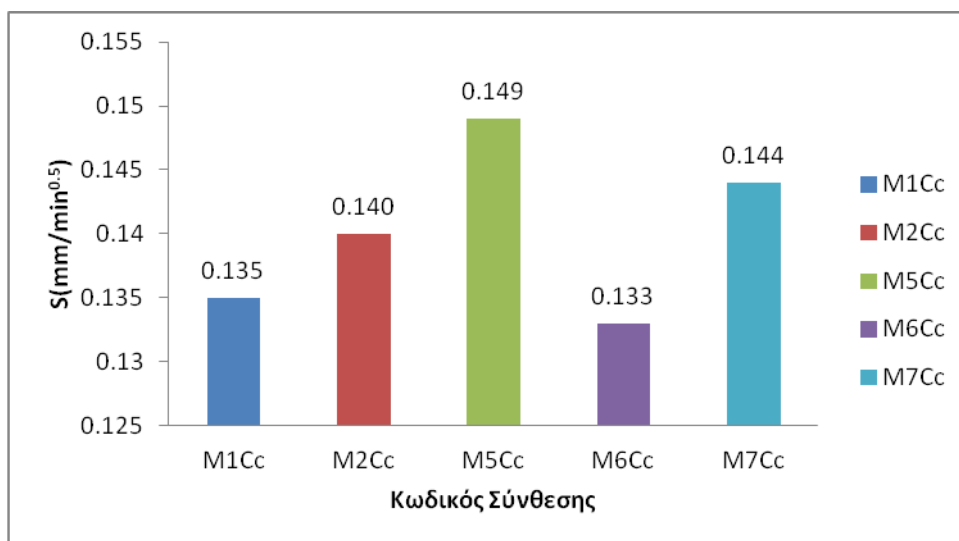
Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η τάση του δείγματος να προσροφά νερό, τόσο μικρότερη ανθεκτικότητα ανεμένουμε να έχει. Η υδατοαπορροφητικότητα του κάθε δοκιμίου όπως μετρήθηκε πειραματικά εκφράζεται από τη παράμετρο S (Σχήμα 5.7, Σχήμα 5.8), ενώ στη συνέχεια με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης πραγματοποιήθηκε fitting στην ευθεία που περιγράφει την υδατοαπορροφητικότητα σε σχέση με το τετράγωνο του χρόνου και προέκυψαν οι τιμές που αντιστοιχούν στη παράμετρο S_{avg} . Η τυπική απόκλιση της S από την S_{vg} εκφράζεται με τη παράμετρο R_{SQUARE} . Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι οι τιμές της R_{SQUARE} , τόσο καλύτερη είναι η προσαρμογή και τα αποτελέσματα θεωρούνται πιο αξιόπιστα.

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών ελέγχου και στη συνέχεια των ιασμένων δοκιμίων (Πίνακας 5.22, Πίνακας 5.23). Τέλος ακολουθεί ο συγκεντρωτικός Πίνακας 5.24 για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 5.22: Δείγματα αναφοράς

Σύνθεση	M1Cc	M2Cc	M5Cc	M6Cc	M7Cc
S (mm/min ^{0.5})	0.135	0.140	0.149	0.133	0.144
S (mm/min ^{0.5}) _{avg}	0.140	0.147	0.159	0.142	0.152
R square	0.9998	0.9997	0.9998	0.9996	0.9996

Η κατάταξη των δοκιμών ελέγχου κατά σειρά αύξουσας υδατοαπορροφητικότητας είναι:
 $M6C_c < M1C_c < M2C_c < M7C_c < M5C_c$

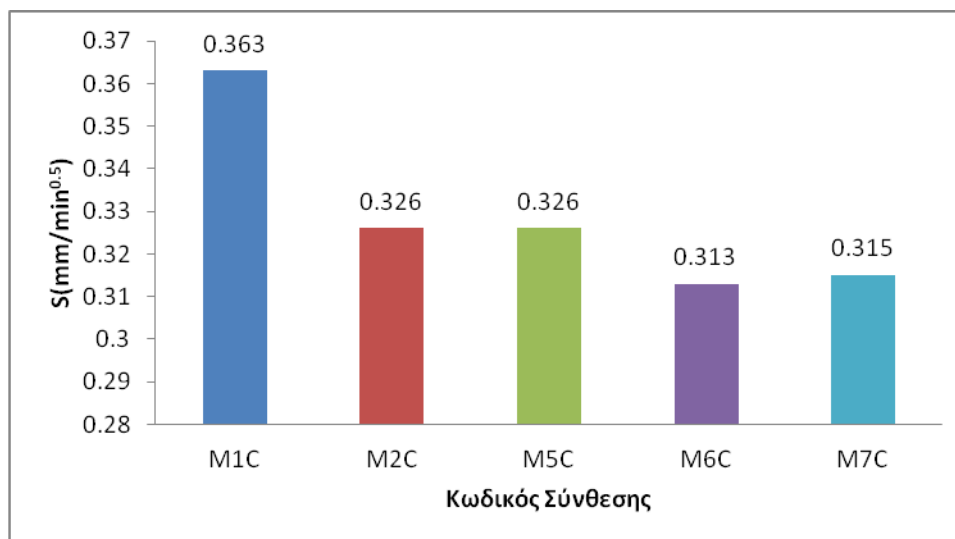


Σχήμα 5.7: Υδατοαπορροφητικότητα S (mm/min^{0.5}) δοκιμών ελέγχου, ανά σύνθεση.

Πίνακας 5.23: Ιασμένα δοκίμια

Σύνθεση	M1C	M2C	M5C	M6C	M7C
S (mm/min ^{0.5})	0.363	0.326	0.326	0.313	0.315
S (mm/min ^{0.5}) _{avg}	0.381	0.343	0.341	0.324	0.332
R square	0.9990	0.9992	0.9983	0.9988	0.9993

Τα ιασμένα δοκίμια της σύνθεσης M2 και M5 έχουν την ίδια S. Ωστόσο για το M5 έχουμε μικρότερη S_{avg} και επιπλέον η R_{square} είναι πιο κοντά στη μονάδα και έτσι θεωρούμε ότι το M5 έχει μικρότερη υδατοαπορροφητικότητα. Η κατάταξη των ιασμένων δοκιμών κατά σειρά αύξουσας υδατοαπορροφητικότητας είναι:
 $M6C < M7C < M5C < M2C < M1C$.



Σχήμα 5.8: Υδατοαπορροφητικότητα S (mm/min^{0.5}) ιασμένων δοκιμίων, ανά σύνθεση.

Συμπεραίνουμε ότι η υδατοαπορροφητικότητα των ιασμένων δοκιμίων είναι αυξημένη για όλες τις συνθέσεις, γεγονός αναμενόμενο αφού ακόμα και για πλήρως ιασμένα δοκίμια, η ίαση έχει γίνει από τσιμεντοειδές υλικό που είναι σαφώς πιο διαπερατό από το σκυρόδεμα παρουσία αδρανών (**Πίνακας 5.24**). Τόσο για τα ιασμένα δοκίμια όσο και για τα δοκίμια ελέγχου καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει η σύνθεση M6. Προκύπτει η εξής κατάταξη:

$$M6Cc < M1Cc < M2Cc < M7Cc < M5Cc$$

$$M6C < M7C < M5C < M2C < M1C$$

Γίνεται φανερό ότι ενώ για αρηγμάτωτα δοκίμια η σύνθεση M1 ήταν η δεύτερη καλύτερη σύνθεση μετά τη ρηγμάτωση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη υδατοαπορροφητικότητα. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η σύνθεση αυτή δεν περιέχει πρόσθετα που κινητοποιούν την ίαση καθώς είναι η σύνθεση αναφοράς.

Τέλος παρατηρούμε ότι η σύνθεση M7 παρουσιάζει βελτιωμένη συμπεριφορά σε σχέση με τις άλλες συνθέσεις μετά την ίαση των δοκιμίων.

Πίνακας 5.24: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υδατοαπορροφητικότητας S (mm/min^{0.5}) όλων των δοκιμίων.

Σύνθεση	Υδατοαπορροφητικότητα S (mm/min ^{0.5})	
	Δοκίμια ελέγχου	Ιασμένα Δοκίμια
M1	0.135	0.363
M2	0.140	0.326
M5	0.149	0.326
M6	0.133	0.313
M7	0.144	0.315

5.3 Ανοιχτό Πορώδες

Δοκίμια ελέγχου

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη μέτρηση του ανοιχτού πορώδους. Παρουσιάζονται οι μετρήσεις των μαζών δοκιμίων πριν την έναρξη του πειράματος (Πίνακας 5.25), καθώς υπήρχε η απαίτηση της ξήρανσης τους, ενώ ακολουθεί ο Πίνακας 5.26 με τις μετρήσεις των μαζών κατά τη διάρκεια του πειράματος και τον υπολογισμό μέσω αυτών της ειδικής και της φαινόμενης πυκνότητας. Προκύπτει η κατάταξη των δοκιμίων ελέγχου κατά αύξουσα τιμή πορώδους ως εξής:

$M1Cc < M2Cc < M5Cc < M7Cc < M6Cc$ (Πίνακας 5.27, Σχήμα 5.9).

Με βάση και τα όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4.4, γίνεται φανερό ότι μέσω του πορώδους μπορούν να εισέλθουν βλαβεροί παράγοντες εντός του σκυροδέματος, επομένως αυξημένη τιμή του πορώδους επιφέρει μειωμένη ανθεκτικότητα. Επομένως από τη μέτρηση του ανοιχτού πορώδους στα δοκίμια ελέγχου προκύπτει ότι μεγαλύτερη ανθεκτικότητα αναμένεται από τη σύνθεση M1, και ακολουθούν οι συνθέσεις M2, M5, M7, M6.

Πίνακας 5.25: Σταθεροποίηση μάζας των δοκιμίων αναφοράς πριν τη μέτρηση του πορώδους.

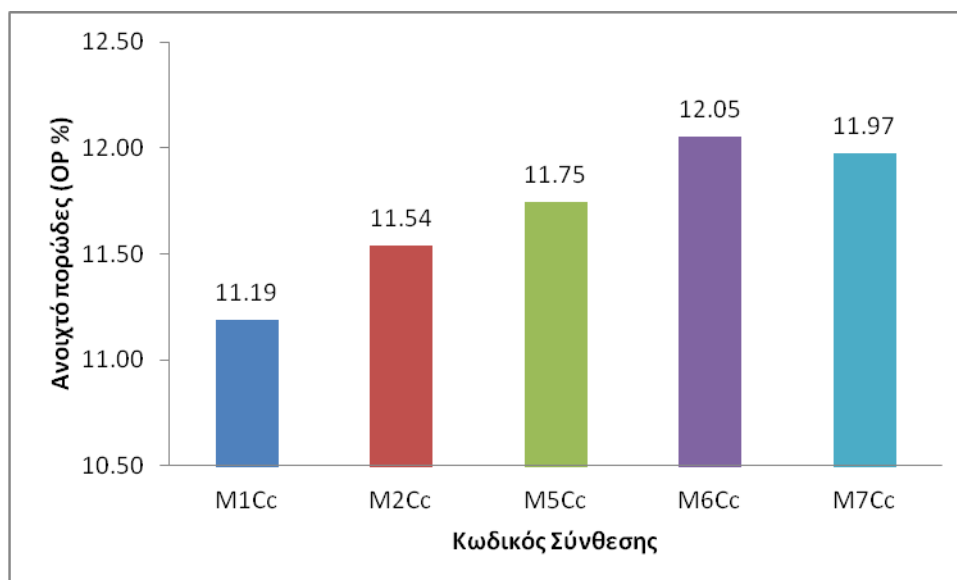
Σύνθεση	23-Οκτ	22-Οκτ	Απαίτηση μεταβολής μάζας < 0.1
M1Cc	815.93	815.49	0.05
M2Cc	803.34	802.90	0.05
M5Cc	821.13	820.77	0.04
M6Cc	859.74	859.61	0.02
M7Cc	847.42	846.85	0.07

Πίνακας 5.26: Μετρήσεις μαζών και υπολογισμός πυκνοτήτων για τον προσδιορισμό του πορώδους.

Σύνθεση	Επιφανειακά στεγνό	Υπό Αιώρηση	Ξηρό Υλικό	Απορρόφηση μετά από εμβάπτιση και βρασμό (%)	Ειδική πυκνότητα (kg/m ³)	Φαινόμενη Πυκνότητα (kg/m ³)
	Μάζα (g)					
M1Cc	855.03	501.67	815.49	4.85	2.31	2.60
M2Cc	843.39	492.53	802.90	5.04	2.29	2.59
M5Cc	862.78	505.12	820.77	5.12	2.29	2.60
M6Cc	905.10	527.68	859.61	5.29	2.28	2.59
M7Cc	891.37	519.53	846.85	5.26	2.28	2.59

Πίνακας 5.27: Σύγκριση ανοιχτού πορώδους των συνθέσεων με τα πρόσθετα με τη σύνθεση M1(συμβατικό σκυρόδεμα) για τα δοκίμια ελέγχου.

Σύνθεση	Ανοιχτό πορώδες (%)	ΔV(%) ως προς M1
M1Cc	11.19	0.00
M2Cc	11.54	3.13
M5Cc	11.75	4.97
M6Cc	12.05	7.71
M7Cc	11.97	7.00



Σχήμα 5.9: Ανοιχτό πορώδες OP (%) για τα δοκίμια ελέγχου, ανά σύνθεση.

Ιασμένα δοκίμια

Καταγράφεται ο έλεγχος των δοκιμίων για τη σταθεροποίηση της μάζας τους πριν τη μέτρηση του πορώδους (Πίνακας 5.28). Προκύπτει η κατάταξη των ιασμένων δοκιμίων κατά αύξουσα τιμή πορώδους ως εξής:

$M6C < M2C < M1C < M7C < M5C$ (Πίνακας 5.30, Σχήμα 5.10).

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι αυξημένη τιμή του πορώδους επιφέρει μειωμένη ανθεκτικότητα στα ιασμένα δοκίμια προκύπτει ότι *μεγαλύτερη ανθεκτικότητα αναμένεται από τη σύνθεση M6*, και ακολουθούν οι συνθέσεις *M2, M1, M7, M5*.

Πίνακας 5.28: Έλεγχος Δm(g) για τα ιασμένα δοκίμια, ανά σύνθεση.

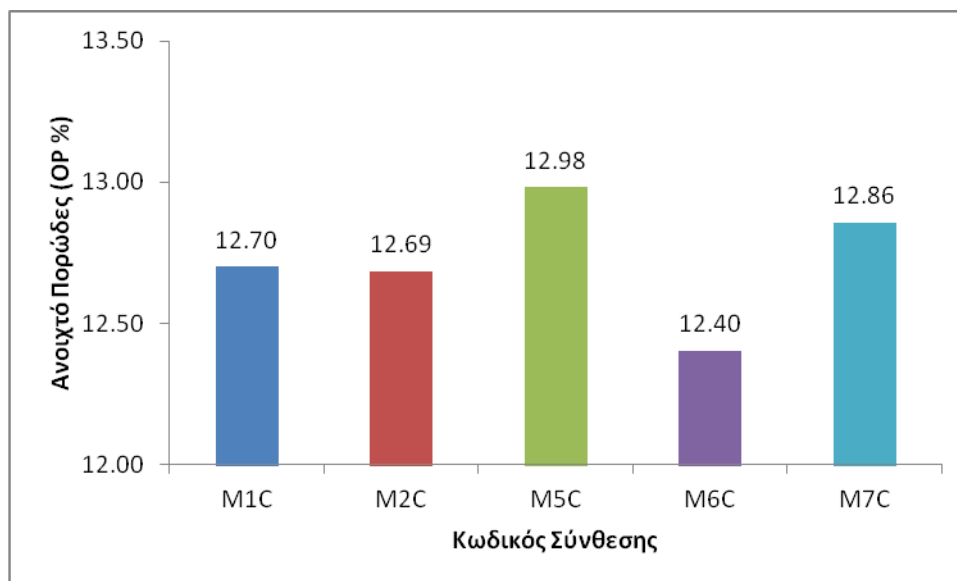
Σύνθεση	24/1/2018	25/1/2018	<0.1
M1C	852.93	852.51	-0.05
M2C	897.31	896.90	-0.05
M5C	865.05	864.60	-0.05
M6C	867.23	866.85	-0.04
M7C	869.07	868.65	-0.05

Πίνακας 5.29: Μετρήσεις μαζών και υπολογισμός πυκνοτήτων για τον προσδιορισμό του πορώδους, ανά σύνθεση.

Σύνθεση	Επιφανειακά στεγνό	Υπό Αιώρηση	Ξηρό Υλικό	Απορρόφηση μετά από εμφάπτιση και βρασμό (%)	Ειδική πυκνότητα (kg/m ³)	Φαινόμενη Πυκνότητα (kg/m ³)
	Μάζα (g)					
M1C	900.39	523.37	852.51	5.62	2.26	2.59
M2C	947.01	552.00	896.90	5.59	2.27	2.60
M5C	914.05	533.11	864.60	5.72	2.27	2.61
M6C	913.82	535.12	866.85	5.42	2.29	2.61
M7C	917.68	536.34	868.65	5.64	2.28	2.61

Πίνακας 5.30: Σύγκριση του ανοιχτού πορώδους OP(%) των ιασμένων δοκιμίων των συνθέσεων με τα πρόσθετα με τη σύνθεση M1(σύνθεση αναφοράς).

Σύνθεση	Ανοικτό πορώδες (%)	ΔV(%) ως προς M1
M1C	12.70	0.00
M2C	12.69	-0.11
M5C	12.98	2.22
M6C	12.40	-2.34
M7C	12.86	1.24



Σχήμα 5.10: Ανοιχτό πορώδες OP (%) για τα ιασμένα δοκίμια, ανά σύνθεση.

Σύγκριση ανοιχτού πορώδους μεταξύ δοκιμίων ελέγχου και ιασμένων δοκιμίων.

Προκύπτει ότι τα ιασμένα δοκίμια έχουν ελαφρώς μεγαλύτερο πορώδες από τα δοκίμια ελέγχου (**Πίνακας 5.31**). Ως προς τα δοκίμια ελέγχου καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει η σύνθεση M1 και χειρότερη η σύνθεση M6. Ωστόσο η κατάσταση αντιστρέφεται μετά την ίαση των δοκιμίων όπου η σύνθεση M6 εμφανίζει μικρότερο πορώδες από όλες τις συνθέσεις, επομένως καλύτερη ανθεκτικότητα.

Πίνακας 5.31: Ανοιχτό πορώδες OP(%) – Σύγκριση ιασμένων δοκιμίων με τα δοκίμια ελέγχου, ανά σύνθεση.

Σύνθεση	Ανοιχτό πορώδες OP(%)	
	Δοκίμια ελέγχου	Δοκίμια ιασμένα
M1	11.19	12.70
M2	11.54	12.69
M5	11.75	12.98
M6	12.05	12.40
M7	11.97	12.86

5.4 Διείσδυση Χλωριόντων

5.4.1 Προσδιορισμός διείσδυσης χλωριόντων με το Πρότυπο NT Build 492.

Ο Προσδιορισμός των χλωριόντων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο **Κεφάλαιο 4.5.1**. Κατά τη διάρκεια της πειραματικής μέτρησης συμπληρώνεται ένα έντυπο στο οποίο αναγράφονται οι συνθήκες στις οποίες έγινε η μέτρηση καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις αυτές. Ενδεικτικά παρατίθεται στο **Σχήμα 5.11** το έντυπο που συμπληρώθηκε για το δοκίμιο M6, όταν εξετάστηκε η διείσδυση των χλωριόντων κάθετα στη ρωγμή.

ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ			
ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	M6C II	ΚΩΔΙΚΟΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	TAX.M6C.ΝΕΡΟ.214
ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΝΕΡΟ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ/ΕΣ	ΑΣΠΙΩΤΗΣ Κ.
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	29/1/2018		ΝΤΑΣΚΑ Α.
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗΣ	29/6/2017		ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ Ε.
ΗΛΙΚΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (ημέρες)	214		
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ (ώρες)	24		
ΔΙΑΛΥΜΑ ΚΑΘΟΔΟΥ		ΔΙΑΛΥΜΑ ΑΝΟΔΟΥ	
ΝΕΡΟ ΔΙΚΤΥΟΥ (g)	10000.00	ΑΠΙΟΝΙΣΜΕΝΟ ΝΕΡΟ (g)	365.00
ΧΛΩΡΙΟΥΧΟ ΝΑΤΡΙΟ NaCl (g)	1111.11	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)	30.00		
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.054		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	29/1/2018	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	30/1/2018
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	15:11	ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	15:10
ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	30.00	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	28.80
ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.056	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.079
ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	15.0	ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	16.6
ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ		Τομή Δοκίμιου: Διείσδυση Χλωριόντων 	
ΜΗΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm)	100.00	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ (h)	23.98
ΠΛΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΜΗΣ (mm)	47.50 47.50 48.50	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	15.80
ΜΕΣΟ ΠΛΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm)	47.83	ΜΕΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ (mm)	25.79
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ (kN)	8.46	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ (m ² /s)	11.36E-12
ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ (MPa)	1.13		
Xd7 (mm)	#### ##	22.00	
Xd5 (mm)	#### ##	24.00	
Xd3 (mm)	#### ##	30.50	
Xd1 (mm)	#### ##	31.00	
Xd2 (mm)	#### ##	25.50	
Xd4 (mm)	#### ##	23.50	
Xd6 (mm)	#### ##	24.00	
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:			

Σχήμα 5.11: Τεχνική αναφορά για ιασμένο δοκίμιο M6(διείσδυση χλωριόντων κάθετα στη ρωγμή)

Δοκίμια ελέγχου

Παρουσιάζονται οι συνθήκες μέτρησης και τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν κατά τη μελέτη διείσδυσης των χλωριόντων για τα δοκίμια ελέγχου (Πίνακας 5.32). Στη συνέχεια ακολουθεί η κατάταξη τους σε κατηγορίες αντίστασης έναντι διείσδυσης χλωριόντων (Πίνακας 5.33), και η διαγραμματική απεικόνιση των συντελεστών διείσδυσης D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) για όλες τις συνθέσεις (Σχήμα 5.12).

Πίνακας 5.32: Μετρήσεις και αποτελέσματα από μέτρηση διείσδυσης χλωριόντων στα δοκίμια ελέγχου κατά το Πρότυπο NT Build 492.

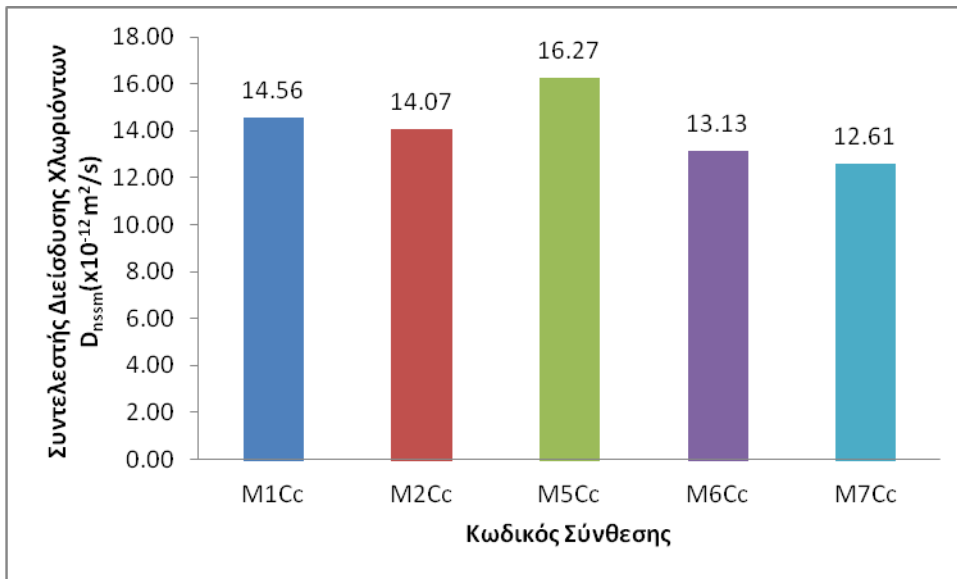
ΣΥΝΘΕΣΗ	ΔΟΚΙΜ. ΤΑΣΗ (V)	ΔΟΚΙΜ. ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ (mm)	ΜΕΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ (mm)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)
M1Cc	30	0.036	35	0.043	34.5	0.062	46.1233	17.679	14.559
M2Cc	30	0.148	14.9	0.056	15.1	0.056	47.1867	26.357	14.072
M5Cc	30	0.115	19.9	0.072	20.6	0.044	45.0833	31.343	16.265
M6Cc	30	0.1	20	0.054	20	0.062	45.3833	26	13.129
M7Cc	30	0.133	15.1	0.051	15	0.051	46.45	24.5	12.614

Παρατηρούμε ότι μεγαλύτερη αντίσταση έναντι διείσδυσης χλωριόντων παρουσιάζει η σύνθεση M7Cc, καθώς έχει μικρότερο συντελεστή διείσδυσης, ενώ ακολουθούν κατά αύξοντα συντελεστή διείσδυσης οι συνθέσεις M6Cc, M2Cc, M1Cc, M5Cc. Όλες οι συνθέσεις εντάσσονται σε μέτρια κατηγορία αντίστασης, με εξαίρεση την σύνθεση M5Cc που έχει χαμηλή αντίσταση.

$M7Cc < M6Cc < M2Cc < M1Cc < M5Cc$.

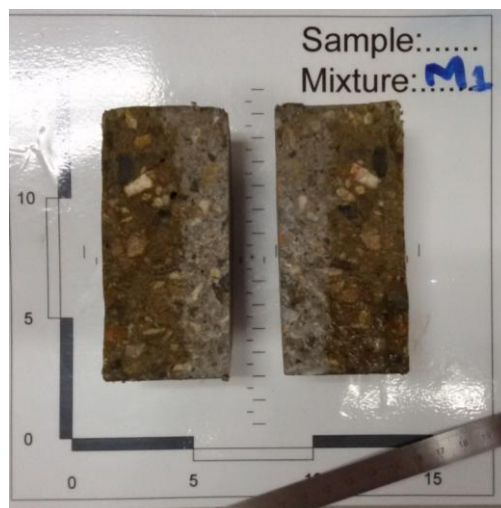
Πίνακας 5.33: Κατάταξη δοκιμίων ελέγχου σε κατηγορίες αντίστασης έναντι διείσδυσης χλωριόντων σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492.

Κωδικός Σύθεσης	Συντελεστής Διείσδυσης D	Ποσοστό % μεταβολής D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) ως προς συμβατικό σκυρόδεμα	Κατηγορία Αντίστασης
M1Cc	14.56	-	Moderate
M2Cc	14.07	3.34	Moderate
M5Cc	16.27	-11.72	Low
M6Cc	13.13	9.82	Moderate
M7Cc	12.61	13.36	Moderate



Σχήμα 5.12: Συντελεστής διείσδυσης D_{nssm} ($x10^{-12} m^2/s$) σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492 για τα δοκίμια ελέγχου.

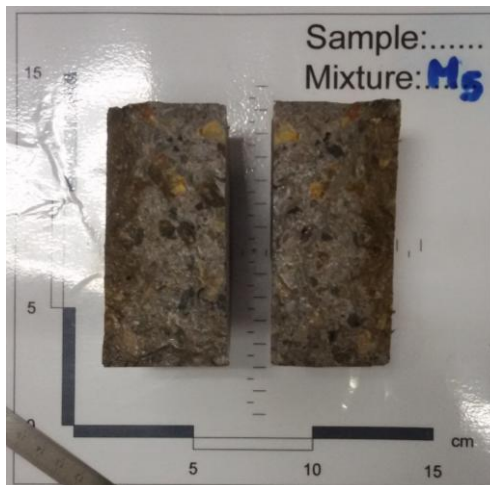
Στο **Σχήμα 5.13**, **Σχήμα 5.14**, **Σχήμα 5.15**, **Σχήμα 5.16** και **Σχήμα 5.17** δίνονται οι εικόνες των δοκιμίων ελέγχου των συνθέσεων M1, M2, M5, M6, M7 αντίστοιχα μετά το ψεκάσμο τους με νιτρικό άργυρο, ώστε να γίνουν εμφανή τα βάθη διείσδυσης στις θέσεις μέτρησης.



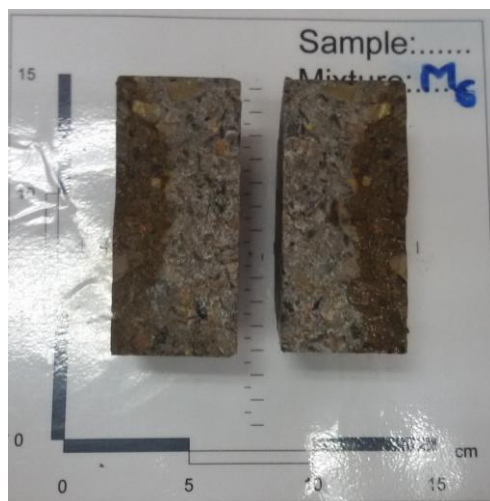
Σχήμα 5.13: Εικόνα δοκιμίου ελέγχου της σύνθεσης M1 μετά από ψεκάσμο με νιτρικό άργυρο για τη μέτρηση του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων.



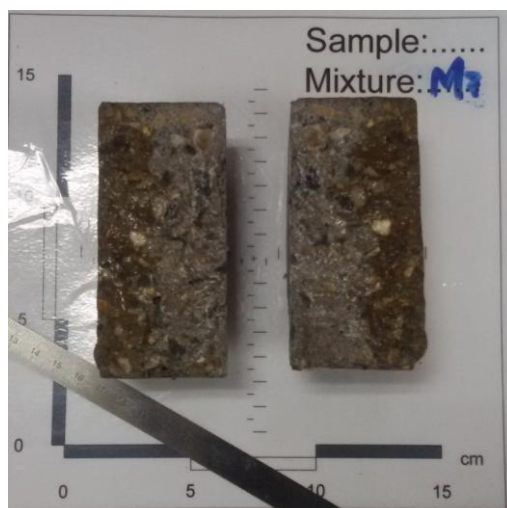
Σχήμα 5.14: Εικόνα δοκιμίου ελέγχου της σύνθεσης M2 μετά από ψεκασμό με νιτρικό άργυρο για τη μέτρηση του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων.



Σχήμα 5.15: Εικόνα δοκιμίου ελέγχου της σύνθεσης M5 μετά από ψεκασμό με νιτρικό άργυρο για τη μέτρηση του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων.



Σχήμα 5.16: Εικόνα δοκιμίου ελέγχου της σύνθεσης M6 μετά από ψεκασμό με νιτρικό άργυρο για τη μέτρηση του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων.



Σχήμα 5.17: Εικόνα δοκιμίου ελέγχου της σύνθεσης M7 μετά από ψεκασμό με νιτρικό άργυρο για τη μέτρηση του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων.

Ιασμένα δοκίμια

Προκειμένου να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα της ίασης μελετήθηκε η διείσδυση των χλωριόντων παράλληλα (Πίνακας 5.34, Πίνακας 5.35, Σχήμα 5.18) καθώς και κάθετα στη ρωγμή (Πίνακας 5.36, Πίνακας 5.37, Σχήμα 5.20).

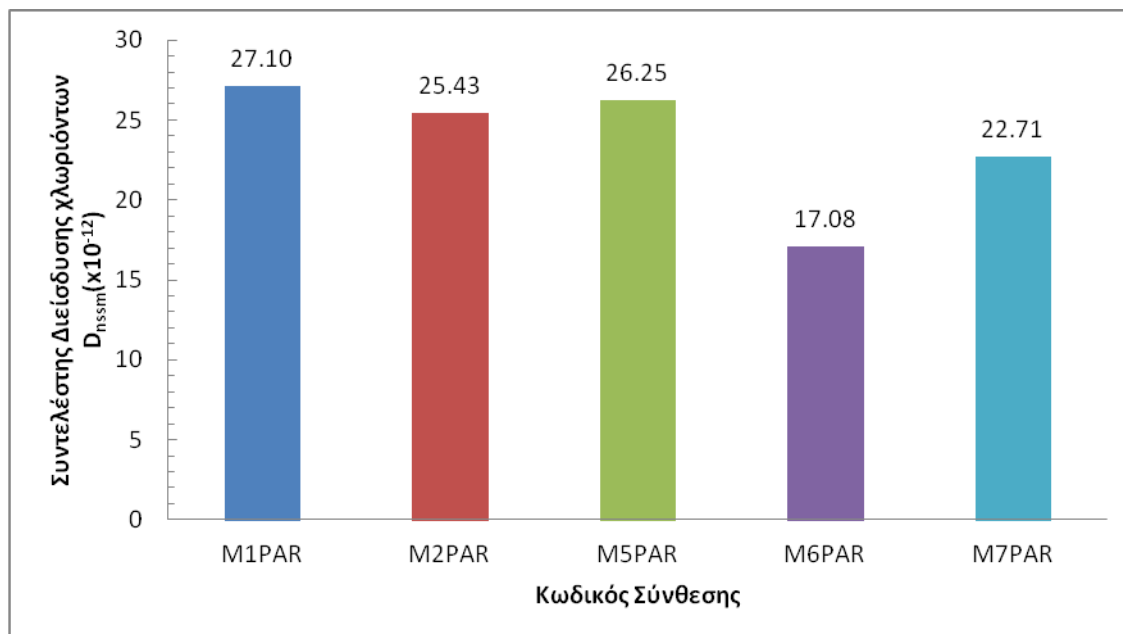
Πίνακας 5.34: Πειραματικές μετρήσεις στα ιασμένα δοκίμια παράλληλα στο επίπεδο της ρωγμής σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492.

ΣΥΝΘΕΣΗ	ΔΟΚΙΜ. ΤΑΣΗ (V)	ΔΟΚΙΜ. ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ (mm)	ΜΕΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ (mm)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ (*10 ⁻⁴ - 12m ² /s)
M1PAR	30.00	0.062	25.00	0.051	25.20	0.070	49.67	47.54	27.10
M2PAR	30.00	0.102	20.00	0.065	20.40	0.060	49.17	36.14	25.43
M5PAR	29.70	0.073	25.10	0.061	25.30	0.086	48.17	47.75	26.25
M6PAR	30.00	0.054	30.00	0.056	28.80	0.079	47.83	38.00	17.08
M7PAR	30.00	0.054	30.00	0.055	29.10	0.066	49.17	48.68	22.71

Πίνακας 5.35: Κατάταξη ιασμένων δοκιμίων σε κατηγορίες αντίστασης έναντι διείσδυσης χλωριόντων κατά τη διεύθυνση παράλληλα στη ρωγμή σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492.

Κωδικός Σύνθεσης	Συντελεστής Διείσδυσης D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Ποσοστό % μεταβολής D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s) ως προς συμβατικό σκυρόδεμα	Κατηγορία Αντίστασης
M1PAR	27.10	-	Low
M2PAR	25.43	6.16	Low
M5PAR	26.25	3.14	Low
M6PAR	17.08	36.97	Low
M7PAR	22.71	16.20	Low

Παρατηρούμε ότι τα *ιασμένα δοκίμια* όσο αφορά στη διείσδυση χλωριόντων παράλληλα στη διεύθυνση της ρωγμής όλες οι συνθέσεις ανήκουν σε *χαμηλή* κατηγορία αντίστασης, και παρουσιάζουν εμφανώς αυξημένο συντελεστή διείσδυσης εν συγκρίσει με τα δοκίμια αναφοράς. Κατά αύξοντα συντελεστή διείσδυσης οι συνθέσεις κατατάσσονται ως εξής: **M6PAR < M7PAR < M2PAR < M5PAR < M1PAR**.

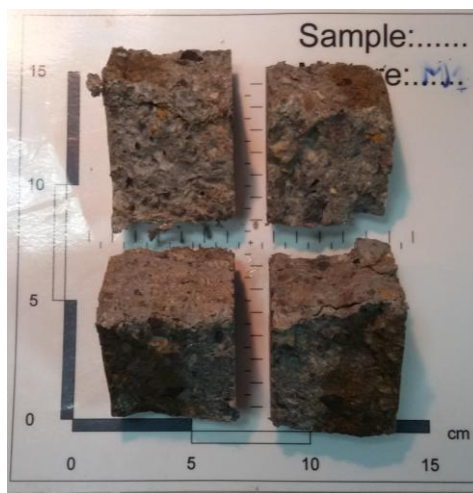


Σχήμα 5.18: Συντελεστής διείσδυσης $D_{nssm} (x10^{-12} m^2/s)$ στη διεύθυνση παράλληλα στη ρωγμή σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492 για τα ιασμένα δοκίμια.

Πίνακας 5.36: Πειραματικές μετρήσεις στα ιασμένα δοκίμια κάθετα στο επίπεδο της ρωγμής σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492.

ΣΥΝΘΕΣΗ	ΔΟΚΙΜ. ΤΑΣΗ (V)	ΔΟΚΙΜ. ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ (A)	ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ (mm)	ΜΙΕΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ (mm)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ (*10 ⁻¹² m ² /s)
M1VER	30	0.062	25	0.05	25.2	0.07	49.67	30.82	17.17
M2VER	30	0.102	20	0.07	20.4	0.06	49.17	25.50	17.51
M5VER	29.7	0.073	25.1	0.06	25.3	0.086	48.17	35.82	19.41
M6VER	30	0.054	30	0.06	28.8	0.079	47.83	25.79	11.36
M7VER	30	0.054	30	0.06	29.1	0.066	49.17	27.93	12.68

Παρατηρούμε ότι τα *ιασμένα δοκίμια* όσο αφορά στη διείσδυση χλωριόντων κάθετα στη διεύθυνση της ρωγμής παρουσιάζουν εμφανώς μειωμένο συντελεστή διείσδυσης εν συγκρίσει με τη διεύθυνση παράλληλα στη ρωγμή, γεγονός αναμενόμενο αφού η διείσδυση των χλωριόντων καθίσταται ευκολότερη όταν αυτά συναντήσουν μια δίοδο, όπως είναι η ρωγμή (**Σχήμα 5.19**).



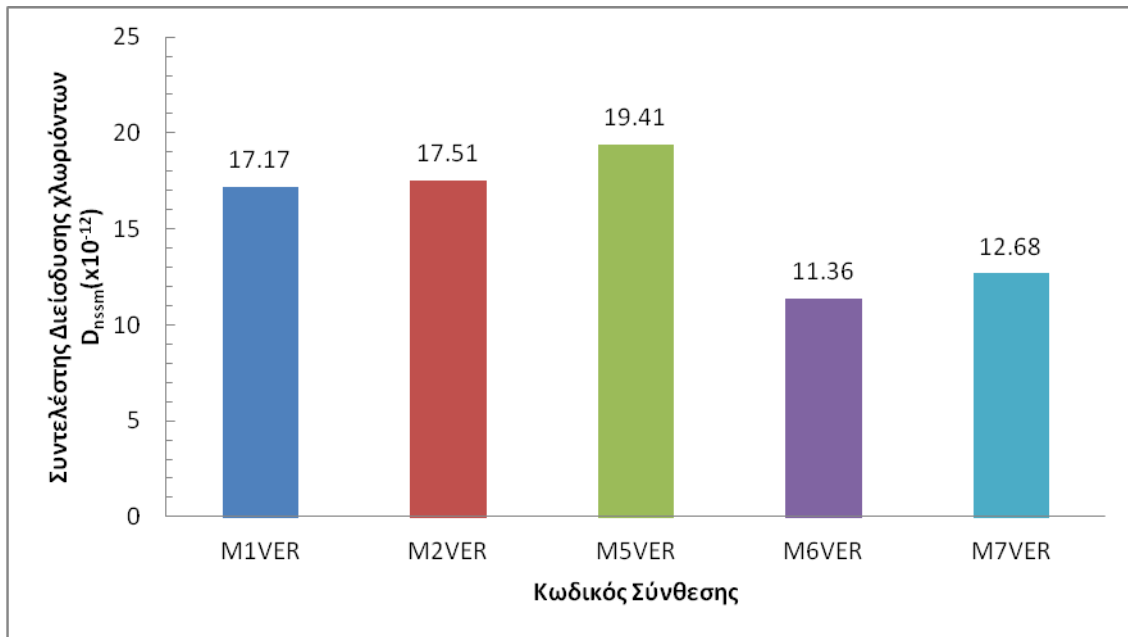
Σχήμα 5.19: Εικόνα ιασμένου δοκιμίου M1 μετά το ψεκάσμο του με νιτρικό άργυρο. Με το τεμαχισμό του σε 4 τμήματα φαίνεται το μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης στο μέσον του δοκιμίου όπου βρίσκονταν η ρωγμή.

Ασφαλώς κατά τη στερεοσκοπική επιθεώρηση σε κάποιες περιπτώσεις παρατηρήθηκε σφράγισμα της ρωγμής, όμως το υλικό σφράγισης ως τσιμεντοειδές υλικό παρουσιάζει μεγαλύτερη διαπερατότητα σε σχέση με μια τυχαία θέση στην οποία υπάρχει τσιμεντόπαστα και αδρανή. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται και από τις μετρήσεις των βαθών διείσδυσης κάθετα στη ρωγμή (**Σχήμα 5.11**). Παρατηρούμε ότι στα άκρα του δοκιμίου (xd4, xd5, xd7, xd8) το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων, (δηλαδή το εύρος που χρωματίστηκε λευκό μετά το ψεκάσμο με νιτρικό άργυρο), είναι μικρότερο σε σχέση με αυτό στο μέσο του δοκιμίου όπου υπήρχε η ρωγμή (xd1, xd2, xd3). Κατά αύξοντα συντελεστή διείσδυσης οι συνθέσεις κατατάσσονται ως εξής:

$M6VER < M7VER < M1VER < M2VER < M5VER$.

Πίνακας 5.37: Κατάταξη ιασμένων δοκιμίων σε κατηγορίες αντίστασης έναντι διείσδυσης χλωριόντων κατά τη διεύθυνση κάθετα στη ρωγμή σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492.

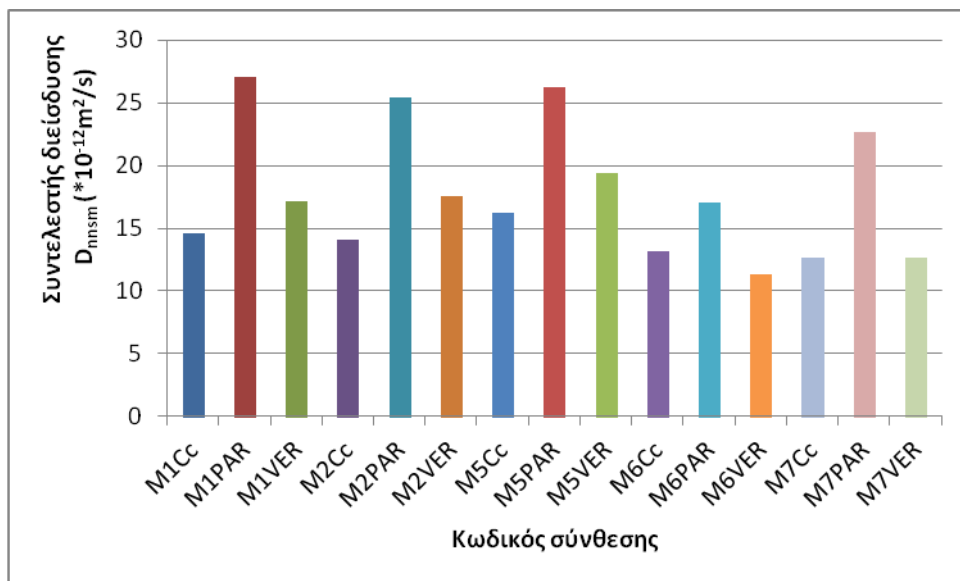
Κωδικός Σύνθεσης	Συντελεστής Διείσδυσης D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Ποσοστό % μεταβολής D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) ως προς συμβατικό σκυρόδεμα	Κατηγορία Αντίστασης
M1VER	17.17	-	Low
M2VER	17.51	-1.98	Low
M5VER	19.41	-13.05	Low
M6VER	11.36	33.84	Moderate
M7VER	12.68	26.15	Moderate



Σχήμα 5.20: Συντελεστής διείσδυσης D_{nssm} ($x10^{-12}$ m^2/s) κατά τη διεύθυνση κάθετα στη ρωγμή σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492 για τα ιασμένα δοκίμια.

Συγκριτικά αποτελέσματα για δοκίμια ελέγχου και δοκίμια αναφοράς

Για λόγους εποπτείας παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5.21** συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα διείσδυσης χλωριόντων κατά το NT Build 492 για όλες τις συνθέσεις, τόσο για τα δοκίμια ελέγχου όσο και για τα ιασμένα δοκίμια στη διαύθυνση παράλληλα και κάθετα στη ρωγμή.



Σχήμα 5.21: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα συντελεστή διείσδυσης

D_{nssm} ($x10^{-12}$ m^2/s) κατά το NT Build 492.

Προκύπτει ότι όσο αφορά στις συνθέσεις M1,M2,M5 ο συντελεστής διείσδυσης στα δοκίμια ελέγχου έχει τη μικρότερη τιμή, ενώ αυξημένη τιμή παρουσιάζεται στα ιασμένα δοκίμια στη διεύθυνση κάθετα στη ρωγμή και μέγιστη γίνεται η τιμή του στα ιασμένα δοκίμια παράλληλα στη ρωγμή (**Πίνακας 5.38**). Όσο αφορά στη σύνθεση M7 οι τιμές των συντελεστών διείσδυσης στα δείγματα ελέγχου και στα ιασμένα δείγματα κάθετα στη ρωγμή είναι σχεδόν ίσοι, ενώ αυξημένος είναι ο συντελεστής διείσδυσης των ιασμένων δοκιμίων παράλληλα στη ρωγμή. Ωστόσο η σύνθεση M6 παρουσιάζει εμφανώς καλύτερα αποτελέσματα αφού στα ιασμένα δοκίμια στη διεύθυνση κάθετα στη ρωγμή ο συντελεστής διείσδυσης είναι μικρότερος από αυτόν στο αντίστοιχο δοκίμιο ελέγχου της σύνθεσης. Επιπλέον τα *ιασμένα* δοκίμια της σύνθεσης M6 έχουν το *μικρότερο* συντελεστή διείσδυσης από όλες τις συνθέσεις ανά διεύθυνση. Επομένως από τις μετρήσεις διείσδυσης χλωριόντων κατά το Πρότυπο NT Build 492, προκύπτει ότι η σύνθεση M6 έχει καλύτερη συμπεριφορά έναντι *ανθεκτικότητας*.

Πίνακας 5.38: Συντελεστής διείσδυσης D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m²/s) κατά το NT Build 492.

Σύνθεση	Συντελεστής Διείσδυσης D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s)		
	CONTR	VER	PAR
M1	14.56	17.17	27.10
M2	14.07	17.51	25.43
M5	16.27	19.41	26.25
M6	13.13	11.36	17.08
M7	12.61	12.68	22.71

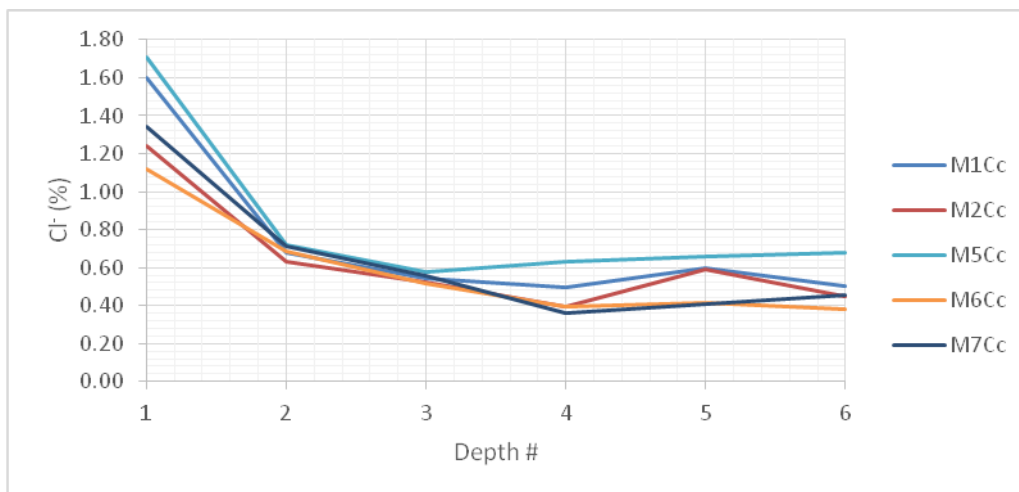
5.4.2 Προσδιορισμός συντελεστή διάχυσης χλωριόντων με το Πρότυπο Nord Test Build 443.

Δοκίμια Ελέγχου

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα δοκίμια ελέγχου με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στο **Κεφάλαιο 4.5.2 (Πίνακας 5.39, Σχήμα 5.22)**.

Πίνακας 5.39: Αποτελέσματα από πειραματική διαδικασία προσδιορισμού των χλωριόντων για τα δοκίμια ελέγχου σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 443.

	Βάθος	Μάζα	AgNO ₃	NH ₄ SCN	Cl ⁻
	(mm)	(g)	(mL)	(mL)	(%)
M1Cc	0 - 5	2.501	15	3.70	1.60
	5 - 10	5.005	15	5.45	0.68
	10 - 15	3.721	10	4.30	0.54
	15 - 20	4.605	10	3.55	0.50
	20 - 25	1.188	10	8.00	0.60
	25 - 30	1.630	10	7.70	0.50
M2Cc	0 - 5	2.512	15	6.20	1.24
	5 - 10	5.011	15	6.10	0.63
	10 - 15	4.040	10	4.05	0.52
	15 - 20	3.687	10	5.90	0.39
	20 - 25	1.527	10	7.45	0.59
	25 - 30	2.268	10	7.15	0.45
M5Cc	0 - 5	2.559	15	2.65	1.71
	5 - 10	5.046	15	4.80	0.72
	10 - 15	4.702	10	2.30	0.58
	15 - 20	2.823	10	4.95	0.63
	20 - 25	1.402	10	7.40	0.66
	25 - 30	1.716	10	6.70	0.68
M6Cc	0 - 5	2.564	15	6.90	1.12
	5 - 10	4.983	15	5.40	0.68
	10 - 15	3.381	10	5.05	0.52
	15 - 20	3.927	10	5.65	0.39
	20 - 25	1.616	10	8.10	0.42
	25 - 30	2.543	10	7.25	0.38
M7Cc	0 - 5	2.507	15	5.50	1.34
	5 - 10	1.870	15	11.25	0.71
	10 - 15	3.897	10	3.90	0.55
	15 - 20	3.417	10	6.50	0.36
	20 - 25	1.778	10	7.95	0.41
	25 - 30	1.917	10	7.55	0.45

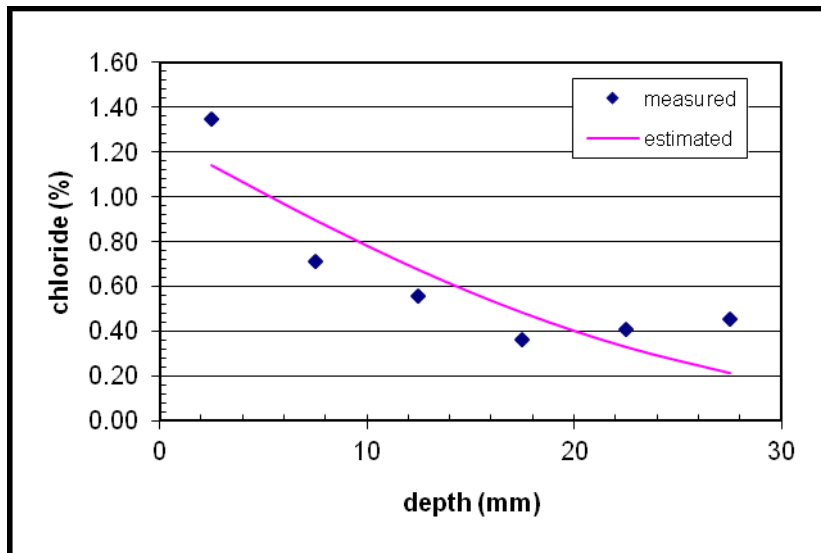


Σχήμα 5.22: Ποσοστά % Cl για τα 5 βάθη από τα οποία λήφθηκε υλικό για τα δοκίμια ελέγχου.

Ενδεικτικά παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του συντελεστή διάχυσης για το δοκίμιο της σύνθεσης M7Cc: Ο όγκος V_{AgNO_3} του $AgNO_3$ που τοποθετείται είναι 15 mL για τα 2 πρώτα βάθη, και 10mLγια τα επόμενα βάθη. Επίσης ζυγίζεται η ποσότητα του σκυροδέματος $m_{\text{δείγματος}}$ που χρησιμοποιείται σε κάθε βάθος, ενώ σημειώνεται και ο όγκος V_{NH_4SCN} του NH_4SCN που απαιτείται για τον αποχρωματισμό του διαλύματος. Σύμφωνα με την εξίσωση υπολογίζεται η επί τις εκατό περιεκτικότητα σε Cl (measured) για κάθε βάθος. Έπειτα σύμφωνα με την εξίσωση υπολογίζεται η εκτιμώμενη ποσότητα Cl (estimated) η οποία υπακούει στην εξίσωση (4.11), καθώς και το ποσοστό % του τετραγώνου της απόκλισης της μετρημένης τιμής από την εκτιμώμενη. Ουσιαστικά η καμπύλη παλιδρόμησης χαράσσεται ώστε να έχουμε την ελάχιστη δυνατή απόκλιση από τις μετρημένες τιμές (**Πίνακας 5.40**) και κατ' αυτό το τρόπο προσδιορίζεται ο συντελεστής διάχυσης.

Πίνακας 5.40: %Cl του δοκιμίου M7Cc που προέκυψαν από τη πειραματική μέτρηση και από το θεωρητικό μοντέλο. Απόκλιση μεταξύ των τιμών αυτών.

x (mm)	Cl (%)		
	measured	estimated	$d(\text{meas-est})^2$
2.5	1.34	1.142	0.0405
7.5	0.71	0.897	0.0348
12.5	0.55	0.675	0.0144
17.5	0.36	0.484	0.0146
22.5	0.41	0.331	0.0061
27.5	0.45	0.215	0.0568



Σχήμα 5.23: Ανάλυση παλινδρόμησης. %Cl (measured και estimated) συναρτήσει του βάθους για το δοκίμιο M7Cc.

Σύμφωνα με τα παραπάνω προσδιορίστηκαν οι συντελεστές διάχυσης (**Πίνακας 5.41**).

Πίνακας 5.41: Συντελεστής διάχυσης και παράμετροι προσδιορισμού αυτού για τα δοκίμια ελέγχου σύμφωνα με το Πρότυπο NT443.

Σύνθεση	D_c (m^2/s)	C_0	R
M1Cc	7.76E-11	1.384	0.6030
M2Cc	11.4E-11	1.076	0.5916
M5Cc	11.5E-11	1.394	0.4806
M6Cc	8.81E-11	1.067	0.8193
M7Cc	6.62E-11	1.268	0.7607

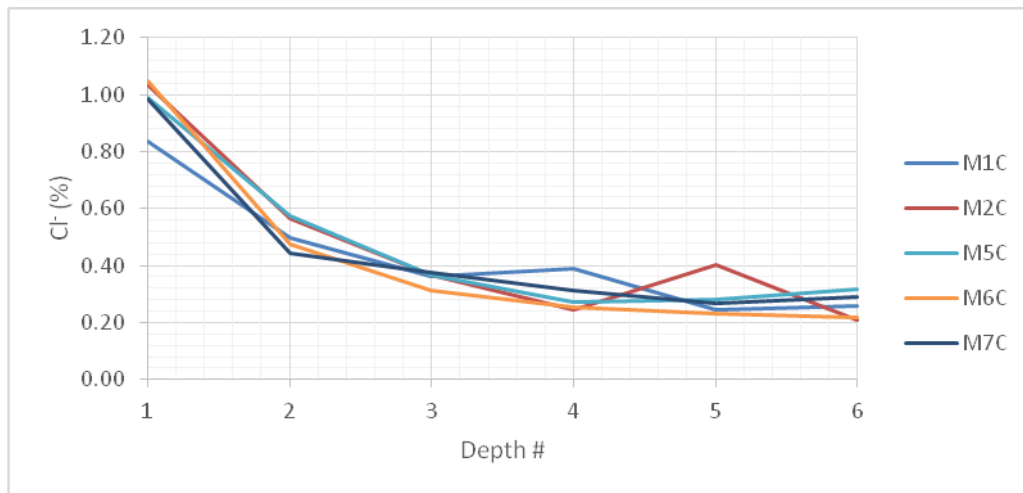
Παρατίθενται οι συντελεστές διάχυσης D_c (m^2/s) όπως προέκυψαν από τη πειραματική διαδικασία κατά το Πρότυπο Nordest Build Test 443 (**Πίνακας 5.41**). Με βάση τα αποτελέσματα αυτά καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για τα δοκίμια ελέγχου καλύτερη συμπεριφορά έναντι διάχυσης χλωριόντων παρουσιάζει η σύνθεση M7 και ακολουθούν οι συνθέσεις M1, M6, M2, M5.

Ιασμένα δοκίμια

Με τη μέθοδο παλινδρόμησης ανάλυσης, και έπειτα από τον υπολογισμό των χλωριόντων (Πίνακας 5.42) γίνεται ο προσδιορισμός του συντελεστή διάχυσης D_c (m^2/s) για κάθε σύνθεση (Πίνακας 5.43) και παρατηρούμε ότι ως προς τα *ιασμένα δοκίμια* καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει η *σύνθεση M6*, με το μικρότερο συντελεστή διάχυσης D_c και ακολουθούν οι συνθέσεις *M5* και *M2, M7, M1*.

Πίνακας 5.42: Αποτελέσματα από πειραματική διαδικασία προσδιορισμού των χλωριόντων για τα *ιασμένα δοκίμια* σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 443.

	Βάθος	Μάζα	AgNO ₃	NH ₄ SCN	Cl ⁻
	(mm)	(g)	(mL)	(mL)	(%)
M1C	0 - 5	2.507	15	9.10	0.83
	5 - 10	5.044	15	7.90	0.50
	10 - 15	2.738	10	7.20	0.36
	15 - 20	2.690	10	7.05	0.39
	20 - 25	1.603	10	8.90	0.24
	25 - 30	2.122	10	8.45	0.26
M2C	0 - 5	2.551	15	7.55	1.04
	5 - 10	5.200	15	6.70	0.57
	10 - 15	4.222	10	5.65	0.37
	15 - 20	3.500	10	7.60	0.24
	20 - 25	1.324	10	8.50	0.40
	25 - 30	2.485	10	8.55	0.21
M5C	0 - 5	2.502	15	8.00	0.99
	5 - 10	5.016	15	6.90	0.57
	10 - 15	3.611	10	6.25	0.37
	15 - 20	4.355	10	6.65	0.27
	20 - 25	1.947	10	8.45	0.28
	25 - 30	2.127	10	8.10	0.32
M6C	0 - 5	2.541	15	7.50	1.05
	5 - 10	5.041	15	8.25	0.47
	10 - 15	3.388	10	7.00	0.31
	15 - 20	3.557	10	7.45	0.25
	20 - 25	1.468	10	9.05	0.23
	25 - 30	1.779	10	8.90	0.22
M7C	0 - 5	2.539	15	7.95	0.98
	5 - 10	5.183	15	8.50	0.44
	10 - 15	3.084	10	6.75	0.37
	15 - 20	4.329	10	6.20	0.31
	20 - 25	1.784	10	8.65	0.27
	25 - 30	2.142	10	8.25	0.29



Σχήμα 5.24: Ποσοστά % Cl για τα 5 βάθη από τα οποία λήφθηκε υλικό για τα ιασμένα δοκίμια.

Πίνακας 5.43: Συντελεστής διάχυσης D_c (m^2/s) και παράμετροι προσδιορισμού αυτού για τα ιασμένα δοκίμια σύμφωνα με το Πρότυπο NT 443.

Σύνθεση	D_c (m^2/s)	C_0	R
M1C	8.26E-11	0.803	0.8436
M2C	5.23E-11	1.016	0.7964
M5C	5.80E-11	0.970	0.8080
M6C	3.35E-11	1.070	0.8463
M7C	6.08E-11	0.910	0.7422

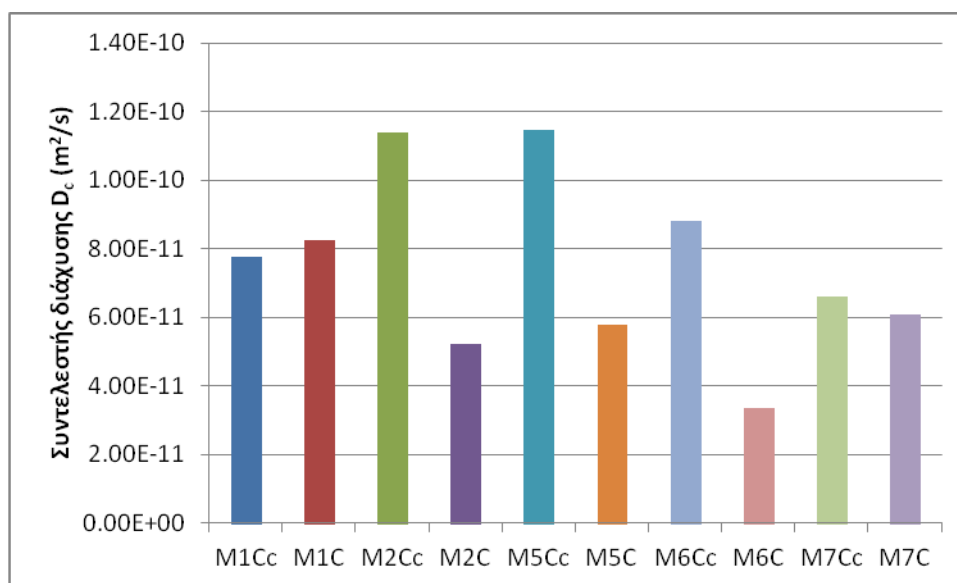
Δοκίμια ελέγχου και ιασμένα δοκίμια

Από τη πειραματική διαδικασία σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 443 προκύπτει ότι τα ιασμένα δοκίμια παρουσιάζουν αυξημένη αντίσταση έναντι διείσδυσης σε χλωριόντα σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς. Το γεγονός αυτό γίνεται αντιληπτό αν εξετάσουμε το λόγο $D_c(M_{XC})/D_c(M_{XCc})$ (Πίνακας 5.44). Ο λόγος αυτός είναι μικρότερος της μονάδας, εξαίρεση ωστόσο αποτελεί η σύνθεση M1 η οποία όμως δεν περιέχει τα πρόσθετα που κινητοποιούν την ίαση του σκυροδέματος. Βελτιωμένη συμπεριφορά μετά την ίαση παρουσιάζει η σύνθεση M6, καθώς έχει το μικρότερο λόγο $D_c(M_{XC})/D_c(M_{XCc})$, ενώ κατά αύξοντα λόγο ακολουθούν οι συνθέσεις M5, M2, M7, M1.

Πίνακας 5.44: Σύγκριση συντελεστή διάχυσης D_c (m^2/s) σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 443 μεταξύ των δοκιμών ελέγχου και των ιασμένων δοκιμών.

Σύνθεση	$D_c(M_{xc})/D_c(M_{xcc})$
M1	1.1
M2	0.5
M5	0.5
M6	0.4
M7	0.9

Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.25** και σύμφωνα και με τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω (**Πίνακας 5.44**) τα ιασμένα δοκίμια παρουσιάζουν μειωμένη διάχυση χλωριόντων σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς. Επιπλέον, το ιασμένο δοκίμιο της σύνθεσης M6 παρουσιάζει το μικρότερο συντελεστή διάχυσης μεταξύ όλων των δοκιμών ιασμένων και μη. Επομένως καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η *σύνθεση M6* με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής NT Build 443 είναι η αποτελεσματικότερη ως προς την *ανθεκτικότητα*.



Σχήμα 5.25: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα συντελεστή διάχυσης D_c (m^2/s) για όλες τις συνθέσεις.

5.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων των πειραματικών διαδικασιών προσδιορισμού συντελεστή διάχυσης χλωριόντων σύμφωνα με τα Πρότυπα NT Build 492 και 443.

Παρουσιάζονται για καλύτερη εποπτεία τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του προσδιορισμού συντελεστή διάχυσης για τα δυο Πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν για τα δοκίμια ελέγχου και τα ιασμένα δοκίμια αντίστοιχα (Πίνακας 5.45, Πίνακας 5.46).

Πίνακας 5.45: Δείγματα Ελέγχου- Σύγκριση συντελεστών D_{nssm} (m^2/s), D_C (m^2/s) Προτύπων NT Build 492 και NT Build 443.

Σύνθεση	NT492	NT443
	D_{nssm} (m^2/s)	D_C (m^2/s)
M1Cc	1.46E-11	7.76E-11
M2Cc	1.41E-11	11.4E-11
M5Cc	1.63E-11	11.5E-11
M6Cc	1.31E-11	8.81E-11
M7Cc	1.26E-11	6.62E-11

Πίνακας 5.46: Ιασμένα δείγματα-Σύγκριση συντελεστών $D_{par_{nssm}}$ (m^2/s), $D_{ver_{nssm}}$ (m^2/s), D_C (m^2/s) των Προτύπων NT Build 492 και NT Build 443.

Σύνθεση	NT492		NT443
	$D_{par_{nssm}}$ (m^2/s)	$D_{ver_{nssm}}$ (m^2/s)	D_C (m^2/s)
M1C	2.71E-11	1.72E-11	8.26E-11
M2C	2.54E-11	1.75E-11	5.23E-11
M5C	2.63E-11	1.94E-11	5.80E-11
M6C	1.71E-11	1.14E-11	3.35E-11
M7C	2.27E-11	1.27E-11	6.08E-11

Παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει κατά το Πρότυπο NT Build 492 παρουσιάζουν μειωμένο συντελεστή διεύθυνσης. Ωστόσο οι μετρήσεις αυτές έχουν προκύψει έπειτα από εξαναγκασμένη διεύθυνση λόγω επιβολής δυναμικού. Έτσι, τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει με το Πρότυπο NT443 θεωρούνται σαφώς πιο αξιόπιστα καθώς οι πειραματικές συνθήκες προσομοιάζουν με καλύτερο τρόπο τις πραγματικές συνθήκες στις οποίες εκτίθενται οι κατασκευές.

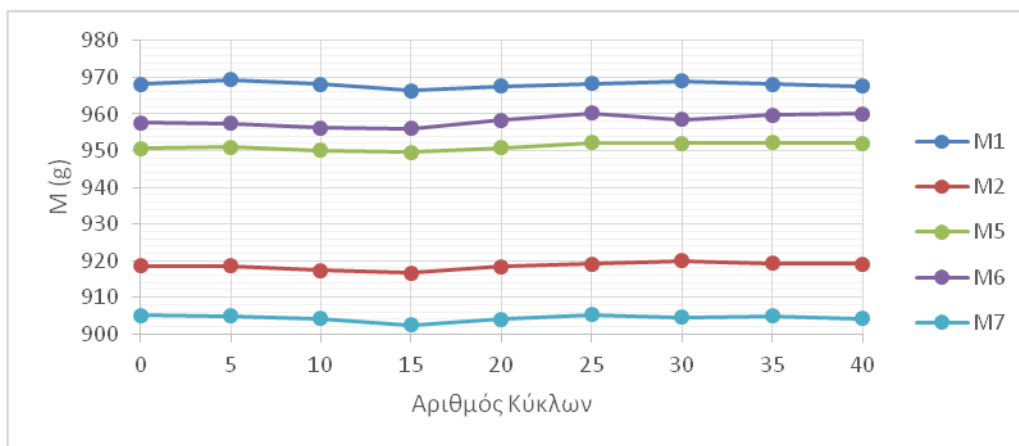
5.5 Κύκλοι ξήρανσης-εμβάπτισης

Για τη δοκιμή ξήρανσης-εμβάπτισης χρησιμοποιήθηκαν πέντε ιασμένα δοκίμια κονιάματος (ένα από κάθε σύνθεση). Ανά 5 κύκλους μετρούνταν οι μάζες των δοκιμίων, ενώ τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε συνολικά 40 επαναλαμβανόμενους κύκλους. Παρουσιάζονται οι μετρούμενες μάζες των δοκιμίων πριν την υποβολή τους στη δοκιμή ξήρανσης-εμβάπτισης (μάζες αναφοράς, 0 κύκλοι), και μετά από 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, και 40 επαναλαμβανόμενους κύκλους (Πίνακας 5.47).

Πίνακας 5.47: Μάζες των δοκιμίων κατά τη δοκιμή ξήρανσης-εμβάπτισης.

Κύκλοι	Μάζα(g)				
	M1	M2	M5	M6	M7
0	968.20	918.63	950.70	957.58	905.07
5	969.44	918.65	950.93	957.43	904.87
10	968.10	917.36	950.09	956.15	904.12
15	966.41	916.62	949.53	956.05	902.48
20	967.60	918.40	950.87	958.34	903.95
25	968.28	919.09	952.26	960.33	905.30
30	969.07	920.00	951.97	958.51	904.50
35	968.10	919.24	952.22	959.73	904.84
40	967.66	919.16	952.02	960.13	904.14

Στο Σχήμα 5.26 παρουσιάζονται γραφικά οι τιμές των μαζών των δοκιμίων σε συνάρτηση με τον αριθμό των επαναλαμβανόμενων κύκλων ξήρανσης-εμβάπτισης.



Σχήμα 5.26: Μεταβολή μάζας δοκιμίων M (g) όταν αυτά υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ξήρανσης-εμβάπτισης.

Παρατηρείται ότι οι μάζες των δοκιμίων παραμένουν πρακτικά σταθερές. Η σταθερότητα των μαζών των δοκιμίων υποδεικνύει την ικανοποιητική ανθεκτικότητα των ιασμένων δοκιμίων σκυροδέματος σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ξήρανσης-εμβάπτισης. Εξίσου ικανοποιητικά ήταν τα αποτελέσματα των κύκλων ξήρανσης-εμβάπτισης που πραγματοποιήθηκαν σε αντίστοιχα δοκίμια κονιαμάτων των ίδιων συνθέσεων [49].

5.6 Κύκλοι ψύξης-απόψυξης

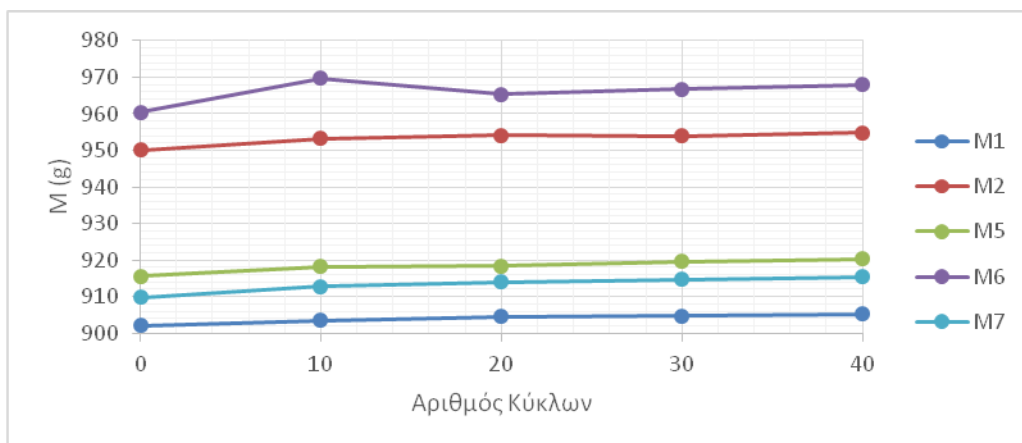
Για τη δοκιμή ψύξης-απόψυξης χρησιμοποιήθηκαν 5 ιασμένα δοκίμια σκυροδέματος (ένα από κάθε σύνθεση). Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε 40 επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης. Σε κάθε κύκλο τα δοκίμια τοποθετούνταν 4 ώρες στη ψύξη και έπειτα 4 ώρες στη κατάψυξη. Πραγματοποιούνται ζυγίσεις των μαζών των δοκιμίων ανά 10 κύκλους σε κορεσμένα με νερό δοκίμια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Πριν από κάθε ζύγιση, τα δοκίμια τοποθετούνταν για 2 ημέρες στο νερό.

Πριν την εφαρμογή των επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης τα δοκίμια ζυγίστηκαν μετά από παραμονή 7 ημερών σε νερό ώσμωσης ούτως ώστε να είναι κορεσμένα. Οι μάζες αυτές αποτέλεσαν τις μάζες αναφοράς. Παρουσιάζονται οι μετρούμενες μάζες όλων των δοκιμίων τόσο πριν την υποβολή τους στη δοκιμή ψύξης-απόψυξης (μάζες αναφοράς), όσο και μετά από 10, 20, 30 και 40 επαναλαμβανόμενους κύκλους (Πίνακας 5.48).

Πίνακας 5.48: Μάζες δοκιμίων κατά την επιβολή τους σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης.

Κύκλοι	Μάζα (g)				
	M1	M2	M5	M6	M7
0	902.17	950.18	915.53	960.44	909.76
10	903.55	953.27	918.21	969.68	912.82
20	904.57	954.07	918.43	965.32	914.00
30	904.66	953.98	919.63	966.83	914.68
40	905.26	954.88	920.30	967.91	915.43

Στο Σχήμα 5.27 παρουσιάζονται γραφικά οι μέσες τιμές των μαζών των δοκιμίων σε συνάρτηση με τον αριθμό των επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης.



Σχήμα 5.27: Μεταβολή μάζας δοκιμίων M(g) κατά την επιβολή τους σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης.

Γίνεται αντιληπτό από το **Σχήμα 5.27** ότι οι μάζες των δοκιμίων παραμένουν πρακτικά σταθερές. Η σταθερότητα των μαζών των δοκιμίων υποδεικνύει ότι οι συνθέσεις ικανοποιούν τις απαιτήσεις ως προς την ανθεκτικότητα σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης. Εξίσου ικανοποιητικά ήταν τα αποτελέσματα των κύκλων ψύξης-απόψυξης που πραγματοποιήθηκαν σε αντίστοιχα δοκίμια κονιαμάτων των ίδιων συνθέσεων [49].

6 Συμπεράσματα

Τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα εξής:

- Η στερεοσκοπική επιθεώρηση δείχνει ότι η αυτο-ίαση των δοκιμίων σκυροδέματος λειτούργησε ικανοποιητικά, καθώς παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του πλάτους των ρωγμών, ενώ σε μερικές ρωγμές παρατηρήθηκε πλήρης ίαση.
- Οι δοκιμές ανθεκτικότητας πιστοποίησαν την αποτελεσματική αυτο-ίαση στα δοκίμια που ελέγχθηκαν.
- Οι τιμές του πορώδους και της υδατοαπορροφητικότητας των ιασμένων δοκιμίων ήταν υψηλότερες από αυτές των δοκιμίων ελέγχου καθώς ακόμα και για πλήρη ίαση των ρωγμών αυτές σφραγίζονται με τσιμεντοειδές υλικό που ασφαλώς είναι πιο περατό από το σκυρόδεμα (τσιμεντοειδές υλικό και αδρανή). Ωστόσο είναι φανερό ότι τα ιασμένα δοκίμια σκυροδέματος παρουσίασαν γενικά καλή συμπεριφορά στη δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας και πορώδους. Η δοκιμή αυτή θα μπορούσε να αξιοποιηθεί ως ένας πρώτος δείκτης διάγνωσης της αποτελεσματικής ή όχι αυτο-ίασης των δομικών υλικών.
- Όλες οι συνθέσεις παρουσίασαν πολύ καλή συμπεριφορά στις δοκιμές ξήρανσης-εμβάπτισης και ψύξης-απόψυξης, καθώς οι μάζες των δοκιμίων παρέμειναν πρακτικά σταθερές.
- Τα ιασμένα δοκίμια σκυροδέματος επέδειξαν καλή συμπεριφορά στη δοκιμή διάχυσης χλωριόντων και για τις δυο μεθόδους που ακολουθήθηκαν. Παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος κατά το πρότυπο NT Build 492 δίνει καλύτερα αποτελέσματα, δηλαδή μικρότερους συντελεστές διείσδυσης χλωριόντων. Ωστόσο οι μετρήσεις σύμφωνα με το πρότυπο NT Build 443 γίνονται σε συνθήκες που προσομοιάζουν με καλύτερο τρόπο τις συνθήκες έκθεσης μιας κατασκευής σε χλωριόντα και θεωρούνται πιο αξιόπιστες. Σημαντικό είναι το γεγονός πως μετά την ίαση η σύνθεση M6 με το διογκωτικό πρόσθετο και τα καρβοξυλικά οξέα παρουσιάζει μειωμένο συντελεστή διάχυσης χλωριόντων σε σχέση με τις υπόλοιπες συνθέσεις και για τις δυο μεθόδους, γεγονός που υποδεικνύει την ανθεκτικότητα της σύνθεσης.

Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να γίνει στην εφαρμογή και άλλων δοκιμών ανθεκτικότητας, όπως η διαπερατότητα σε αέρα. Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η συγκριτική αξιολόγηση της ανθεκτικότητας δομικών υλικών που έχουν αυτο-ιαθεί με διαφορετικές τεχνικές.

7 Βιβλιογραφία

1. Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ. (2004). Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
2. Τσίμας Σ. (2016). Χημεία και Τεχνολογία Κονιών, Κονιαμάτων και Σκυροδέματος, Σημειώσεις μαθήματος Τεχνολογία δομικών Υλικών, Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών.
3. Μπαδογιάννης Ε. (2016). Σημειώσεις μαθήματος Τεχνολογία δομικών Υλικών, Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών.
4. Kim Van Tittelboom and Nele De Belie. (2013). Self-Healing in Cementitious Materials—A Review, *Materials* 6, 2182-2217.
5. M. Wu et al. (2012) . A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials* 28, 571–583.
6. M. Roig-Flores et al. (2016). Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. *Construction and Building Materials* 114, 447–457.
7. Sakai, Y.; Kitagawa, Y.; Fukuta, T.; Iiba, M. (2003). Experimental study on enhancement of self-restoration of concrete beams using SMA wire. In Proceedings of Conference on Smart Structures and Materials, San Diego, CA, USA.
8. K. Sisomphon et al.(2012). Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. *Cement & Concrete composites* 34, 566-574.
9. T.H. Ahn & T. Kishi (2009). The effect of geo-materials on the autogenous healing behavior of cracked concrete. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – Alexander et al (eds)© 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46850-3.*
10. T-H. Ahn and T. Kishi (2010). Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures. *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol. 8, No. 2, 171-186.
11. Jonkers, H.M. , (2007).Self healing concrete: A biological approach. In *Self Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*; van der Zwaag, S., Ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands; pp. 195–204. [[Google Scholar](#)]
12. Jonkers, H.M.; Schlangen, E. (28 June–1 July 2009.) Towards a sustainable bacterially-mediated self healing concrete. In Proceedings of 2nd International Conference on Self Healing Materials, Chicago, IL, USA,
13. Jonkers, H.M.; Thijssen, A. (4–6 October 2010). Bacteria mediated remediation of concrete structures. In Proceedings of 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure, Delft, The Netherlands,
14. Pang JWC, Bond IP. (2005) ‘Bleeding composites’ – damage detection and self-repair using a biomimetic approach. *Composites Part A*;36:183–8.
15. Pang JWC, Bond IP. (2005) A hollow fibre reinforced polymer composite encompassing self-healing and enhanced damage visibility. *Compos Sci Technol*;65:1791–9.

16. Dry C. (1990). Alteration of matrix permeability, pore and crack structure by the time release of internal chemicals. In: Proceedings of advance in cementitious materials. American Ceramic Society: Gaithersbury, Maryland;. p. 729–68.
17. Dry C. (1994). Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices. *Smart Mater Struct*;3(2):118–23.
18. Dry C, McMillan W. (1996). Three-part methylmethacrylate adhesive system as an internal delivery system for smart responsive concrete. *Smart Mater Struct*;5(3):297–300.
19. Dry C. (2000). Three design for the internal release of sealants, adhesives and waterproofing chemical into concrete to release. *Cem Concr Res*;30:1969–77.
20. Nishiwaki T, Mihashi H, Jang BK, Miura K. (2006). Development of self-healing system for concrete with selective heating around crack. *J Adv Concr Technol*;4(2):267–75.
21. Schleicher L, Green BK. Manifold record material. US patent 2730456; 1956.
22. Ghosh SK, editor. (2006) Functional coatings and microencapsulation: a general perspective. *Functional Coatings*.
23. White SR, Sottos NR, Geubelle PH, Moore JS, Kessler MR, Sriram SR, et al. (2001) Autonomic healing of polymer composites. *Nature*;409(6822):794.
24. Boh B, Šumiga B. (2008). Microencapsulation technology and its applications in building construction materials. *Mater Geoenviron*;55(3):329–44.
25. Tomiuchi S, Nishihama Y. (1986). Inorganic building boards with uniform strength. JP patent 61031338. Matsushita Electric Works, Ltd..
26. Kishi T, Ahn TH, Hosoda H, Suzuki S, Takaoka H. (2007). Self-healing behavior by cementitious recrystallization of cracked concrete. In: Proceedings of the first international conference on self healing materials, Noordwijk, The Netherlands; [in CD].
27. Ahn TH. (2008). Development of self-healing concrete incorporating geomaterials: a study on its mechanism and behavior in cracked concrete. PhD dissertation, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, Japan.
28. Ahn TH, Kishi T. (2010). Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various miner admixtures. *J Adv Concr Technol*;8(2):171–86.
29. Gollapudi UK, Knutson CL, Bang SS, Islam MR. (1995). A new method for controlling leaching through permeable channels. *Chemosphere*;30:695–705.
30. Tittelboom KV, Belie ND, Muynck WD, Verstraete W. (2010). Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cem Concr Res*;40:157–66.
31. Van der Zwaag S. (2010). Routes and mechanisms towards self-healing behavior in engineering materials. *Bull Polish Acad Sci*;58(2):227–36.
32. Wu, M., B. Johannesson, and M. Geiker, (2012). A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials*., 28(1): p. 571-583.
33. Duerig TW, Melton KN, Stockel D, Waymanb CM. (1990) Engineering aspects of shape memory alloys. London: Butterworth-Heinemann;
34. Simon D. (2007). Self-healing concrete– a sustainable future. <www.swieet2007.org.uk/files/SelfHealingConcrete.pdf> (accessed on December, 2010);
35. Jefferson A, Joseph C, Lark R, et al. (2010). A new system for crack closure of cementitious materials using shrinkable polymers. *Cem Concr Res*;40:795–801.

36. Scrivener KL, Damidot D, Famy C. (1999). Possible mechanisms of expansion of concrete exposed to elevated temperatures during curing (also known as DEF) and implications for avoidance of field problems. *Cem Concr Aggr*;21:93–101.
37. Collepardi M. (1999). Damage by delayed ettringite formation – a holistic approach and new hypothesis. *Concr Int*;21(1):69–74.
38. K. Sisomphon et al. (2013). Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials. *Construction and Building Materials* 42, 217–224.
39. M. Roig-Flores et al. (2015). Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. *Construction and Building Materials* 86, 1–11.
40. Κ. Γεωργίου. (2004). Ανθεκτικότητα Σκυροδέματος (Στοιχεία) Και Ελληνικές Πρακτικές Κατασκευής. Περίληψη Ομιλίας.
41. S. Tsivilis et al. (2003). The permeability of Portland limestone cement concrete. *Cement and Concrete Research* 2345, 1–7.
42. Τσιβιλής Σ.(2009). Προχωρημένες Εργαστηριακές Ασκήσεις Υλικών. Μελέτη Παραμέτρων που Επιδρούν στην Υδατοαπορροφητικότητα του Σκυροδέματος, 2-4.
43. Neville (1995). *Properties of Concrete*, 5, ISBN: 978-0-273-75580-7
44. Nordest Build 492. (1999). Concrete, Mortar And Cement-Based Repair Materials. Chloride Migration Coefficient From Non-Steady-State Migration Experiments
45. Ασπρογέρακας Π. Αριστείδης. (2013). Συγκριτική Αξιολόγηση Ανθεκτικότητας Γεωπολυμερών από Ιπτάμενη Τέφρα Και Τσιμεντοκονιαμάτων, 133-137.
46. Nordest Build 443. (1995). Concrete, Hardened. Accelerated Chloride Penetration.
47. ΕΛΟΤ 196-2. (2000). Μέθοδοι δοκιμών τσιμέντου: Χημική ανάλυση τσιμέντου, 2, 38.
48. Κ. Ασπιώτης. (2013). Μελέτη Αυτο-ίασης (Self-Healing) Κονιαμάτων Τσιμέντου. Μεταπτυχιακή Εργασία Ε.Μ.Π.
49. Α. Κοσμαδάκη. (2017). Αξιοποίηση δοκιμών ανθεκτικότητας για τον έλεγχο της αυτό-ίασης (self-healing) τσιμεντοειδών κονιαμάτων. Μεταπτυχιακή Εργασία Ε.Μ.Π.

Βιογραφικό Σημείωμα
Άννα Ντάσκα
Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΠΡΟΣΩΠΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Διεύθυνση: Κοκκινόπουλου 6Α, Γουδί, Τ.Κ. 15773

E-mail: annacvnt@hotmail.gr

Ημ. Γέννησης: 12 Νοεμβρίου 1991

ΣΠΟΥΔΕΣ

10/2016-σήμερα **Δ.Π.Μ.Σ. «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών».**
Συντονιζούσα σχολή: Χημικών Μηχανικών,Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
(Ε.Μ.Π).

Μέσος όρος μαθημάτων: 8,62.

Τίτλος διπλωματικής εργασίας: «Αυτο-ίαση(self-healing) σκυροδέματος με χρήση κατάλληλων προσμίκτων. Δοκιμές ανθεκτικότητας».

10/2009-
11/2015 **Δίπλωμα Σχολής Πολιτικών Μηχανικών.Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**
(Ε.Μ.Π). Βαθμός: 7,16/10.

Κατεύθυνση: Δομοστατικός Μηχανικός.

Διπλωματική Εργασία: «Αντισεισμικός Σχεδιασμός Πενταόροφου Μεταλλικού Κτιρίου με συνδέσμους δυσκαμψίας». Εκπόνηση εργασίας : τομέας Μεταλλικών κατασκευών, έμφαση στον αντισεισμικό σχεδιασμό με βάση τους Ευρωκώδικες. Εργαλεία: Robot Structural Analysis της Autodesk.

Υπεύθυνος Καθηγητής: Παύλος Θανόπουλος. Βαθμός: 9,5/10.

6/2009 **Απολυτήριο Γενικού Λυκείου Κρεμαστής Ρόδου.** Βαθμός: 19,7/20 (άριστα)

ΔΙΑΚΡΙΣΕΙΣ/ΥΠΟΤΡΟΦΙΕΣ

2009 Υποτροφία από την τράπεζα Eurobank για την επίτευξη του καλύτερου γενικού μέσου όρου στο Γενικό Λύκειο Κρεμαστής, κατά το σχολικό έτος 2008-2009.

2008 Υποτροφία από τη λέσχη LIONS ως πρώτης μαθήτριας στο Γενικό Λύκειο Κρεμαστής κατά το σχολικό έτος 2007-2008.

2007 Island Games 2007: Επιλογή μου ως εκπροσώπου-αθλήτριας της Ρόδου στους αγώνες, με συμμετοχή αθλητών από νησιά όλου του κόσμου και κατάκτηση της 12^{ης} θέσης, International Island Games Association, Ρόδος, 30 Ιουνίου-6 Ιουλίου 2007.

2002-2009 Βραβεύσεις από το Πολιτιστικό Σύλλογο «Κερωνιάτης» Ρόδου για τις άριστες επιδόσεις μου κατά τα σχολικά έτη 2002 έως 2009.

2002-2009 Κατάκτηση μεταλλίων σε Δωδεκανησιακό και Αιγαιοπελαγίτικο επίπεδο και συμμετοχή σε τελικούς Πανελληνίων Πρωταθλημάτων ανοιχτού στίβου.

ΕΠΙΣΚΕΨΕΙΣ (Field trips)

4/2015 Επίσκεψη –αξιολόγηση κτιρίων στην Κεφαλονιά (Ληξούρι) μετά το σεισμό με ομάδα καθηγητών του Ε.Μ.Π. (Χ.Μουζάκης, Κ.Τρέζος, Ι.Σιγάλας, Χ.Ζέρης).

ΣΥΝΕΔΡΙΑ/ΗΜΕΡΙΔΕΣ

2017 Υπεύθυνη υλοποίησης και παρουσίασης πειραμάτων στο Athens' Science Festival, Πολυχώρος Τεχνόπολις, Αθήνα, 29 Μαρτίου-2 Φεβρουαρίου 2017.

2016 Πανόραμα Επιχειρηματικότητας και Σταδιοδρομίας, Ερευνητικό Κέντρο Στρατηγικής Διοίκησης των Επιχειρήσεων και Επιχειρηματικότητας, Μέγαρο Διεθνές Συνεδριακό Κέντρο Αθηνών, 1 - 3 Απριλίου 2016.

2010 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο για την υγεία και την ασφάλεια στο χώρο εργασίας, ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε(Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας), Ξενοδοχείο Χίλτον Αθήνα, 29-30 Νοεμβρίου 2010.

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ

Πολύ καλή γνώση του MSOffice.

Πολύ καλή γνώση του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD της Autodesk.

Πολύ καλή γνώση του σχεδιαστικού προγράμματος Allplan της Nemetschek.

Πολύ καλή γνώση του προγράμματος Robot Structural Analysis της Autodesk.

Πολύ καλή γνώση της γλώσσας προγραμματισμού Fortran.

Καλή γνώση του σχεδιαστικού προγράμματος SketchUp της Trimble Navigation.

Καλή γνώση του προγράμματος Sofistik στο πλαίσιο ομαδικής εργασίας με θέμα το σχεδιασμό σιδηράς γέφυρας.

ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

Αγγλικά: Πολύ Καλή γνώση (C1, ALCE Advanced Level Certificate in English).

ΠΡΟΣΩΠΙΚΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΑ

Στίβος: Πολύχρονη συμμετοχή σε Πανελλήνια Πρωταθλήματα και διακρίσεις σε Δωδεκανησιακό επίπεδο.

Συμμετοχή σε χορευτικές και θεατρικές ομάδες.

Εθελοντική εργασία: συμμετοχή στην οργάνωση και την πραγματοποίηση του 10^{ου} και 11^{ου} Φεστιβάλ των Πολιτιστικών Ομάδων Φ.Ε.Π.Α. (Φοιτητικές Εστίες Πανεπιστημίου Αθηνών).

ΣΥΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΟΛΕΣ

Διαθέσιμες εφόσον ζητηθούν.