



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Ι: ΧΗΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ

**Αξιοποίηση δοκιμών ανθεκτικότητας
για τον έλεγχο της αυτο-ίασης
(self-healing) τσιμεντοειδών
κονιαμάτων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΔΡΟΝΙΚΗ ΚΟΣΜΑΔΑΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΤΣΙΒΙΛΗΣ Σ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, Ιούνιος 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έλαβε χώρα, στο εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας του τομέα Ι της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Σωτήριου Τσιβιλίη.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η μελέτη της ανθεκτικότητας ιασμένων κονιαμάτων επτά διαφορετικών συνθέσεων μέσω δοκιμών κόπωσης. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ήταν η υδατοαπορροφητικότητα, επαναλαμβανόμενοι κύκλοι ξήρανσης-εμβάπτισης και ψύξης-απόψυξης και η διείδυση σε χλωριόντα.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους για τη βοήθεια τους είτε ψυχική είτε επιστημονική, με την οποία συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της συγκεκριμένης μελέτης.

Ιδιαίτερα επιθυμώ να ευχαριστήσω:

- Τον Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, επιβλέποντα μου και δάσκαλο κύριο Σωτήριο Τσιβιλίη για την ανάθεση της παρούσας εργασίας, αλλά και για την εμπιστοσύνη, το ενδιαφέρον και τη στήριξη που μου παρείχε τόσο κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όσο και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τον ευχαριστώ θερμά για τις συμβουλές του καθώς και για το ότι ήταν πάντα δίπλα μου σε κάθε απορία.
- Τον Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Χημικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Κωνσταντίνο Ασπιώτη για την αμέριστη υποστήριξη και βοήθεια του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, για την προθυμία του, την ανεξάντλητη υπομονή καθώς και για το εξαιρετικό κλίμα που δημιούργησε στη μεταξύ μας συνεργασία.
- Τον Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κύριο Ευστράτιο Μπαδογιάννη, για τη βοήθεια του στις δοκιμές διείδυσης χλωριόντων και για το πραγματικό του ενδιαφέρον.
- Τους Διδάκτορες της Σχολής Χημικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Δημήτριο Κιούπη, Αγγελική Σκαροπούλου και Αφροδίτη Ντζιούννη για την ψυχική βοήθεια που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μου καθώς και για την προθυμία τους να με βοηθήσουν ανά πάσα στιγμή.

- Την Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Μαρία Στρατουρά για τη βοήθεια της στις δοκιμές διείδυσης χλωριόντων και για τις συμβουλές της.

Ανδρονίκη Κοσμαδάκη

Αθήνα, Ιούνιος 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή δοκιμών ανθεκτικότητας για τον έλεγχο της αυτο-ίασης (self-healing) τσιμεντοειδών κονιαμάτων. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ήταν η υδατοαπορροφητικότητα, επαναλαμβανόμενοι κύκλοι ξήρανσης-εμβάπτισης και ψύξης-απόψυξης και προσβολή σε χλωριόντα (διείσδυση). Οι απαιτήσεις της σημερινής εποχής για την επίτευξη μεγάλου χρόνου ζωής των κατασκευών, οδηγούν στη διάθεση μεγάλων πόρων για τη συντήρηση και επισκευή αυτών. Δομικά υλικά με δυνατότητα αυτό-ίασης αποτελούν εξέλιξη στον τομέα των κατασκευών με θετική επίδραση τόσο στο κόστος όσο και στην ποιότητα και στη διάρκεια ζωής τους.

Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια κονιαμάτων τσιμέντου 7 διαφορετικών συνθέσεων. Τα δοκίμια είχαν παρασκευαστεί και ωριμάσει για 28 ημέρες. Κατόπιν είχαν αστοχήσει τεχνητά, προς τη δημιουργία ρωγμών και στη συνέχεια είχαν τοποθετηθεί στο νερό για περαιτέρω ενυδάτωση 200 ημερών προκειμένου να λάβουν χώρα οι μηχανισμοί αυτο-ίασης. Κατόπιν πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές ανθεκτικότητας με σκοπό να ληφθούν συμπεράσματα όσον αφορά την επαναφορά των ιδιοτήτων των δοκιμίων μετά την αυτο-ίαση.

Οι δοκιμές ανθεκτικότητας πιστοποίησαν την αποτελεσματική αυτό-ίαση στα δοκίμια που ελέγχθηκαν. Τα ιασμένα δοκίμια κονιάματος παρουσίασαν γενικά καλή συμπεριφορά σε όλες τις πραγματοποιηθείσες δοκιμές. Πιστοποιήθηκε ότι η δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την ταχύτατη διάγνωση της αποτελεσματικής ή όχι αυτο-ίασης των δομικών υλικών. Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να γίνει στην εφαρμογή και άλλων δοκιμών ανθεκτικότητας, όπως η διαπερατότητα σε αέρα και η διάχυση χλωριόντων.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the use of durability tests in order to evaluate the efficiency of self-healing process in cementitious mortars. Durability of self-healed specimens was evaluated by means of sorptivity, resistance to wet-dry cycles, resistance to freezing-thawing cycles and chloride migration coefficient.

Seven cementitious mortars of different composition were prepared and cured for 28 days. Then the specimens were artificially cracked and water-cured for 200 days in order the self-healing progress to take place. The above mentioned durability tests were applied in the self-healed specimens.

The durability tests confirmed the efficient self-healing of the studied specimens. The self-healed mortar specimens showed good behavior in all performed tests. The sorptivity test seems to be a fast and reliable test in order to evaluate the self-healing progress. Further research could include the air permeability and chloride diffusion tests.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Δομικά υλικά με βάση το τσιμέντο.....	13
2.1 Τσιμέντο	13
2.1.1 Γενικά.....	13
2.1.2 Τύποι και σύσταση τσιμέντων.....	14
2.1.3 Μηχανικές, φυσικές και χημικές απαιτήσεις.....	16
2.1.4 Ειδικά τσιμέντα.....	17
2.2 Κονιάματα	18
2.2.1 Διάκριση κονιαμάτων.....	18
2.2.2 Πρώτες ύλες κονιαμάτων.....	18
2.3 Σκυρόδεμα	19
2.3.1 Γενικά.....	19
2.3.2 Ταξινόμηση σκυροδέματος.....	21
2.3.3 Βασικές ιδιότητες σκυροδέματος.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Θεωρητική επισκόπηση της αυτο-ίασης τσιμεντοειδών υλικών.....	26
3.1 Αυτο-ίαση (Self-Healing)	26
3.1.1 Γενικά.....	26
3.1.2 Ιστορική αναδρομή.....	30
3.1.3 Τεχνικές αυτο-ίασης.....	31
3.1.4 Μέθοδοι μέτρησης αυτο-ίασης.....	39
3.2 Αυτο-ίαση μέσω της τεχνικής των διογκωτικών και κρυσταλλικών προσθέτων	40
3.3 Αυτο-ίαση με τη μέθοδο επίστρωσης/κοκκοποίησης φιλμ	42
3.4 Αυτο-ίαση ρωγμών σκυροδέματος μέσω βακτηρίων	45
3.5 Αυτο-ίαση μέσω μικρο/νανο-προσθέτων	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Πειραματικό Μέρος.....	48
4.1 Μελετηθέντα Δοκίμια	48
4.2 Δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας	51
4.3 Ανθεκτικότητα σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ξήρανσης-εμβάπτισης, ψύξης-απόψυξης	52
4.3.1 Δοκιμή ξήρανσης-εμβάπτισης.....	52
4.3.2 Δοκιμή ψύξης-απόψυξης.....	52

4.4 Διείσδυση χλωριόντων	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Αποτελέσματα και συζήτηση αποτελεσμάτων	59
5.1 Δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας	59
5.1.1 Γενικά.....	59
5.1.2 Αποτελέσματα	60
5.2 Ανθεκτικότητα σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ξήρανσης-εμβάπτισης, ψύξης-απόψυξης	69
5.2.1 Δοκιμή ξήρανσης-εμβάπτισης	69
5.2.2 Δοκιμή ψύξης-απόψυξης.....	72
5.3 Διείσδυση χλωριόντων	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Συμπεράσματα	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	90

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1 ..	16
Πίνακας 2.2: Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις τσιμέντων στο EN 197-1	17
Πίνακας 2.3: Προβλεπόμενες χημικές απαιτήσεις προτύπου EN 197-1	17
Πίνακας 2.4: Κατηγορίες σκυροδέματος σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ – 2016	22
Πίνακας 2.5: Κατηγορίες κάθισης	22
Πίνακας 3.1: Σύγκριση μεθόδων αυτο-ίασης.....	38
Πίνακας 3.2: Μέθοδοι αυτο-ίασης και μετρούμενες μεταβλητές.....	39
Πίνακας 3.3: Τεχνικές αυτο-ίασης και μετρούμενες μεταβλητές.....	39
Πίνακας 3.4: Αναλογία ανάμιξης σκυροδέματος.....	42
Πίνακας 3.5: Μέθοδοι αυτο-ίασης.....	42
Πίνακας 4.1: Συνθέσεις κονιαμάτων (% w/w).....	47
Πίνακας 4.2: Αντιστοίχιση αρχικής έντασης ρεύματος με την τελική εφαρμοζόμενη τάση και διάρκεια του πειράματος.....	57
Πίνακας 5.1: Μάζα δοκιμίων (g) πριν και μετά την ξήρανση.....	62
Πίνακας 5.2: Μάζες δοκιμίων (g) συναρτήσει του χρόνου	62
Πίνακας 5.3: Υδατοαπορροφητικότητα δοκιμίων	63
Πίνακας 5.4: Μάζες δοκιμίων M_i ref, M_{vi} ref (g) συναρτήσει του χρόνου	65
Πίνακας 5.5: Υδατοαπορροφητικότητα δοκιμίων M_i ref, M_{vi} ref	65
Πίνακας 5.6: Απορρόφηση νερού κατά τη δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας.....	66
Πίνακας 5.7: Μεταβολή μαζών κατά τους κύκλους ξήρανσης-εμβάπτισης	70
Πίνακας 5.8: Μεταβολή μαζών κατά τους κύκλους ψύξης-απόψυξης.....	72
Πίνακας 5.9: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl ⁻ για το δοκίμιο M_i	75
Πίνακας 5.10: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl ⁻ για το δοκίμιο M_{ii}	76
Πίνακας 5.11: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl ⁻ για το δοκίμιο M_{iii}	77
Πίνακας 5.12: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl ⁻ για το δοκίμιο M_{iv}	78
Πίνακας 5.13: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl ⁻ για το δοκίμιο M_v	80
Πίνακας 5.14: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl ⁻ για το δοκίμιο M_{vi}	81
Πίνακας 5.15: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl ⁻ για το δοκίμιο M_{vii}	82
Πίνακας 5.16: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl ⁻ για το δοκίμιο M_i ref.....	83
Πίνακας 5.17: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl ⁻ για το δοκίμιο M_{vi} ref.....	84
Πίνακας 5.18: Συντελεστές διείσδυσης δοκιμίων.....	86

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.1: Πιθανοί μηχανισμοί αυτό-ίασης σε τσιμεντοειδή υλικά	28
Σχήμα 3.2: Ρωγμές γεμάτες από άσπρο υπόλειμμα: (α) Λευκό υπόλειμμα στην επιφάνεια του δείγματος μετά την ίαση(το πλάτος του δείγματος είναι 40mm) και (β) κρυσταλλικά προϊόντα στις ρωγμές (το πλάτος της ρωγμής είναι περίπου 100μm).....	29
Σχήμα 3.3: Πέτρινη γέφυρα Ρωμαϊκού Υδραγωγείου.....	30
Σχήμα 3.4: (α) Κοίλες ίνες γυαλιού και (β) επουλωτικά συστατικά με φθορίζουσες χρωστικές ουσίες.....	32
Σχήμα 3.5: (α) Βασική μέθοδος μικροενθυλάκωσης και (β) ρήξη μικροκάψουλας	33
Σχήμα 3.6: ESEM εικόνα προϊόντων επούλωσης στην περίπτωση διογκωτικών υλικών	35
Σχήμα 3.7: Αυτο-ίαση με χρήση βακτηρίων στο σκυρόδεμα. Οι μεγαλύτεροι κρύσταλλοι ανθρακικού ασβεστίου (μεγέθους 50-500 μm) βασίζουν την παραγωγή τους στα ενσωματωμένα στην επιφάνεια των ρωγμών βακτήρια	37
Σχήμα 3.8: Χημική δομή του γεω-υλικού.....	40
Σχήμα 3.9: Αξιολόγηση αυτο-ίασης μέσω ρωγμών στο σκυρόδεμα	42
Σχήμα 3.10: Κόκκοι και επικάλυψη με PVA.....	44
Σχήμα 3.11: Διαδικασία επούλωσης ρωγμών μέσω αυτο-ίασης: (α) Χωρίς επίστρωση με αρχικό πλάτος ρωγμής 0,174 mm (β) κόκκοι με επίστρωση φιλμ PVA με αρχικό πλάτος ρωγμής 0,182 mm	44
Σχήμα 3.12: Οπτική εξέταση της επιφάνειας των ρωγμών κατά τη διάρκεια του χρόνου ηλεκτρομεταφοράς.....	45
Σχήμα 3.13: Η συσκευή ηλεκτρομεταφοράς.....	45
Σχήμα 4.1: α) Φωτογραφία δοκιμίου Mi β) Εικόνα από στερεοσκόπιο (×25).....	49
Σχήμα 4.2: α) Φωτογραφία δοκιμίου Mii β) Εικόνα από στερεοσκόπιο (×25).....	49
Σχήμα 4.3: α) Φωτογραφία δοκιμίου Miii β) Εικόνα από στερεοσκόπιο (×25)	49
Σχήμα 4.4: α) Φωτογραφία δοκιμίου Miv β) Εικόνα από στερεοσκόπιο (×25).....	50
Σχήμα 4.5: α) Φωτογραφία δοκιμίου Mv β) Εικόνα από στερεοσκόπιο (×25).....	50
Σχήμα 4.6: α) Φωτογραφία δοκιμίου Mvi β) Εικόνα από στερεοσκόπιο (×25).....	50
Σχήμα 4.7: α) Φωτογραφία δοκιμίου Mvii β) Εικόνα από στερεοσκόπιο (×25).....	51
Σχήμα 4.8: Πειραματική διάταξη μέτρησης υδατοαπορροφητικότητας	52
Σχήμα 4.9: Ηλεκτρική διάταξη	53
Σχήμα 4.10: Γέφυρα ανόρθωσης.....	54
Σχήμα 4.11: Πειραματική διάταξη διείδυσης χλωριόντων σύμφωνα με πρότυπο nordtest build 492.....	55

Σχήμα 4.12: Πειραματική διάταξης διείσδυσης χλωριόντων	56
Σχήμα 4.13: Υπόδειγμα μέτρησης βάθους διείσδυσης χλωριόντων.....	58
Σχήμα 5.1. Πρωτόκολλο μετρήσεων/επεξεργασίας για τον προσδιορισμό της υδατοαπορροφητικότητας	61
Σχήμα 5.2: Μεταβολή μάζας δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου.....	64
Σχήμα 5.3: Υδατοαπορροφητικότητα συνθέσεων	64
Σχήμα 5.4: Μεταβολή μάζας των δοκιμίων αναφοράς Mi ref, Mvi ref και των αντίστοιχων συνθέσεων που είχαν αυτο-ιαθεί	66
Σχήμα 5.5: Απορρόφηση νερού συναρτήσει του χρόνου.....	67
Σχήμα 5.6: Υδατοαπορροφητικότητα των συνθέσεων αναφοράς Mi ref, Mvi ref και των αντίστοιχων συνθέσεων που είχαν αυτο-ιαθεί	68
Σχήμα 5.7: Μάζες δοκιμίων μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους ξήρανσης-εμβάπτισης	71
Σχήμα 5.8: Μάζες δοκιμίων μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης.....	73
Σχήμα 5.9: Πρωτόκολλο επεξεργασίας/μετρήσεων για τον υπολογισμό του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων.....	74
Σχήμα 5.10: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Mi (χωρισμένο σε 2 μέρη)	75
Σχήμα 5.11: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Mi (χωρισμένο σε 2 μέρη)	75
Σχήμα 5.12: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Mii (χωρισμένο σε 2 μέρη).....	76
Σχήμα 5.13: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Mii (χωρισμένο σε 2 μέρη).....	76
Σχήμα 5.14: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Miii (χωρισμένο σε 2 μέρη).....	78
Σχήμα 5.15: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Miii (χωρισμένο σε 2 μέρη).....	78
Σχήμα 5.16: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Miv (χωρισμένο σε 2 μέρη).....	79
Σχήμα 5.17: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Miv (χωρισμένο σε 2 μέρη).....	79
Σχήμα 5.18: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Mv (χωρισμένο σε 2 μέρη)	80
Σχήμα 5.19: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Mv (χωρισμένο σε 2 μέρη)	80
Σχήμα 5.20: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Mvi (χωρισμένο σε 2 μέρη).....	81
Σχήμα 5.21: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Mvi (χωρισμένο σε 2 μέρη).....	81
Σχήμα 5.22: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Mvii (χωρισμένο σε 2 μέρη).....	82
Σχήμα 5.23: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Mvii (χωρισμένο σε 4 μέρη).....	82
Σχήμα 5.24: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Mi ref	84
Σχήμα 5.25: Βάθος διείσδυσης των Cl ⁻ στο δοκίμιο Mvi ref.....	85
Σχήμα 5.26: Συντελεστής διείσδυσης ιασμένων κονιαμάτων και κονιαμάτων αναφοράς των συνθέσεων Mi και Mvi.....	86
Σχήμα 5.27: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων (κάθετα).....	87
Σχήμα 5.28: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων (παράλληλα).....	87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή δοκιμών ανθεκτικότητας για τον έλεγχο της αυτο-ίασης (self-healing) τσιμεντοειδών κονιαμάτων. Οι δοκιμές ανθεκτικότητας που πραγματοποιήθηκαν είναι η υδατοαπορροφητικότητα, επαναλαμβανόμενοι κύκλοι ξήρανσης-εμβάπτισης και ψύξης-απόψυξη και η διείδυση χλωριόντων.

Τα υλικά που εμφανίζουν το φαινόμενο της αυτο-ίασης είναι μια κατηγορία έξυπνων υλικών που έχουν ενσωματωμένη την ικανότητα να αποκαθιστούν ζημιές που προκλήθηκαν από μηχανική καταπόνηση με την πάροδο του χρόνου. Η έμπνευση αυτή προέρχεται από τα βιολογικά συστήματα, τα οποία έχουν την ικανότητα να επουλώνονται κατόπιν τραυματισμών. Ρωγμές και άλλου τύπου βλάβες σε μικροσκοπικό επίπεδο έχει αποδειχθεί πως μεταβάλλουν τις θερμικές, ηλεκτρικές και ακουστικές ιδιότητες του υλικού, και τελικά ο πολλαπλασιασμός τους οδηγεί στην χονδρική αστοχία του υλικού. Σε γενικές γραμμές, οι ρωγμές είναι δύσκολο να ανιχνευθούν σε πρώιμο στάδιο, και η επισκευή τους γίνεται με χειροκίνητη παρέμβαση. Η σπουδαιότητα της αυτο-ίασης τσιμεντοειδών υλικών είναι μεγάλη καθώς ένα υλικό που μπορεί εγγενώς να αποκαταστήσει ζημιές που προκαλούνται από κανονική χρήση μπορεί να μειώσει το κόστος ενός αριθμού διαφορετικών βιομηχανικών διεργασιών. Επίσης οδηγεί στη μείωση της αναποτελεσματικότητας του υλικού που προκαλείται από την υποβάθμιση με την πάροδο του χρόνου, καθώς και στην αποφυγή εξόδων λόγω αστοχίας του. Για ένα υλικό που ορίζεται ως αυτο-ιάσιμο, είναι απαραίτητο η διαδικασία της ίασης να λαμβάνει χώρα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Πρέπει να τονιστεί, ότι η χρήση των αυτο-ιάσιμων τσιμεντοειδών υλικών δεν έχει ως στόχο να αντικαταστήσει τον ανθρώπινο παράγοντα, στον τομέα των κατασκευών, αλλά να εναρμονίσει απόλυτα τις προ-διαγραφές ασφαλείας με τις κατασκευές. Άλλωστε, η σημερινή εποχή, είναι εκείνη η οποία ζητά συνεχώς καινούργια υλικά τα οποία θα αποδίδουν τις μέγιστες ιδιότητες και θα φέρουν αειφορία με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας είναι η εφαρμογή δοκιμών ανθεκτικότητας για τον έλεγχο της αυτο-ίασης (self-healing) τσιμεντοειδών κονιαμάτων επτά διαφορετικών συνθέσεων τα οποία αφού παρασκευάστηκαν και ωρίμασαν στο εργαστήριο, ρηγματώθηκαν και επιδιορθώθηκαν μέσω αυτο-ίασης. Έτσι, εφαρμόστηκαν δοκιμές υδατοαπορροφητικότητας, ξήρανσης-εμβάπτισης, ψύξης-απόψυξης και διείδυσης χλωριόντων. Ακολούθησε συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των ιασμένων δοκιμίων και δοκιμίων αναφοράς, που δεν ρηγματώθηκαν, η οποία οδήγησε σε συμπεράσματα σχετικά με την αποκατάσταση των ιδιοτήτων των τσιμεντοκονιαμάτων.

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 και οι σημαντικότερες ιδιότητες του τσιμέντου Portland καθώς επίσης και μια σύντομη περιγραφή των κονιαμάτων και του σκυροδέματος.
- Κεφάλαιο 3 «Θεωρητική επισκόπηση στην έννοια της αυτο-ίασης τσιμεντοειδών»: Παρουσιάζονται οι τεχνικές αυτο-ίασης τσιμεντοειδών 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 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Δομικά υλικά με βάση το τσιμέντο

2.1 Τσιμέντο

2.1.1 Γενικά

Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1, το οποίο έχει τεθεί σε ισχύ στην Ελλάδα από το 2001, δίνει τον παρακάτω ορισμό για το τσιμέντο:

Τσιμέντο είναι μια υδραυλική κονία, δηλαδή ένα λεπτοαλεσμένο ανόργανο υλικό, το οποίο όταν αναμειχθεί με νερό σχηματίζει μια πάστα που λόγω των αντιδράσεων ενυδάτωσης πήζει και σκληρύνεται έχοντας έκτοτε την ικανότητα να διατηρεί τις αντοχές της και τη σταθερότητα της ακόμα και κάτω από το νερό.

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 αενάως σταθερότητα όγκου.

Ως τσιμέντο Portland ορίζεται το προϊόν που προκύπτει μετά από έψηση σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης (1380-1420°C) ενός κατάλληλα αλεσμένου και πλήρως ομογενοποιημένου μίγματος, που αποτελείται περίπου από 75% ασβεστολιθικά και 25% αργιλοπυριτικά υλικά και συνάλεση του προκύπτοντος προϊόντος, που καλείται κλίνκερ, με την κατάλληλη ποσότητα γύψου.

Ο υδραυλικός χαρακτήρας των τσιμέντων CEM οφείλεται κυρίως στην ενυδάτωση των ασβεστοπυριτικών ενώσεων, αλλά παράλληλα και άλλες χημικές ενώσεις, όπως αυτές του αργιλίου συμμετέχουν στην ανάπτυξη των αντοχών. Το άθροισμα του δραστικού CaO και του δραστικού SiO₂ πρέπει να είναι τουλάχιστον 50% όταν προσδιορίζονται σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-2.

Το τσιμέντο συνίσταται από τα κύρια συστατικά του, τα δευτερεύοντα συστατικά του, το θειικό 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) το οποίο έχει και τον δεσπόζοντα ρόλο, χρησιμοποιούνται η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων (S), διάφορα ποζολανικά υλικά φυσικά (P) ή φυσικά ψημένα (Q), διάφορες 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, στα οποία περιλαμβάνονται και τα υλικά που είναι γνωστά και ως γεμιστικά (fillers). Για τα

δευτερεύοντα συστατικά επιτρέπεται η ενσωμάτωση έως 5% κατά βάρος στο τσιμέντο, ενώ πολλές χώρες κρατούν το ποσοστό αυτό στο 3%. Ως δευτερεύον κυρίως χρησιμοποιείται ένα από τα συστατικά, η προσθήκη των οποίων γίνεται σε υψηλότερο ποσοστό στους αντίστοιχους τύπους τσιμέντου, όπως σκωρία υψικαμίνων, φυσική ποζολάνη ηφαιστειογενούς προέλευσης, βιομηχανική ποζολάνη, ιπτάμενες τέφρες, ψημένος σχιστόλιθος, ασβεστόλιθοι, πυριτική παιπάλη και filler. Ας σημειωθεί ότι ως δευτερεύον δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κύριο συστατικό που θα προσδιορίσει και τον τύπο του τσιμέντου. Έτσι παραδείγματος χάρη ένα τσιμέντο II B-V με 28% ιπτάμενη τέφρα δεν μπορεί να περιέχει ως δευτερεύον συστατικό 5% τέφρα, ενώ μπορεί να περιέχει 5% σκωρία υψικαμίνων, filler ή άλλο υλικό ή και περισσότερα του ενός υλικά αρκεί το ποσοστό τους να μην υπερβαίνει το 5%.

Fillers είναι ειδικά επιλεγμένα φυσικά ή τεχνητά ανόργανα ορυκτά υλικά τα οποία, μετά από κατάλληλη προετοιμασία που στοχεύει κυρίως στη διαμόρφωση της κοκκομετρικής κατανομής τους βελτιώνουν φυσικές ιδιότητες του τσιμέντου όπως π.χ. είναι η εργασιμότητα ενώ παράλληλα δεν αυξάνουν την απαίτηση σε νερό του τσιμέντου και δεν επηρεάζουν αρνητικά την ανθεκτικότητα των σκυροδεμάτων και των κονιαμάτων. Είναι αδρανή ή έχουν ασθενείς υδραυλικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ή ποζολανικές ιδιότητες χωρίς όμως να πρέπει να υπακούουν σε συγκεκριμένες απαιτήσεις.

Το *θειικό ασβέστιο* προστίθεται στα άλλα συστατικά του τσιμέντου κατά την τελική άλεση του κλίνκερ με σκοπό να ρυθμίσει την πήξη του τσιμέντου. Το ακριβές ποσοστό προσθήκης εξαρτάται από την περιεκτικότητα των κύριων συστατικών σε SO_3 καθώς και από τα θειικά του καυσίμου, συνήθως όμως κυμαίνεται μεταξύ 4 και 5% του βάρους του κλίνκερ.

Το *θειικό ασβέστιο* μπορεί να προστεθεί κυρίως ως γύψος ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), που είναι και η περισσότερο συνηθισμένη μορφή, καθώς επίσης και ως ημιυδρική ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$) ή ως ανυδρίτης ($CaSO_4$) που πολλές φορές υπάρχει ως παραπροϊόν διαφόρων βιομηχανικών διαδικασιών.

Τα *πρόσθετα* είναι υλικά τα οποία δεν ανήκουν ούτε στα κύρια ούτε στα δευτερεύοντα συστατικά του τσιμέντου και έχουν σκοπό να βελτιώσουν είτε την παραγωγική διαδικασία είτε τις ιδιότητες του τσιμέντου.

Η ποσότητα των προσθέτων δεν πρέπει να υπερβαίνει σε ξηρή βάση το 1% κ.β. του τσιμέντου για ανόργανα πρόσθετα (εκτός από πιγμέντα) ή το 0,5% για οργανικά πρόσθετα. Τα πρόσθετα αυτά δεν πρέπει να προκαλούν διάβρωση του οπλισμού ή να επιβαρύνουν τις ιδιότητες του τσιμέντου καθώς και των σκυροδεμάτων ή των κονιαμάτων που προκύπτουν από αυτό [1].

2.1.2 Τύποι και σύσταση τσιμέντων

Τα κοινά τσιμέντα που προδιαγράφονται στο ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 υποδιαιρούνται στους παρακάτω πέντε κύριους τύπους:

CEM I, Τσιμέντα Πόρτλαντ

CEM II, Σύνθετα τσιμέντα Πόρτλαντ

CEM III, Σκωριοτσιμέντα

CEM IV, Ποζολανικά τσιμέντα

CEM V, Σύνθετα τσιμέντα

Οι περαιτέρω υποδιαιρέσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1, όπου τα ποσοστά αναφέρονται στο άθροισμα των κύριων και δευτερευόντων συστατικών. Στο τσιμέντο συμμετέχουν επίσης το απαραίτητο θειικό ασβέστιο και τα ενδεχόμενα πρόσθετα.

Από τους πέντε τύπους, το χαρακτηρισμό του Πόρτλαντ έχουν οι δύο πρώτοι τύποι, όπου το κλίνκερ, που είναι και το βασικό συστατικό του τσιμέντου, συμμετέχει τουλάχιστον κατά 65%. Στις κατηγορίες τσιμέντων του τύπου II, εκτός από τα τσιμέντα με πυριτική παιπάλη, διακρίνονται δύο ομάδες Α και Β ανάλογα με το ποσοστό προσθήκης του μετά το κλίνκερ κύριου συστατικού από το οποίο έχει πάρει την ονομασία της η κατηγορία. Στην Α το ποσοστό του κλίνκερ δεν μπορεί να είναι μικρότερο του 80%, ενώ στη Β αυτό κατεβαίνει στο 65%. Τα ποσοστά αυτά διαφοροποιούνται στους τρεις τελευταίους τύπους τσιμέντου, όπου το κλίνκερ δεν είναι απαραίτητα το κύριο συστατικό [1].

Πίνακας 2.1: Τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1

Τύπος	Όνομασία	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	-	-	-	-	-	-	-	
	II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/A-P	80-90	-	-	6-20	-	-	-	-	-	
CEM II	II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	
	II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	
	II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	
	II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	
	II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	
	II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	
	II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	
	II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35		
II/A-M	80-94	6-20									0-5
II/B-M	65-79	21-35									
ΣΚΩΡΙΟΤΣΙΜΕΝΤΑ											
CEM III	III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	
	III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	
ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ											
CEM IV	IV/A	65-89	-	11-35				-	-	-	0-5
	IV/B	45-64	-	36-55				-	-	-	
ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ											
CEM V	V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	0-5
	V/B	20-39	31-50	-	31-50			-	-	-	

*Η σύνθεση είναι % κ.β. χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η γύψος

2.1.3 Μηχανικές, φυσικές και χημικές απαιτήσεις

Οι κανονικές αντοχές του τσιμέντου είναι οι θλιπτικές που προσδιορίζονται σε συμφωνία με το EN 196-1 στις 28 ημέρες και θα πρέπει να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις που δίνονται στον Πίνακα 2.2. Έχουν θεσπισθεί τρεις κατηγορίες αντοχών: 32.5 MPa, 42.5 MPa και 52.5 MPa.

Οι πρώιμες αντοχές μετρούνται στις 2 ημέρες εκτός από την κατηγορία 32.5 όπου και μετρούνται στις 7 ημέρες. Για κάθε κατηγορία προβλέπονται δύο τάξεις πρώιμων αντοχών: η πρώτη αναφέρεται στις κανονικές πρώιμες αντοχές (συμβολισμός με το γράμμα N) και η άλλη, που συμβολίζεται με το γράμμα R, στις μεγάλες πρώιμες αντοχές ή διαφορετικά αντιστοιχεί σε τσιμέντα ταχείας ανάπτυξης αντοχών. Όλα τα όρια φαίνονται στον Πίνακα 2.2.

Όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες, προβλέπεται έλεγχος μόνο της αρχής χρόνου πήξης και της σταθερότητας του όγκου. Και τα δύο αυτά μεγέθη πρέπει να καλύπτουν τις απαιτήσεις του Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις τσιμέντων στο EN 197-1

Κατηγορία αντοχών (ονομαστική)	Αντοχή σε θλίψη (MPa)			Αρχή πήξης (min)	Διόγκωση (mm)
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες		
32,5N	-	≥16	32,5-52,5	≥75	≤10
32,5R	≥10	-	32,5-52,5		
42,5N	≥10	-	42,5-62,5	≥60	
42,5R	≥20	-	42,5-62,5		
52,5N	≥20	-	≥52,5	≥45	≤10
52,5R	≥30	-	≥52,5		

Όσον αφορά τις χημικές απαιτήσεις, ελέγχονται μόνο η απώλεια πύρωσης, το αδιάλυτο υπόλειμμα, τα SO₃, τα χλωριόντα και η ποζολανικότητα. Οι έλεγχοι αυτοί γίνονται στους τύπους και στις κατηγορίες τσιμέντου που αναφέρονται στον Πίνακα 2.3, όπου δίνονται και τα όρια που πρέπει να καλύπτονται [1].

Πίνακας 2.3: Προβλεπόμενες χημικές απαιτήσεις προτύπου EN 197-1

Ιδιότητα	Πρότυπο	Τύπος τσιμέντου	Κατηγορία αντοχών	Απαίτηση % w/w
Απώλεια πύρωσης	EN 196-2	CEM I CEM II	Όλες	≤5,0%
Αδιάλυτο υπόλειμμα	EN 196-2	CEM I CEM II	Όλες	≤5,0%
Θειικά (SO ₃)	EN 196-2	CEM I CEM II CEM IV CEM V	32,5N 32,5R 42,5N	≤3,5%
			42,5R 52,5N 52,5R	≤4,0%
		CEM III	Όλες	
Χλωριόντα	EN 196-2	Όλοι οι τύποι	Όλες	≤0,10%
Ποζολανικότητα	EN 196-5	Όλοι	Όλες	Πρέπει να ικανοποιεί τη δοκιμή ποζολανικότητας

2.1.4 Ειδικά τσιμέντα

Εκτός από τα κοινά τσιμέντα, στην ελληνική και την ευρωπαϊκή αγορά κυκλοφορούν πολλές επιπλέον ποιότητες που έχουν εξειδικευμένες ιδιότητες, διαφοροποιημένη παραγωγή και καλύπτουν απαιτήσεις που δεν προδιαγράφονται στα κοινά τσιμέντα. Από τα τσιμέντα αυτά, άλλα θεωρούνται ως τροποποιημένα Πόρτλαντ ειδικών απαιτήσεων για να καλύψουν εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως είναι τα λευκά τσιμέντα και τα τσιμέντα που ενδείκνυνται για σταθεροποιήσεις φρεατίων άντλησης πετρελαίου, και άλλα έχουν τέτοια σύσταση, ώστε να μπορέσουν να χαρακτηρισθούν ως υδραυλικές κονίες όπως είναι τα διογκούμενα τσιμέντα, τα αλουμινικά τσιμέντα ή τα τσιμέντα τοιχοποιίας, αλλά δε θεωρούνται τσιμέντα Πόρτλαντ [1].

2.2 Κονιάματα

2.2.1 Διάκριση κονιαμάτων

Τα κονιάματα είναι μίγματα μίας ή περισσοτέρων συνδετικών υλών (κονιών), νερού, λεπτόκοκκων αδρανών (<4 mm) και, ενδεχομένως, ειδικών πρόσθετων, τα οποία έχουν αξιόλογη ρευστότητα και πλαστικότητα όταν είναι νωπά. Μετά δε από την πήξη και τη σκλήρυνση της συνδετικής ύλης, αποκτούν μηχανική αντοχή και άλλες φυσικές και χημικές ιδιότητες. Οι ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου κονιάματος εξαρτώνται από το είδος και τις αναλογίες των πρώτων υλών, από τον τρόπο ανάμιξης και μορφοποίησης και από τις συνθήκες που επικρατούν και εφαρμόζονται κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης.

Τα κονιάματα μπορούν να διακριθούν:

- ανάλογα με τον τρόπο πήξης και σκλήρυνσης, που εξαρτάται από το είδος της κονιάς, σε υδραυλικά και αερικά,
- ανάλογα με το φαινόμενο βάρος τους σε ελαφρά (<1500 kg/m³) και σε βαρέα (>1500 kg/m³),
- ανάλογα με το είδος της κονιάς ή των αδρανών σε τσιμεντοκονιάματα, ασβεστοκονιάματα, τσιμεντοασβεστοκονιάματα, ποζολανικά κονιάματα, μαρμαροκονιάματα και γυψοκονιάματα.
- ανάλογα με τη χρήση τους σε κονιάματα δόμησης ή κονιάματα τοιχοποιίας, κονιάματα επιχρισμάτων, ισοπεδωτικά ή κονιάματα εξίσωσης δαπέδων, κονιάματα αποκατάστασης, συγκολλητικά κονιάματα και ειδικά κονιάματα.

Οι επιμέρους κατηγορίες κονιαμάτων, όπως τα θερμομονωτικά, ηχομονωτικά, πυράντοχα κλπ., είναι υποπεριπτώσεις των παραπάνω γενικών διαιρέσεων. Η σύνθεση των μικτών κονιαμάτων εκφράζεται με τρεις αριθμούς, οι οποίοι αναφέρονται με τη σειρά, σε μέρη όγκου τσιμέντου προς ασβέστη προς άμμο. Όταν γίνεται αναφορά σε απλά κονιάματα (με μία κονιά) προτίθεται ο όγκος της κονιάς σε σχέση με τον όγκο της άμμου [2].

2.2.2 Πρώτες ύλες των κονιαμάτων

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή κονιαμάτων είναι η άσβεστος, το τσιμέντο, το νερό και η άμμος. Η φυσική υδραυλική άσβεστος προέρχεται από έψηση ειδικών μαργαϊκών ασβεστόλιθων, που περιέχουν 5-20% αργίλιο. Βάσει της περιεκτικότητας της άσβεστου σε MgCO₃, αυτή διακρίνεται σε κανονική άσβεστο (MgCO₃≤5%), σε μαγνησιακή άσβεστο (5≤MgCO₃≤20%) και σε δολιμιτική άσβεστο (20≤MgCO₃≤40%). Τα κονιάματα μπορούν επίσης να περιέχουν και κάποιες αερικές κονίες, οι συνηθέστερες από τις οποίες είναι η άργιλος, ο πηλός, οι δομικοί γύψοι, οι κονίες ανυδρίτη, οι ποζολάνες και οι ιπτάμενες τέφρες. Όσον αφορά στο τσιμέντο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τύποι CEM I και CEM II κατά το EN 197-1. Στα κονιάματα πολλές φορές χρησιμοποιούνται τσιμέντα τοιχοποιίας, τα οποία καλύπτονται από την

προδιαγραφή EN 413. Το νερό που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι απαλλαγμένο από επιβλαβείς προσμίξεις, όπως οργανικά και ανόργανα οξέα, λίπη και λάδια, διαλυτά σάκχαρα, αιωρούμενες ουσίες και υπερβολικά ποσά διαλυμένων αλάτων, κυρίως θεικών και χλωριούχων. Η άμμος είναι το συνηθέστερο αδρανές υλικό που χρησιμοποιείται στα κονιάματα. Η απαίτηση που σχετίζεται με την άμμο είναι ότι δεν πρέπει να περιέχει προσμίξεις που (i) να είναι ικανές να προκαλέσουν μείωση της αντοχής και της σταθερότητας των κονιαμάτων, (ii) να επηρεάζουν δυσμενώς άλλες ιδιότητες και (iii) να μπορούν να προκαλέσουν επιβλαβείς χημικές αντιδράσεις με την εκάστοτε συνδετική ύλη.

Ειδικότερα, κατά την επιλογή και τη χρήση της άμμου δίνεται έμφαση: (α) στην κοκκομετρική διαβάθμιση, όπου προτιμάται η χρήση αδρανών με σχετικά μεγάλο εύρος προκειμένου να καλύπτουν οι μικροί κόκκοι τα κενά που αφήνουν οι μεγαλύτεροι, (β) στην παρουσία αλάτων και άλλων προσμίξεων, καθώς και χωματοειδών υλικών, που καθιστούν δύσκολη την πρόσφυση μεταξύ της άμμου και του συνδετικού υλικού, και (γ) στην υγρασία, όπου οι αναλογίες ανάμιξης των συστατικών των κονιαμάτων, με βάση τα διάφορα πρότυπα, ισχύουν με την προϋπόθεση ότι η άμμος περιέχει υγρασία περίπου 3%. Ιδιαίτερα ξηρές ή πολύ υγρές άμμοι καταλαμβάνουν διαφορετικό χώρο. Για το λόγο αυτό, κατά τον καθορισμό των αναλογιών ενός κονιάματος, η ποσότητα της άμμου πρέπει να διορθώνεται ανάλογα με την περιεχόμενη υγρασία της [2].

2.3 Σκυρόδεμα

2.3.1 Γενικά

Το σκυρόδεμα είναι ένα τεχνητό δομικό υλικό το οποίο παρασκευάζεται με την ανάμιξη τσιμέντου, αδρανών και νερού και το οποίο στερεοποιείται με τη χημική ένωση του νερού με το τσιμέντο (ενυδάτωση), εγκλωβίζοντας μέσα στη μάζα του τα αδρανή υλικά. Ο όρος αδρανή περιλαμβάνει γενικά την άμμο, το γαρμπίλι και τα σκύρα (χαλίκια). Εκτός από τα υλικά αυτά, με το νέο Ευρωπαϊκό πρότυπο (EN 206-1), προβλέπεται η προσθήκη των άλλων συστατικών (βελτιωτικά πρόσθετα - admixtures και πρόσθετα συστατικά - additions), τα οποία τροποποιούν συγκεκριμένες ιδιότητες του σκυροδέματος.

Για να παρασκευασθεί ένα καλής ποιότητας σκυρόδεμα, δεν αρκεί μόνο η καλή διαλογή και σύνθεση των συστατικών του. Εξίσου σημαντική είναι η διάστρωσή του και η συντήρησή του σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές. Στην Ελλάδα, σχετικές λεπτομερείς οδηγίες υπάρχουν στον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Κ.Τ.Σ. - 97), όπου επίσης δίνονται πολλές πληροφορίες για τον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος.

Εκτός από το τσιμέντο στις πρώτες ύλες του σκυροδέματος περιλαμβάνονται τα αδρανή, το νερό ανάμιξης, τα βελτιωτικά (χημικά) πρόσθετα και τα πρόσθετα συστατικά.

Τα αδρανή υλικά οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι παραμένουν χημικώς αδρανή, σε αντίθεση με το τσιμέντο και το νερό, στη χημική δράση των οποίων οφείλεται η σκλήρυνση του σκυροδέματος. Τα αδρανή υλικά συνδέονται και συγκολλούνται μεταξύ τους και συμβάλλουν, μηχανικά μόνο, στην αντοχή του τελικού προϊόντος. Ως αδρανή υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, θεωρητικά, οποιαδήποτε υλικά συγκεντρώνουν τις τρεις βασικές απαιτήσεις: επαρκή αντοχή, επαρκή πρόσφυση και χημική ανεκτικότητα με την τσιμεντοκονία. Τα καταλληλότερα πετρώματα είναι τα ασβεστολιθικά ή τα πυριτικά. Τα κύρια χαρακτηριστικά των αδρανών, που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος, είναι: η αντοχή τους (αντοχή του μητρικού πετρώματος), η καθαρότητα (η ύπαρξη δηλαδή ή όχι πρόσμικτων ουσιών οι κυριότερες εκ των οποίων είναι η παιπάλη, οι οργανικές προσμίξεις και οι θειούχες ενώσεις), η πρόσφυση με την κονία, η χημική συμπεριφορά τους με άλλα συστατικά του σκυροδέματος, η κοκκομετρική τους διαβάθμιση (σχήμα και μέγεθος των κόκκων) κ.α..

Το νερό είναι ένα από τα δύο ενεργά συστατικά του σκυροδέματος. Μαζί με το τσιμέντο παίρνει μέρος σε σειρά χημικών αντιδράσεων που οδηγούν, με τη δημιουργία ένυδρων κρυστάλλων, στην πήξη και τη σκλήρυνση του μείγματος. Η βασική απαίτηση για το νερό είναι να μην περιέχει συστατικά που μπορούν να βλάψουν ή να επηρεάσουν τις αντιδράσεις ενυδάτωσης. Για το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος υπάρχει μια ανοχή σχετικά με την ποιότητα του, σε αντίθεση με τα νερά που δρουν εξωτερικά και μόνιμα. Και αυτό γιατί η ποσοστιαία αναλογία του νερού ανάμειξης, και συνεπώς και κάθε ξένης ουσίας μέσα σε αυτό, είναι μικρή και εξάλλου οι ουσίες αυτές δρουν μέχρι να εξαντληθούν. Στην περίπτωση όμως εξωτερικών νερών, όπως το θαλασσίνο νερό ή τα νερά αποχετεύσεων, η δράση τους είναι μόνιμη και η ποσότητα των επιβλαβών ουσιών ανεξάντλητη, αφού τα νερά αυτά ανανεώνονται συνεχώς. Οι κυριότερες από τις χημικές ουσίες που έχουν δυσμενή επίδραση στην εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων, με αποτέλεσμα είτε τη μείωση της τελικής αντοχής είτε την καθυστέρηση της πήξης είναι οι ακόλουθες: α. η ζάχαρη, β. τα οξέα, όπως το ανθρακικό οξύ ή άλλα οργανικής προέλευσης, γ. τα λάδια και τα λίπη και δ. οι οργανικές ουσίες. Το χρησιμοποιούμενο νερό πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγραφή EN 1008, ενώ η χρησιμοποίηση νερού από ανακύκλωση πρέπει να γίνεται με βάση το παράρτημα Α της ίδιας προδιαγραφής.

Βελτιωτικά ή χημικά πρόσμεικτα είναι τα υλικά που προστίθενται, σε μικρές ποσότητες σε σχέση με τη μάζα του τσιμέντου, κατά τη διάρκεια της ανάμειξης τους σκυροδέματος με σκοπό να τροποποιήσουν τις ιδιότητες κυρίως του νωπού αλλά και του σκληρυμένου σκυροδέματος. Ανάλογα με την κύρια δράση τους τα υλικά αυτά κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες: α. ρευστοποιητικά (αυξάνουν τη ρευστότητα του σκυροδέματος μειώνοντας την επιφανειακή τάση του νερού και τις δυνάμεις συνοχής μεταξύ των κόκκων του τσιμέντου), β. αερακτικά (αυξάνουν τον περιεχόμενο αέρα του σκυροδέματος και την ρευστότητά του), γ. επιβραδυντικά (απομονώνουν τις ταχύπηκτες αργλικές ενώσεις και κυρίως το C₃A), δ. επιταχυντικά (διευκολύνουν την ενυδάτωση του

C₃A ή/και των πυριτικών ενώσεων) και ε. στεγανωτικά. Εκτός από τα παραπάνω υλικά, υπάρχουν και άλλα ειδικά πρόσμεικτα, όπως τα αντιπαγετικά, τα διογκωτικά και τα αντιδιαβρωτικά.

Τα πρόσθετα συστατικά είναι τα λεπτομερώς διαμερισμένα ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα με στόχο τη βελτίωση ή τη ρύθμιση κάποιων ιδιοτήτων. Το EN 206-1 αναφέρεται σε δύο κατηγορίες προσθέτων: τα σχεδόν αδρανή πρόσθετα (τύπου 1- filler αδρανών με προδιαγραφές σύμφωνες με το prEN 12620 και χρώματα) και τα πρόσθετα που έχουν ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες (τύπου II). Τα τύπου II πρόσθετα συμπεριλαμβάνουν τις Ιπτάμενες Τέφρες, σύμφωνα με το EN 450, και την πυριτική παιπάλη (silica fume), κατά prEN 13263, και ταξινομούνται στις εξής πέντε κατηγορίες: α. υλικά με υδραυλικές ιδιότητες, β. υλικά με ποζολανικές και υδραυλικές ιδιότητες, γ. κανονικές ποζολάνες, δ. υλικά με ισχυρώς ποζολανικές ιδιότητες και ε. υλικά μικρής δραστηριότητας. Οι ιδιότητες των παραπάνω προσθέτων ενισχύονται σημαντικά εάν τα υλικά αυτά αλεσθούν σε μεγάλες λεπτότητες [1].

2.3.2 Ταξινόμηση σκυροδέματος

Τα σκυροδέματα ταξινομούνται βάσει του κριτηρίου των αντοχών θλίψης 28 ημερών για τα σκληρυμένα σκυροδέματα και του κριτηρίου της κατηγορίας κάθισης για τα νωπά σκυροδέματα. Η ταξινόμηση των σκυροδεμάτων βάσει των ανωτέρω κριτηρίων παρουσιάζεται στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 2.4 και Πίνακας 2.5), αντίστοιχα. Η μετάβαση από τη μια κατηγορία στην ανώτερη της προϋποθέτει αύξηση της ποσότητας του περιεχόμενου τσιμέντου (εφ' όσον υπάρχει διαθέσιμος ένας τύπος), που εκφράζεται σε kg τσιμέντου ανά m³ σκυροδέματος. Επίσης, 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 [1]

Πίνακας 2.4: Κατηγορίες σκυροδέματος σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ – 2016

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
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60

Πίνακας 2.5: Κατηγορίες κάθισης

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

2.3.3 Βασικές ιδιότητες σκυροδέματος

Η εργασιμότητα

Με τον όρο εργασιμότητα (workability) χαρακτηρίζεται γενικά η ευκολία με την οποία είναι δυνατόν να μεταφερθεί, διαστρωθεί και συμπυκνωθεί το σκυρόδεμα. Σύμφωνα με έναν άλλον ορισμό, η εργασιμότητα ορίζεται ως το έργο που απαιτείται για να υπερνικηθούν οι εσωτερικές τριβές και να επιτευχθεί πλήρης συμπίκνωση.

Η εργασιμότητα είναι μια πιο πολύ χρήσιμη έννοια στην πράξη, γιατί αποδίδει ακριβώς αυτό που ενδιαφέρει τον κατασκευαστή κατά το χρόνο της σκυροδέτησης. Είναι μια σύνθετη ιδιότητα και συνδέεται με άλλες ρεολογικές ιδιότητες όπως οι παρακάτω:

- α. Η ρευστότητα, που σημαίνει την ευκολία με την οποία ρέει ένα υλικό. Η ρευστότητα εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του νερού ανάμειξης.
- β. Η πλαστικότητα, δηλαδή η ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς διακοπή της συνέχειας του.
- γ. Η συνοχή, που εκφράζει το αποτέλεσμα των δυνάμεων που έλκουν τα μέρη μεταξύ τους και επομένως είναι μία από τις ιδιότητες που συντελούν στην πλαστικότητα.

δ. Η συμπτυκνωσιμότητα, που εκφράζει τη δυνατότητα του υλικού να συμπτυκνωθεί και εξαρτάται από τον αρχικό βαθμό συμπίκνωσης.

Πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος συνεκτικότητα για να εκφρασθεί άλλοτε η εργασιμότητα και άλλοτε η ρευστότητα [1].

Οι αντοχές

Η αντοχή (strength) του σκυροδέματος σε μηχανική καταπόνηση θεωρείται ως η πιο σημαντική ιδιότητα του παρόλο που σε μερικές περιπτώσεις άλλα χαρακτηριστικά του, όπως η ανθεκτικότητα (durability) και η διαπερατότητα (permeability), μπορεί να είναι σημαντικότερα. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η αντοχή δίνει μια συνολική εικόνα της ποιότητας του σκυροδέματος επειδή συνδέεται άμεσα με τη δομή της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας. Επιπρόσθετα, η αντοχή του σκυροδέματος είναι μια αναντικατάστατη μεταβλητή στο σχεδιασμό των κατασκευών και κατά κανόνα προδιαγράφεται και από τους κανονισμούς.

Η αντοχή του σκυροδέματος σε συγκεκριμένη ηλικία, συντήρηση και θερμοκρασία θεωρείται ότι εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες: το λόγο N/T (W/C) και το βαθμό συμπίκνωσης (degree of compaction) [1].

Το πορώδες

Το σκυρόδεμα, όπως και οι φυσικοί λίθοι δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές και πλήρες, αλλά περιέχει πλήθος από εσωτερικές κοιλότητες. Οι κοιλότητες αυτές είναι κενές από στερεό υλικό, γι' αυτό και ονομάζονται πόροι ή κενά. Το σύνολο αυτών των κοιλοτήτων ονομάζεται πορώδες του σκυροδέματος. Οι κοιλότητες αυτές μπορεί να περιέχουν αέρα ή να είναι γεμάτες με νερό. Ανάλογα με την προέλευσή τους διακρίνονται σε κατηγορίες. Έτσι υπάρχουν:

- α. Πόροι των αδρανών υλικών, δηλαδή πόροι των κόκκων της άμμου και των σκύρων.
- β. Πόροι που δημιουργούνται από εγκλεισμό φυσαλίδων αέρα μέσα στο τσιμεντοκονίαμα.
- γ. Πόροι ή τριχοειδή κενά που δημιουργούνται μέσα στην τσιμεντοκονία μετά την εξάτμιση του νερού που περισεύει.
- δ. Κοιλότητες μεταξύ τσιμεντοκονιάματος και αδρανών είτε από κακή πρόσφυση μεταξύ τους, είτε λόγω συστολής του τσιμεντοκονιάματος, είτε από το νερό που συγκεντρώνεται στην κάτω κυρίως πλευρά των κόκκων, λόγω της εξίδρωσης του μείγματος.
- ε. Μακροσκοπικές κοιλότητες που προέρχονται από κακή συμπίκνωση.
- στ. Τριχοειδή κενά δημιουργημένα μετά τις μικρορηγματώσεις που οφείλονται στις συστολές του τσιμεντοκονιάματος ή και στις εξωτερικές καταπονήσεις.

Το ολικό πορώδες εκφράζει το % ποσοστό ή το κλάσμα του όγκου ενός υλικού που καταλαμβάνουν οι πόροι του, όπως φαίνεται και από τη σχέση:

$$\rho = \frac{Vk}{V} = \frac{\rho - \rho\varphi}{\rho}$$

όπου:

ρ : ολικό πορώδες του υλικού του υλικού

V_k : ο όγκος των πόρων (κενών)

V : ο φαινόμενος όγκος του υλικού

$\rho\varphi$: η φαινόμενη πυκνότητα του υλικού

ρ : η πυκνότητα του υλικού

Για το σκυρόδεμα το ολικό πορώδες κυμαίνεται μεταξύ 8 και 25% [1].

Η διαπερατότητα

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαπερατότητα και μέσω αυτής την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος αναλύονται παρακάτω:

1. *Σύσταση του τσιμέντου.* Όταν το σκυρόδεμα περιέχει τσιμέντο σε ποσότητα μεγαλύτερη από 300 kg/m³, έχει μικρό λόγο N/T και έχει γίνει προσεκτική συντήρηση, τότε θα έχει μικρή διαπερατότητα.
2. *Λόγος N/T.* Όταν ο λόγος αυτός υπερβεί την τιμή 0,6, υπάρχει δυσανάλογη αύξηση της διαπερατότητας, επειδή αυξάνεται το μέγεθος και ο αριθμός των τριχοειδών πόρων.
3. *Πορώδες.* Το μέγεθος και η κατανομή των πόρων καθώς και η ποσότητα νερού που περιέχουν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη διαπερατότητα του σκυροδέματος. Συνήθως η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε φυσικές και χημικές επιδράσεις μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε τριχοειδείς πόρους.
4. *Βαθμός συμπύκνωσης.* Με την συμπύκνωση γίνεται προσπάθεια μείωσης των κενών του αέρα στο σκυρόδεμα σε ποσοστό μικρότερο από 1%. Με τη δόνηση κατά τη χύτευση, ο αέρας και το νερό μεταφέρονται προς την επιφάνεια του σκυροδέματος, μειώνοντας έτσι το πορώδες. Με τον τρόπο αυτόν υπάρχει προσωρινή αύξηση της διαπερατότητας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση λόγω της δημιουργίας των τριχοειδών πόρων, οι οποίοι σφραγίζονται με την πρόοδο της ενυδάτωσης.
5. *Συντήρηση.* Η συντήρηση του σκυροδέματος συνίσταται στη διατήρηση ευνοϊκών συνθηκών υγρασίας και θερμοκρασίας ώστε να προχωρήσουν οι αντιδράσεις ενυδάτωσης. Ο ελάχιστος χρόνος συντήρησης εξαρτάται από το λόγο N/T αλλά ένας χρόνος 7 ημερών θεωρείται σε κάθε περίπτωση ικανοποιητικός. Η συντήρηση γίνεται με σκοπό αφενός μεν να συγκρατήσει τη σωστή υγρασία για να γίνει η ενυδάτωση του τσιμέντου, αφετέρου δε να προστατευθεί από τις απότομες αλλαγές της θερμοκρασίας.

6. *Υπαρξη ρωγμών.* Με τις ρωγμές διευκολύνεται η διείσδυση βλαβερών ουσιών στο εσωτερικό της κατασκευής και προς τον οπλισμό του σκυροδέματος. Η δημιουργία τους μπορεί να οφείλεται σε διάφορες αιτίες όπως φυσικές (συστελλόμενα αδρανή, καθίζηση σκυροδέματος), χημικές (διάβρωση οπλισμού, αντίδραση αλκαλίων – αδρανών), θερμικές (ψύξη – απόψυξη, εποχικές μεταβολές της θερμοκρασίας, πρόωρη θερμική μεταβολή) και κατασκευαστικές (υπερφόρτιση, ερπυσμός) [1].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Θεωρητική επισκόπηση της αυτο-ίασης τσιμεντοειδών υλικών

3.1 Αυτο-ίαση (Self-Healing)

3.1.1 Γενικά

Το φαινόμενο της αυτο-ίασης (self-healing) έχει παρατηρηθεί στα τσιμεντοειδή υλικά εδώ και δεκαετίες. Πρακτικά, το σκυρόδεμα κάτω από συγκεκριμένες καταστάσεις (π.χ. όταν υπάρχει νερό βροχής και διοξείδιο του άνθρακα) είναι ικανό να επιδιορθώσει μόνο του τις ρωγμές του με χημικά προϊόντα. [3] Η διαδικασία αυτο-ίασης τσιμεντοειδών υλικών μπορεί να περιλαμβάνει αρκετούς μηχανισμούς. Ένας από τους κύριους μηχανισμούς βασίζεται στην περεταίρω ενυδάτωση και διόγκωση των μη αντιδρώντων μορίων των τσιμεντοειδών υλικών. Τα μόρια αυτά συναντώνται στο τσιμέντο Πόρτλαντ καθώς και σε άλλους τύπους συμβατικών δομικών υλικών, τα οποία δεν είχαν ενυδατωθεί πλήρως κατά το αρχικό στάδιο ενυδάτωσής τους. Ωστόσο, ο μηχανισμός αυτός δεν είναι πολλά υποσχόμενος όσον αφορά στην ίαση τυπικών ρωγμών στο σκυρόδεμα, εξαιτίας της περιορισμένης προοπτικής του και των δυσκολιών στην βελτιστοποίηση της απόδοσης του. Ένας άλλος σημαντικός μηχανισμός περιλαμβάνει την κατακρύμνηση ανθρακικού ασβεστίου, και αποτελεί την κύρια μέθοδο αυτο-ίασης επιφανειακών ρωγμών στο σκυρόδεμα. Υπάρχουν διάφορες πειραματικές μελέτες οι οποίες έχουν αποδείξει ότι η επιδιόρθωση ρωγμών σε τσιμεντοειδή υλικά οδηγεί σε μείωση της διαπερατότητας στο νερό με το χρόνο [4].

Τα τελευταία χρόνια, διάφορα εναλλακτικά τσιμεντοειδή συνδετικά υλικά αλλά και μη τσιμεντοειδή υλικά χρησιμοποιούνται στην έρευνα για την αυτο-ίαση τσιμεντοειδών υλικών. Από τους Hosada et al. [5], Kishi et al. [6], Sisomphon και Corugoglu [7] έχει μελετηθεί, η πιθανή αυτο-ίαση κονιαμάτων και σκυροδέματος που ενσωματώνουν σουλφαργιλικό ασβέστιο μέσω της τεχνικής των διογκωτικών προσθέτων. Επιπλέον ερευνητές [8] αξιολόγησαν τη συμπεριφορά αυτο-ίασης κονιαμάτων με διαφορετικά πρόσθετα όπως ιπτάμενη τέφρα, πυριτική παιπάλη και κρυσταλλικά πρόσθετα. Επίσης, έχει μελετηθεί [9, 10] η πιθανή αυτο-ίαση τσιμεντοειδών υλικών με τη χρήση βακτηρίων καθώς και με τη χρήση μικροκαψουλών από έλαιο κουκουτσιού και περίβλημα από silica gel [11].

Οι Sisomphon et al. ανέφεραν ότι επιφανειακές ρωγμές με πλάτος έως περίπου 400 μm μπορούν να αποκατασταθούν πλήρως εντός 28-56 ημερών με τη χρήση κατάλληλων τσιμεντοειδών προσθέτων. Ωστόσο αν και η εσωτερική ρωγμή κλείνει, παραμένει προβληματική. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, ο μηχανισμός ίασης εσωτερικής ρωγμής βασίζεται στην περεταίρω ενυδάτωση και διόγκωση των μη αντιδρώντων μορίων του σκυροδέματος. Λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας των προϊόντων που έχουν δυνατότητα αυτο-ίασης είναι

απαραίτητος ο έλεγχος του πλάτους της ρωγμής στα τσιμεντοειδή υλικά προκειμένου να επιτευχθεί η αυτο-ίαση τους και η αποκατάσταση της σταθερότητάς τους. [3, 12] Για την επίτευξη στενού ελεγχόμενου πλάτους ρωγμής έχουν αναπτυχθεί και εξελίσσονται συνεχώς σκληρυνόμενα σύνθετα τσιμεντοειδή υλικά, ενισχυμένα με ίνες, τα οποία αναφέρονται ως μηχανικά τσιμεντοειδή (ECC). Οι Li και Yang [12, 13] ανέφεραν ότι είναι δυνατή η πλήρης ανάκτηση των μηχανικών ιδιοτήτων των μηχανικών τσιμεντοειδών σύνθετων υλικών με μέγιστο πλάτος ρωγμής 50 μm . Σε περίπτωση ρωγμών μεταξύ 50 και 150 μm μπορεί να επιτευχθεί μερική ανάκτηση των ιδιοτήτων. Το αρχικό πλάτος ρωγμών καθώς και ο χρόνος ρήξης παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην ικανότητα αυτό-ίασης των υλικών. Υλικά με χαμηλά αρχικά επίπεδα βλάβης και λιγότερες μικρορωγμές εμφανίζουν υψηλότερα επίπεδα μηχανικής ανάκτησης. Ωστόσο, ακόμη και δείγματα με μεγαλύτερες ρωγμές παρουσιάζουν κάποια, έστω και ατελή, επούλωση. Το επίπεδο της διατηρούμενης ακαμψίας μετά απ' τις διεργασίες αυτο-ίασης μειώθηκε σε σχέση με το χρόνο της ρήξης, λόγω της σταδιακής καταπόνησης των τσιμεντοειδών υλικών εξαιτίας της συνεχούς ενυδάτωσης [14].

Σε μια προσπάθεια να βελτιωθούν οι δυνατότητες αυτο-ίασης ενισχυμένων με ίνες σύνθετων τσιμεντοειδών υλικών (SHCC), αξιολογήθηκαν μείγματα αυτών που ενσωμάτωναν διογκωτικά και κρυσταλλικά πρόσθετα. Ερευνήθηκε η επίδραση των πρόσθετων στην επιδιόρθωση των επιφανειακών ρωγμών και στην μηχανική ανάκτηση των προ-ραγισμένων δειγμάτων και εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:

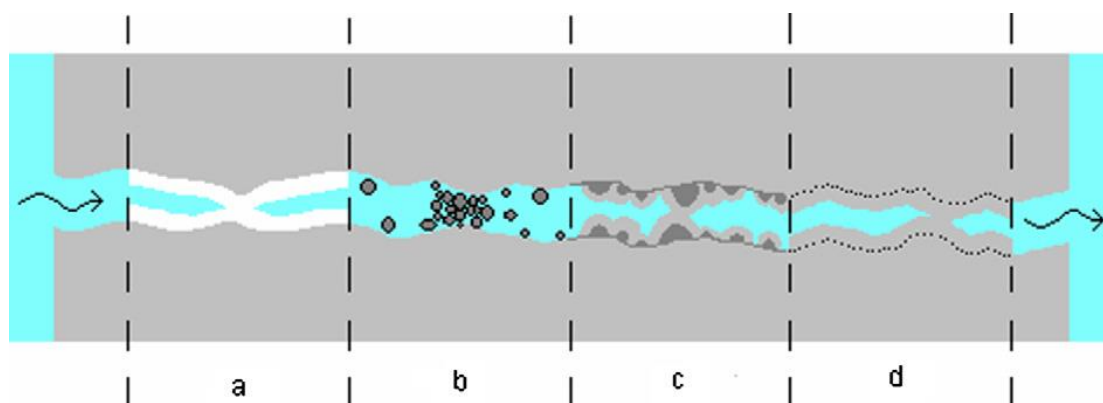
- Η συγκέντρωση των ανθρακικών ιόντων στο νερό παίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία αυτο-ίασης.
- Ο σχηματισμός ανθρακικού ασβεστίου στις ρωγμές είναι προτιμότερος από άποψη υδατοστεγανότητας, ωστόσο μειώνει τη δυνατότητα ανάκτησης των μηχανικών ιδιοτήτων.
- Τα αποτελέσματα από τη χημική ανάλυση έδειξαν ότι τα προϊόντα επούλωσης αποτελούνται από CaCO_3 , C-S-H και ετρινγκίτη ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$)
- Το ποσοστό της αυτο-ίασης εξαρτάται από τις συνθήκες έκθεσης και από το είδος των τσιμεντοειδών υλικών που χρησιμοποιούνται [15].

Πολλές υποδομές σκυροδέματος πάσχουν από σοβαρή υποβάθμιση σε όλο τον κόσμο. Έτσι, οι τεχνικές επιθεώρησης και συντήρησης των δομών σκυροδέματος αποτελούν το επίκεντρο ολοένα αυξανόμενης προσοχής. Ωστόσο, η εφαρμογή συνεχούς ελέγχου και συντήρησης είναι δύσκολη, ιδιαίτερα σε μεγάλης κλίμακας κατασκευής σκυροδέματος, όπως σε υποδομές οι οποίες απαιτούν σημαντικό ποσό εργασίας και κεφαλαίων. Από την άλλη πλευρά, η επιδιόρθωση μπορεί να είναι δύσκολο ή ακατόρθωτο να επιτευχθεί εξαιτίας συνθηκών όπως είναι η θέση της ζημιάς στην δομή. Πολλές υποδομές όπως αυτοκινητόδρομοι και τούνελ βρίσκονται σε συνεχή λειτουργία και έτσι η επιδιόρθωσή τους γίνεται πολύ δύσκολη. Επιπλέον, ακόμη και αν η επιδιόρθωση ήταν δυνατή αρχικά, το κόστος και η ποσότητα δουλειάς που απαιτείται για τη διάγνωση και επιδιόρθωση

μπορεί να είναι απαγορευτικά σε περίπτωση υποδομών μεγάλης κλίμακας. Υπό αυτές τις συνθήκες, η αυτόματη επιδιόρθωση, ή καλύτερα η αυτο-ίαση των επιβλαβών ρωγμών θα ήταν πολύ ελκυστική καθώς δεν απαιτεί ούτε πολλή εργασία ούτε μεγάλα κεφάλαια.

Η εξέλιξη των τεχνητών υλικών που έχουν τη δυνατότητα αυτο-ίασης είναι εμπνευσμένη από διάφορα υλικά στη φύση. Ένα τυπικό παράδειγμα φαινομένου αυτο-ίασης είναι οι κατεστραμμένοι φλοιοί δέντρων και δέρματα ζώων που μπορούν αυτόνομα να επουλωθούν μόνα τους. Αξίζει να σημειωθεί η διαφορά μεταξύ αυτο-ίασης (self-healing) και αυτό-σφράγισης (self-sealing), όπου στη μεν πρώτη έχουμε πλήρη ανάκτηση της αρχικής αντοχής του σκυροδέματος ενώ στην δεύτερη παρά το κλείσιμο των ρωγμών δεν επιτυγχάνεται η ανάκτηση της αρχικής αντοχής του υλικού [16].

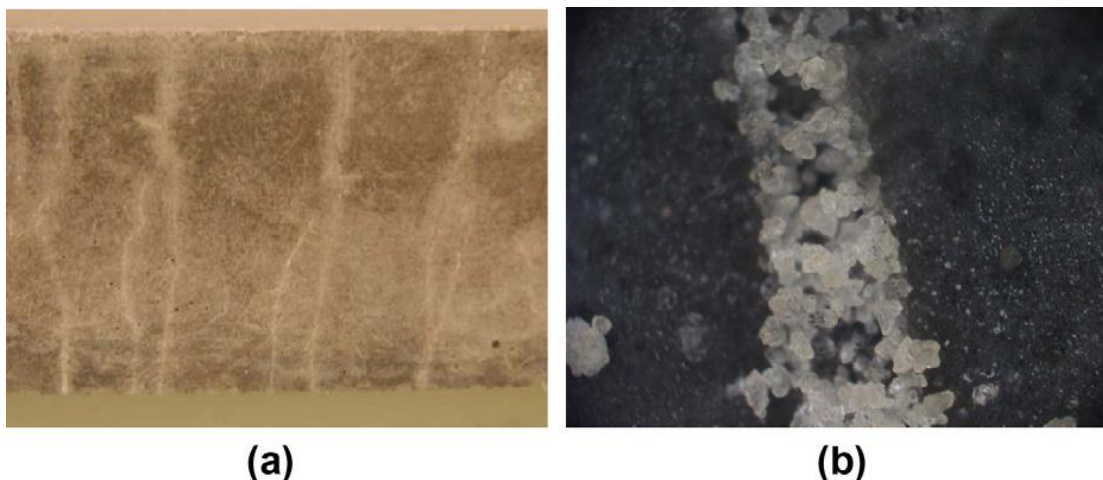
Με βάση ουσιαστικές πειραματικές μελέτες και εμπειρία, πιστεύεται ότι η αυτο-ίαση των ρωγμών στα τσιμεντοειδή υλικά είναι ένας συνδυασμός περίπλοκων χημικών και φυσικών διεργασιών. Όπως αποκαλύφθηκε στις περισσότερες μελέτες τα φαινόμενα αυτό-ίασης οφείλονται σε διαφορετικές πιθανές αιτίες (Σχήμα 3.1) [17].



Σχήμα 3.1: Πιθανοί μηχανισμοί αυτό-ίασης σε τσιμεντοειδή υλικά [17]

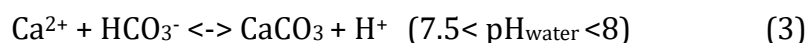
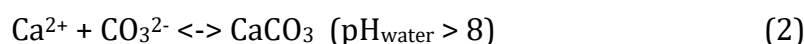
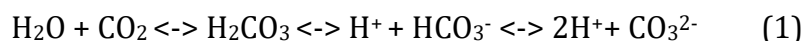
- a) Σχηματισμός ανθρακικού ασβεστίου ή υδροξειδίου του ασβεστίου.
- b) Φράξιμο ρωγμών από ακαθαρσίες του νερού και από ελεύθερα σωματίδια σκυροδέματος τα οποία έχουν προκύψει από θρυμματισμό ρωγμών.
- c) Επιπλέον ενυδάτωση του μη αντιδρώντος τσιμέντου ή τσιμεντοειδών υλικών.
- d) Επέκταση του ενυδατωμένου στρώματος τσιμέντου στη ρωγμή.

Από όλες αυτές τις προτεινόμενες αιτίες ο αρχικός μηχανισμός πιστεύεται ότι αποδίδεται στην κρυσταλλοποίηση του ανθρακικού ασβεστίου. Η άποψη αυτή υποστηρίζεται από το γεγονός ότι στις εξωτερικές επιφάνειες των ρωγμών παρατηρείται συχνά ίζημα ανθρακικού ασβεστίου ως λευκό υπόλειμμα (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Ρωγμές γεμάτες από άσπρο υπόλειμμα. (α) Λευκό υπόλειμμα στην επιφάνεια του δείγματος μετά την ίαση (το πλάτος του δείγματος είναι 40mm) και (β) κρυσταλλικά προϊόντα στις ρωγμές (το πλάτος της ρωγμής είναι περίπου 100μm) [18]

Ως ένα προϊόν ενυδάτωσης του τσιμέντου που διαλύεται στο νερό, το υδροξείδιο του ασβεστίου απελευθερώνεται και διαχέεται κατά μήκος της επιφάνειας των ρωγμών. Στη συνέχεια, ελεύθερα ιόντα ασβεστίου από την ενυδάτωση του τσιμέντου αντιδρούν με διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα. Έτσι, σχηματίζονται κρύσταλλοι που έχουν αυτο-ιαθεί, αναπτύσσονται και στις δύο επιφάνειες των ρωγμών και τέλος γεμίζουν τα κενά. Η διαδικασία χημικής αντίδρασης περιγράφεται ως εξής [4]:



Αρχικά, υπήρχε ο ισχυρισμός ότι η αυτο-ίαση προκαλείται κυρίως από περεταίρω ενυδάτωση των μη ενυδατωμένων συστατικών του τσιμέντου. Όμως αργότερα ανακαλύφθηκε ότι αυτό αφορά μόνο μικρής ηλικίας σκυρόδεμα και βγήκε το συμπέρασμα ότι ο σχηματισμός του ανθρακικού ασβεστίου είναι η πιο πιθανή αιτία αυτό-ίασης σε μεγαλύτερες ηλικίες σκυροδέματος [19].

Τα υλικά που εμφανίζουν το φαινόμενο της αυτο-ίασης είναι μια κατηγορία έξυπνων υλικών που έχουν ενσωματωμένη την ικανότητα να αποκαθιστούν ζημιές που προκλήθηκαν από μηχανική καταπόνηση με την πάροδο του χρόνου. Η έμπνευση αυτή προέρχεται από τα βιολογικά συστήματα, τα οποία έχουν την ικανότητα να επουλώνονται κατόπιν τραυματισμών. Ρωγμές και άλλου τύπου βλάβες σε μικροσκοπικό επίπεδο έχει αποδειχθεί πως μεταβάλλουν τις θερμικές, ηλεκτρικές και ακουστικές ιδιότητες του υλικού, και τελικά ο πολλαπλασιασμός τους οδηγεί στην χονδρική αστοχία του υλικού. Σε γενικές γραμμές, οι ρωγμές είναι δύσκολο να ανιχνευθούν σε πρώιμο στάδιο, και η επισκευή τους γίνεται με χειροκίνητη παρέμβαση.

Ένα υλικό που μπορεί εγγενώς να αποκαταστήσει ζημιές που προκαλούνται από κανονική χρήση μπορεί να μειώσει το κόστος ενός αριθμού διαφορετικών βιομηχανικών διεργασιών. Επίσης οδηγεί στη μείωση της αναποτελεσματικότητας του υλικού που προκαλείται από την υποβάθμιση με την πάροδο του χρόνου, καθώς και στην αποφυγή εξόδων λόγω αστοχίας του υλικού. Για ένα υλικό που ορίζεται ως αυτο-ιάσιμο, είναι απαραίτητο ότι η διαδικασία της ίασης λαμβάνει χώρα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

3.1.2 Ιστορική αναδρομή

Το φαινόμενο της αυτο-ίασης (self-healing) και τα υλικά που είναι σε θέση να θεραπεύονται από μόνα τους, έχουν μακρά ιστορία στο βάθος του χρόνου.

Οι πρώτοι που τα χρησιμοποίησαν ήταν οι Ρωμαίοι μηχανικοί, οι οποίοι κατάφεραν να περάσουν τις κατασκευές τους στο χρόνο και να έλθουν ανέπαφες, από αυτόν, στο σήμερα, λόγω του σχεδιασμού ενός κονιάματος το οποίο είχε ως βάση την ηφαιστειακή τέφρα και τον ασβέστη [1]. Οι κατασκευαστές της Αρχαίας Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, χρησιμοποιούσαν το υλικό αυτό, μαζί με τα τούβλα, ως κόλλα. Το τσιμέντο αυτό, έφερε κάποια χαρακτηριστικά αυτο-ίασης, καθώς ο ασβέστης διαλυόταν με το νερό της βροχής και μετανάστευε μέσω αυτού σε πάσχοντα μέρη του τεχνικού έργου, όπως ρωγμές, όπου και εναποτίθετο με την εξάτμιση του νερού. Η διαδικασία αυτή συνεχιζόταν, μέχρις ότου η ρωγμή να πληρωθεί από το υλικό απορροής των ανωτέρων κονιαμάτων και να κορεσθεί σε αυτό. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η εκάστοτε κατασκευή επισκευαζόταν σε τοπικό επίπεδο.

Ο συγκεκριμένος μηχανισμός που περιγράφηκε παραπάνω, έχει παρατηρηθεί σε πολλά ρωμαϊκά έργα, όπως στην πέτρινη γέφυρα του Ρωμαϊκού Υδραγωγείου (Σχήμα 3.3), καθώς και σε παρόμοιες, νεότερες γέφυρες, από αυτήν, όπου μπορούμε να τις δούμε στο Άμστερνταμ, στην Ουτρέχτη και στο Ντελφτ και ανήκουν στον 18ο αιώνα. Στις συγκεκριμένες, ο τρόπος αυτο-ίασης κατατάσσεται στην ανακρυστάλλωση του ασβεστίτη [20].



Σχήμα 3.3: Πέτρινη γέφυρα Ρωμαϊκού Υδραγωγείου [22]

Από τα παραπάνω παραδείγματα, γίνεται κατανοητό, ότι ένα υλικό δεν πρέπει να είναι απαραίτητως ισχυρό για να πραγματοποιήσει την αυτο-θεραπεία. Κάτι τέτοιο, είναι αντιληπτό, καθώς το ρωμαϊκό κονίαμα έχει καταστεί μηχανικά ως το ασθενέστερο που χρησιμοποιήθηκε μέχρι και σήμερα, με την εξαίρεση όμως, ότι οι κατασκευές που έχουν γίνει με αυτό, έχουν επιβιώσει περισσότερο από 2000 χρόνια. Επίσης, γίνεται σαφές, ότι το βρόχινο νερό και το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) πρέπει να είναι διαθέσιμα, προκειμένου να υπάρξει η διάλυση και παράσυρση του ασβέστη (CaO) προς το σχηματισμό ανθρακικού ασβεστίου (CaCO₃), είτε αυτό δοθεί υπό την μορφή ασβεστίτη είτε υπό αυτήν του αραγωνίτη.

Τα όσα αναφέρθηκαν, λειτούργησαν ως ερεθίσματα στη σύγχρονη ερευνητική κοινότητα, με αποτέλεσμα, ένα αρκετά μεγάλο κομμάτι της να ασχολείται με τη διερεύνηση, υπό διαφορετικές πάντα σκοπίες και προσεγγίσεις, για την εύρεση τεχνικών και υλικών που θα έθεταν καλύτερα, στην σύγχρονη κοινωνία, την έννοια των υλικών αυτο-ίασης ή self-healing materials.

Τα υλικά αυτά, αποτελούν πλέον, ένα νέο ερευνητικό πεδίο στην τεχνολογία σκυροδέματος, όπου η αυτο-θεραπεία θα χρησιμοποιείται στα τσιμεντοειδή υλικά, τα οποία θα αποκαθιστούν από μόνα τους τη φάση ή τη δομή που θα έχει καταστραφεί από κάποιον μηχανισμό φθοράς [3, 21].

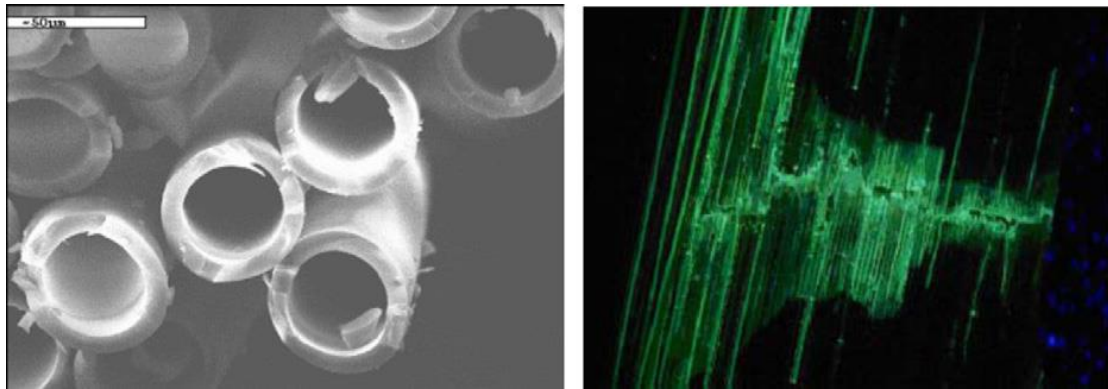
3.1.3 Τεχνικές αυτό-ίασης

Κατεστραμμένες επιφάνειες και ιστοί μπορούν να επιδιορθωθούν, καθώς το υλικό μπορεί να αφομοιώσει θρεπτικά συστατικά για την παραγωγή νέων υποκατάστατων και την επούλωση των κατεστραμμένων τμημάτων. Συνεπώς, για την αυτό-ίαση τσιμεντοειδών, η ουσία είναι να παρέχονται τα απαραίτητα προϊόντα τα οποία θα έχουν τη δυνατότητα να γεμίσουν τις ρωγμές όταν συμβεί η βλάβη. Στη συνέχεια αναφέρονται τεχνικές αυτο-ίασης που έχουν αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών.

- Κοίλες ίνες (Hollow Fibers)

Η βασική ιδέα χρησιμοποίησης των κοίλων ινών είναι να έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύσουν στο εσωτερικό τους κάποια λειτουργικά συστατικά, τα οποία θα ενσωματωθούν σε μια σύνθετη μήτρα. Έτσι σε περίπτωση βλάβης ή ρωγμής, οι παράγοντες επούλωσης θα εξέλθουν και στη συνέχεια θα θεραπεύσουν τις ρωγμές.

Η αυτο-ίαση με τη χρήση κοίλων ινών έχει διερευνηθεί από διάφορους συγγραφείς και για διάφορα υλικά (πολυμερή, πολυμερικά σύνθετα). Με σκοπό την γρήγορη και εύκολη παρατήρηση των εσωτερικών ρωγμών των συνθέτων υλικών, οι Pang και Bond [23, 24] σχεδίασαν μια οπτική μέθοδο κατά την οποία ίνες γεμίζουν με παράγοντες επούλωσης οι οποίοι έχουν αναμειχθεί με φθορίζουσες χρωστικές ουσίες με αποτέλεσμα να καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση της διαδικασίας επούλωσης (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4: (α) Κοίλες ίνες γυαλιού και (β) επολυτωτικά συστατικά με φθορίζουσες χρωστικές ουσίες [24]

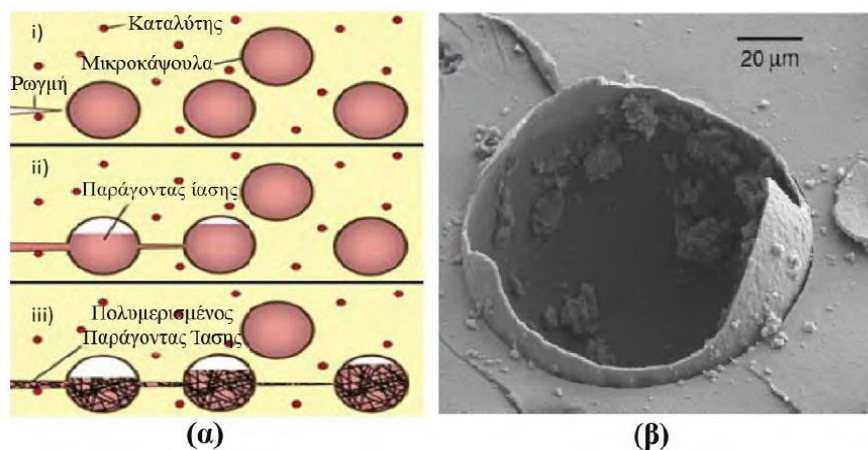
Οι πειραματικές μέθοδοι, αυτού του τρόπου αυτο-ίασης τσιμεντοειδών υλικών, έχουν συζητηθεί από αρκετούς ερευνητές. Ένας από αυτούς ήταν ο Dry, ο οποίος προσαρμόζει την ιδέα του, σε μία έννοια της βιολογικής προσέγγισης της αυτο-ίασης, σε εφαρμογή της στο σκυρόδεμα. Η ιδέα του περιλαμβάνει την αποθήκευση των επισκευαστικών συστατικών μέσα σε εύθραυστα «αιμοφόρα αγγεία» τα οποία διανέμονται μέσα σε ένα δείγμα σκυροδέματος. Αυτό, κατόπιν θα υποστεί αστοχία, τα αγγεία θα σπάσουν και κατ' αυτόν τον τρόπο θα απελευθερωθούν οι θεραπευτικοί παράγοντες. Τα αιμοφόρα αγγεία, είναι κοίλες πορώδεις ίνες από πολυπροπυλένιο, οι οποίες φιλοξενούν μέσα τους υγρό μεθακρυλικό μεθύλιο. Όταν αυτό ελευθερωθεί, μειώνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος στο οποίο βρίσκονται διασκορπισμένες οι ίνες. Επίσης, μία ακόμη έρευνα που πραγματοποιήθηκε, ήταν πάνω στην απελευθέρωση του υλικού αποκατάστασης, το οποίο προσκολλάται στην επιφάνεια της ρωγμής, από γυάλινες κοίλες πιπέτες που βρίσκονται μέσα στο σκυρόδεμα, κατά την διάρκεια δοκιμής κάμψης. Μετά τη συγκόλληση, το δείγμα παρουσίασε ικανότητα στο να φέρει 20% περισσότερο φορτίο σε μία μεταγενέστερη καμπτική δοκιμή [23, 24].

- Μικροενθυλάκωση (Microencapsulation)

Η ενθυλάκωση των υλικών έχει εξελιχθεί από παραδείγματα στη φύση, τα οποία κυμαίνονται από μικροκλίμακα σε νανοκλίμακα. Το απλούστερο παράδειγμα σε μακροσκοπική κλίμακα είναι ένα αυγό πουλιού ή ένας σπόρος, ενώ σε μια μικροσκοπική κλίμακα το καλύτερο παράδειγμα είναι αυτό ενός κυττάρου μαζί με το περιεχόμενό του [25]. Η ανάπτυξη της μικροενθυλάκωσης ξεκίνησε με την παρασκευή καψουλών οι οποίες περιέχουν χρωστικές ουσίες [26]. Με το πέρασμα του χρόνου, έχουν προκύψει και αναπτυχθεί πολλές νέες τεχνολογίες σε διάφορους τομείς. Η μικροενθυλάκωση δεν μπορεί να οριστεί ως ξεχωριστό προϊόν ή ως συστατικό προϊόντος. Θα μπορούσε να περιγραφεί καλύτερα ως μια διαδικασία κατά την οποία περικλείονται μικροσωματίδια στερεού ή σταγονίδια υγρού ή αερίου σε ένα αδρανές κέλυφος, το οποίο με τη σειρά του τα απομονώνει και τα προστατεύει από ανεπιθύμητες αντιδράσεις στο εξωτερικό περιβάλλον [27].

Η εφαρμογή της τεχνικής της μικροενθυλάκωσης, η οποία ενσωματώνει παράγοντες επούλωσης για την αυτο-ίαση υλικών, μελέτηθηκε από τους White et

al. [28]. Το Σχήμα 3.5 επεξηγεί αυτή τη διαδικασία αυτό-ίασης. Όταν η ρωγμή προκαλέσει ρήξη στις ενσωματωμένες μικροκάψουλες, απελευθερώνονται παράγοντες επούλωσης οι οποίοι αντιμετωπίζουν τη ρωγμή με τριχοειδή δράση. Στη συνέχεια, η ουσία έρχεται σε επαφή με τον ενσωματωμένο καταλύτη προκαλώντας πολυμερισμό και εξασφαλίζοντας το κλείσιμο των ρωγμών.



Σχήμα 3.5: (α) Βασική μέθοδος μικροενθυλάκωσης και (β) ρήξη μικροκάψουλας [28]

Ακόμα, οι Boh και Šumiga αξιολόγησαν την εφαρμογή των πρόσθετων μικροκάψουλας στα δομικά και κατασκευαστικά υλικά. Προκειμένου να διευκολυνθεί η περαιτέρω ενυδάτωση της μήτρας, τα διαφορετικά πρόσθετα εγκλείστηκαν σε μικροκάψουλες οι οποίες στη συνέχεια ενσωματώθηκαν στη μήτρα. Οι Tomiuchi και Nishihama, κατοχύρωσαν με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας εφαρμογές μικροενθυλακωμένου ύδατος για την παραγωγή τσιμεντοειδών οικοδομικών δοκών με ενιαία αντοχή. Οι τυπικές συνθέσεις, αποτελούνταν από τσιμέντο με ίνες και μικροκάψουλες που περιείχαν νερό για σκλήρυνση. Οι οικοδομικές δοκοί με ενιαία αντοχή, κατασκευάστηκαν σε ιμάντα μεταφοράς με χύτευση υπό πίεση, με αποτέλεσμα την σκλήρυνση του τσιμέντου. Σε μία άλλη εφεύρεση, το υψηλής αντοχής τσιμέντο, στο οποίο βασίζονται οι οικοδομικές σανίδες, κατασκευάζεται από ένα μίγμα υδραυλικού υλικού (γύψος), ινώδους υλικού, πρόσθετων και ζελατινωδών μικροκαψουλών οι οποίες ενσωματώνουν παγωμένο νερό ως επιταχυντή πήξης. Το μικροενθυλακωμένο ή πηγμένο νερό χρησιμοποιείται σε φυσίγγια ταχείας πήξης τσιμέντου. Επίσης, ένα προαναμεμιγμένο μίγμα κονιάματος κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και αποτελείται από τσιμέντο και μικροκάψουλες που περιέχουν νερό. Σε ένα άλλο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, από τους Okamoto et al. για την παρασκευή σκυροδέματος και μειγμάτων κονιαμάτων, το νερό εγκλείεται σε κάψουλες από ακρυλικό υπεραπορροφητικό πολυμερές. Κατά την παραγωγή του σκυροδέματος ή του κονιάματος, το νερό απελευθερώνεται από το υπεραπορροφητικό υλικό για να προάγει την ενυδάτωση του τσιμέντου γύρω του. Επίσης, η χρήση της παρούσας μεθόδου, προτάθηκε και συζητήθηκε και σε άλλα πεδία εκτός από αυτό της ίασης. Οι υποψήφιες εφαρμογές για την μέθοδο της μικροενθυλάκωσης σε οικοδομικά υλικά ήταν η πυρασφάλεια, η αντίσταση σε παγετό - ψύξη και απόψυξη, η επέκταση και αντίσταση στην υποβάθμιση αυτών, η μείωση της έκλυσης θερμότητας κατά την ενυδάτωση κ.λπ.

Στην εργασία που πραγματοποιήθηκε από τον Nishiwaki, χρησιμοποιούνται δύο ειδών μικροκάψουλες. Οι μεν 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 πληρώνονται με 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 δύσκολη η σκλήρυνση των δύο συστατικών του παράγοντα επούλωσης, β) η ποσότητα αυτού, που γέμιζε τις κάψουλες, περιορίστηκε σε μία πολύ μικρή ποσότητα και γ) η αντοχή της σύζευξης μεταξύ μικροκαψουλών και μήτρας, χρειάζεται να είναι ισχυρότερη από την αντοχή των μικροκαψιδίων. Προκειμένου να επιλυθούν τα παραπάνω προβλήματα, προτάθηκε η χρήση ενός υλικού ως παράγοντα επούλωσης, η διάμετρος της μικροκάψουλας να είναι αρκετά μεγάλη και η αντοχή δεσμού μεταξύ των υλικών περιβλήματος και τσιμεντοειδούς μήτρας να βελτιωθεί. Επιπλέον διαπιστώθηκε ότι υπήρχαν ακόμη πολλά τεχνικά προβλήματα.

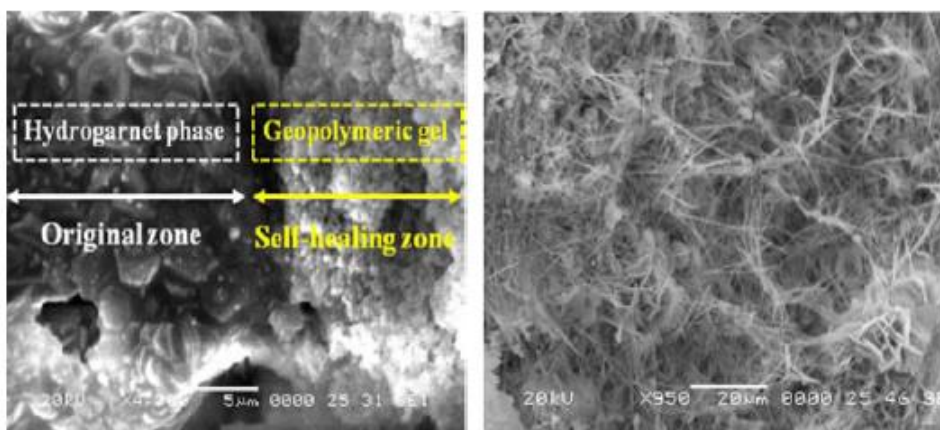
Τέλος, έχει αναφερθεί, ότι χρησιμοποιήθηκαν μικροκάψουλες που ενσωμάτωναν πυριτικό νάτριο. Στην έρευνα που αναφέρθηκε, το σκυρόδεμα είχε αρχικά φορτισθεί τόσο, ώστε να προσεγγίσει οριακά το σημείο αστοχίας του. Εν συνεχεία, το φορτίο απομακρύνεται και ακολούθως αφήνεται προς ωρίμανση για μία εβδομάδα. Το δοκίμιο με 2% μικροενθλακωμένο πυριτικό νάτριο εμφάνισε αντοχή σε θλίψη στο 26% των αρχικών αντοχών (πριν την τεχνητή αστοχία), ενώ το δείγμα αναφοράς είχε αντοχή σε θλίψη μόνο το 10% της αρχικής αντοχής. Πιστεύεται ακόμη, ότι ο λόγος ανάκτησης αντοχής θα μπορούσε να είναι ακόμα υψηλότερος με την αύξηση της ποσότητας του παράγοντα επούλωσης [23].

- 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 (Ca(OH)_2) στα κενά αυτών, στο ραγισμένο σκυρόδεμα. Υποτέθηκε, ότι αυτά τα προϊόντα ενυδάτωσης, δημιουργήθηκαν κατά την είσοδο νερού στις ρωγμές η οποία προκάλεσε ανακρυσταλλώσεις στον χώρο της ρηγματωμένης ζώνης. Με βάση αυτό το σκεπτικό και σε μια προσπάθεια να αναπτύξουν μια μέθοδο αυτο-ίασης, οι Kishi και συνεργάτες [6, 29-31] μελέτησαν την επίδραση διαφόρων παραγόντων στην συμπεριφορά αυτο-ίασης του σκυροδέματος. Οι παράγοντες που διερευνώνται 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. Επίσης, μεταξύ των ρωγμών παρατηρήθηκαν προϊόντα (επαν)

ενυδάτωσης. Ωστόσο, για τα δοκίμια κανονικού σκυροδέματος, οι ρωγμές εξακολουθούσαν να υπάρχουν, εκτός από κάποια σημεία στα οποία έκλεισαν μετά από μικρό χρονικό διάστημα. Έτσι, η ανακρυστάλλωση με διογκωτικούς παράγοντες, στις περιοχές που υπήρχαν κενά λόγω ρωγμών, για το φαινόμενο της αυτο-ίασης, ήταν πιο αποτελεσματική απ' ό,τι στο κανονικό σκυρόδεμα. Σε μία ακόλουθη μελέτη, μαζί με τον διογκωτικό παράγοντα, προστέθηκε ένα γεω-υλικό το οποίο είχε περιεκτικότητα σε SiO_2 71.3% και σε Al_2O_3 15.4%. Με τη χρήση των γεω-υλικών, διαπιστώθηκε ότι αυτά σχηματίζουν γεωπολυμερή τα οποία προέρχονται από τον επιμέρους πολυμερισμό των αργιλικών και πυριτικών ειδών. Αυτά, διαλύονται από τις αρχικές πηγές τους 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 φάσεις hydrogarnet. Αυτό υποδεικνύει ότι οι φάσεις hydrogarnet ή AFt, όπως παρουσιάζονται και στο Σχήμα 3.6, σχηματίζονται από τον διογκωτικό παράγοντα και συνεπώς έπαιξαν ένα σημαντικό ρόλο στην γεφύρωση της ρωγμής. Η ανάλυση EDS, αποκάλυψε επίσης, ότι το μεγαλύτερο μέρος του τροποποιημένου γεωπολυμερούς gel 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 κανονικό σκυρόδεμα, συνέβαλε στην αύξηση της ανακρυστάλλωσης των τσιμεντοειδών και την καθίζηση των σωματιδίων στο σκυρόδεμα. Ειδικότερα, κατά την χρησιμοποίηση της κατάλληλης δόσης ανθρακικών αλάτων και διογκωτικού παράγοντα, η ικανότητα αυτο-ίασης των ρωγμών θα μπορούσε να ενισχυθεί [23].

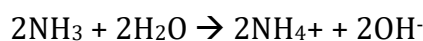
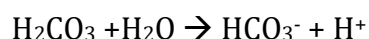
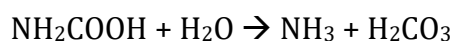


Σχήμα 3.6: ESEM εικόνα προϊόντων επούλωσης στην περίπτωση διογκωτικών υλικών [31]

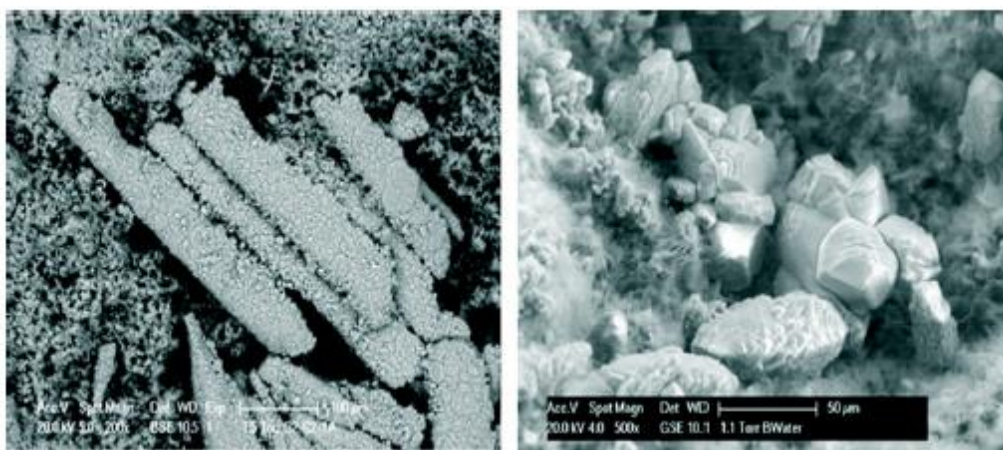
- Βακτήρια (Bacteria)

Ορισμένοι ερευνητές, πρότειναν τη χρήση μίας βιολογικής επισκευαστικής τεχνικής με την εισαγωγή βακτηρίων στο σκυρόδεμα. Αυτή η προσέγγιση χρονολογείται από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 σε μία εργασία των *Gollapudi et al* [32], οι οποίοι πρότειναν μία μέθοδο για την επισκευή ρωγμών με φιλικές προς το περιβάλλον διαδικασίες. Η ιδέα αυτή περιείχε τη χρήση βακτηρίων τα οποία μεταβολίζουν την ουρία και βοηθούν στην καταβύθιση ανθρακικού ασβεστίου (CaCO₃) στην περιοχή των μικρορωγμών. Η μικροβιακή κατακρήμνιση του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO₃) προσδιορίζεται από έναν αριθμό παραγόντων οι οποίοι περιλαμβάνουν τη συγκέντρωση του διαλυμένου ανόργανου άνθρακα, το pH, τη συγκέντρωση των ιόντων ασβεστίου και την παρουσία θέσεων σχηματισμού πυρήνων. Οι πρώτοι τρεις από αυτούς τους παράγοντες προέρχονται από τον μεταβολισμό των βακτηρίων, ενώ τα κυτταρικά τοιχώματα αυτών ενεργούν ως θέσεις σχηματισμού πυρήνων.

Τα βακτήρια που χρησιμοποιούνται στην έρευνα που διεξήχθη από τον Tittelboom και τους συνεργάτες του για το σκυρόδεμα, προορίζεται για την παραγωγή ουρεάσης, ένα ένζυμο που καταλύει την ουρία (CO(NH₂)₂) σε αμμώνιο (NH₄⁺) και ανθρακική ρίζα (CO₃²⁻). Η χημική διαδικασία είναι η ακόλουθη: 1 mol ουρίας υδρολύεται ενδοκυτταρικά προς 1 mol καρβαμικού οξέως και 1 mol αμμωνίας (εξ. 1). Το καρβαμικό οξύ, αυθόρμητα υδρολύεται και παράγεται 1 mol αμμωνίας και 1 mol ανθρακικού οξέως (εξ. 2). Αυτά τα προϊόντα σχηματίζουν τότε 1 mol όξινου ανθρακικού, 2 mol αμμωνίου και ιόντα υδροξειδίου (εξ. 3 και 4). Οι δύο τελευταίες αντιδράσεις οδηγούν σε αύξηση του pH και μετατόπιση της ισορροπίας του όξινου ανθρακικού και έτσι έχουμε ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό ανθρακικών ιόντων (εξ. 4 και 5).



Επειδή το κυτταρικό τοίχωμα των βακτηρίων είναι αρνητικά φορτισμένο, τα βακτήρια είναι σε θέση να δημιουργήσουν κατιόντα από το περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων θετικών φορτισμένων ιόντων ασβεστίου, το οποίο αποθηκεύεται στην επιφάνεια του κυτταρικού τοιχώματος. Τα ιόντα Ca^{2+} στη συνέχεια 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 αυτή την μέθοδο, τα βακτήρια προκαλώντας την τοπική καθίζηση CaCO_3 , θα μπορούν να καλύψουν τις ραγισμένες επιφάνειες. Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζονται εικόνες από ESEM για το ίζημα CaCO_3 πάνω στην επιφάνεια των ρωγμών [33].



Σχήμα 3.7: Αυτο-ίαση με χρήση βακτηρίων στο σκυρόδεμα. Οι μεγαλύτεροι κρύσταλλοι ανθρακικού ασβεστίου (μεγέθους 50-500 μm) βασίζονται στην παραγωγή τους στα ενσωματωμένα στην επιφάνεια των ρωγμών βακτήρια [34]

- 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. Σημειώνεται ότι ορισμένοι ερευνητές, πρότειναν την ενσωμάτωση λειτουργικών υλικών, δηλαδή διαμορφωμένων μνημονικών κραμάτων ή πολυμερών μέσα σε τσιμεντοειδή υλικά. Η βασική ιδέα 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, θα παράγεται μία δύναμη συστολής η οποία βέλτιστα θα οδηγήσει στο κλείσιμο των ρωγμών [16].

Έχει αποδειχθεί ότι η χρήση μνημονικών, ως προς το σχήμα, υλικών δουλεύει. Ωστόσο, δεδομένου ότι το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται συχνά σε τεράστιες ποσότητες στην πράξη, η μέθοδος αυτή καθίσταται ασύμφορη από άποψη κόστους με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές. Σημειώνεται επίσης ότι η ενεργοποίηση αυτού του μηχανισμού εργασίας συνεπάγεται θέρμανση σε ορισμένη θερμοκρασία. Έτσι, ο τρόπος για να πραγματοποιηθεί θέρμανση σε μία τσιμεντοειδή μήτρα με τα μνημονικά υλικά καθιστά τη διαδικασία αυτο-ίασης του συστήματος περίπλοκη. Επιπλέον, θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψιν ότι ορισμένα προϊόντα ενυδάτωσης δεν είναι

σταθερά σε υψηλές θερμοκρασίες κάτι που οδηγεί σε αβεβαιότητα υιοθέτησης αυτής της μεθόδου [35, 36].

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

Πίνακας 3.1: Σύγκριση μεθόδων αυτο-ίασης

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 αβεβαιότητα

3.1.4 Μέθοδοι μέτρησης αυτο-ίασης

Η οπτική παρατήρηση με μικροσκόπιο ήταν η επικρατούσα μέθοδος που υιοθετήθηκε από την πλειοψηφία των ερευνητών για τον προσδιορισμό του πλάτους των σφραγισμένων ρωγμών. Κάποιες από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται είναι η ψηφιακή εικόνα, φωτογραφική μηχανή με πολύ υψηλή ανάλυση, ακτίνες X και αξονική τομογραφία. Στον Πίνακα 3.2 φαίνεται ότι ρωγμή μεγέθους 60 μm επουλώθηκε λόγω φυσικών φαινομένων. Εκτός αυτού, ρωγμή με πλάτος έως 138 μm σφραγίστηκε πλήρως με τη χρήση πολυμερών. Επιπλέον, η χρήση πρόσθετων τσιμεντοειδών υλικών στο σκυρόδεμα προκαλεί επούλωση σε ρωγμές πλάτους 200 μm . Επίσης η προοδευτική βελτίωση για τη σφράγιση των μεγαλύτερων ρωγμών πλάτους 970 μm επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας ενθυλάκωση μικροοργανισμών στην παρασκευή του σκυροδέματος. Ακόμη, η χρήση χημικής ουσίας και μικροοργανισμού σε συνδυασμό κατά την προετοιμασία του σκυροδέματος έχει οδηγήσει σε σφράγιση ρωγμής με μέγιστο πλάτος 0,22 mm.

Πίνακας 3.2: Μέθοδοι αυτο-ίασης και μετρούμενες μεταβλητές

Μέθοδος	Μετρούμενη μεταβλητή (πλάτος ρωγμής)
Φυσική	Επούλωση ρωγμής πλάτους κάτω από 60 μm
Πρόσθετα τσιμεντοειδή υλικά	Επιδιόρθωση ρωγμών πλάτους κάτω από 200 μm
Πολυμερή	Ρωγμές πλάτους μέχρι 138 μm επιδιορθώθηκαν πλήρως
Βακτήρια και ενθυλάκωση	Ίαση ρωγμών μέγιστου πλάτους 0,970 mm
Άλλες (Βιολογικές και Χημικές)	Επούλωση ρωγμών πλάτους έως 0,22 mm

Οι Mostavi et al. και Achal et al. αναφέρουν πως η επιλογή της μεθόδου μέτρησης αυτο-ίασης βασίζεται στο βάθος που σφραγίζονται οι ρωγμές. Αυτά συνοψίζονται στον Πίνακα 3.3. Ο Πίνακας 3.3 δείχνει πως το μέγιστο βάθος ρωγμών των 32 mm σφραγίστηκε με τη μέθοδο της ενθυλάκωσης. Επίσης δείχνει ότι βάθος ρωγμών 27,2 mm γέμισε με τη χρήση μικροοργανισμών. Συνεπώς, με βάση το μέγιστο πλάτος ρωγμών 0,97 mm και το βάθος 32 mm όπως παρουσιάζεται στους Πίνακες 3.2 και 3.3 αντίστοιχα, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η ενθυλάκωση αποδείχθηκε ότι είναι η πλέον αποτελεσματική μέθοδος [37].

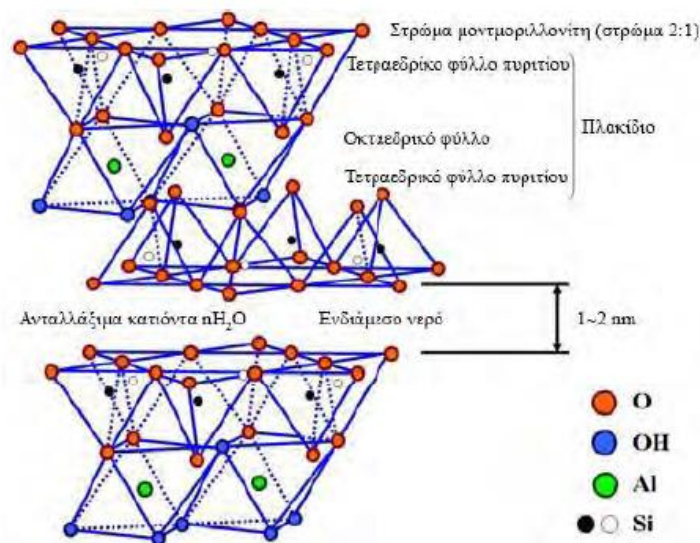
Πίνακας 3.3: Τεχνικές αυτο-ίασης και μετρούμενες μεταβλητές

Μέθοδος	Μετρούμενη μεταβλητή (Βάθος και μήκος ρωγμής)
Μικροενθυλάκωση	Μέγιστο βάθος ρωγμής 32 mm σφραγίστηκε επιτυχώς
Βακτήρια	Μέγιστο βάθος ρωγμής 27,2 mm σφραγίστηκε επιτυχώς
Σκωρία ανθρακούχου χάλυβα	Μέγιστο μήκος ρωγμής που επουλώθηκε ήταν 5 mm

3.2 Αυτο-ίαση μέσω της τεχνικής των διογκωτικών και κρυσταλλικών προσθέτων

Στη συνέχεια θα αναλυθεί μία εκ των τεχνικών αυτο-ίασης που αναφέρθηκαν προηγουμένως, αυτή της χρήσης διογκωτικών και κρυσταλλικών προσθέτων.

Οι T.H. Ahn & T. Kishi [30, 31] στην εργασία τους χρησιμοποίησαν τσιμέντο Portland τύπου I σε μίγματα που περιέχουν κρυσταλλικά και χημικά πρόσθετα. Για να είναι δυνατή η σύγκριση της ικανότητας αυτο-ίασης, των τσιμεντοειδών συνθέτων, χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μίξεις με κρυσταλλικά πρόσμικτα (δύο τύποι γεω-υλικών, A και B), διογκωτικούς και χημικούς παράγοντες. Τόσο ο διογκωτικός παράγοντας, όσο τα γεω-υλικά και οι χημικές ουσίες, που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν εμπορικά προϊόντα που παράγονται στην Ιαπωνία. Για την προκείμενη μελέτη επιλέχθηκε ο K-type διογκωτικός παράγοντας, ο οποίος αποτελείται από ένα μίγμα τριών ορυκτών, C_4A_3S (χαουνίτη), $CaSO_4$ (ανυδρίτη) και CaO (ασβέστη). Επίσης, έγινε εφαρμογή δύο τύπων γεω-υλικών. Ο πρώτος, έχει περιεκτικότητα σε SiO_2 71.3% και 15.4% σε Al_2O_3 , ενώ όπως εμφανίζεται σε διαγράμματα περιθλασιμετρίας ακτίνων X, αποτελείται κυρίως από SiO_2 και υδροξύλιο αργιλοπυριτικού νατρίου $[Na_{0.6}Al_{4.70}Si_{7.32}O_{20}(OH)_4]$. Επιπλέον περιέχει μοντμοριλλονίτη, αστρίους και χαλαζία, καθώς η διόγκωση του προκαλείται κυρίως από τη διόγκωση του αργιλικού ορυκτού. Η συγκεκριμένη μορφή γεω-υλικού, αυξάνει τον όγκο της 15 έως και 18 φορές επί του ξηρού της μεγέθους, μετά από ενυδάτωση και αυτό επειδή ο μοντμοριλλονίτης αποτελείται από μία διάταξη 2:1 επί των στρωμάτων της δομής του. Κατ' αυτήν, παρουσιάζεται με μία οκταεδρική μορφολογία εκατέρωθεν της οποίας αναπτύσσονται δύο τετραεδρικά φύλλα πυριτίου (Σχήμα 3.8). Από την άλλη μεριά, το δεύτερο γεω-υλικό φέρει παρόμοια διάταξη, αλλά με λίγο διαφορετική χημική σύνθεση από το πρώτο.



Σχήμα 3.8: Χημική δομή του γεω-υλικού (Li, 1995)

Όσον αφορά στους χημικούς παράγοντες, επιλέχθηκαν διάφοροι τύποι ανθρακικών αλάτων όπως NaHCO_3 , Na_2CO_3 και Li_2CO_3 ώστε να ενισχύσουν το αποτέλεσμα της ανακρυστάλλωσης των τσιμεντοειδών, με τη χρήση διογκωτικών παραγόντων, στα κενά του ραγισμένου σκυροδέματος. Επίσης, για τη δημιουργία των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε υπερευστοποιητής πολυκαρβοξυλικής βάσης. Από αυτόν τον τύπο, έγιναν δοκιμές με τρία προϊόντα: ρευστοποιητή βασισμένο σε λιγνίνη (SP I) και δύο τύπους υπερευστοποιητή πολυκαρβοξυλικής βάσης (SP II: κοινός τύπος και SP III: τύπος βελτίωσης κάθισης “slump retention type”), η χρήση των οποίων έγινε προκειμένου να διευκρινιστούν τα αποτελέσματα κάθε υπερευστοποιητή στην εργασιμότητα της πάστας και του σκυροδέματος που περιλαμβάνουν οι τσιμεντοειδείς συνθέσεις με ικανότητα αυτο-ίασης.

Τα μίγματα πάστας έγιναν με λόγο νερού προς τσιμεντοειδή υλικά (W/B) 0.45. Κατά την προσθήκη του υπερευστοποιητή, η περιεκτικότητα αυτού σε νερό αγνοήθηκε σε σχέση με το νερό ανάμιξης. Η δοσολογία του κάθε υπερευστοποιητή ορίστηκε στην περιοχή από 0.8-2.5%, προκειμένου το μίγμα να έχει κατάλληλη ρευστότητα. Η ρευστότητα του μίγματος, μετρήθηκε σε χρονικό διάστημα από 30 έως και 90 λεπτά από την ανάμιξη.

Ακολουθως, έγινε χύτευση της σύνθεσης σε κυλινδρικά καλούπια διαστάσεων 5 επί 10 cm. Έπειτα, αφέθηκαν να ωριμάσουν για 120 μέρες και στη συνέχεια δημιουργήθηκαν τεχνητές ρωγμές. Το εύρος της ρωγμής ελέγχθηκε να είναι μεταξύ 0.1 και 0.3 mm. Μετά την τεχνητή αστοχία, τα δείγματα εμβαπτίστηκαν εκ νέου στο νερό για παραπάνω ωρίμανση 200 ημερών.

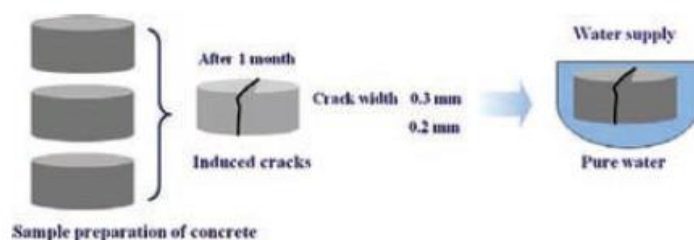
Όλα τα τσιμεντοειδή σύνθετα υλικά με την ικανότητα αυτο-ίασης που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία, παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο. Στον Πίνακα 3.4 αναφέρονται οι αναλογίες ανάμιξης του σκυροδέματος. Οι λόγοι νερού προς συνδετικό υλικό (W/B) και άμμου προς αδρανή υλικά (S/A), είναι 47,3% και 46,6% αντίστοιχα για όλα τα σκυροδέματα.

Πίνακας 3.4: Αναλογία ανάμιξης σκυροδέματος

Πρώτες ύλες	kg/m ³
Συνδετικό υλικό	370
Νερό	175
Άμμος	803
Χονδρόκοκκα αδρανή	920
Υπερευστοποιητής	0.43~0.50

Υπολογίστηκε επίσης η αντοχή σε θλίψη των δειγμάτων σκυροδέματος μετά από 1, 3, 7 και 28 ημέρες. Επιπλέον έγινε δοκιμή κάθισης του σκυροδέματος και δημιουργήθηκαν κύλινδροι διαστάσεων 10 επί 20 cm. Τα δείγματα ωρίμασαν για 1 μήνα και στη συνέχεια προκλήθηκαν τεχνητές ρωγμές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9, προκειμένου να διασαφηνιστεί η διαδικασία αυτο-ίασης. Τα πλάτη των ρωγμών ελέγχθηκαν μεταξύ 0.1 mm και 0.3 mm ανάλογα με τα μέγιστα

επιτρεπόμενα πλάτη ρωγμών που υπαγορεύονται από τον κατασκευαστικό κώδικα. Κατόπιν τα δείγματα αφέθηκαν για άλλον ένα μήνα στο νερό.



Σχήμα 3.9: Αξιολόγηση αυτο-ίασης μέσω ρωγμών στο σκυρόδεμα

Συμπερασματικά, στη συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκαν οι ιδιότητες αυτο-ίασης του σκυροδέματος με τη χρήση γεω-υλικών. Η ικανότητα αυτο-ίασης επηρεάστηκε σημαντικά από αργιλοπυριτικά υλικά και από διάφορα τροποποιημένα σύνθετα του ασβεστίου. Επιπλέον διερευνήθηκαν βασικές ιδιότητες όπως η διόγκωση καθώς και η ανακρυστάλλωση των γεω-υλικών με ποζολανική αντίδραση με σκοπό την αυτο-ίαση.

3.3 Αυτο-ίαση με τη μέθοδο επίστρωσης/ κοκκοποίησης φιλμ

Διάφορες μέθοδοι αυτο-ίασης έχουν προταθεί μέχρι σήμερα όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.5 οι οποίες έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Πίνακας 3.5: Μέθοδοι αυτο-ίασης

Μέθοδοι αυτο-ίασης	
Φυσική επούλωση	<ul style="list-style-type: none"> • Ενυδάτωση τσιμέντου • Ενανθράκωση/καθίζηση προϊόντων αντίδρασης
Αυτο-ίαση	<ul style="list-style-type: none"> • Ορυκτά πρόσμεικτα όπως ιπτάμενη τέφρα, σκωρία, πυριτική παιπάλη • Διογκωτικοί παράγοντες, γεω-υλικά
Δραστική επιδιόρθωση	<ul style="list-style-type: none"> • Μικροενθυλάκωση, κοίλες ίνες • Μνημονικά ως προς το σχήμα υλικά, βακτήρια • Έκλυση θερμότητας συσκευές, τεχνικές παρακολούθησης

Η χρήση διογκωτικών και κρυσταλλικών προσθέτων μπορεί να προτιμάται σε διάφορες μεθόδους λόγω της καλής αποδοτικότητας της ίασης, της συμβατότητας με τις μήτρες τσιμέντου και το χαμηλό κόστος, όμως η

αποδοτικότητα των προϊόντων της ίασης, που καθίσταται αναγκαία δεν είναι εγγυημένη.

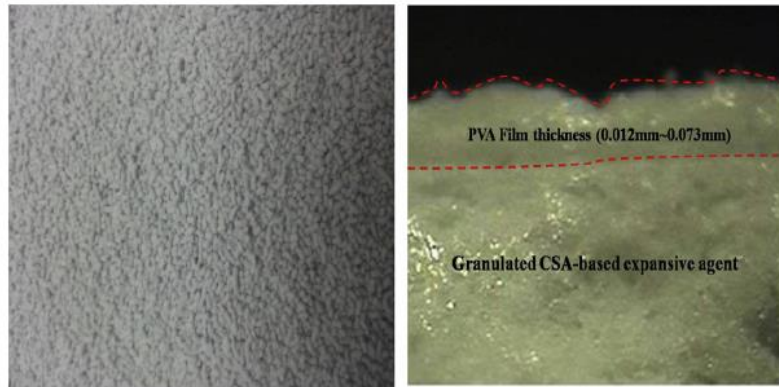
Υλικά σε μορφή σκόνης μπορεί να περιβάλλονται από στερεό κατασκεύασμα το οποίο ελέγχει το χρόνο απελευθέρωσης φαρμάκου μέσα στο σώμα, μέσω μεθόδων που χρησιμοποιούνται στον φαρμακευτικό τομέα. Ταμπλέτες, κόκκοι και μικροκάψουλες χρησιμοποιούνται ευρέως. Οι ταμπλέτες και οι μικροκάψουλες σε αυτές τις μεθόδους δεν προτιμώνται όσο οι κόκκοι εξαιτίας της χαμηλής αποτελεσματικότητας τους και της πολυπλοκότητας των διαδικασιών. Τα υλικά σε μορφή κοκκοποιημένης σκόνης μπορούν απελευθερωθούν σταδιακά ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και το χρόνο που έχει παρέλθει. Επιπρόσθετα, μπορούν να επικαλυφθούν με ένα υδατοδιαλυτό φιλμ. Η επικάλυψη αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την προστασία του περιεχομένου, για τη βελτίωση του εξωτερικού στερεού κατασκευάσματος και για τον έλεγχο του χρόνου απελευθέρωσης της δραστικής ουσίας.

Επομένως, όταν οι μέθοδοι κοκκοποίησης/επικάλυψης εφαρμόζονται σε διογκωτικά και κρυσταλλικά πρόσθετα, ο χρόνος απελευθέρωσης των ίασιμων υλικών μπορεί να ελεγχθεί έως ότου εμφανιστούν ρωγμές, και τα προϊόντα ίασης σχηματιστούν λόγω της αντίδρασης των υλικών με την υγρασία μέσω της επιφάνειας των ρωγμών. Ο χρόνος απελευθέρωσης μπορεί να ελεγχθεί σε δύο στάδια: έλεγχος της σκληρότητας των κόκκων και έλεγχος του πάχους της υδατοδιαλυτής μεμβράνης στην επιφανειακή επικάλυψη.

Στην εργασία των Yong-Soo Lee και Jae-Suk Ryou [38] ο διογκωτικός παράγοντας κοκκοποιήθηκε και στη συνέχεια επικαλύφθηκε με μια υδατοδιαλυτή πολυμερική ουσία (PVA). Ακόμη, διεξήχθη μια δοκιμή αλλαγής μήκους για τον προσδιορισμό του πάχους επικάλυψης. Επιπλέον, αξιολογήθηκε η αποδοτικότητα της αυτο-ίασης μέσω μικροσκοπικής παρακολούθησης, μέτρησης σχετικού δυναμικού συντελεστή ελαστικότητας και υδατοαπορροφητικότητας.

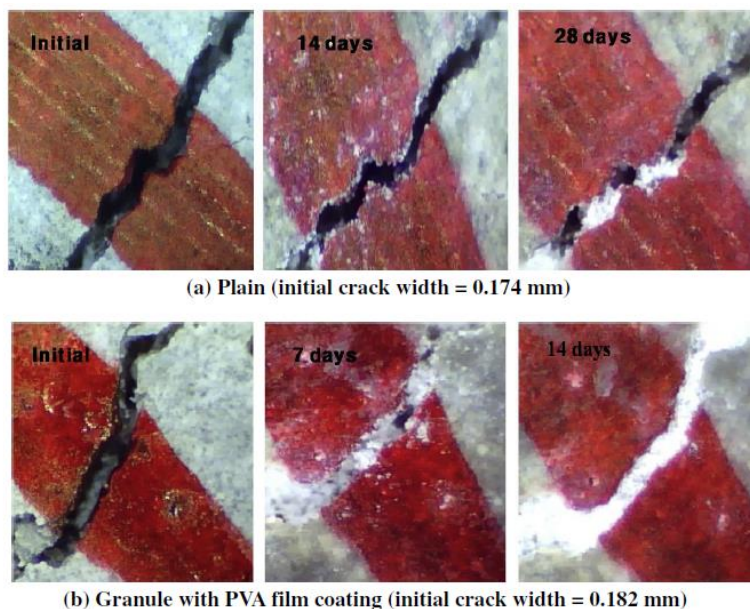
Συμπερασματικά,

- Η επικάλυψη με φιλμ από PVA (πολυβινυλική αλκοόλη), με σκοπό τον έλεγχο του χρόνου αυτο-ίασης σε κοκκοποιημένους διογκωτικούς παράγοντες, διεξήχθη δύο φορές. Επιπλέον, το πάχος της επίστρωσης υπολογίστηκε 0,073 mm με τυπική απόκλιση 0,0063 mm (Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10: Κόκκοι και επικάλυψη με PVA

- Σε δείγματα που ενσωματώνουν κόκκους με επικάλυψη PVA υπήρξε πλήρες κλείσιμο ρωγμών με πάχος 0,1 mm, 0,1-0,2 mm και 0,2 mm σε 11, 14 και 16 ημέρες (Σχήμα 3.11).

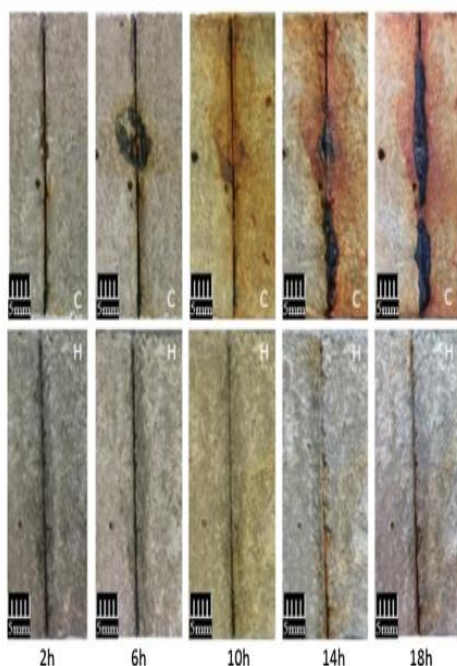


Σχήμα 3.11: Διαδικασία επούλωσης ρωγμών μέσω αυτο-ίασης: (α) Χωρίς επίστρωση με αρχικό πλάτος ρωγμής 0,174 mm (β) κόκκοι με επίστρωση φιλμ PVA με αρχικό πλάτος ρωγμής 0,182 mm

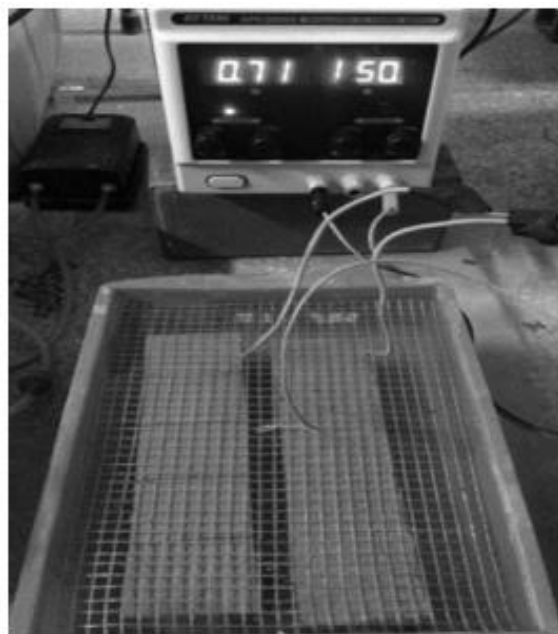
- Στη μέτρηση του σχετικού δυναμικού συντελεστή ελαστικότητας, τα δείγματα που ενσωματώνουν κόκκους με επίστρωση φιλμ PVA έφτασαν πάνω από το 90%, με μία ταχεία αύξηση σε 5 ημέρες. Ως εκ τούτου προέκυψε εσωτερικό κλείσιμο ρωγμών.
- Στη δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας, η διαπερατότητα σε νερό των δειγμάτων, τα οποία ενσωματώνουν κόκκους με επίστρωση φιλμ PVA, μειώθηκε σημαντικά ανάλογα με το χρόνο βύθισης. Ως εκ τούτου, επαληθεύτηκε η αποτελεσματικότητα επούλωσης των ρωγμών, καθώς λόγω του κλείσιμου των ρωγμών εμποδίζεται η μετανάστευση του νερού.

3.4 Αυτο-ίαση ρωγμών σκυροδέματος μέσω βακτηρίων

Η αυτο-ίαση σκυροδέματος μέσω βακτηρίων αποτελεί μία νέα τεχνολογία αποκατάστασης ρωγμών καθώς παλαιότερες μελέτες παρουσίαζαν κυρίως αυτο-ίαση τσιμεντοειδών μέσω καταβυθισμένου CaCO_3 το οποίο γέμιζε τις ρωγμές μειώνοντας το συντελεστή διαπερατότητάς τους. Σε αυτή τη βάση, έχουν μελετηθεί οι επιδράσεις στην αντοχή μετάδοσης χλωριδίων, προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των αυτο-ιάσιμων ρωγμών μέσω μικροβίων, μέσω πολλαπλών μεθόδων χαρακτηρισμού όπως ηλεκτροχημικές δοκιμές, οπτική εξέταση της επιφάνειας των ρωγμών (Σχήμα 3.12), λόγος απώλειας βάρους του ενισχυμένου σκυροδέματος καθώς και περιεκτικότητα σε χλωριόντα. Για την επιτάχυνση μεταφοράς χλωριδίων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ηλεκτρομεταφοράς. (Σχήμα 3.13) Αποτελέσματα της πειραματικής αυτής διαδικασίας έχουν δείξει πως ρωγμές οι οποίες έχουν επουλωθεί μέσω αυτο-ίασης με μικρόβια μπορούν να παρεμποδίσουν τη μεταφορά χλωριδίων και επιπλέον προστατεύουν το ενισχυμένο σκυρόδεμα.



Σχήμα 3.12: Οπτική εξέταση της επιφάνειας των ρωγμών κατά τη διάρκεια του χρόνου ηλεκτρομεταφοράς



Σχήμα 3.13: Η συσκευή ηλεκτρομεταφοράς

Οι παραδοσιακές μέθοδοι επιδιόρθωσης στις περισσότερες περιπτώσεις είναι παθητικές. Έχουν σύνθετες τεχνολογίες, υψηλό κόστος και κάποιες φορές έχουν καταστροφικές επιπτώσεις για το περιβάλλον. Για το λόγο αυτό δεν ικανοποιούν τις σύγχρονες απαιτήσεις. Το 1995, οι Gollapudi et al. πρότειναν για πρώτη φορά μεθόδους αποκατάστασης ρωγμών βασισμένες στην εξέλιξη της βιολογίας. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε νέες λύσεις του προβλήματος. Οι μέθοδοι αυτο-ίασης με μικρόβια χρησιμοποιούν κυρίως το μεταβολισμό βακτηρίων προκειμένου να προκαλέσουν καθίζηση των κρυστάλλων. Αποτελούν το επίκεντρο των ερευνών

λόγω της απλής τους τεχνολογίας, του χαμηλού κόστους και της μη μολυσματικής τους δράσης.

Η επαγόμενη από βακτήρια ιζηματοποίηση έχει προταθεί ως εναλλακτική και φιλική προς το περιβάλλον τεχνική για τη βελτίωση της ικανότητας επούλωσης του σκυροδέματος τα τελευταία χρόνια. Οι Wiktor et al. εφάρμοσαν διάφορες δοκιμές σε αυτο-ιάσιμα δείγματα προκειμένου να δείξουν τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτο-ίασης μέσω βακτηρίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως το σκυρόδεμα που είχε επιδιορθωθεί μέσω μικροβίων είχε περισσότερες κρυσταλλικές κατακρημνίσεις και μπορούσε να επιδιορθώσει ευρύτερες ρωγμές (470 μm). Οι Luo et al. δημιούργησαν σε δοκίμια ρωγμές 3 mm. Διαπίστωσαν ότι οι μικροοργανισμοί επιδιόρθωσαν αρκετές ρωγμές μέσα σε 5 ημέρες και επιπλέον μπόρεσαν να γεμίσουν την επιφάνεια αρκετών ρωγμών μέσα σε 20 ημέρες. Σε άλλες έρευνές τους, βακτήρια στα οποία ενσωματώθηκε άμμος μπόρεσαν να επισκευάσουν ρωγμές μέγιστου πλάτους 1 mm. Διαπίστωσαν επίσης ότι η μέγιστη ποσότητα CaCO_3 καταβυθίστηκε στο άνοιγμα των ρωγμών και συγκεντρώθηκε κυρίως σε περιοχή βάθους 1,5 mm από την επιφάνεια των ρωγμών. Επιπλέον, μπορεί να προσδιοριστεί το αποτέλεσμα της αποκατάστασης μέσω της μεταβολής του συντελεστή διαπερατότητας πριν και μετά την επούλωση των ρωγμών. Οι Wang et al. επιβεβαίωσαν ότι το σκυρόδεμα το οποίο είχε αυτο-ιαθεί μέσω μικροβίων ήταν σε θέση να μειώσει το συντελεστή διαπερατότητας των ρωγμών, ειδικά το πρώτο 24ωρο. Στην έρευνα των Tittelboom et al. επιβεβαιώθηκε επίσης η βελτίωση της αντιδιαπερατότητας και της αντοχής των δειγμάτων σκυροδέματος. Αποδείχθηκε πως η τεχνολογία αυτο-ίασης μέσω μικροβίων μπορεί να αποκαταστήσει ρωγμές στο σκυρόδεμα, όμως η επίδραση στην αντοχή του σκυροδέματος, όσον αφορά στη μετάδοση χλωριδίων, χρειάζεται περαιτέρω έρευνα [39].

3.5 Αυτο-ίαση μέσω μικρο/νάνο-προσθέτων

Κατά τη διάρκεια της ζωής πολλών κατασκευών από σκυρόδεμα, η διασφάλιση της υψηλής ανθεκτικότητας αποτελεί βασική παράμετρο. Η συνεχής αύξηση των απαιτήσεων ανθεκτικότητας των κατασκευών από σκυρόδεμα οδήγησε στην ανάπτυξη σκυροδέματος υψηλής αντοχής (UHPC), όπου η άριστη ανθεκτικότητα καθίσταται υποχρεωτική. Ο όρος UHPC εισήχθη από τον De Larrard το 1994 [40] και από τότε όλο και περισσότερες έρευνες διεξήχθησαν σχετικά με το σχεδιασμό/διαμόρφωση και τον χαρακτηρισμό αυτού του τύπου των σκυροδεμάτων. Ο σχεδιασμός σκυροδέματος υψηλής αντοχής συνεπάγεται μικρή αναλογία W/C, υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο, υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμεντοειδή υλικά (κυρίως πυριτική παιπάλη), ίνες κλπ. με επακόλουθη μείωση του πορώδους, αύξηση της μικροδομής, της ομοιογένειας και της σκληρότητας. Ταυτόχρονα, κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών, η αύξηση των απαιτήσεων ανθεκτικότητας στις κατασκευές από σκυρόδεμα οδήγησε επίσης στη διερεύνηση, το σχεδιασμό και τη βελτίωση της ικανότητας αυτο-ίασης των τσιμεντοειδών υλικών που επιτρέπει έναν αυτόνομο τρόπο επούλωσης των

ρωγμών. Με αυτόν τον τρόπο επιμηκύνεται η διάρκεια ζωής της δομής και μειώνονται τα έξοδα συντήρησης.

Ανάλογα με τη φύση της, η αυτο-ίαση σκυροδέματος μπορεί να χαρακτηριστεί αυτογενής ή αυτόνομη. Η αυτογενής ίαση αποτελεί ένα εγγενές χαρακτηριστικό του σκυροδέματος που θεραπεύει μικρές ρωγμές κυρίως με περεταίρω ενυδάτωση του τσιμέντου και καθίζηση ανθρακικού ασβεστίου. Αντίθετα, στην αυτόνομη ίαση, η επούλωση προκαλείται από ειδικά προσαρμοσμένα για αυτή τη δράση πρόσθετα που προστίθενται στο τσιμεντοειδές πλέγμα (π.χ. σε μικροκάψουλες).

Ο τελικός στόχος είναι πάντα να βελτιωθεί η μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα με την επούλωση των αρχικά σχηματισμένων μικρορωγμών, εμποδίζοντας έτσι την ανάπτυξή τους και περιορίζοντας την είσοδο επιβλαβών διαλυμάτων. Αυτός ο στόχος είναι ακόμα πιο σημαντικός όταν εξετάζονται τα σκυροδέματα εξαιρετικά υψηλής αντοχής (UHPC), καθώς οι απαιτήσεις είναι υψηλές και η αναμενόμενη διάρκεια ζωής πολύ μεγάλη. Παρόλα αυτά, είναι γνωστό ότι το υψηλής αντοχής σκυρόδεμα έχει κάποια ικανότητα αυτογενούς θεραπείας, για ρωγμές μικρότερες από 30 mm, λόγω της παρουσίας μη ενυδατωμένων σωματιδίων τσιμέντου με λανθάνουσα αντιδραστικότητα, τα οποία ενεργοποιούνται παρουσία υγρασίας κατά τη ρηγμάτωση. Αν και η ενίσχυση μέσω ινών συμβάλλει στον έλεγχο της ανάπτυξης των ρωγμών, φαίνεται απίθανο να κρατηθούν αρκετά μικρές ούτως ώστε να λάβει χώρα μια αποτελεσματική αυτογενής επούλωση. Έτσι, μέσω ερευνών έχει γίνει προσπάθεια βελτίωσης της ικανότητας αυτο-ίασης του UHPC με την προσθήκη μηχανικών προσθέτων (αυτόνομη ίαση) με σκοπό την επούλωση ευρύτερων ρωγμών. Στην περίπτωση αυτή, ο σχεδιασμός του UHPC βασίζεται στους Richard και Cheyrezy [41] και ο μηχανισμός αυτο-ίασης στους White et al. [42].

Το προτεινόμενο σύστημα αυτο-ίασης βασίζεται σε σύστημα εποξειδικής αμίνης. Από τη μία πλευρά, το εποξείδιο εισάγεται ενθυλακωμένο σε μικροκάψουλες πυριτίου (CAP) οι οποίες προστίθενται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανάμιξης και δεσμεύονται στη μήτρα καθώς σκληραίνει. Από την άλλη πλευρά, προστίθενται νανοσωματίδια διοξειδίου του πυριτίου με αμίνες (NS) που διασκορπίζονται στο νερό ανάμιξης για να αντιδράσουν με το κλίνκερ κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ενυδάτωσης. Σκοπός είναι να δημιουργηθεί ένα λειτουργικό σύστημα αμίνης - τσιμεντοειδούς μήτρας, δηλαδή η αμινομάδα να είναι ομοιοπολικά συνδεδεμένη με τις αλυσίδες πυριτικού άλατος που σχηματίζουν το τσιμεντοειδές πλέγμα. Ο σχηματισμός μιας μικρορωγμής θα προκαλέσει σπάσιμο σε κάποιες μικροκάψουλες με αποτέλεσμα την απελευθέρωση και εξάπλωση εποξειδίου μέσα στη ρωγμή. Το εποξείδιο επομένως θα έρθει σε επαφή με τις αμινομάδες στο πλέγμα, οι οποίες θα θεραπεύσουν την εποξειδική ρητίνη, επουλώνοντας έτσι τη ρωγμή [43].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πειραματικό Μέρος

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή δοκιμών ανθεκτικότητας για τον έλεγχο της αυτο-ίασης (self-healing) τσιμεντοειδών κονιαμάτων. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ήταν η υδατοαπορροφητικότητα, επαναλαμβανόμενοι κύκλοι ξήρανσης-εμβάπτισης και ψύξης-απόψυξης και η διείδυση χλωριόντων. Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια κονιαμάτων τσιμέντου 7 διαφορετικών συνθέσεων, διαμέτρου 10 cm και πάχους 1 και 5 cm. Τα δοκίμια είχαν παρασκευαστεί και ωριμάσει για 28 ημέρες. Κατόπιν είχαν αστοχήσει τεχνητά, προς τη δημιουργία ρωγμών και στη συνέχεια είχαν τοποθετηθεί στο νερό για περαιτέρω ενυδάτωση 200 ημερών προκειμένου να λάβουν χώρα οι μηχανισμοί αυτο-ίασης. Κατόπιν πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές ανθεκτικότητας με σκοπό να ληφθούν συμπεράσματα όσον αφορά την επαναφορά των ιδιοτήτων των δοκιμίων μετά την αυτο-ίαση.

4.1 Μελετηθέντα Δοκίμια

Για την πραγματοποίηση δοκιμών ανθεκτικότητας χρησιμοποιήθηκαν ιασμένα δοκίμια κονιαμάτων τσιμέντου 7 διαφορετικών συνθέσεων. Οι επί τοις εκατό κατά βάρος συνθέσεις των κονιαμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1

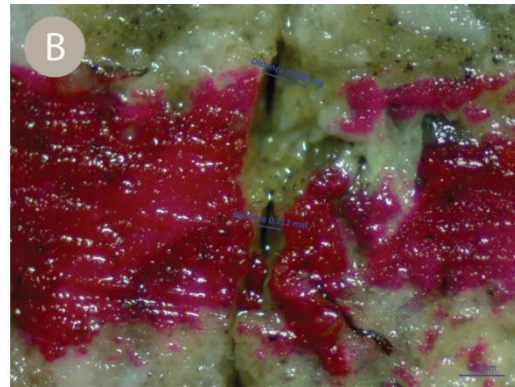
Πίνακας 4.1: Συνθέσεις* κονιαμάτων (% w/w)

Μίγμα	OPC 52.5N	Τσιμεντοειδή		Πυριτική Παιπάλη	Καρβοξυλικά Οξέα			Na ₂ CO ₃	Ίνες	SP**
		CA	CSA		1	2	3			
M _i	100.00									1.10
M _{ii}	88.50	1.50	10.00							1.10
M _{iii}	89.55		10.00		0.10	0.03		0.30		1.10
M _{iv}	89.55		10.00				0.13	0.30	1.00	1.10
M _v	90.00		10.00							1.10
M _{vi}	88.80		10.00		0.26	0.08		0.80		1.10
M _{vii}	87.80		10.00	1.00	0.10	0.03		0.30		1.63

*S/B= 2, W/B= 0.4

**SP: Υπερευστοποιητής

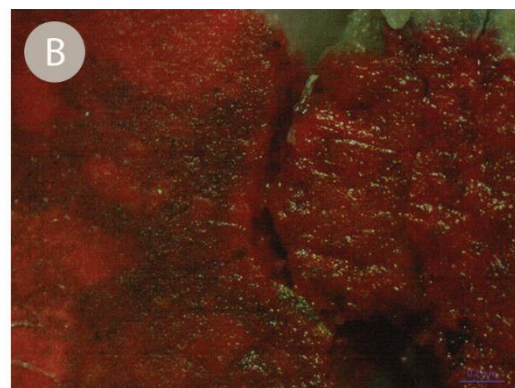
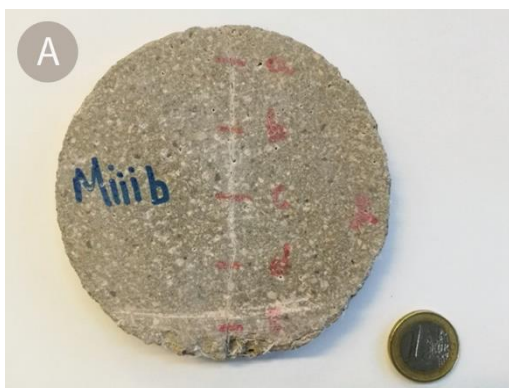
Προκειμένου να διασαφηνιστεί το φαινόμενο της αυτο-ίασης τα δοκίμια εξετάστηκαν με τη βοήθεια στερεοσκοπίου. Στα Σχήματα 4.1-4.7 παρουσιάζονται φωτογραφίες των δοκιμίων κάθε σύνθεσης καθώς και εικόνες των ρωγμών από το στερεοσκόπιο με μεγέθυνση ×25.



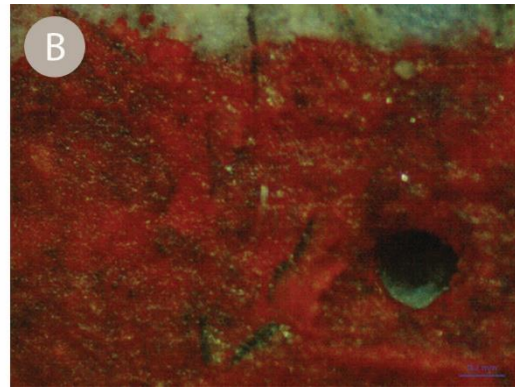
Σχήμα 4.1: α) Φωτογραφία δοκιμίου Mi β) Εικόνα από στερεοσκόπιο (×25)



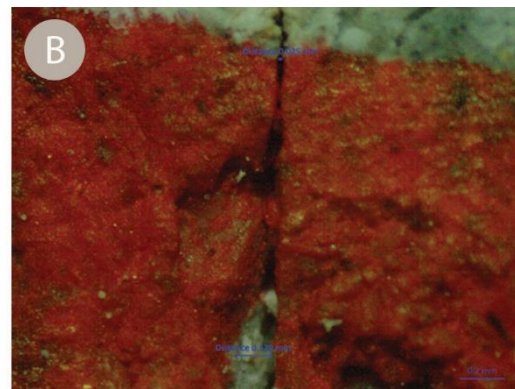
Σχήμα 4.2: α) Φωτογραφία δοκιμίου Mii β) Εικόνα από στερεοσκόπιο (×25)



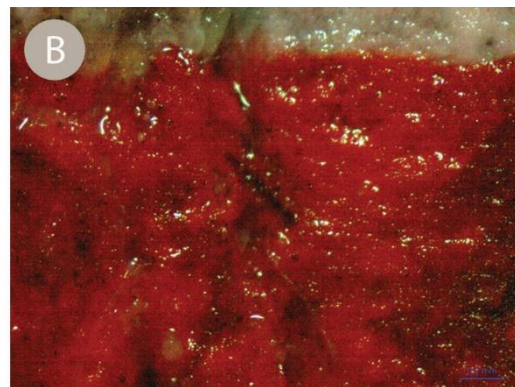
Σχήμα 4.3: α) Φωτογραφία δοκιμίου Miii β) Εικόνα από στερεοσκόπιο (×25)



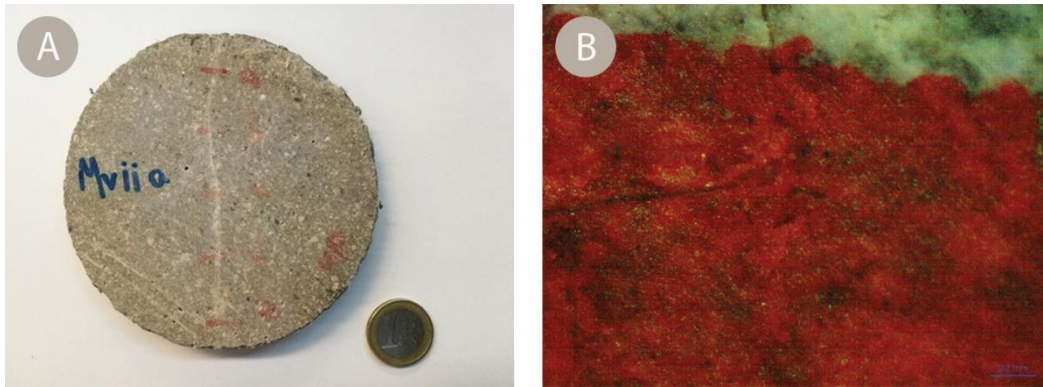
Σχήμα 4.4: α) Φωτογραφία δοκιμίου Μίν β) Εικόνα από στερεοσκόπιο ($\times 25$)



Σχήμα 4.5: α) Φωτογραφία δοκιμίου Μνβ β) Εικόνα από στερεοσκόπιο ($\times 25$)



Σχήμα 4.6: α) Φωτογραφία δοκιμίου Μνι β) Εικόνα από στερεοσκόπιο ($\times 25$)



Σχήμα 4.7: α) Φωτογραφία δοκιμίου Mvii β) Εικόνα από στερεοσκόπιο (x25)

Το αρχικό εύρος ρωγμής που υπέστησαν τα δοκίμια ήταν 300-400 μm . Στις συνθέσεις Mii, Miv, Mvi και Mvii παρατηρήθηκε πλήρες κλείσιμο των ρωγμών. Στη σύνθεση Miii το πλάτος της ρωγμής μειώθηκε σε 50-100 μm και στη Mi σε 100-200 μm . Στη σύνθεση Mn πρακτικά δεν σημειώθηκε επούλωση της ρωγμής.

Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς στις δοκιμές ανθεκτικότητας των ιασμένων δοκιμίων, οι αντίστοιχες δοκιμές έλαβαν χώρα σε δοκίμια αναφοράς τα οποία δεν είχαν υποστεί ρηγματώση και αυτο-ίαση. Τα δοκίμια αυτά παρασκευάστηκαν με χύτευση στο εργαστήριο σε κυλινδρικές μήτρες διαστάσεων 10x20 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 1 και 5 cm.

4.2 Δοκιμή Υδατοαπορροφητικότητας

Στη δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας υποβλήθηκαν 14 δοκίμια κονιάματος διαμέτρου 10 cm και πάχους 5 cm (2 δοκίμια από κάθε σύνθεση) και 2 δοκίμια αναφοράς των συνθέσεων Mi, Mvi. Αρχικά τα δοκίμια αυτά ζυγίστηκαν και κατόπιν τοποθετήθηκαν σε πυριαντήριο στη θερμοκρασία των 70°C με σκοπό την ξήρανση τους. Η διαδικασία διήρκεσε 72 ώρες, όπου και τα δοκίμια απέκτησαν σταθερό βάρος. Κατόπιν, και αφού τα δοκίμια ήρθαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, μονώθηκαν πλευρικά με μονωτική ταινία ούτως ώστε να εξασφαλιστεί μονοδιάστατη προσρόφηση νερού και ζυγίστηκαν εκ νέου.

Όλα τα δοκίμια, τοποθετήθηκαν σε δοχεία με νερό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8, το οποίο έπρεπε να καλύπτει μόνο τη βάση τους σε ένα ύψος 5 mm. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν ειδικά στηρίγματα στα οποία τοποθετήθηκαν τα δοκίμια για να μην παρεμποδίζεται η διέλευση του νερού από τη βάση τους. Οι χρόνοι μέτρησης ήταν: 10, 20, 30, 45, 60 και 120 min. Στο τέλος κάθε προκαθορισμένου χρόνου παραμονής τους στο νερό, τα δοκίμια ζυγίζονταν και καταγράφονταν η μάζα τους.



Σχήμα 4.8: Πειραματική διάταξη μέτρησης υδατοαπορροφητικότητας

4.3 Ανθεκτικότητα σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ξήρανσης-εμβάπτισης, ψύξης-απόψυξης

4.3.1 Δοκιμή ξήρανσης-εμβάπτισης

Για τη δοκιμή ξήρανσης-εμβάπτισης, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 14 ιασμένα δοκίμια κονιάματος (2 από κάθε σύνθεση) και 4 δοκίμια αναφοράς των συνθέσεων Mi, Mvi (2 από 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.

4.3.2 Δοκιμή ψύξης-απόψυξης

Για τη δοκιμή ψύξης-απόψυξης, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 14 ιασμένα δοκίμια κονιάματος (2 από κάθε σύνθεση) και 4 δοκίμια αναφοράς των συνθέσεων Mi, Mvi (2 από κάθε σύνθεση). Πριν την εφαρμογή των επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης, για να είναι δυνατή η πρόκληση φθορών, 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. Η ψύξη των δοκιμίων λάμβανε χώρα σε ξηρό περιβάλλον ενώ η απόψυξη γινόταν σε νερό. 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. Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των δοκιμίων έγινε μέσω μετρήσεων μάζας χρησιμοποιώντας ως κριτήριο τερματισμού της δοκιμής την απώλεια του 50% της αρχικής μάζας των δοκιμίων. Κάθε 10 επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης, ή όποτε παρατηρούνταν σοβαρή υποβάθμιση των δοκιμίων, τα δοκίμια ζυγίζονταν αφού τοποθετούνταν για 2 ημέρες στο νερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όσα από αυτά είχαν απωλέσει ποσοστό άνω του 50% των αρχικών μαζών τους αποβάλλονταν και η δοκιμή συνεχιζόταν για τα υπόλοιπα δοκίμια.

4.4 Διείσδυση χλωριόντων

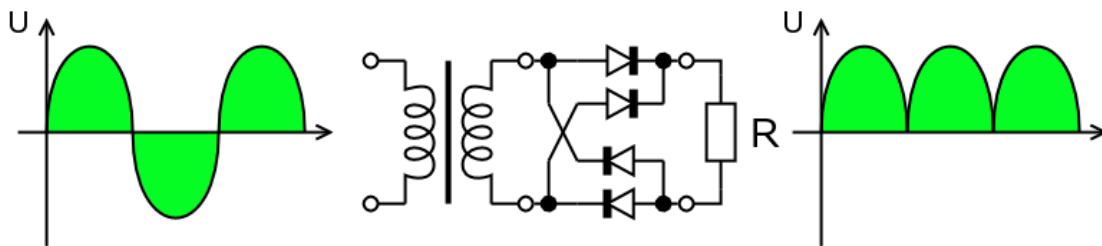
Χρησιμοποιήθηκαν 7 ιασμένα δοκίμια κονιάματος και 2 δοκίμια αναφοράς των συνθέσεων Mi, Mvi.

Για τη δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων χρησιμοποιήθηκε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα - διάταξη το οποίο καταλήγει σε δύο ηλεκτρόδια (άνοδος-κάθοδος), μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται το δοκίμιο. Τα ηλεκτρόδια δημιουργούν μία διαφορά δυναμικού με αποτέλεσμα τα ιόντα χλωρίου να εξαναγκάζονται σε κίνηση μέσα στην μάζα του τσιμέντου. Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή των διαφόρων συσκευών του κυκλώματος (Σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9: Ηλεκτρική διάταξη

- Τροφοδοσία δικτύου.
- Μετασχηματισμός απομόνωσης: Πρόκειται για ένα μονοφασικό μετασχηματιστή με μοναδιαίο λόγο μετασχηματισμού, ο οποίος χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει γαλβανική απομόνωση του κυκλώματος από το δίκτυο.
- Ασφάλεια: Στοιχείο παθητικής προστασίας από υπερρεύμα. Σε περίπτωση διέλευσης ρεύματος μεγαλύτερου από το προδιαγεγραμμένο τήκεται με αποτέλεσμα να διακόπτεται (ανοίγει) το κύκλωμα.
- Αμπερόμετρο: Όργανο μέτρησης της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Διακόπτης: 2 θέσεις (ON/OFF) για ανοιχτό ή κλειστό κύκλωμα αντίστοιχα
- Ρυθμιζόμενος Αυτομετασχηματιστής: Μονοφασικός μετασχηματιστής με μεταβαλλόμενο λόγο μετασχηματισμού μέσω της ρύθμισης ενός δρομέα. Στην είσοδο του υπάρχει η εναλλασσόμενη τάση με το πλάτος του δικτύου, ενώ στην έξοδό του λαμβάνεται εναλλασσόμενη τάση επιθυμητού πλάτους. Δεν προσφέρει γαλβανική απομόνωση.
- Γέφυρα ανόρθωσης: Αποτελείται από 4 διόδους σε συνδεσμολογία γέφυρας και μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή(ανόρθωση), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Η μέση τιμή της τάσης εξόδου είναι η DC συνιστώσα η οποία έχει όμως και κάποια κυμάτωση. Για την εξάλειψη αυτής της κυμάτωσης και για την εξομάλυνση της τάσης εξόδου (DC) γύρω από τη μέση τιμή της, χρησιμοποιείται ένας πυκνωτής παράλληλα στο φορτίο. Εφόσον υπάρχει μεταβλητή τάση εισόδου από το ρυθμιζόμενο αυτομετασχηματιστή μπορεί να ληφθεί συνεχής εξομαλυμένη τάση επιθυμητής τιμής.

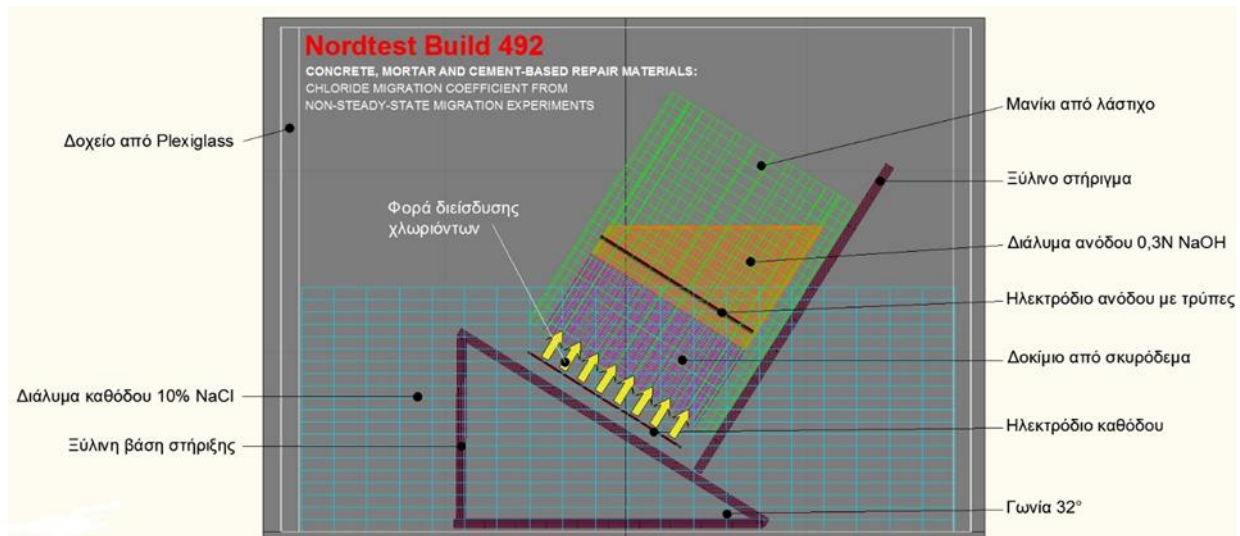


Σχήμα 4.10: Γέφυρα ανόρθωσης

- Πυκνωτής: Είναι μια αποθήκη ενέργειας, η οποία διατηρεί την τάση εξόδου σταθερή.
- Ηλεκτρόδια: 2 κυκλικά μεταλλικά φύλλα εκ των οποίων το ένα (άνοδος) έχει τρύπες, ενώ το άλλο (κάθοδος) δεν έχει.
- Πολύμετρο: όργανο μέτρησης το οποίο μας δίνει οπτικά τα στοιχεία του κυκλώματος (ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, διαφορά δυναμικού, αντίσταση κ.ά.)

- Κύκλωμα αποφόρτισης: Τα δύο ηλεκτρόδια στο τέλος του πειράματος αποφορτίζονται μέσω μιας διάταξης με ωμική αντίσταση μεγάλης τιμής για την αποφυγή τόξων (arcs).

Το κύκλωμα κλείνει όταν μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων παρεμβληθεί το δοκίμιο τσιμέντου το οποίο αποτελεί και την αντίσταση. Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη της διείσδυσης χλωριόντων σύμφωνα με το πρότυπο nordtest build 492 και στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά τα τμήματά της.

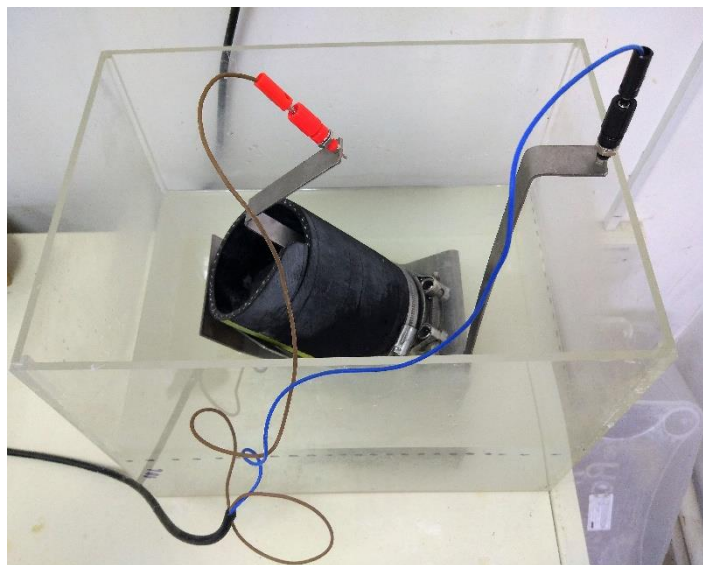


Σχήμα 4.11: Πειραματική διάταξη διείσδυσης χλωριόντων σύμφωνα με πρότυπο nordtest build 492

- Μανίκι από λάστιχο: Εσωτερική/εξωτερική διάμετρος 100/115 mm και ύψος περίπου 150 mm.
- Σφιγκτήρες: 2 μεταλλικοί σφιγκτήρες με εύρος διαμέτρου 105-115 mm και πλάτος 20 mm πλάτος.
- Ταμιευτήρας - δοχείο καθόδου: πλαστικό δοχείο από Plexiglass, 370x270x280 mm (μήκος x πλάτος x ύψος).
- Βάση στήριξης.
- Ηλεκτρόδιο καθόδου: μεταλλικός δίσκος διαμέτρου περίπου 90 mm και πάχους περίπου 0,5 mm.
- Ηλεκτρόδιο ανόδου: μεταλλικός δίσκος με τρύπες διαμέτρου περίπου 90 mm και πάχους περίπου 0,5 mm.
- Θερμόμετρο: ικανό να μετράει θερμοκρασία με ακρίβεια 1 °C.

Η δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων, όπως αναφέρθηκε, έγινε σύμφωνα με το πρότυπο nordtest build 492. Αρχικά, ετοιμάστηκαν τα δύο διαλύματα, αυτό της

ανόδου και αυτό της καθόδου. Συγκεκριμένα όσον αφορά το διάλυμα ανόδου (0.3 M NaOH) χρησιμοποιήθηκαν 4.84 g NaOH σε 365 ml απιονισμένου νερού ενώ για το διάλυμα καθόδου (10% κατά βάρος NaCl), διαλύθηκαν 1111.1 g NaCl εμπορίου σε 10 L νερού βρύσης μέσα στη δεξαμενή της διάταξης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12.



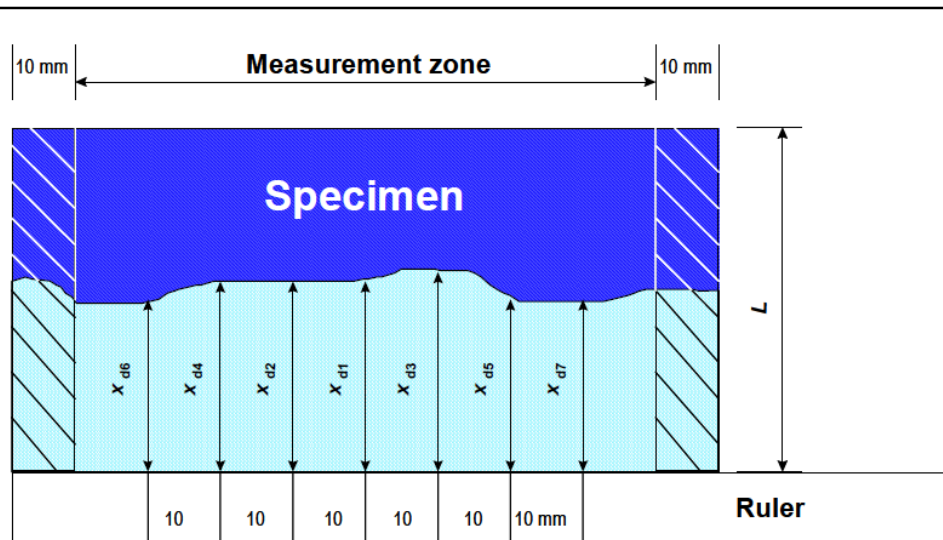
Σχήμα 4.12: Πειραματικής διάταξης διείσδυσης χλωριόντων

Αρχικά, στο δοχείο της καθόδου τοποθετήθηκε το διάλυμα 10% NaCl. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε το δοκίμιο μέσα στο λαστιχένιο μανίκι και ασφαλίστηκε με 2 σφιγκτήρες προκειμένου να μην υπάρξουν διαρροές του διαλύματος ανόδου και να μην αναμιχθεί με το διάλυμα καθόδου. Κατόπιν, τοποθετήθηκε το ηλεκτρόδιο καθόδου στο κάτω μέρος της βάσης. Επιπλέον, τοποθετήθηκε το δοκίμιο μαζί με το μανίκι πάνω στη βάση στήριξης και στην συνέχεια πάνω και μέσα σε αυτό το ηλεκτρόδιο ανόδου. Η ξύλινη βάση βυθίστηκε μέσα στο Plexiglas όπου ήταν τοποθετημένο το διάλυμα καθόδου και στη συνέχεια τοποθετήθηκε το διάλυμα ανόδου στο πάνω μέρος από το μανίκι. Αφού επιβεβαιώθηκε ότι το ηλεκτρόδιο ανόδου είναι συνδεδεμένο στο θετικό πόλο και το ηλεκτρόδιο καθόδου στον αρνητικό πόλο του πυκνωτή, η πρίζα τροφοδοσίας συνδέεται με το ρεύμα. Εν συνεχεία, ο διακόπτης του κυκλώματος έναρξης τοποθετήθηκε στην ένδειξη ON, τα πολύμετρα τέθηκαν σε λειτουργία με ένδειξη Volt στο πρώτο και Amber στο δεύτερο. Με πολύ μικρή ταχύτητα και με πολλή προσοχή ρυθμίστηκε ο δρομέας του μετασχηματιστή έτσι ώστε το πολύμετρο να δείχνει ηλεκτρική τάση 30 V και καταγράφηκε η αρχική ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.2, ο οποίος δίνεται από το πρότυπο, η αρχική ένταση του ρεύματος αντιστοιχίζεται με την τάση της δεύτερης στήλης.

Πίνακας 4.2: Αντιστοίχιση αρχικής έντασης ρεύματος με την τελική εφαρμοζόμενη τάση και 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

Στη συνέχεια, ρυθμίστηκε ο δρομέας του αυτομετασχηματιστή έτσι ώστε να επιτευχθεί η τάση που δείχνει η δεύτερη στήλη του Πίνακα 4.2 για την αρχική ένταση που είχε καταγραφεί. Κατόπιν, μετρήθηκε η αρχική θερμοκρασία του διαλύματος ανόδου και η τιμή της καταγράφηκε. Αφού παρήλθε η απαραίτητη χρονική διάρκεια του πειράματος (24h), αποσύρθηκε το καλώδιο τροφοδοσίας από την πρίζα, ο διακόπτης του κυκλώματος τέθηκε στην ένδειξη OFF και καταγράφηκε η τελική θερμοκρασία του διαλύματος ανόδου. Εν συνεχεία, ρυθμίστηκε ο αυτοσχηματιστής στο «μηδέν». Με πολλή προσοχή και φορώντας γάντια το ηλεκτρόδιο ανόδου επανατοποθετήθηκε πάνω στη διαμορφωμένη αντίσταση έτσι ώστε να γίνει η αποφόρτιση. Η ένδειξη του πολυμέτρου όσον αφορά την τάση του ρεύματος άρχισε να μειώνεται και έφτασε πολύ κοντά στο «μηδέν», γεγονός που σήμανε την πλήρη αποφόρτιση. Το δοκίμιο απομακρύνθηκε και χωρίστηκε με διαμετρική θλίψη σε δύο μέρη κάθετα στο επίπεδο της ρωγμής. 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 νιτρικού αργύρου και ελεύθερων χλωριόντων η οποία είχε ως αποτέλεσμα το χρωματισμό της επιφάνειας όπου υπήρχαν χλωριόντα. Έτσι, λήφθηκαν μετρήσεις για το βάθος διείσδυσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13. Στη συνέχεια, το δοκίμιο υπέστη 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 4.13: Υπόδειγμα μέτρησης βάθους διείσδυσης χλωριόντων

Κατόπιν, προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά των ιασμένων δοκιμίων στη δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων, πραγματοποιήθηκε εκ νέου δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας σε δοκίμια αναφοράς των συνθέσεων Mi, Mvi. Τα δοκίμια αυτά 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 1 και 5 cm. Οι κύλινδροι κονιάματος τοποθετήθηκαν στο πυριαντήριο σε θερμοκρασία 70°C μέχρι σταθερού βάρους. Η διαδικασία αυτή διήρκεσε 3 ημέρες. Στη συνέχεια έλαβε χώρα η πειραματική διαδικασία της διείσδυσης χλωριόντων όπως αναλύθηκε προηγουμένως.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αποτελέσματα και συζήτηση αποτελεσμάτων

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιασθούν και θα συζητηθούν τα αποτελέσματα των δοκιμών ανθεκτικότητας στα κονιάματα 7 διαφορετικών συνθέσεων, προκειμένου να ελεγχθεί η αυτο-ίαση (self-healing). Θα σχολιασθούν αναλυτικά τα αποτελέσματα της υδατοαπορροφητικότητας, των επαναλαμβανόμενων κύκλων ξήρανσης – εμβάπτισης και ψύξης – απόψυξης, της διείσδυσης χλωριόντων και θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα δοκιμίων αναφοράς.

5.1 Δοκιμή Υδατοαπορροφητικότητας

5.1.1 Γενικά

Λόγω της ύπαρξης πόρων διαφορετικών ειδών, μερικοί από τους οποίους συμβάλουν στην διαπερατότητα του υλικού και άλλοι όχι και τόσο, είναι σημαντική η διάκριση μεταξύ πορώδους και διαπερατότητας. Το πορώδες είναι ένα μέτρο του ποσοστού του ολικού όγκου του σκυροδέματος που καλύπτεται από πόρους, και συνήθως εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό. Εάν το πορώδες είναι υψηλό και οι πόροι συνδεδεμένοι, συμβάλουν στη μεταφορά ρευστών μέσω του τσιμέντου και επομένως αυξάνουν την διαπερατότητα του. Από την άλλη, 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.

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.

Εξαιτίας των δυσκολιών οι οποίες συνδέονται με τις δοκιμές απορρόφησης και επειδή οι δοκιμές διαπερατότητας μετρούν την απόκριση τσιμέντου σε ροή ρευστού υπό διαφορά πίεσης, η οποία σπάνια αποτελεί κινητήριο δύναμη των ρευστών που εισέρχονται σε αυτό, προέκυψε η ανάγκη ενός άλλου είδους δοκιμών. Μια τέτοια δοκιμή είναι η υδατοαπορροφητικότητα η οποία μετράει το ποσοστό απορρόφησης νερού μέσω τριχοειδούς ανύψωσης από ακόρεστο τσιμέντο το οποίο τοποθετείται σε επαφή με το νερό.

Ουσιαστικά η δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας καθορίζει το ρυθμό απορρόφησης μέσω τριχοειδούς ανύψωσης σε ένα δοκίμιο τσιμέντου το οποίο τοποθετείται πάνω σε μικρά στηρίγματα και είναι βυθισμένο 2 με 5 mm. Καταγράφεται η αύξηση της μάζας του πρίσματος συναρτήσει του χρόνου.

Ισχύει η σχέση:

$$i=St^{0.5} \quad (1)$$

όπου:

i = συνολική αύξηση μάζας δοκιμίου ανά μονάδα επιφανείας προσρόφησης (g/mm^2)

t = χρόνος (min)

S = υδατοαπορροφητικότητα (sorptivity) ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$)

Πρακτικά, είναι ευκολότερο να μετρηθεί η τιμή του i ως ανύψωση στο επίπεδο του νερού στο τσιμέντο, γεγονός που εκδηλώνεται με αλλαγή στο χρώμα του (γίνεται πιο σκούρο). Σε αυτή την περίπτωση, μετριέται άμεσα σε mm. Για την έκφραση της υδατοαπορροφητικότητας σε μονάδες του συστήματος S.I, γίνεται η παρακάτω μετατροπή:

$$1 \text{ mm}/\text{min}^{0.5} = 1.29 \cdot 10^{-4} \text{ m}/\text{s}^{0.5}$$

Κατά τη δοκιμή, αρκετές μετρήσεις λαμβάνονται επί μια περίοδο έως 4 ώρες και προκύπτει γράφημα με ευθεία γραμμή η οποία εκφράζει την αύξηση μάζας, ή την ανύψωση νερού συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου. Το σημείο πρόελευσης (και πιθανόν και οι πρώτες μετρήσεις) αγνοούνται επειδή υπάρχει μικρή αύξηση στη μάζα τη στιγμή που το άνοιγμα των επιφανειακών πόρων του δοκιμίου που έχει βυθιστεί είναι μικρότερο από 2 με 5 mm.

Στην αρχική δοκιμή, όσο ψηλότερο είναι το περιεχόμενο υγρασίας του τσιμέντου τόσο χαμηλότερη μετριέται η υδατοαπορροφητικότητα. Για το λόγο αυτό τα δείγματα παραμένουν στους 105°C πριν την πρώτη δοκιμή [44].

5.1.2 Αποτελέσματα

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής αυτής προσδιορίζεται η υδατοαπορροφητικότητα 14 ιασμένων δοκιμίων κονιάματος, 7 διαφορετικών συνθέσεων και 2 δοκιμίων αναφοράς μέσω μετρήσεων του ρυθμού απορρόφησης του νερού.

Η δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας βασίζεται στην μέτρηση του ρυθμού απορρόφησης νερού, που αποδίδεται στους τριχοειδείς πόρους, σε ένα δοκίμιο τσιμέντου ή σκυροδέματος.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ισχύει η σχέση (1) η οποία δείχνει ότι η απορρόφηση του νερού ανά μονάδα επιφάνειας απορρόφησης είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου απορρόφησης. Επομένως το S προσδιορίζεται από την κλίση της συνάρτησης $i=f(t^{0.5})$ με τη χρήση ανάλυσης παλινδρόμησης με τη βοήθεια της συνάρτησης LINEST του Excel όπως ενδεικτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1.

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΜΠ**

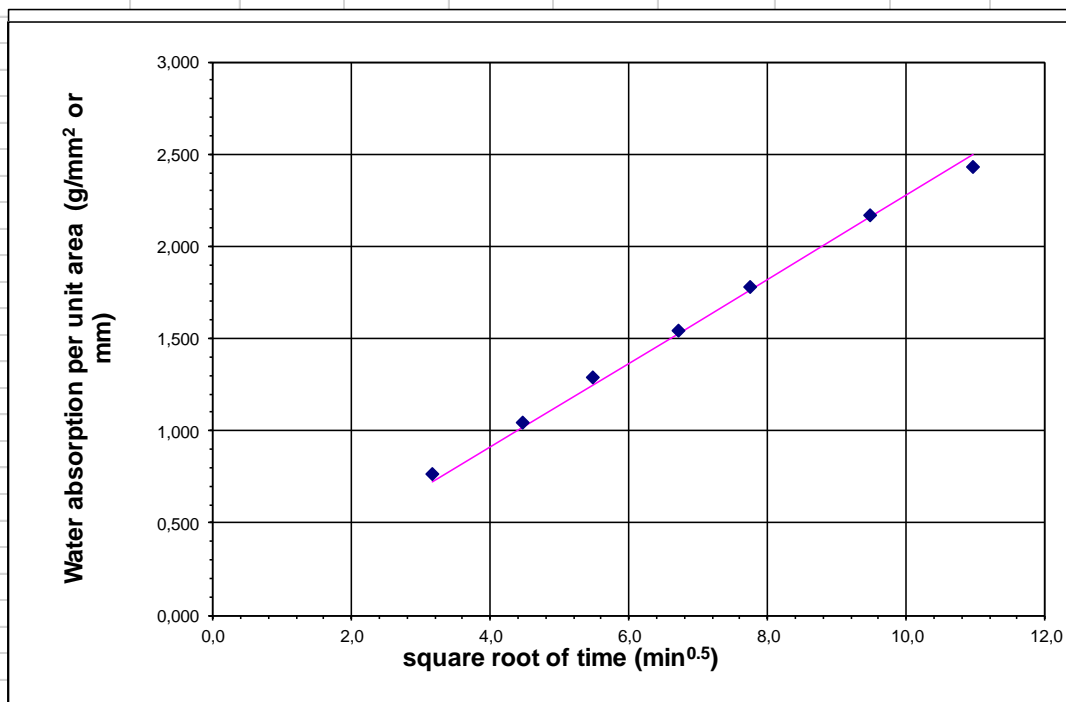
ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

ΔΕΙΓΜΑ : Δοκίμιο 1

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

W₀ (g)	751,4						
t (min)	10	20	30	45	60	90	120
W (g)	757,4	759,6	761,5	763,5	765,4	768,4	770,5
dW (g)	6,0	8,2	10,1	12,1	14,0	17,0	19,1
i (mm)	0,764	1,044	1,286	1,541	1,783	2,165	2,432
S (mm/min ^{0.5})	0,242	0,233	0,235	0,230	0,230	0,228	0,222

Regression analysis	R square :	0,9991
	S (mm/min ^{0.5})	0,228
	S (mm/min ^{0.5}) _{avg}	0,231



**Συσχέτιση ρυθμού απορρόφησης νερού ανά μονάδα επιφάνειας
και χρόνου απορρόφησης. Υπολογισμός υδατοαπορροφητικότητας**

Σχήμα 5.1. Πρωτόκολλο μετρήσεων/επεξεργασίας για τον προσδιορισμό της υδατοαπορροφητικότητας

Πριν από την εκτέλεση της δοκιμής της υδατοαπορροφητικότητας όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε ξήρανση μέχρι σταθερού βάρους, έτσι ώστε η όποια αρχική υγρασία περιέχεται σε αυτά να μην επηρεάσει τα αποτελέσματα της δοκιμής αυτής. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι αρχικές και οι μάζες κατόπιν 72 ωρών σε φούρνο στους 70°C αντίστοιχα για τα δοκίμια. Οι μάζες μετά την ξήρανση αποτέλεσαν τις μάζες αναφοράς των δοκιμίων.

Πίνακας 5.1: Μάζα δοκιμίων (g) πριν και μετά την ξήρανση

ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΞΗΡΑΝΣΗ							
Δοκίμιο	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii
(1)	738.1	732.1	766.3	765.1	766.7	723.9	753.6
(2)	738.7	769.2	784.9	752.1	744.5	760.8	775.3
ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΞΗΡΑΝΣΗ							
(1)	724.7	719.0	751.8	749.6	750.8	708.0	734.8
(2)	724.2	756.8	771.7	738.3	728.0	746.8	759.7

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής η πλευρική επιφάνεια των δοκιμίων καλύπτονται με μια ταινία αδιαπέρατη στο νερό. Τα δοκίμια τοποθετούνται σε ειδικά στηρίγματα έτσι ώστε να είναι βυθισμένα στο νερό σε βάθος περίπου 5 mm. Μετράται η μάζα του νερού που απορροφάται μετά από 10, 20, 30, 45, 60, 90 και 120 min από την έναρξη της δοκιμής. Προκύπτει ο Πίνακας 5.2 με τις μάζες των δοκιμίων και ο Πίνακας 5.3 με την υδατοαπορροφητικότητα κάθε δοκιμίου.

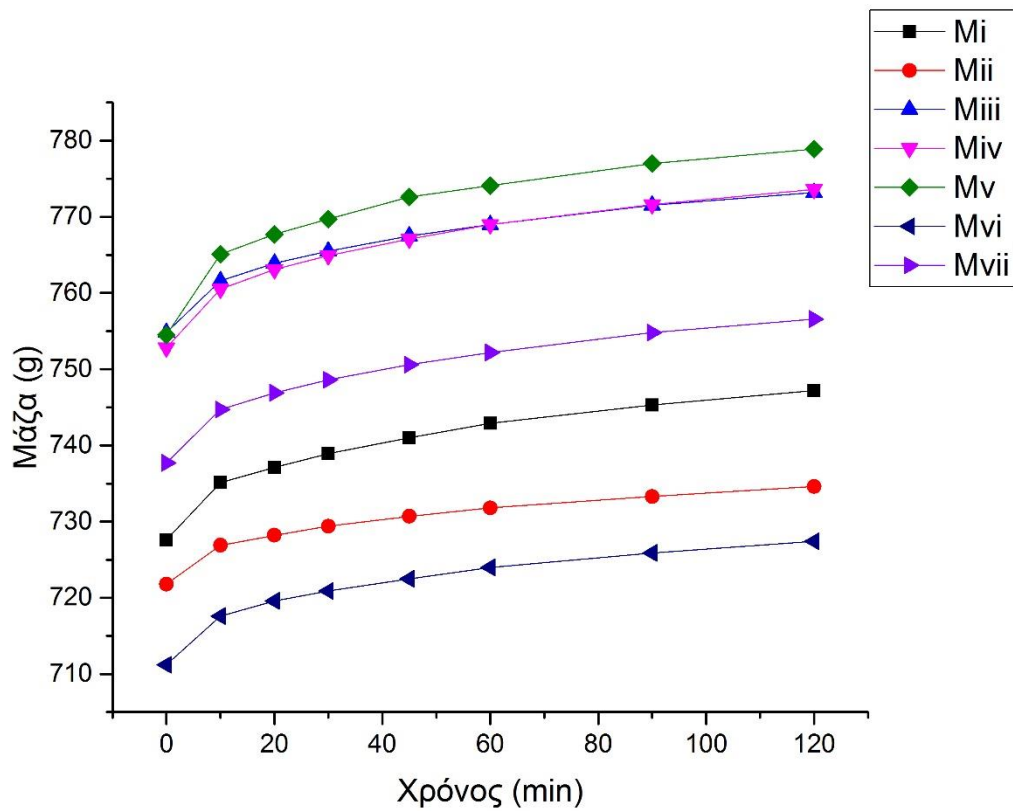
Πίνακας 5.2: Μάζες δοκιμίων (g) συναρτήσει του χρόνου

Συνθέσεις	Χρόνος (min)							
	0	10	20	30	45	60	90	120
Mi (1)	727.1	735.1	737.1	738.9	741.0	742.9	745.3	747.2
Mi (2)	727.2	733.7	735.8	737.3	739.3	740.8	743.5	745.3
Mii (1)	721.8	726.9	728.2	729.4	730.7	731.8	733.3	734.6
Mii (2)	759.3	765.3	766.9	768.5	770.0	771.2	773.0	774.2
Miii (1)	754.8	761.6	763.9	765.5	767.5	769.0	771.5	773.2
Miii (2)	774.9	782.9	785.5	787.2	789.6	791.5	794.2	796.3
Miv (1)	752.8	760.5	763.1	764.9	767.1	769.0	771.6	773.6
Miv (2)	741.5	748.4	750.6	752.1	754.0	755.5	757.7	759.4
Mv (1)	754.5	765.1	767.7	769.7	772.6	774.1	777.0	778.9
Mv (2)	731.0	741.1	743.0	744.6	746.5	748.3	750.6	752.4
Mvi (1)	711.2	717.6	719.6	720.9	722.5	724.0	725.9	727.4
Mvi (2)	749.7	755.8	757.6	759.1	760.7	762.1	764.2	765.7
Mvii (1)	737.7	744.7	746.9	748.6	750.6	752.2	754.8	756.6
Mvii (2)	762.9	771.9	774.3	776.2	778.3	780.1	783.0	785.1

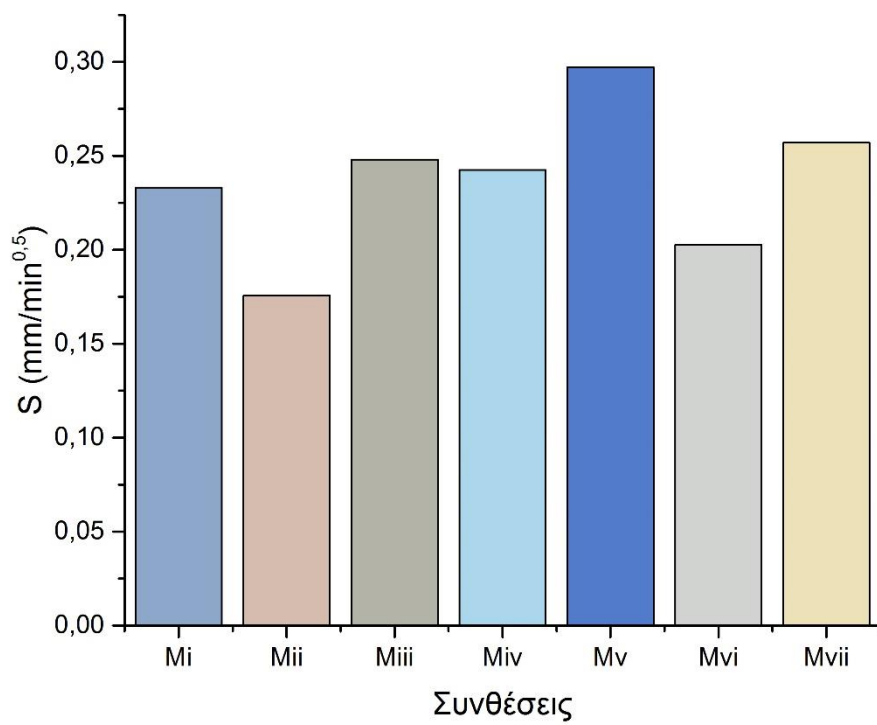
Πίνακας 5.3: Υδατοαπορροφητικότητα δοκιμίων

Συνθέσεις	S (mm/min ^{0.5})	
	Επιμέρους δοκίμια	Μέσος όρος
Mi	0.244	0.233
	0.222	
Mii	0.161	0.176
	0.190	
Miii	0.230	0.248
	0.266	
Miv	0.260	0.243
	0.225	
Mv	0.316	0.297
	0.278	
Mvi	0.205	0.203
	0.200	
Mvii	0.235	0.257
	0.279	

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το Σχήμα 5.2 με την μεταβολή της μάζας κάθε δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου και το Σχήμα 5.3 με την υδατοαπορροφητικότητα κάθε σύνθεσης.



Σχήμα 5.2: Μεταβολή μάζας δοκιμών συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 5.3: Υδατοαπορροφητικότητα συνθέσεων

Η δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για την εκτίμηση της συνεκτικότητας ενός δομικού υλικού δηλαδή της ικανότητάς του να δυσχεραίνει ή όχι την είσοδο διαφόρων ιόντων στο εσωτερικό του. Η απορρόφηση όμως του νερού γίνεται από τους τριχοειδείς πόρους των δοκιμίων. Μεγαλύτερη αύξηση μάζας σημαίνει μεγαλύτερη προσροφητική ικανότητα άρα και μεγαλύτερη διαπερατότητα του υλικού. Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι τη μεγαλύτερη διαπερατότητα εμφανίζει η σύνθεση Mv ενώ τη μικρότερη η σύνθεση Mii. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο δείγμα της σύνθεσης Mv παρατηρήθηκε άμεση απορρόφηση του νερού μέσω της ρωγμής κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής υδατοαπορροφητικότητας στα δοκίμια Mi ref και Mvi ref τα οποία παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο και δεν αστόχησαν τεχνητά. Στον Πίνακα 5.4 αναφέρονται οι μάζες των δοκιμίων με το πέρας του χρόνου και στον Πίνακα 5.5 η υδατοαπορροφητικότητα τους όπως αυτή υπολογίστηκε με τη βοήθεια της συνάρτησης LINEST του Excel.

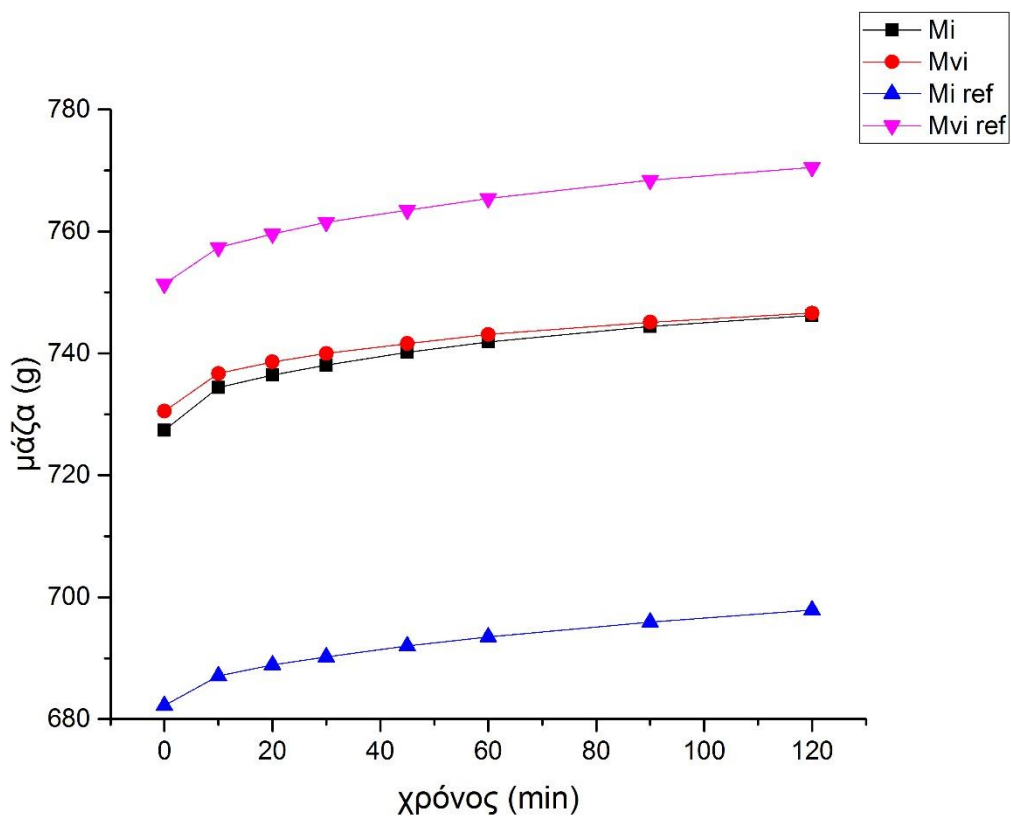
Πίνακας 5.4: Μάζες δοκιμίων Mi ref, Mvi ref (g) συναρτήσει του χρόνου

Συνθέσεις	Χρόνος (min)							
	0	10	20	30	45	60	90	120
Mi ref	682.2	687.1	688.9	690.2	692.0	693.5	695.9	697.9
Mvi ref	751.4	757.4	759.6	761.5	763.5	765.4	768.4	770.5

Πίνακας 5.5: Υδατοαπορροφητικότητα δοκιμίων Mi ref, Mvi ref

Συνθέσεις	S (mm/min ^{0.5})
Mi ref	0.185
Mvi ref	0.228

Κατόπιν, παρουσιάζεται το Σχήμα 5.4 με την μεταβολή της μάζας των δοκιμίων Mi, Mvi που είχαν αυτο-ιαθεί και των δοκιμίων αναφοράς Mi ref, Mvi ref, συναρτήσει του χρόνου.

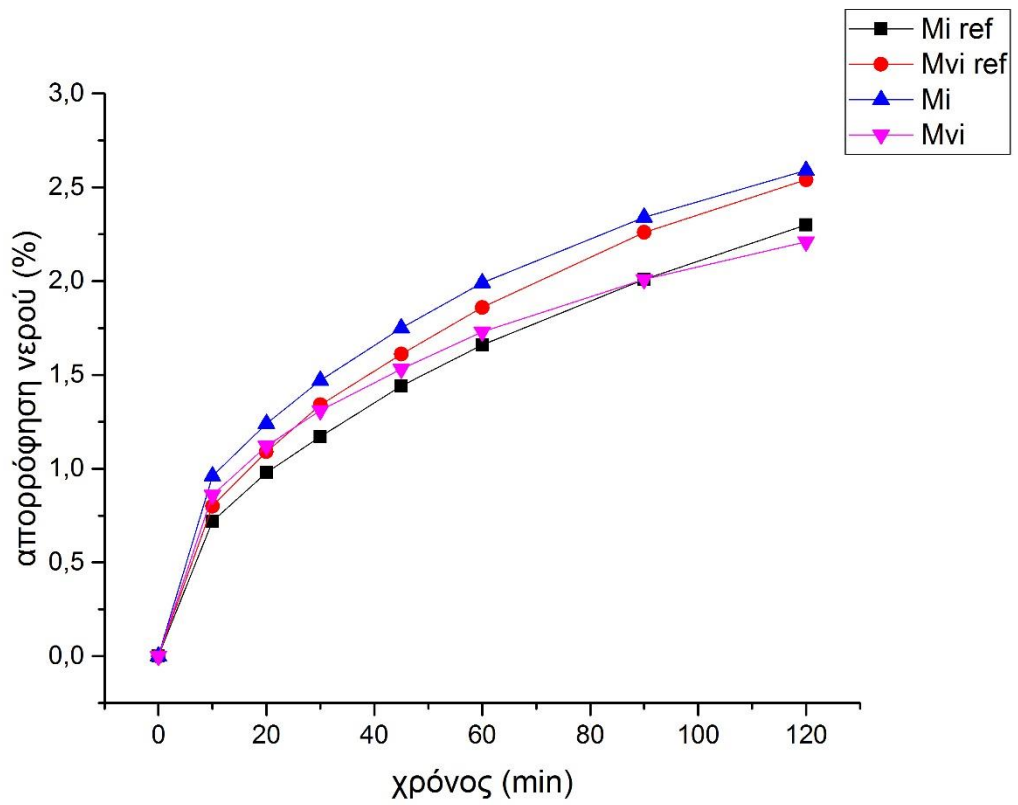


Σχήμα 5.4: Μεταβολή μάζας των δοκιμών αναφοράς *Mi ref*, *Mvi ref* και των αντίστοιχων δοκιμών που είχαν αυτο-ιαθεί

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 5.6 καταγράφονται οι επί τοις εκατό απορροφήσεις νερού των συνθέσεων αναφοράς *Mi ref*, *Mvi ref* και των αντίστοιχων συνθέσεων που είχαν αυτο-ιαθεί καθώς και το αντίστοιχο διάγραμμα στο Σχήμα 5.5.

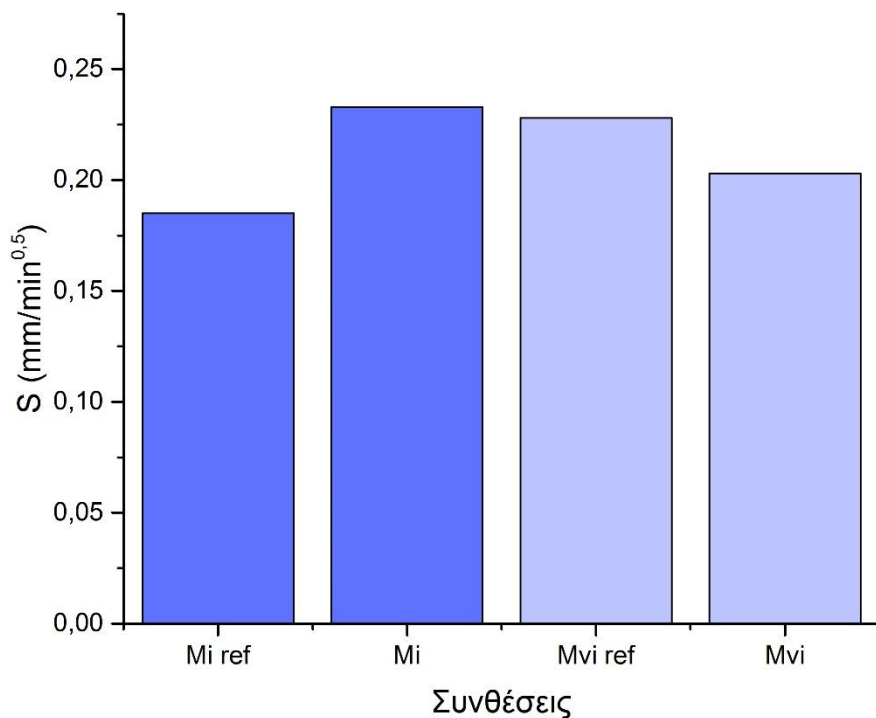
Πίνακας 5.6: Απορρόφηση νερού κατά τη δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας

Συνθέσεις	Χρόνος (min)							
	0	10	20	30	45	60	90	120
Mi	0	0.72	0.98	1.17	1.44	1.66	2.01	2.30
Mvi	0	0.80	1.09	1.34	1.61	1.86	2.26	2.54
Mi ref	0	0.96	1.24	1.47	1.75	1.99	2.34	2.59
Mvi ref	0	0.86	1.12	1.31	1.53	1.73	2.01	2.21



Σχήμα 5.5: Απορρόφηση νερού συναρτήσει του χρόνου

Τέλος, το Σχήμα 5.6 με την αντίστοιχη υδατοαπορροφητικότητα των δοκιμίων που αναφέρθηκαν.



Σχήμα 5.6: Υδατοαπορροφητικότητα των συνθέσεων αναφοράς Mi ref, Mvi ref και των αντίστοιχων συνθέσεων που είχαν αυτο-ιαθεί

Με βάση όσα αναφέρθηκαν, παρατηρήθηκε αύξηση υδατοαπορροφητικότητας του δοκιμίου της σύνθεσης Mi που αστόχησε τεχνητά και κατόπιν επουλώθηκε μέσω αυτο-ίασης σε σύγκριση με το αντίστοιχο αναφοράς της ίδιας σύνθεσης. Η αύξηση αυτή ωστόσο δεν είναι ιδιαίτερα αισθητή, γεγονός που οδήγησε στο συμπέρασμα ότι κατόπιν αυτο-ίασης η συνεκτικότητα του δοκιμίου επανήλθε. Όσον αφορά τη σύνθεση Mvi, το δοκίμιο αυτο-ίασης εμφανίζει μικρότερη υδατοαπορροφητικότητα σε σχέση με το αντίστοιχο αναφοράς. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε συμπεράσματα για πλήρη ανάκτηση της συνεκτικότητας στη σύνθεση Mvi καθώς και σε μείωση της προσροφητικής ικανότητας και κατ' επέκταση της διαπερατότητας. Επομένως, παρατηρήθηκε πως μέσω της αυτο-ίασης υπήρξε βελτίωση ιδιοτήτων.

5.2 Ανθεκτικότητα σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ξήρανσης-εμβάπτισης, ψύξης-απόψυξης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη της συμπεριφοράς τσιμεντοκονιαμάτων στις δοκιμές ξήρανσης-εμβάπτισης και ψύξης-απόψυξης. Και οι δύο αυτές δοκιμές σχετίζονται με τη φθορά των υλικών με φυσικό τρόπο, λόγω μεταβολών της θερμοκρασίας τους και της περιεχόμενης υγρασίας τους.

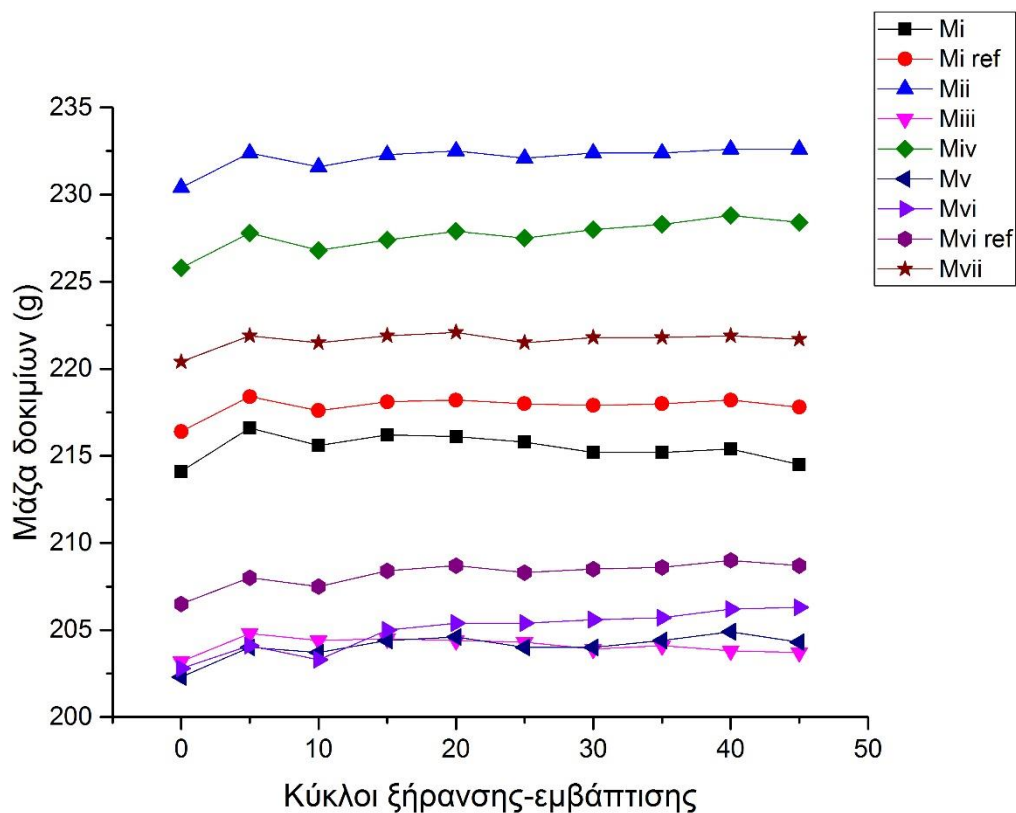
5.2.1 Δοκιμή ξήρανσης-εμβάπτισης

Για τη δοκιμή ξήρανσης-εμβάπτισης χρησιμοποιήθηκαν 14 ιασμένα δοκίμια κονιάματος (2 από κάθε σύνθεση) και 4 αναφοράς (2 από τις συνθέσεις Mi, Mvi). Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε 45 επαναλαμβανόμενους κύκλους ξήρανσης-εμβάπτισης. Ανά 5 κύκλους μετρούνταν οι μάζες των δοκιμίων. Οι μετρούμενες μάζες όλων των δοκιμίων τόσο πριν την υποβολή τους στη δοκιμή ξήρανσης-εμβάπτισης (μάζες αναφοράς), όσο και μετά από 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 και 45 επαναλαμβανόμενους κύκλους παρατίθενται στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7: Μεταβολή μαζών κατά τους κύκλους ξήρανσης-εμβάπτισης

Μάζες Αναφοράς (g)									
	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii	Mi ref	Mvi ref
(1)	206.5	237.2	227.7	214.3	207.2	240.7	223.4	219.4	221.8
(2)	221.7	223.5	178.7	237.3	197.4	164.8	217.3	213.3	191.2
M.O.	214.1	230.4	203.2	225.8	202.3	202.8	220.4	216.4	206.5
Μάζες μετά από 5 κύκλους (g)									
	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii	Mi ref	Mvi ref
(1)	209.1	239.2	229.7	216.4	208.9	242.3	224.9	221.6	223.4
(2)	224.0	225.6	179.9	239.1	199.0	165.8	218.8	215.2	192.5
M.O.	216.6	232.4	204.8	227.8	204.0	204.1	221.9	218.4	208.0
Μάζες μετά από 10 κύκλους (g)									
	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii	Mi ref	Mvi ref
(1)	208.2	238.3	228.9	215.2	208.4	241.9	224.6	220.7	223.0
(2)	222.9	224.8	179.9	238.4	198.9	164.7	218.4	214.5	192.0
M.O.	215.6	231.6	204.4	226.8	203.7	203.3	221.5	217.6	207.5
Μάζες μετά από 15 κύκλους (g)									
	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii	Mi ref	Mvi ref
(1)	208.8	239.2	229.2	215.9	209.3	243.4	225.1	221.3	223.9
(2)	223.6	225.3	179.8	238.9	199.4	166.5	218.7	214.9	192.9
M.O.	216.2	232.3	204.5	227.4	204.4	205.0	221.9	218.1	208.4
Μάζες μετά από 20 κύκλους (g)									
	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii	Mi ref	Mvi ref
(1)	208.6	239.9	229.1	216.3	209.2	244.4	225.2	221.5	224.3
(2)	223.6	225.1	179.6	239.4	200.0	166.4	218.9	214.9	193.1
M.O.	216.1	232.5	204.4	227.9	204.6	205.4	222.1	218.2	208.7
Μάζες μετά από 25 κύκλους (g)									
	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii	Mi ref	Mvi ref
(1)	208.0	239.1	229.0	215.7	208.7	244.8	224.6	221.0	224.0
(2)	223.5	225.1	179.5	239.3	199.2	165.9	218.3	214.9	192.5
M.O.	215.8	232.1	204.3	227.5	204.0	205.4	221.5	218.0	208.3
Μάζες μετά από 30 κύκλους (g)									
	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii	Mi ref	Mvi ref
(1)	207.6	239.3	228.5	216.3	208.6	244.6	224.8	220.9	224.0
(2)	222.8	225.4	179.3	239.6	199.3	166.6	218.7	214.8	192.9
M.O.	215.2	232.4	203.9	228.0	204.0	205.6	221.8	217.9	208.5
Μάζες μετά από 35 κύκλους (g)									
	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii	Mi ref	Mvi ref
(1)	207.6	239.5	228.9	216.6	209.3	245.1	225.1	221.2	224.5
(2)	222.8	225.2	179.2	240.0	199.4	166.2	218.4	214.8	192.7
M.O.	215.2	232.4	204.1	228.3	204.4	205.7	221.8	218.0	208.6
Μάζες μετά από 40 κύκλους (g)									
	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii	Mi ref	Mvi ref
(1)	207.9	239.4	228.8	216.9	209.6	245.8	225.0	221.3	224.8
(2)	222.8	225.8	178.8	240.6	200.1	166.5	218.8	215.0	193.1
M.O.	215.4	232.6	203.8	228.8	204.9	206.2	221.9	218.2	209.0
Μάζες μετά από 45 κύκλους (g)									
	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii	Mi ref	Mvi ref
(1)	206.8	239.8	228.7	217.0	209.1	245.7	224.8	221.1	224.5
(2)	222.2	225.4	178.6	239.8	199.4	166.8	218.5	214.5	192.9
M.O.	214.5	232.6	203.7	228.4	204.3	206.3	221.7	217.8	208.7

Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζονται γραφικά οι μέσες τιμές των μαζών των δοκιμίων σε συνάρτηση με τον αριθμό των επαναλαμβανόμενων κύκλων ξήρανσης-εμβάπτισης.



Σχήμα 5.7: Μάζες δοκιμίων μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους ξήρανσης-εμβάπτισης

Από το Σχήμα 5.7 παρατηρείται ότι οι μάζες των δοκιμίων παραμένουν πρακτικά σταθερές. Η σταθερότητα των μαζών των δοκιμίων υποδεικνύει την ικανοποιητική ανθεκτικότητα των ιασμένων κονιαμάτων σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ξήρανσης-εμβάπτισης.

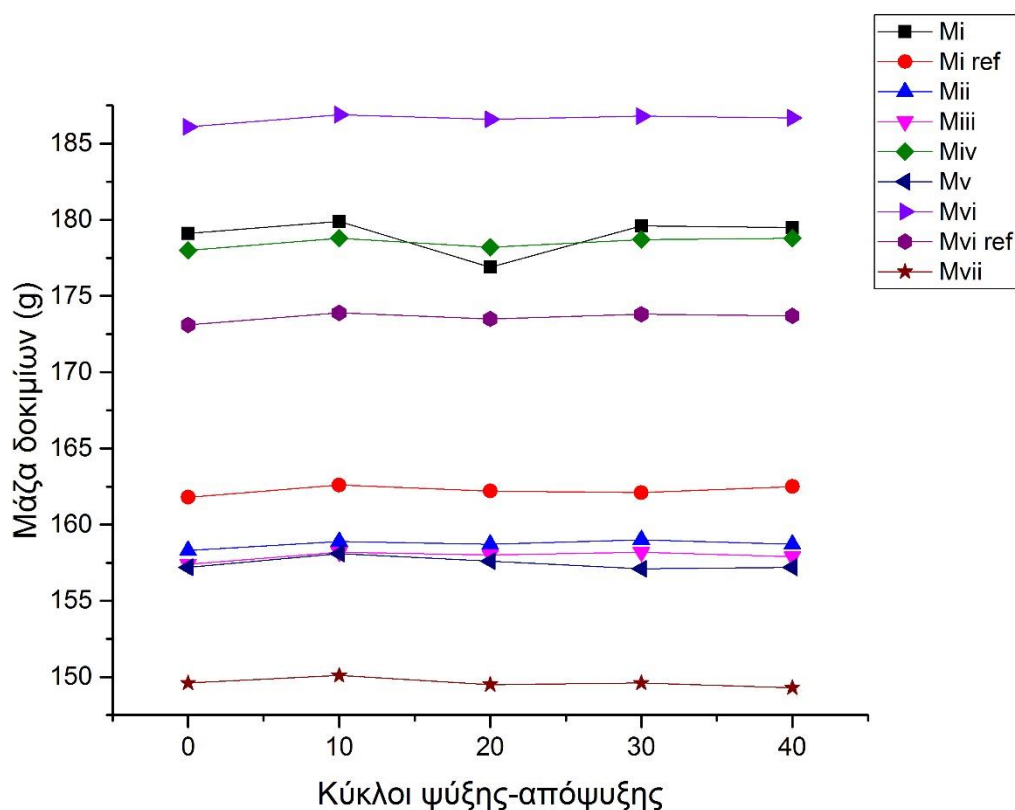
5.2.2 Δοκιμή ψύξης-απόψυξης

Για τη δοκιμή ψύξης-απόψυξης χρησιμοποιήθηκαν 14 ιασμένα δοκίμια κονιάματος (2 από κάθε σύνθεση) και 4 αναφοράς (2 από τις συνθέσεις Mi, Mvi). Τα δοκίμια υποβλήθηκαν συνολικά σε 40 επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης. Οι ζυγίσεις των μαζών των δοκιμίων γίνονταν ανά περίπου 10 κύκλους σε κορεσμένα με νερό δοκίμια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. 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. 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 παρατίθενται στον Πίνακα 5.8. Πριν από κάθε ζύγιση, τα δοκίμια τοποθετούνταν για 2 ημέρες στο νερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Πίνακας 5.8: Μεταβολή μαζών κατά τους κύκλους ψύξης-απόψυξης

Μάζες Αναφοράς (g)									
	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii	Mi ref	Mvi ref
(1)	183.0	180.5	155.3	188.9	155.9	207.6	173.5	167.9	191.3
(2)	175.2	136.0	159.4	167.0	158.4	164.5	125.6	155.7	154.8
M.O.	179.1	158.3	157.4	178.0	157.2	186.1	149.6	161.8	173.1
Μάζες μετά από 10 κύκλους (g)									
	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii	Mi ref	Mvi ref
(1)	183.8	181.4	160.2	189.8	157.0	208.6	174.1	169.8	192.3
(2)	175.9	136.3	156.1	167.7	159.2	165.2	126.1	155.3	155.4
M.O.	179.9	158.9	158.2	178.8	158.1	186.9	150.1	162.6	173.9
Μάζες μετά από 20 κύκλους (g)									
	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii	Mi ref	Mvi ref
(1)	183.4	181.2	159.8	189.3	156.2	208.7	173.6	169.3	192.1
(2)	175.8	136.1	156.1	167.0	158.9	164.5	125.4	155.1	154.9
M.O.	179.6	158.7	158.0	178.2	157.6	186.6	149.5	162.2	173.5
Μάζες μετά από 30 κύκλους (g)									
	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii	Mi ref	Mvi ref
(1)	183.4	181.7	160.3	189.9	155.6	208.7	173.5	169.2	192.4
(2)	175.8	136.2	156.1	167.5	158.6	164.8	125.6	155.0	155.2
M.O.	179.6	159.0	158.2	178.7	157.1	186.8	149.6	162.1	173.8
Μάζες μετά από 40 κύκλους (g)									
	Mi	Mii	Miii	Miv	Mv	Mvi	Mvii	Mi ref	Mvi ref
(1)	183.1	181.3	160.1	190.0	155.9	208.7	173.3	169.6	192.3
(2)	175.8	136.1	155.7	167.6	158.4	164.6	125.2	155.3	155.1
M.O.	179.5	158.7	157.9	178.8	157.2	186.7	149.3	162.5	173.7

Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζονται γραφικά οι μέσες τιμές των μαζών των δοκιμίων σε συνάρτηση με τον αριθμό των επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης.



Σχήμα 5.8: Μάζες δοκιμίων μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης

Από το Σχήμα 5.8 παρατηρείται ότι οι μάζες των δοκιμίων παραμένουν πρακτικά σταθερές. Η σταθερότητα των μαζών των δοκιμίων υποδεικνύει την ικανοποιητική ανθεκτικότητα των ιασμένων κονιαμάτων σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης.

5.3 Διείσδυση χλωριόντων

Κατά τη δοκιμή της διείσδυσης χλωριόντων, καθένα από τα ιασμένα τσιμεντοκονιάματα των επτά διαφορετικών συνθέσεων καθώς και τα δύο αναφοράς των συνθέσεων Mi, Mvi τοποθετήθηκαν σε ηλεκτρικό κύκλωμα-διάταξη. Η διάταξη αυτή καταλήγει σε δύο ηλεκτρόδια, αυτό της ανόδου και αυτό της καθόδου, τα οποία δημιουργούν διαφορά δυναμικού. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα ιόντα χλωρίου να εξαναγκάζονται σε κίνηση μέσα στη μάζα του δοκιμίου. Μετά από 24 ώρες λειτουργίας της πειραματικής διάταξης κάθε δοκίμιο κόπηκε στα δύο κάθετα στη ρωγμή και ακολούθως καθένα από τα δύο κομμάτια που προέκυψαν κόπηκαν στα δύο πάνω στην ιασμένη ρωγμή. Κατόπιν, τα κομμάτια που προέκυψαν ψεκάστηκαν με νιτρικό άργυρο προκειμένου να προσδιοριστεί το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων. Η επεξεργασία μετρήσεων έγινε μέσω υπολογιστικού φύλλου Excel. Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται το πρωτόκολλο επεξεργασίας/μετρήσεων για τον υπολογισμό του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων.

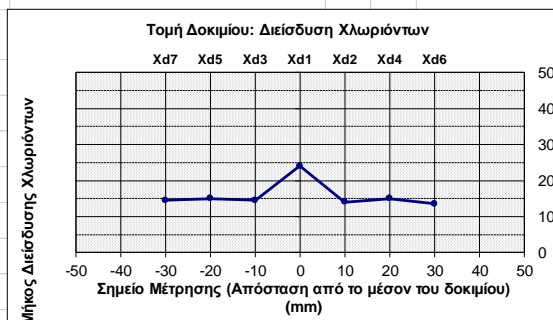
ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	Δοκίμιο 1	ΚΩΔΙΚΟΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	
ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΔΝ	ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ/ΕΣ	
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	23/5/2017		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗΣ	7/6/2016		
ΗΛΙΚΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (ημέρες)	350		
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)	0,330		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	23/5/2017	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	24/5/2017
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	13:00	ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	13:00
ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	10,20	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	9,90
ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0,062	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0,072
ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	22,8	ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	21,8

ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ		
ΜΗΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm)	100,00	
ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΜΗΣ (mm)	41,50	42,50 43,50
ΜΕΣΟ ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm)	42,50	
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ (kN)	11,45	
ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ (MPa)	1,72	
Xd1 (mm)	####	#### 24,00
Xd2 (mm)	####	#### 14,00
Xd3 (mm)	####	#### 14,50
Xd4 (mm)	####	#### 15,00
Xd5 (mm)	####	#### 15,00
Xd6 (mm)	####	#### 13,50
Xd7 (mm)	####	#### 14,50



ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ (h)	24,00
ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	22,30
ΜΕΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ (mm)	15,79
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ (m ² /s)	18,42E-12

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

Σχήμα 5.9: Πρωτόκολλο επεξεργασίας/μετρήσεων για τον υπολογισμό του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων.

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα της διείσδυσης χλωριόντων για κάθε ιασμένο δοκίμιο.

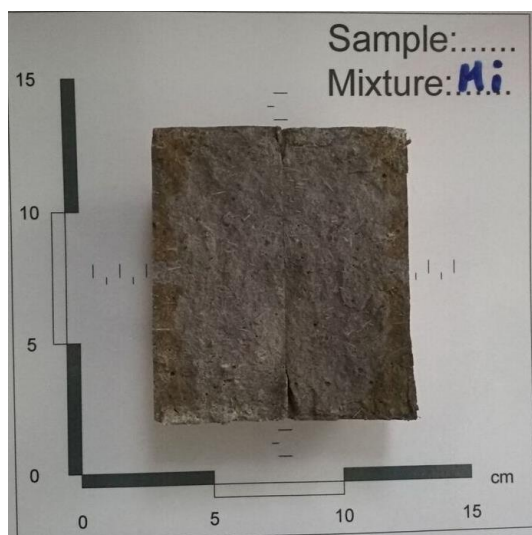
- *Mi*

Στον Πίνακα 5.9 αναφέρονται στοιχεία της έναρξης και της λήξης της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για το δοκίμιο *Mi*.

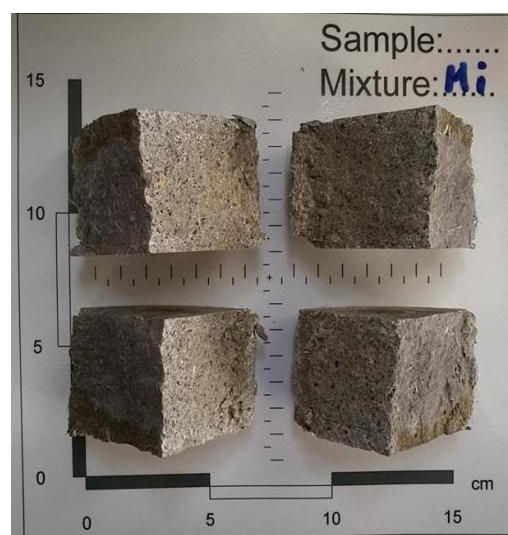
Πίνακας 5.9: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl⁻ για το δοκίμιο *Mi*

ΕΝΑΡΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΛΗΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ	
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	30.00		
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.093		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	22/5/2017	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	23/5/2017
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	12:55	ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	13:00
ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	20.0	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	20.0
ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.060	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.074
ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	22.8	ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	21.7

Στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται το δοκίμιο *Mi* χωρισμένο σε δύο μέρη κάθετα στο επίπεδο της ιασμένης ρωγμής. Στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζεται το ίδιο δοκίμιο χωρισμένο σε τέσσερα μέρη. Παρατηρείται αλλαγή χρώματος (ανοιχτόχρωμο) στο δοκίμιο η οποία σηματοδοτεί το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων σε αυτό.



Σχήμα 5.10: Βάθος διείσδυσης των Cl⁻ στο δοκίμιο *Mi* (χωρισμένο σε 2 μέρη).



Σχήμα 5.11: Βάθος διείσδυσης των Cl⁻ στο δοκίμιο *Mi* (χωρισμένο σε 4 μέρη).

Κατόπιν υπολογισμών μέσω υπολογιστικού φύλλου Excel προέκυψε ότι ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων του δοκιμίου *Mi*, αφού χωρίστηκε σε δύο

μέρη κάθετα στο επίπεδο της ιασμένης ρωγμής, είναι $23.61 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Αντίστοιχα προέκυψε ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων του δοκιμίου, αφού κόπηκε δεύτερη φορά σε επίπεδο παράλληλο με την ιασμένη ρωγμή, ίσος με $28.60 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

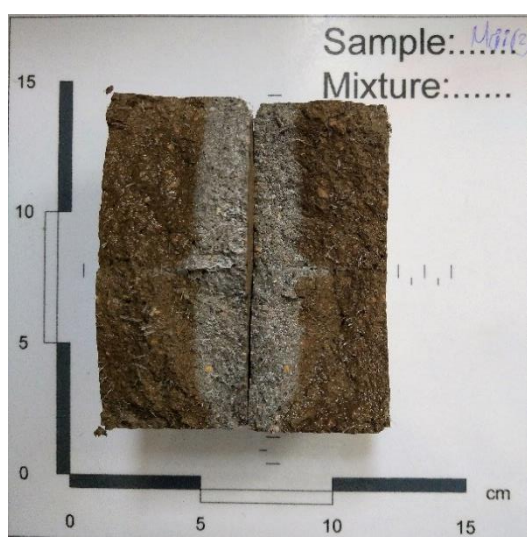
- *Mii*

Στον Πίνακα 5.10 αναφέρονται στοιχεία της έναρξης και της λήξης της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για το δοκίμιο *Mii*.

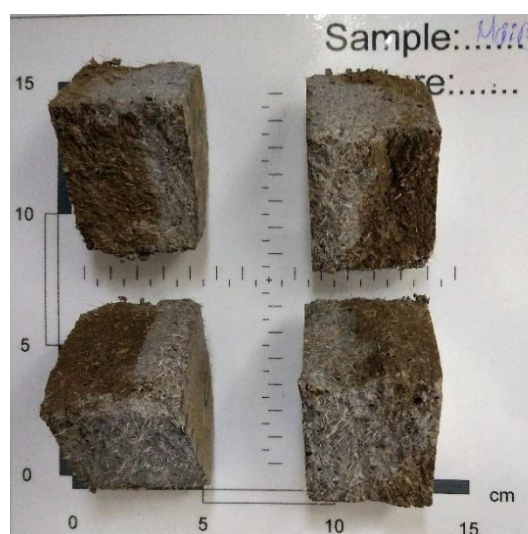
Πίνακας 5.10: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl^- για το δοκίμιο *Mii*

ΕΝΑΡΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΛΗΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ	
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	30.00		
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.330		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	23/5/2017	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	24/5/2017
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	13:00	ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	13:00
ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	10.2	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	9.9
ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.062	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.072
ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ ($^{\circ}\text{C}$)	22.8	ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ ($^{\circ}\text{C}$)	21.8

Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζεται το δοκίμιο *Mii* χωρισμένο σε δύο μέρη κάθετα στο επίπεδο της ιασμένης ρωγμής. Στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζεται το ίδιο δοκίμιο χωρισμένο σε τέσσερα μέρη. Παρατηρείται αλλαγή χρώματος (ανοιχτόχρωμο) στο δοκίμιο η οποία σηματοδοτεί το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων σε αυτό.



Σχήμα 5.12: Βάθος διείσδυσης των Cl^- στο δοκίμιο *Mii* (χωρισμένο σε 2 μέρη).



Σχήμα 5.13: Βάθος διείσδυσης των Cl^- στο δοκίμιο *Mii* (χωρισμένο σε 4 μέρη).

Κατόπιν υπολογισμών μέσω υπολογιστικού φύλλου Excel προέκυψε ότι ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων του δοκιμίου Mii, αφού χωρίστηκε σε δύο μέρη κάθετα στο επίπεδο της ιασμένης ρωγμής, είναι $18.42 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Αντίστοιχα προέκυψε ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων του δοκιμίου, αφού κόπηκε δεύτερη φορά σε επίπεδο παράλληλο με την ιασμένη ρωγμή ίσος με $43.65 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

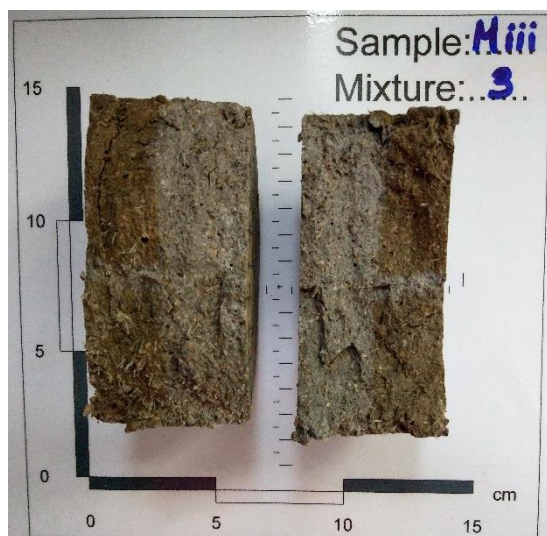
- *Miii*

Στον Πίνακα 5.11 αναφέρονται στοιχεία της έναρξης και της λήξης της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για το δοκίμιο Miii.

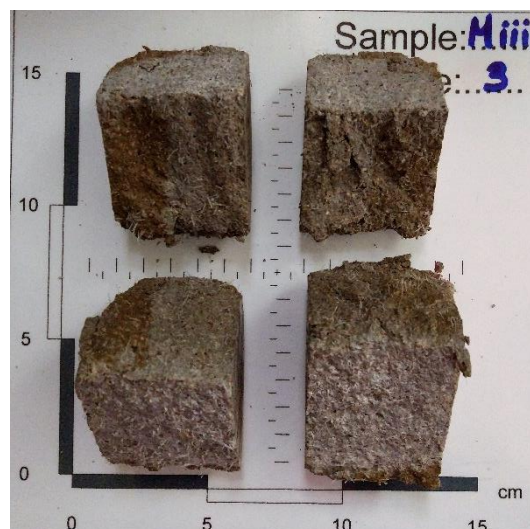
Πίνακας 5.11: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl⁻ για το δοκίμιο Miii

ΕΝΑΡΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΛΗΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ	
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	30.00		
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.092		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	29/5/2017	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	30/5/2017
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	12:55	ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	12:55
ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	19.9	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	19.9
ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.059	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.071
ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	20.8	ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	20.7

Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζεται το δοκίμιο Miii χωρισμένο σε δύο μέρη κάθετα στο επίπεδο της ιασμένης ρωγμής. Στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζεται το ίδιο δοκίμιο χωρισμένο σε τέσσερα μέρη. Παρατηρείται αλλαγή χρώματος (ανοιχτόχρωμο) στο δοκίμιο η οποία σηματοδοτεί το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων σε αυτό.



Σχήμα 5.14: Βάθος διείσδυσης των Cl⁻ στο δοκίμιο Miii (χωρισμένο σε 2 μέρη).



Σχήμα 5.15: Βάθος διείσδυσης των Cl⁻ στο δοκίμιο Miii (χωρισμένο σε 4 μέρη).

Κατόπιν υπολογισμών μέσω υπολογιστικού φύλλου Excel προέκυψε ότι ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων του δοκιμίου Miii, αφού χωρίστηκε σε δύο μέρη κάθετα στο επίπεδο της ιασμένης ρωγμής, είναι $18.92 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Αντίστοιχα προέκυψε ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων του δοκιμίου, αφού κόπηκε δεύτερη φορά σε επίπεδο παράλληλο με την ιασμένη ρωγμή ίσως με $31.05 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

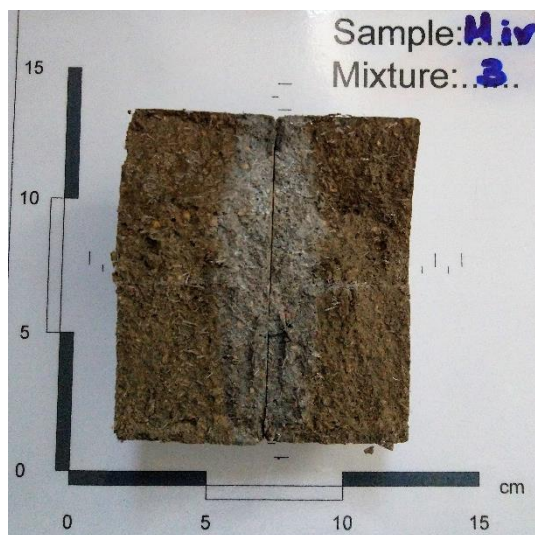
- Miv

Στον Πίνακα 5.12 αναφέρονται στοιχεία της έναρξης και της λήξης της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για το δοκίμιο Miv.

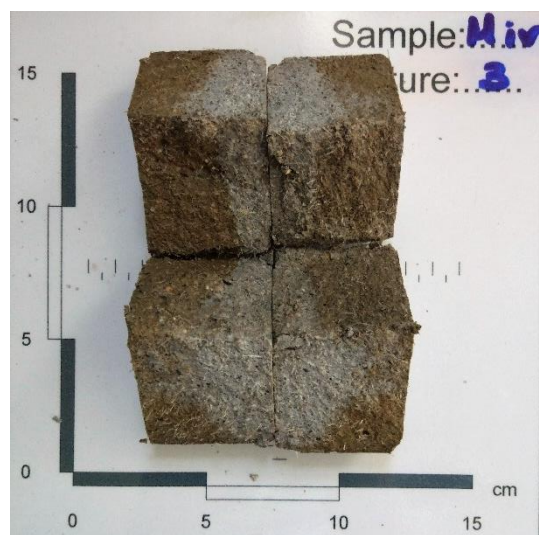
Πίνακας 5.12: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl⁻ για το δοκίμιο Miv

ΕΝΑΡΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΛΗΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ	
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	30.00		
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.256		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	30/5/2017	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	31/5/2017
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	13:05	ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	13:05
ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	9.9	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	9.9
ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.046	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.059
ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	22.3	ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	21.3

Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζεται το δοκίμιο Μίν χωρισμένο σε δύο μέρη κάθετα στο επίπεδο της ιασμένης ρωγμής. Στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζεται το ίδιο δοκίμιο χωρισμένο σε τέσσερα μέρη. Παρατηρείται αλλαγή χρώματος (ανοιχτόχρωμο) στο δοκίμιο η οποία σηματοδοτεί το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων σε αυτό.



Σχήμα 5.16: Βάθος διείσδυσης των Cl⁻ στο δοκίμιο Μίν (χωρισμένο σε 2 μέρη).



Σχήμα 5.17: Βάθος διείσδυσης των Cl⁻ στο δοκίμιο Μίν (χωρισμένο σε 4 μέρη).

Κατόπιν υπολογισμών μέσω υπολογιστικού φύλλου Excel προέκυψε ότι ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων του δοκιμίου Μίν, αφού χωρίστηκε σε δύο μέρη κάθετα στο επίπεδο της ιασμένης ρωγμής, είναι $18.97 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Αντίστοιχα προέκυψε ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων του δοκιμίου, αφού κόπηκε δεύτερη φορά σε επίπεδο παράλληλο με την ιασμένη ρωγμή ίσος με $46.90 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

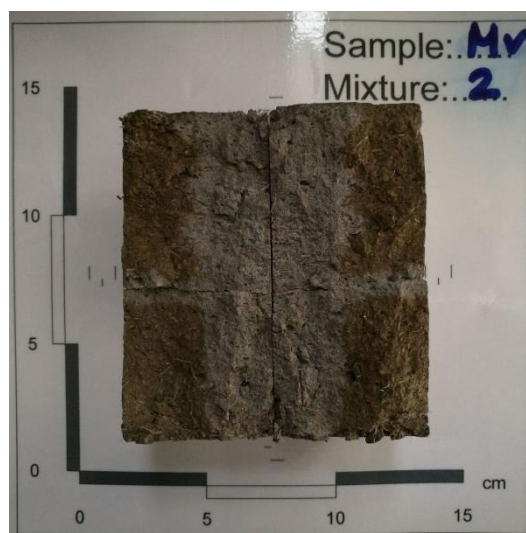
- M_v

Στον Πίνακα 5.13 αναφέρονται στοιχεία της έναρξης και της λήξης της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για το δοκίμιο M_v .

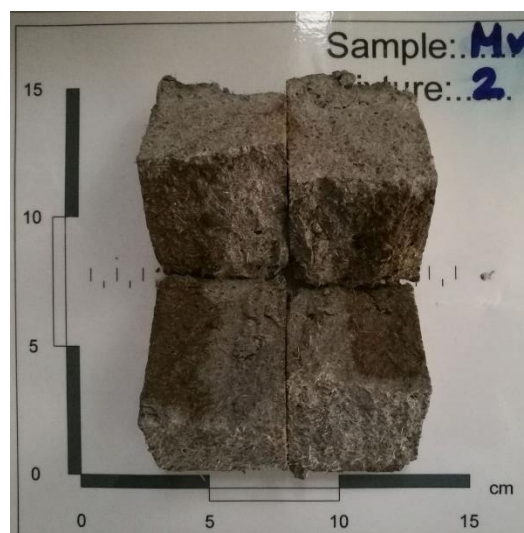
Πίνακας 5.13: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl^- για το δοκίμιο M_v

ΕΝΑΡΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΛΗΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ	
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	30.00		
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.151		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	6/6/2017	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	7/6/2017
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	13:05	ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	13:05
ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	15.0	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	14.5
ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.071	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.068
ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	25.7	ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	24.6

Στο Σχήμα 5.18 παρουσιάζεται το δοκίμιο M_v χωρισμένο σε δύο κάθετα στο επίπεδο της ιασμένης ρωγμής. Στο Σχήμα 5.19 παρουσιάζεται το ίδιο δοκίμιο χωρισμένο σε τέσσερα μέρη. Παρατηρείται αλλαγή χρώματος (ανοιχτόχρωμο) στο δοκίμιο η οποία σηματοδοτεί το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων σε αυτό.



Σχήμα 5.18: Βάθος διείσδυσης των Cl^- στο δοκίμιο M_v (χωρισμένο σε 2 μέρη).



Σχήμα 5.19: Βάθος διείσδυσης των Cl^- στο δοκίμιο M_v (χωρισμένο σε 4 μέρη).

Κατόπιν υπολογισμών μέσω υπολογιστικού φύλλου Excel προέκυψε ότι ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων του δοκιμίου M_v , αφού χωρίστηκε σε δύο μέρη κάθετα στο επίπεδο της ιασμένης ρωγμής, είναι του δοκιμίου, αφού κόπηκε

δεύτερη φορά σε επίπεδο παράλληλο με την ιασμένη ρωγμή, ίσως με $42.69 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

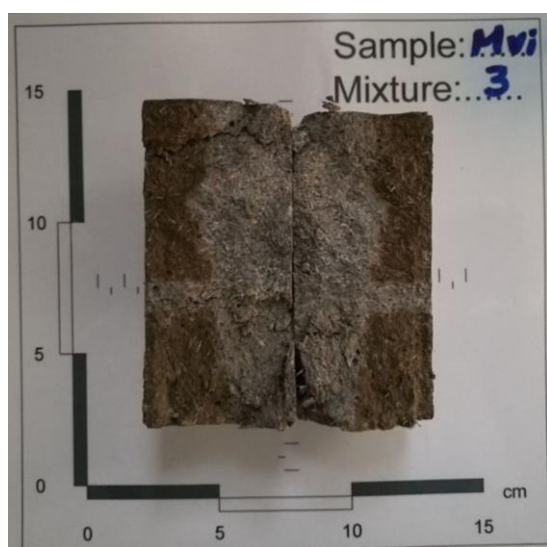
- *Mvi*

Στον Πίνακα 5.14 αναφέρονται στοιχεία της έναρξης και της λήξης της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για το δοκίμιο *Mvi*.

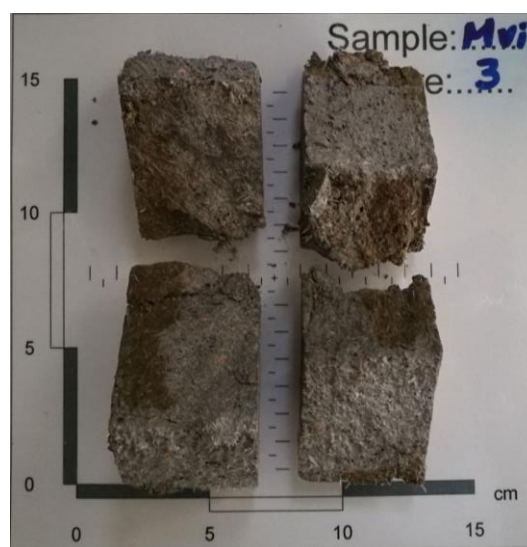
Πίνακας 5.14: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl⁻ για το δοκίμιο *Mvi*

ΕΝΑΡΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΛΗΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ	
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	30.00		
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.122		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	13/6/2017	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	14/6/2017
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	13:50	ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	13:50
ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	15.0	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	14.3
ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.058	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.062
ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	25.8	ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ	24.9

Στο Σχήμα 5.20 παρουσιάζεται το δοκίμιο *Mvi* χωρισμένο σε δύο μέρη κάθετα στο επίπεδο της ιασμένης ρωγμής. Στο Σχήμα 5.21 παρουσιάζεται το ίδιο δοκίμιο χωρισμένο σε τέσσερα μέρη. Παρατηρείται αλλαγή χρώματος (ανοιχτόχρωμο) στο δοκίμιο η οποία σηματοδοτεί το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων σε αυτό.



Σχήμα 5.20: Βάθος διείσδυσης των Cl⁻ στο δοκίμιο *Mvi* (χωρισμένο σε 2 μέρη).



Σχήμα 5.21: Βάθος διείσδυσης των Cl⁻ στο δοκίμιο *Mvi* (χωρισμένο σε 4 μέρη).

Κατόπιν υπολογισμών μέσω υπολογιστικού φύλλου Excel προέκυψε ότι ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων του δοκιμίου Mvi, αφού χωρίστηκε σε δύο μέρη κάθετα στο επίπεδο της ιασμένης ρωγμής, είναι $26.00 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Αντίστοιχα προέκυψε ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων του δοκιμίου, αφού κόπηκε δεύτερη φορά σε επίπεδο παράλληλο με την ιασμένη ρωγμή, ίσος με $41.38 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

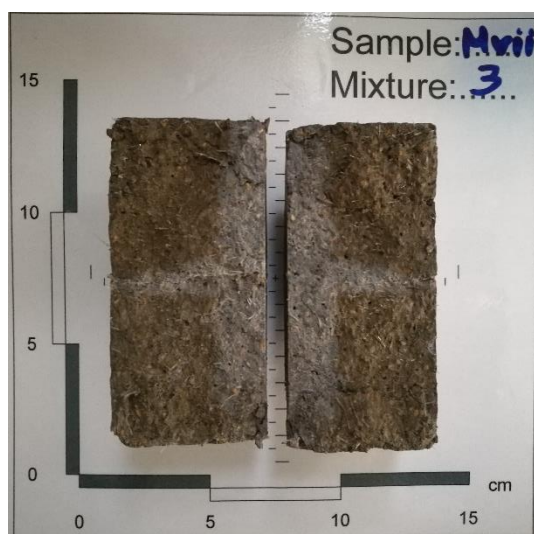
- Mvii

Στον Πίνακα 5.15 αναφέρονται στοιχεία της έναρξης και της λήξης της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για το δοκίμιο Mvii.

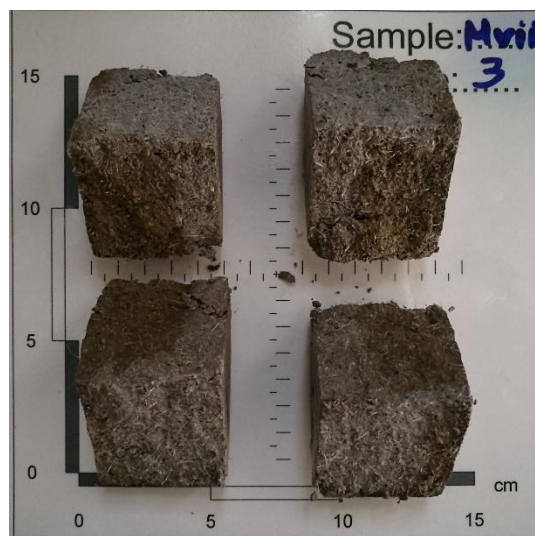
Πίνακας 5.15: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl⁻ για το δοκίμιο Mvii

ΕΝΑΡΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΛΗΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ	
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	30.00		
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.269		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	14/6/2017	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	15/6/2017
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	13:55	ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	13:55
ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	10.30	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	9.90
ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.054	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.071
ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	26.1	ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	26.0

Στο Σχήμα 5.22 παρουσιάζεται το δοκίμιο Mvii χωρισμένο σε δύο μέρη μετά την πρώτη δοκιμή κάμψης, η οποία έγινε κάθετα στο επίπεδο της ιασμένης ρωγμής. Στο Σχήμα 5.23 παρουσιάζεται το ίδιο δοκίμιο χωρισμένο σε τέσσερα μέρη. Παρατηρείται αλλαγή χρώματος (ανοιχτόχρωμο) στο δοκίμιο η οποία σηματοδοτεί το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων σε αυτό.



Σχήμα 5.22: Βάθος διείσδυσης των Cl⁻ στο δοκίμιο Mvii (χωρισμένο σε 2 μέρη).



Σχήμα 5.23: Βάθος διείσδυσης των Cl⁻ στο δοκίμιο Mvii (χωρισμένο σε 4 μέρη).

Κατόπιν υπολογισμών μέσω υπολογιστικού φύλλου Excel προέκυψε ότι ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων του δοκιμίου Mvii, αφού χωρίστηκε σε δύο μέρη κάθετα στο επίπεδο της ιασμένης ρωγμής, είναι $23.89 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Αντίστοιχα προέκυψε ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων του δοκιμίου, αφού κόπηκε δεύτερη φορά σε επίπεδο παράλληλο με την ιασμένη ρωγμή, ίσος με $57.67 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διείσδυσης χλωριόντων στα δοκίμια αναφοράς των συνθέσεων Mi και Mvi προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά των ιασμένων κονιαμάτων στην προσβολή από χλωριόντα. Στα δοκίμια αναφοράς έλαβε χώρα η πειραματική διαδικασία της διείσδυσης χλωριόντων όπως έχει αναφερθεί με την μόνη διαφορά ότι πραγματοποιήθηκε μία δοκιμή διαμετρικής θλίψης.

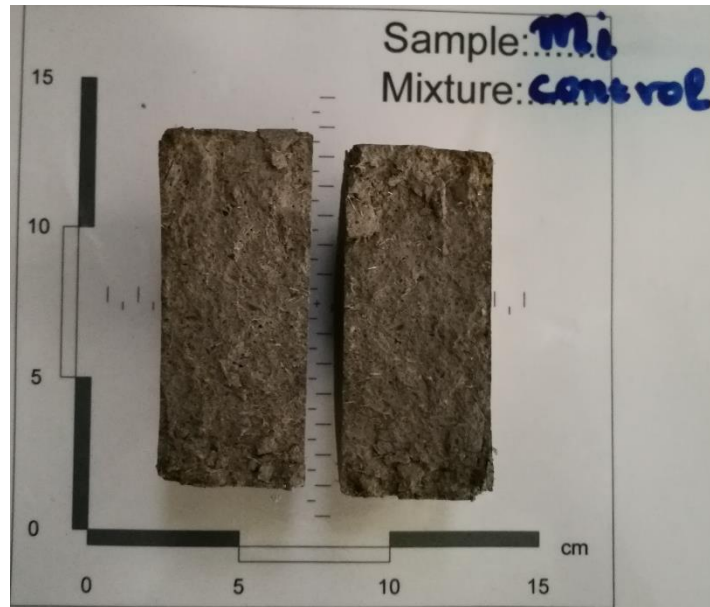
- *Mi ref*

Στον Πίνακα 5.16 αναφέρονται στοιχεία έναρξης και λήξης της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για το δοκίμιο αναφοράς Mi ref.

Πίνακας 5.16: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl⁻ για το δοκίμιο Mi ref

ΕΝΑΡΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΛΗΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ	
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	30.00		
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.163		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	19/6/2017	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	20/6/2017
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	14:45	ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	14:45
ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	15.00	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	14.60
ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.078	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.066
ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	24.0	ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	23.8

Στο Σχήμα 5.24 παρουσιάζεται το δοκίμιο Mi ref χωρισμένο σε δύο μέρη. Παρατηρείται αλλαγή χρώματος (ανοιχτόχρωμο) στο δοκίμιο η οποία σηματοδοτεί το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων σε αυτό.



Σχήμα 5.24: Βάθος διείσδυσης των Cl⁻ στο δοκίμιο Mi ref.

Κατόπιν υπολογισμών μέσω υπολογιστικού φύλλου Excel προέκυψε ότι ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων του δοκιμίου Mi ref είναι $34.61 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

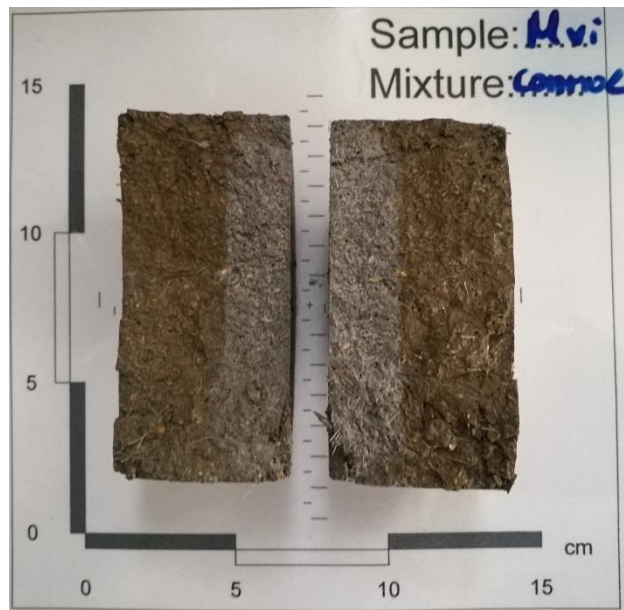
- *Mvi ref*

Στον Πίνακα 5.17 αναφέρονται στοιχεία έναρξης και λήξης της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων για το δοκίμιο αναφοράς Mvi ref.

Πίνακας 5.17: Έναρξη και λήξη δοκιμής διείσδυσης Cl⁻ για το δοκίμιο Mvi ref

ΕΝΑΡΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ		ΛΗΞΗ ΔΟΚΙΜΗΣ	
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	30.00		
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.257		
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	20/6/2017	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	21/6/2017
ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	15:40	ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	15:40
ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΗ ΑΡΧΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	10.00	ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	10.00
ΑΡΧΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.059	ΤΕΛΙΚΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	0.070
ΑΡΧΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	26.5	ΤΕΛΙΚΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΟΔΟΥ (°C)	24.6

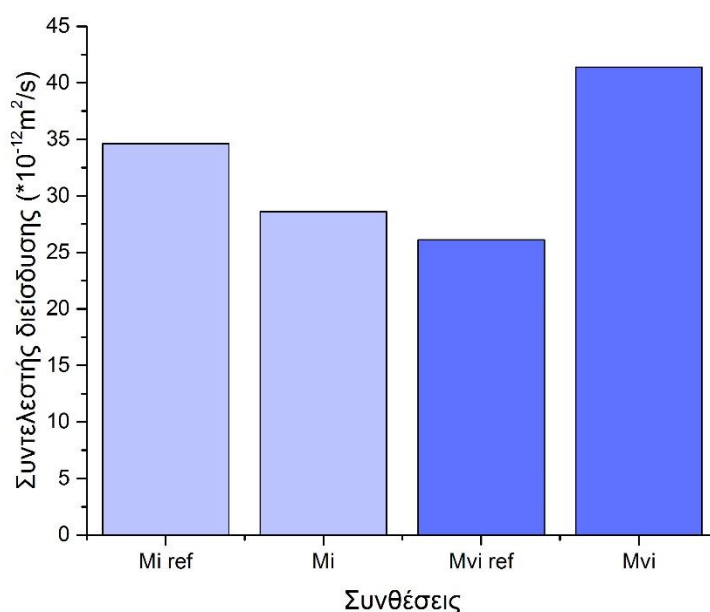
Στο Σχήμα 5.25 παρουσιάζεται το δοκίμιο Mvi ref χωρισμένο σε δύο μέρη. Παρατηρείται αλλαγή χρώματος (ανοιχτόχρωμο) στο δοκίμιο η οποία σηματοδοτεί το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων σε αυτό.



Σχήμα 5.25: Βάθος διείσδυσης των Cl⁻ στο δοκίμιο Mvi ref.

Κατόπιν υπολογισμών μέσω υπολογιστικού φύλλου Excel προέκυψε ότι ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων του δοκιμίου Mvi ref είναι $26.12 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Στη συνέχεια παρατίθεται το Σχήμα 5.26 με τις τιμές του συντελεστή διείσδυσης των δοκιμίων αναφοράς (Mi ref, Mvi ref) και των ιασμένων δοκιμίων (Mi, Mvi).



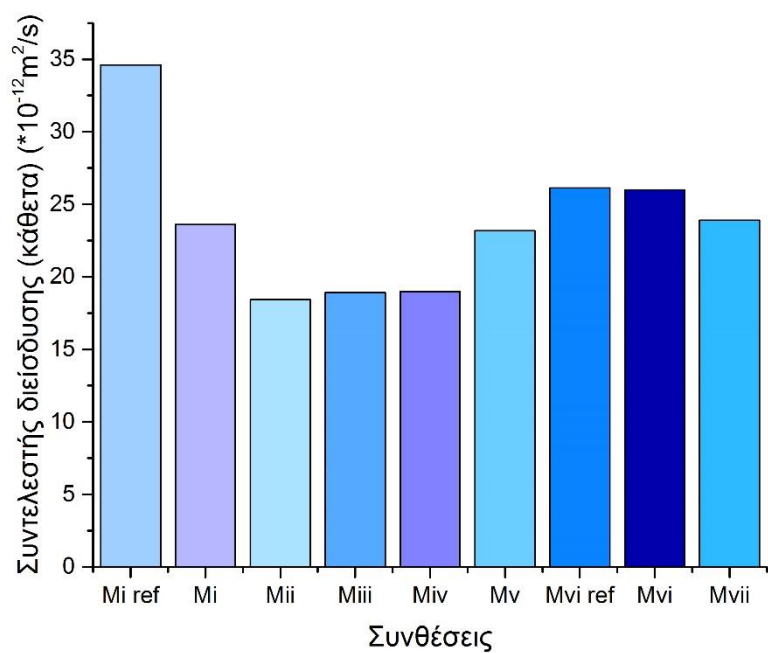
Σχήμα 5.26: Συντελεστής διείσδυσης ιασμένων κονιαμάτων και κονιαμάτων αναφοράς των συνθέσεων Mi και Mvi.

Παρατηρήθηκε μικρή μείωση του συντελεστή διείσδυσης του ιασμένου κονιάματος της σύνθεσης Mi σε σχέση με το αντίστοιχο αναφοράς και μικρή αύξηση στη σύνθεση Mvi. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε συμπεράσματα για ανάκτηση των ιδιοτήτων και συγκεκριμένα της ανθεκτικότητας στα ιασμένα δοκίμια καθώς επέδειξαν καλή συμπεριφορά στην προσβολή σε χλωριόντα.

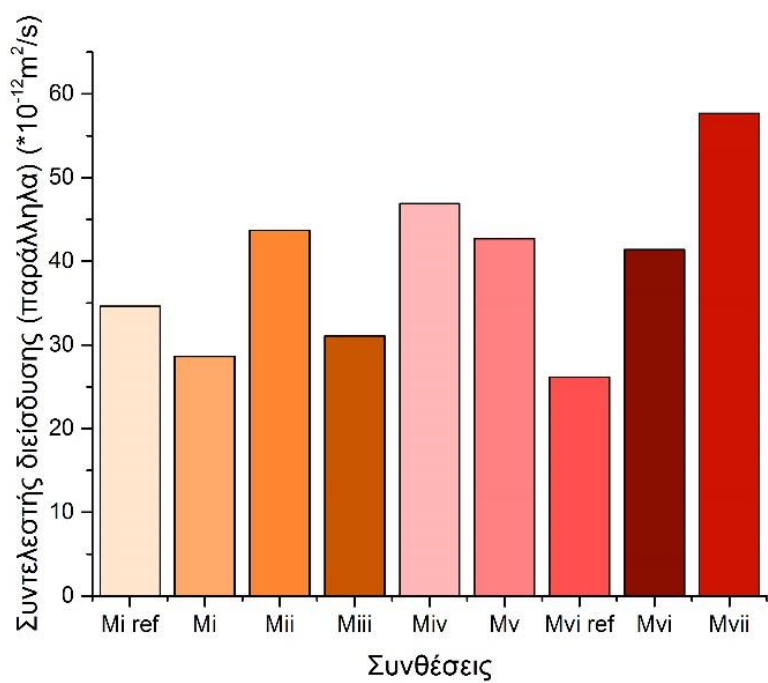
Τέλος, παρατίθενται ο Πίνακας 5.18 και τα Σχήματα 5.27 και 5.28 τα οποία αποτελούν συγκεντρωτικά διαγράμματα των συντελεστών διείσδυσης χλωριόντων όλων των δοκιμίων.

Πίνακας 5.18: Συντελεστές διείσδυσης δοκιμίων.

	Κάθετα	Παράλληλα
	$D \times 10^{-12}$ (m ² /s)	$D \times 10^{-12}$ (m ² /s)
Mi ref	34.61	
Mvi ref	26.12	
Mi	23.61	28.60
Mii	18.42	43.65
Miii	18.92	31.05
Miv	18.97	46.90
Mv	23.18	42.69
Mvi	26.00	41.38
Mvii	23.89	57.67



Σχήμα 5.27: Συντελεστής διείδυσης χλωριόντων (κάθετα)



Σχήμα 5.28: Συντελεστής διείδυσης χλωριόντων (παράλληλα)

Οι τιμές των συντελεστών διείσδυσης που προέκυψαν αφού τα δοκίμια κόπηκαν κάθετα στη ρωγμή, αποτελούν τις τιμές των συντελεστών διείσδυσης των δοκιμίων καθώς η επίδραση της ρωγμής στο επίπεδο αυτό είναι μικρή. Οι συντελεστές διείσδυσης των δοκιμίων δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους και η τάξη μεγέθους τους είναι αντίστοιχη της βιβλιογραφίας.

Όσον αφορά τις τιμές των συντελεστών διείσδυσης χλωριόντων, που προέκυψαν αφού τα δοκίμια κόπηκαν παράλληλα στη ρωγμή, παρατηρήθηκε αύξησή τους καθώς στο σημείο της ρωγμής ήταν αυξημένη η διείσδυση. Ο μικρότερος συντελεστής διείσδυσης σημειώθηκε στη σύνθεση Miii και ο μεγαλύτερος στη σύνθεση Mvii. Γενικά, όλα τα ιασμένα δοκίμια επέδειξαν καλή συμπεριφορά στη δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων.

Κλείνοντας το κεφάλαιο αυτό, αξίζει να σημειωθεί ότι μετά τις δοκιμές ξήρανσης - εμβάπτισης και ψύξης - απόψυξης πραγματοποιήθηκε στερεοσκοπική μελέτη των ιασμένων δοκιμίων, όπου και δεν παρατηρήθηκε κάποια αλλαγή ή υποβάθμιση σε αυτά. Οι εικόνες των δοκιμίων είναι αντίστοιχες με τα Σχήματα 4.1 - 4.7.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα

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

- Οι δοκιμές ανθεκτικότητας πιστοποίησαν την αποτελεσματική αυτο-ίαση στα δοκίμια που ελέγχθηκαν.
- Τα ιασμένα δοκίμια κονιάματος παρουσίασαν γενικά καλή συμπεριφορά στη δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας. Η δοκιμή αυτή θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την ταχύτατη διάγνωση της αποτελεσματικής ή όχι αυτο-ίασης των δομικών υλικών.
- Όλες οι συνθέσεις παρουσίασαν πολύ καλή συμπεριφορά στις δοκιμές ξήρανσης-εμβάπτισης και ψύξης-απόψυξης. Η παρατήρηση στο στερεοσκόπιο δεν έδειξε υποβάθμιση των δοκιμίων μετά τις παραπάνω δοκιμές.
- Τα ιασμένα δοκίμια κονιάματος επέδειξαν καλή συμπεριφορά στη δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων και οι υπολογισθέντες συντελεστές διείσδυσης είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τους αναφερόμενους στην βιβλιογραφία.

Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να γίνει στην εφαρμογή και άλλων δοκιμών ανθεκτικότητας, όπως η διαπερατότητα σε αέρα και η διάχυση χλωριόντων. Ενδιαφέρον θα είχε ακόμη η συνολική αξιολόγηση της αυτο-ίασης των δοκιμίων με κατάλληλη ποσοτική στάθμιση των επιμέρους δοκιμών. Τέλος, ιδιαίτερα χρήσιμη θα ήταν η συγκριτική αξιολόγηση της ανθεκτικότητας δομικών υλικών που έχουν αυτο-ιαθεί με διαφορετικές τεχνικές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Τσίμας, Σ., Τσιβιλής, Σ. Επιστήμη & Τεχνολογία Τσιμέντου. - Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2010.
- [2] Τσίμας Σ., Δομικά Υλικά (Τσιμέντο - Ασβέστης - Σκυρόδεμα - Κονιάματα), Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2001.
- [3] Qian S, Zhou J, de Rooij MR, Schlangen E, Ye G, van Breugel K. Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials. *Cement Concrete Compos* 2009;31(9):613–21.
- [4] Edvardsen C. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Mater J* 1999;96(4):448–54.
- [5] Hosada A, Kishi T, Arita H, Takakuwa Y. Self healing of crack and water permeability of expansive concrete. In: *Proceedings of the first international conference on self healing materials*, Noordwijk, The Netherlands; 2007 [in CD].
- [6] Kishi T, Ahn TH, Hosoda H, Suzuki S, Takaoka H. Self-healing behavior by cementitious recrystallization of cracked concrete. In: *Proceedings of the first international conference on self healing materials*, Noordwijk, The Netherlands; 2007 [in CD].
- [7] Sisomphon K, Copuroglu O. Some characteristics of a self healing mortar incorporating calcium sulfo-aluminate based agent. In: *Proceedings of the 2nd international conference on durability of concrete structures*, Sapporo, Japan; 2010. p. 157–64.
- [8] Jaroenratanapirom D, Sahamitmongkol R. Effects of different mineral additives and cracking ages on self-healing performance of mortar. In: *Proceedings of the 6th annual concrete conference*, Petchaburi, Thailand; 2010. p. 551–6.
- [9] Wiktor V, Jonkers HM. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement Concrete Compos* 2011;33(7):763–70.
- [10] Van Tittelboom K, De Belie N, De Muynck W, Verstraete W. Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cement Concrete Res* 2010;40(1):157–66.
- [11] Yang Z, Hollar J, He X, Shi X. A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules. *Cement Concrete Compos* 2011;33(4):506–12
- [12] Li VC, Yang EH. Self healing in concrete materials. In: *Self healing materials: an alternative approach to 20 centuries of materials science*; 2007. p. 161–93.
- [13] Li VC, Yang EH. Self healing in concrete materials. In: van der Zwaag S, editor. *Self healing materials*. Dordrecht: Springer; 2007. p. 161–93.
- [14] Qian SZ, Zhou J, Schlangen E. Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of engineered cementitious composites. *Cement Concrete Compos* 2010;32(9):686–93.
- [15] Sisomphon, K., Copuroglu, and E.A.B. Koenders, Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 2013. 42: p. 217-224.
- [16] Wu, M., B. Johannesson, and M. Geiker, A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials*, 2012. 28(1): p. 571-583.
- [17] Schlangen E. Fracture mechanics. CT5146 Lecture Notes. In: Hua X. *Self-healing of Engineered Cementitious Composites (ECC) in concrete repair system*. Master thesis, Delft University of Technology; 2010.
- [18] Homma D, Mihashi H, Nishiwaki T. Self-healing capability of fibre reinforced

- cementitious composites. *J Adv Concr Technol* 2009;7(2):217–28.
- [19] Neville AM. Autogenous healing – a concrete miracle. *Concr Int* 2002;November:76–82.
- [20] <http://sfrang.com/historia/selida204.htm>
- [21] NL Agency, Ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovation. Self-healing materials concept and applications. Second edition, 2011
- [22] <https://depositphotos.com>
- [23] Pang JWC, Bond IP. ‘Bleeding composites’ – damage detection and self-repair using a biomimetic approach. *Composites Part A* 2005;36:183–8.
- [24] Pang JWC, Bond IP. A hollow fibre reinforced polymer composite encompassing self-healing and enhanced damage visibility. *Compos Sci Technol* 2005;65:1791–9.
- [25] Hemsley AR, Griffiths PC. Architecture in the microcosm: biocolloids, self-assembly and pattern formation. *Philos Trans Roy Soc London* 2000;358:547–64.
- [26] Schleicher L, Green BK. Manifold record material. US patent 2730456; 1956.
- [27] Ghosh SK, editor. Functional coatings and microencapsulation: a general perspective. *Functional Coatings*; 2006.
- [28] White SR, Sottos NR, Geubelle PH, Moore JS, Kessler MR, Sriram SR, et al. Autonomic healing of polymer composites. *Nature* 2001;409(6822):794.
- [29] Ahn TH. Development of self-healing concrete incorporating geo-materials: a study on its mechanism and behavior in cracked concrete. PhD dissertation, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, Japan; 2008
- [30] Ahn TH, Kishi T. The effect of geomaterials on the autogenous healing behavior of cracked concrete. In: *Proceeding of 2nd ICCRRR, Cape Town, South Africa*; 2008. p. 235–40.
- [31] Ahn TH, Kishi T. Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures. *J Adv Concr Technol* 2010;8(2):171–86.
- [32] Gollapudi UK, Knutson CL, Bang SS, Islam MR. A new method for controlling leaching through permeable channels. *Chemosphere* 1995;30:695–705.
- [33] Tittelboom KV, Belie ND, Muynck WD, Verstraete W. Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cem Concr Res* 2010;40:157–66.
- [34] van der Zwaag S. Routes and mechanisms towards self-healing behavior in engineering materials. *Bull Polish Acad Sci* 2010;58(2):227–36.
- [35] Scrivener KL, Damidot D, Famy C. 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* 1999;21:93–101.
- [36] Collepardi M. Damage by delayed ettringite formation – a holistic approach and new hypothesis. *Concr Int* 1999;21(1):69–74.
- [37] Muhammad, N.Z., et al., Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 2016. 112: p. 1123-1132.
- [38] Yong-Soo Lee, Jae-Suk Ryou. Self healing behavior for crack closing of expansive agent via granulation/film coating method. *Construction and Building Materials*, 2014. 171: p. 188-193.

- [39] Ling, H. and C. Qian, Effects of self-healing cracks in bacterial concrete on the transmission of chloride during electromigration. *Construction and Building Materials*, 2017. 144: p. 406-411.
- [40] F. De Larrard, T. Sedran, Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model, *Cem. Concr. Res.* 24 (1994) 997–1009.
- [41] P. Richard, M. Cheyrezy, Composition of reactive powder concretes, *Cem. Concr. Res.* 25 (1995) 1501–1511.
- [42] S.R. White, N.R. Sottos, J. Moore, P. Geubelle, M. Kessler, E. Brown, et al., Autonomic healing of polymer composites, *Nature* 409 (2000) 794–797.
- [43] García Calvo, J.L., et al., Development of ultra-high performance concretes with self-healing micro/nano-additions. *Construction and Building Materials*, 2017. 138: p. 306-315.
- [44] Neville, A. M., *Properties of concrete*, Addison Wesley Longman Limited., 4th and final edition, England, 1996.