



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

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΜΕΛΕΤΗ ΑΥΤΟ-ΙΑΣΗΣ**  
**(SELF-HEALING)**  
**ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Μ. ΑΣΠΙΩΤΗ**

Πτυχιούχου Γεωλόγου Ε.Κ.Π.Α.

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

**ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2013**





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

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΜΕΛΕΤΗ ΑΥΤΟ-ΙΑΣΗΣ**  
**(SELF-HEALING)**  
**ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Μ. ΑΣΠΙΩΤΗ**

Πτυχιούχου Γεωλόγου Ε.Κ.Π.Α.

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Σ. ΤΣΙΒΙΛΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. ΤΣΙΜΑΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

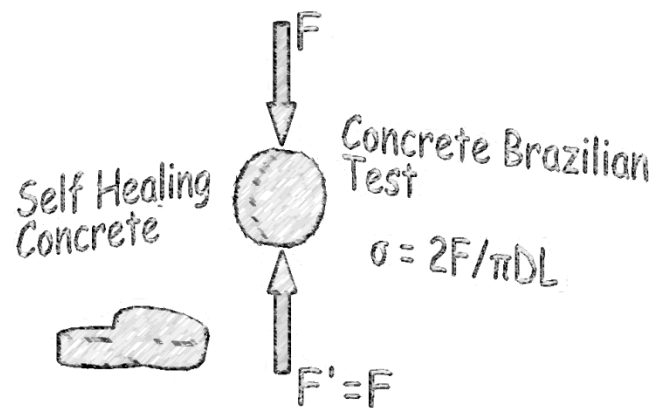
Ε. ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2013**





ΜΕΛΕΤΗ ΑΥΤΟ-ΙΑΣΗΣ  
(SELF-HEALING)  
ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ



«Κάλλιον του θεραπεύειν το προλαμβάνειν»  
Ιπποκράτης



Στους γονείς μου,  
Μαριάνθη, Μάρκο  
και στην αδερφή μου  
Νεκταρία - Κυριακή



# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, έλαβε χώρα, στο εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, του τομέα Χημικών Επιστημών (I), της σχολής Χημικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Σωτήριου Τσιβιλή.

Αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας, αποτέλεσε η αυτο-ίαση (self-healing) ρωγμών σε κονιάματα τσιμέντου με τη χρήση διαφόρων εμπορικών προσθέτων. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η συμπεριφορά έξι διαφορετικών μιγμάτων με μεταβολή των ποσοστών των τσιμεντοειδών πρόσμικτων, σε σχέση με το μίγμα αναφοράς, στην ιδιότητα της αυτο-αποκατάστασης. Για τη διασαφήνιση του φαινομένου, προκλήθηκαν με τη χρήση της δοκιμής σε διάρρηξη διαμπερείς και αντιδιαμετρικές ρωγμές, οι οποίες παρακολούθηθηκαν με στερεοσκοπική επιθεώρηση και εν συνεχεία με τη χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM).

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους για την 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, επιβλέποντά μου και δάσκαλο, κύριο Σωτήριο Τσιβιλή, που μου εμπιστεύτηκε την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Επίσης, τον ευχαριστώ, για τις συμβουλές του, καθώς και για τη βοήθεια που μου παρείχε στην παρούσα έρευνα, όπως και για το ότι ήταν πάντα δίπλα μου, σε κάθε απορία, με χαμόγελο και πραγματικό ενδιαφέρον.
- Τον Λέκτορα της σχολής Πολιτικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κύριο Ευστράτιο Μπαδογιάννη, για την βοήθεια του στις δοκιμές διάρρηξης, καθώς και την ψυχική βοήθεια που μου παρείχε. Επίσης, θα ήθελα να προσθέσω, ότι το νεαρό της ηλικίας του, αποτελεί φωτεινό παράδειγμα για τους νέους ακαδημαϊκούς, τόσο προς την ερευνητική του δραστηριότητα, όσο και για την σωστή συμπεριφορά και αντιμετώπιση απέναντι στους φοιτητές, που τους φέρνει κοντά του και τους δίνει ευκαιρίες εξέλιξης στις σημερινές δύσκολες ημέρες.
- Τον Καθηγητή της σχολής Χημικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κύριο Σταμάτη Τσίμα, που είχα την τιμή να παρακολουθήσω το μάθημα του, στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών. Επίσης, επιθυμώ να τον ευχαριστήσω, για την τιμή που μου έκανε να συμμετέχει στην τριμελή εξεταστική επιτροπή, καθώς και για το πείσμα που μου έδωσε, για να γίνομαι όλο και καλύτερος.
- Τον Καθηγητή, Πρόεδρο του τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και Μέντορα μου, κύριο Μιχαήλ Σταματάκη. Για την παραχώρηση του Περιθλασίμετρου Ακτίνων X (XRD) του τομέα Οικονομικής Γεωλογίας και Γεωχημείας, για τις αναλύσεις των πρώτων υλών. Επίσης, θέλω να τον ευχαριστήσω, για όλα αυτά τα χρόνια, από το προπτυχιακό επίπεδο μέχρι και σήμερα, που συνεχίζει να με συμβουλεύει και που μου παρείχε τα πρώτα επιστημονικά βήματα στον όμορφο πολύπλοκο κόσμο των Γεωλογικών Επιστημών και πιο συγκεκριμένα στον μαγικό κόσμο της Χημείας.

- Τον Καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κύριο Δημήτριο Μανωλάκο, για τη δημιουργία των καλουπιών που χρησιμοποίησα για την ολοκλήρωση της παρούσας έρευνας.
- Την Λέκτορα της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και Γεωλόγο, κυρία Μαρία Περράκη. Για τη διάθεση του στερεοσκοπίου και τη σημαντική βοήθεια της στην οπτική επιθεώρηση των δειγμάτων.
- Τον κύριο Βασίλειο Σκουνάκη, Ι.Δ.Α.Χ. του τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, για την βοήθεια του στον εμποτισμό και εγκιβωτισμό των παρασκευασμάτων για μελέτη SEM.
- Τον Δρ. Πέτρο Σχοινά, Ι.Δ.Α.Χ. της σχολής Χημικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την βοήθεια του στην ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM).
- Τις Υποψήφιες Διδάκτορες, Βασιλική Οικονομοπούλου και Παναγιώτα - Μαρία Ελένη, της σχολής Χημικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και το εργαστήριο της Αναπληρώτριας Καθηγήτριας Μαγδαληνής Κροκίδας, για τις επιμεταλλώσεις των δοκιμίων προς επιθεώρηση SEM.
- Τους Υποψήφιους Διδάκτορες, Αλέξανδρο Τσιτούρα και Δημήτρη Κιούπη, για την ψυχική βοήθεια που μου παρείχαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων μου.
- Τους καθηγητές του Δ.Π.Μ.Σ. «Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών» για τις γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσαν.
- Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω, τους νέους μου φίλους, από το ΔΠΜΣ «Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών», για την υπέροχη παρέα που κάναμε, κάνουμε και θα συνεχίσουμε να κάνουμε, καθώς και για την ψυχική και όχι μόνο, βοήθεια τους στις δύσκολές στιγμές που αντιμετώπισα, σε προσωπικό επίπεδο και ήταν δίπλα μου, αν και δεν με ήξεραν τότε πολύ καιρό.

Κωνσταντίνος Μ. Ασπιώτης  
Αθήνα, Ιούλιος 2013

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της εργασίας, είναι η διερεύνηση της αυτο-ίασης (self-healing) τεχνητών ρωγμών σε κονιάματα τσιμέντου, τα οποία παρασκευάστηκαν με χρήση εμπορικών προσθέτων. Οι σύγχρονες απαιτήσεις για την εκπλήρωση του σχεδιασμένου χρόνου ζωής των κατασκευών, έχουν ως αποτέλεσμα τη διάθεση σημαντικών πόρων για τη συντήρηση και την επισκευή αυτών. Δομικά στοιχεία με δυνατότητες αυτο-ίασης έχουν θετική επίδραση στο κόστος, στην ποιότητα και στη διάρκεια ζωής των δομικών έργων, ενώ θα πρέπει οπωσδήποτε να συνεκτιμούνται και τα αναμενόμενα περιβαλλοντικά οφέλη.

Παρασκευάστηκαν 7 διαφορετικές συνθέσεις κονιαμάτων με χρήση, τσιμέντου τύπου Ι, ασβεστολιθικής άμμου, ινών και δυο διαφορετικών εμπορικών προσθέτων. Ο λόγος νερού προς τσιμεντοειδή υλικά (W/B) και η ποσότητα του υπερρευστοποιητή βελτιστοποιήθηκαν με δοκιμαστικά αναμίγματα. Μετά τη συντήρηση των δοκιμίων για 28 ημέρες, γίνονται τεχνητές ρωγμές (μέσω δοκιμής σε διάρρηξη) και τα δοκίμια συντηρούνται σε νερό για κατάλληλο χρονικό διάστημα. Σε τακτά χρονικά διαστήματα (10, 20, 40 ημέρες) ελέγχεται η πρόοδος της αυτο-ίασης (κλείσιμο) των ρωγμών με στερεοσκόπιο. Ακόμη, με την τεχνική SEM προσδιορίζεται η φύση των ορυκτολογικών φάσεων που αναπτύσσονται στις ρωγμές και τελικά αξιολογούνται οι συνθέσεις που μελετήθηκαν.

Παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του πλάτους των ρωγμών, ενώ σε κάποιες συνθέσεις η αυτο-ίαση ήταν σχεδόν πλήρης. Χρήσιμο και αξιοποιήσιμο ακόμη στοιχείο είναι η χρονική εξέλιξη του φαινομένου της αυτο-ίασης στις διάφορες συνθέσεις, ενώ η ηλεκτρονική μικροσκοπία SEM αξιοποιήθηκε ιδιαίτερα στην ερμηνεία του μηχανισμού δράσης των χρησιμοποιηθέντων προσθέτων. Τέλος, από τις πειραματικές μετρήσεις διευκρινίστηκε η συμβολή καθενός από τα πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία της αυτο-ίασης των κονιαμάτων.





# ABSTRACT

The subject of this thesis is the self-healing of cementitious materials. Seven mortars (W/B=0.38) were prepared using cement type I, calcareous sand, polypropylene fibers, superplasticizer and two commercial additives. The first one was a crystalline waterproofing admixture (Penetron<sup>®</sup> Admix), while the second one was a special expansive hydraulic binder (DENKA CSA#20). Specimens were water cured for 28 days and then artificially cracked (crack width up to 120  $\mu\text{m}$ ) in order to clarify the self-healing process. After cracking, the specimens were water-cured and the residual crack width was measured after 10, 20 and 40 days using a stereomicroscope. In addition, the mineral phases that precipitated in the cracks were examined by SEM-EDS. Significant reduction of crack width was observed, while in some mixes the cracks were completely sealed. The mix containing 10% CSA and 1.5% Penetron showed the best self-healing behavior.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Κεφάλαιο 1</b>	<b><i>Εισαγωγή</i></b>	<b>1</b>
<b>Κεφάλαιο 2</b>	<b><i>Θεωρητική επισκόπηση στην έννοια της αυτο-ίασης τσιμεντοειδών</i></b>	<b>3</b>
2.1	Η αυτο-ίαση στο πέρασμα των χρόνων	3
2.2	Μηχανισμοί αυτο-ίασης	4
2.2.1	Κοίλες ίνες	4
2.2.2	Μικρο-ενθυλάκωση	9
2.2.3	Διογκωτικά και κρυσταλλικά πρόσθετα	11
2.2.4	Βακτήρια	12
2.2.5	Μνημονικά, ως προς το σχήμα, υλικά	14
<b>Κεφάλαιο 3</b>	<b><i>Αυτο-ίαση με τη χρήση διογκωτικών και κρυσταλλικών πρόσθετων</i></b>	<b>17</b>
3.1	Η τεχνική των διογκωτικών και κρυσταλλικών προσθέτων	17
3.2	Λόγοι ανάπτυξης της μεθόδου αυτο-ίασης	22
<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b><i>Τοποθέτηση θέματος</i></b>	<b>25</b>
<b>Κεφάλαιο 5</b>	<b><i>Πειραματικό μέρος</i></b>	<b>27</b>
5.1	Πρώτες ύλες	27
5.1.1	Τσιμέντο CEM I 52.5 R (OPC)	27
5.1.2	DENKA CSA#20	28
5.1.3	Penetron® Admix	31
5.1.4	Άμμος (SAND)	33
5.1.5	Υπερρευστοποιητής Domylco Chemium 172 (SP)	34
5.1.6	Ίνες Harbourite 324	34
5.2	Παρασκευή δοκιμίων και τεχνητή αστοχία	35
5.3	Διαδικασία οπτικής επιθεώρησης της αυτο-ίασης	38

<b>Κεφάλαιο 6</b>	<b>Αποτελέσματα και συζήτηση αποτελεσμάτων</b>	43
<b>6.1</b>	<b>Στερεοσκοπική επιθεώρηση των δοκιμίων</b>	43
6.1.1.	Μίγμα M1 - Δοκίμιο αναφοράς (OPC 100%)	43
6.1.2.	Μίγμα M2 - (OPC 98.5%, Penetron® Admix 1.5%)	48
6.1.3.	Μίγμα M3 - (OPC 97%, Penetron® Admix 3%)	52
6.1.4.	Μίγμα M4 - (OPC 95.5%, Penetron® Admix 4.5%)	56
6.1.5.	Μίγμα M5 - (OPC 90%, DENKA CSA#20 10%)	60
6.1.6.	Μίγμα M6 - (OPC 88.5%, DENKA CSA#20 10%, Penetron® Admix 1.5%)	64
6.1.7.	Μίγμα M7 - (OPC 93.5%, DENKA CSA#20 5%, Penetron® Admix 1.5%)	68
<b>6.2</b>	<b>Συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της στερεοσκοπικής επιθεώρησης</b>	72
<b>6.3</b>	<b>Επιθεώρηση των ρωγμών με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM)</b>	73
<b>Κεφάλαιο 7</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	77
<b>Βιβλιογραφία</b>		79
<b>Βιογραφικό σημείωμα</b>		81

# Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 3.1</b> Σύνθεση τσιμεντοειδών υλικών για αυτο-ίαση (Ahn and Kishi)	18
<b>Πίνακας 3.2</b> Σύνθεση σκυροδέματος (Ahn and Kishi)	18
<b>Πίνακας 3.3</b> Σύσταση συνδετικού υλικού του Πίνακα 3.2	19
<b>Πίνακας 3.4</b> Χημικές αναλύσεις των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για αυτο-ίαση (Sisomphon et al.)	20
<b>Πίνακας 3.5</b> Ορυκτολογική ανάλυση των CSA-α και CSA-β του Πίνακα 3.4	20
<b>Πίνακας 3.6</b> Σύνθεση κονιαμάτων (g.) για αυτο-ίαση (Sisomphon et al.)	20
<b>Πίνακας 5.1</b> Χημική ανάλυση DENKA CSA#20 (w/w %)	29
<b>Πίνακας 5.2</b> Ορυκτολογική ανάλυση DENKA CSA#20	30
<b>Πίνακας 5.3</b> Φυσικές ιδιότητες DENKA CSA#20	30
<b>Πίνακας 5.4</b> Φυσικοχημικές ιδιότητες Penetron <sup>®</sup> Admix	32
<b>Πίνακας 5.5</b> Σύσταση Penetron <sup>®</sup> Admix	32
<b>Πίνακας 5.6</b> Φυσικοχημικές ιδιότητες ινών Harbourite 324	35
<b>Πίνακας 5.7</b> Συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων (% w/w)	36
<b>Πίνακας 6.1</b> Πρόοδος αυτο-ίασης στις 4 ηλικίες για το M1	44
<b>Πίνακας 6.2</b> Πρόοδος αυτο-ίασης άνω επιφανείας δοκιμίου M1	46
<b>Πίνακας 6.3</b> Πρόοδος αυτο-ίασης κάτω επιφανείας δοκιμίου M1	47
<b>Πίνακας 6.4</b> Πρόοδος αυτο-ίασης στις 4 ηλικίες για το M2	48
<b>Πίνακας 6.5</b> Πρόοδος αυτο-ίασης άνω επιφανείας δοκιμίου M2	50
<b>Πίνακας 6.6</b> Πρόοδος αυτο-ίασης κάτω επιφανείας δοκιμίου M2	51
<b>Πίνακας 6.7</b> Πρόοδος αυτο-ίασης στις 4 ηλικίες για το M3	52
<b>Πίνακας 6.8</b> Πρόοδος αυτο-ίασης άνω επιφανείας δοκιμίου M3	54
<b>Πίνακας 6.9</b> Πρόοδος αυτο-ίασης κάτω επιφανείας δοκιμίου M3	55
<b>Πίνακας 6.10</b> Πρόοδος αυτο-ίασης στις 4 ηλικίες για το M4	56
<b>Πίνακας 6.11</b> Πρόοδος αυτο-ίασης άνω επιφανείας δοκιμίου M4	58
<b>Πίνακας 6.12</b> Πρόοδος αυτο-ίασης κάτω επιφανείας δοκιμίου M4	59
<b>Πίνακας 6.13</b> Πρόοδος αυτο-ίασης στις 4 ηλικίες για το M5	60
<b>Πίνακας 6.14</b> Πρόοδος αυτο-ίασης άνω επιφανείας δοκιμίου M5	62
<b>Πίνακας 6.15</b> Πρόοδος αυτο-ίασης κάτω επιφανείας δοκιμίου M5	63
<b>Πίνακας 6.16</b> Πρόοδος αυτο-ίασης στις 4 ηλικίες για το M6	64
<b>Πίνακας 6.17</b> Πρόοδος αυτο-ίασης άνω επιφανείας δοκιμίου M6	66
<b>Πίνακας 6.18</b> Πρόοδος αυτο-ίασης κάτω επιφανείας δοκιμίου M6	67
<b>Πίνακας 6.19</b> Πρόοδος αυτο-ίασης στις 4 ηλικίες για το M7	68
<b>Πίνακας 6.20</b> Πρόοδος αυτο-ίασης άνω επιφανείας δοκιμίου M7	70
<b>Πίνακας 6.21</b> Πρόοδος αυτο-ίασης κάτω επιφανείας δοκιμίου M7	71
<b>Πίνακας 6.22</b> Βαθμός ίασης και μείωση επιφάνειας ρωγμής	72
<b>Πίνακας 6.23</b> Μέγιστα και ελάχιστα εύρη ρωγμών που έφεραν πλήρη ίαση για το εκάστοτε μίγμα	72



# Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 2.1</b>	Πέτρινη γέφυρα ρωμαϊκού υδραγωγείου	3
<b>Σχήμα 2.2</b>	Κοίλες ίνες (αριστερά) και επολωτικά συστατικά με φθορίζουσες χρωστικές ουσίες (δεξιά)	5
<b>Σχήμα 2.3</b>	Σχηματική παράσταση των πειραμάτων των Mihashi και Joseph	5
<b>Σχήμα 2.4</b>	Σύστημα αυτο-ίασης με τη μέθοδο της εσωτερικής ενθυλάκωσης με κοίλους γυάλινους σωλήνες. (α) Εγκάρσια τομή (β) Πλευρική τομή (γ) Σφραγισμένος γυάλινος σωλήνας γεμάτος με εποξειδική ρητίνη	7
<b>Σχήμα 2.5</b>	Σύστημα αυτο-ίασης για σκυρόδεμα με επιλεκτική θέρμανση γύρω από τις ρωγμές	8
<b>Σχήμα 2.6</b>	Μικρο-ενθυλάκωση α) Τρόπος λειτουργίας μικροκάψουλας. β) Μικροκάψουλα μετά από τη ρήξη	9
<b>Σχήμα 2.7</b>	Εικόνα ESEM των προϊόντων επούλωσης στην περίπτωση χρήσης διογκωτικών υλών	11
<b>Σχήμα 2.8</b>	Σχηματικό σενάριο της ίασης ρωγμής από σκυρόδεμα με ακινητοποιημένα βακτήρια	13
<b>Σχήμα 2.9</b>	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	14
<b>Σχήμα 2.10</b>	Σχηματική αναπαράσταση δείγματος ευφυούς οπλισμένου σκυροδέματος	15
<b>Σχήμα 3.1</b>	Χημική δομή του γεω-υλικού (Li, 1995)	17
<b>Σχήμα 3.2</b>	Ρηγμάτωση δοκιμίου με δοκιμή σε διάρρηξη	21
<b>Σχήμα 3.3</b>	Δοκίμιο σε σφικτήρα PVC. Σημεία μέτρησης ανά 10 mm	21
<b>Σχήμα 3.4</b>	Δοκιμή διαπερατότητας σε νερό	21
<b>Σχήμα 3.5</b>	Η διάβρωση του οπλισμού σε σκυρόδεμα με ρωγμές	23
<b>Σχήμα 5.1</b>	Πρώτες ύλες για την Παρασκευή των δοκιμίων (πραγματικές ποσότητες για δοκίμιο M6	27
<b>Σχήμα 5.2</b>	Ακτινοδιάγραμμα XRD του CEM I 52.5 R	28
<b>Σχήμα 5.3</b>	Ακτινοδιάγραμμα XRD του DENKA CSA#20	30
<b>Σχήμα 5.4</b>	Ακτινοδιάγραμμα XRD του Penetron® Admix	32
<b>Σχήμα 5.5</b>	Ακτινοδιάγραμμα XRD της άμμου	33
<b>Σχήμα 5.6</b>	Συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων (% w/w)	36
<b>Σχήμα 5.7</b>	Εργαστηριακός αναμικτήρας	37
<b>Σχήμα 5.8</b>	Κυλινδρικές μήτρες 75Φ×20 mm	37
<b>Σχήμα 5.9</b>	Δοκίμιο σε διαδικασία τεχνικής θλίψης με δοκιμή σε διάρρηξη	38
<b>Σχήμα 5.10</b>	Δοκίμιο μετά από την διάρρηξη με χαραγμένα τα σημεία οπτικής επιθεώρησης (κατά την διάρκεια ίασης)	38
<b>Σχήμα 5.11</b>	Στερεοσκόπιο Leica MZ 8 και πρόγραμμα ανάλυσης εικόνας ProgRes Capture Pro 2.1	39
<b>Σχήμα 5.12</b>	SEM / FEI Quanta 200	40
<b>Σχήμα 5.13</b>	Συσκευή επιμετάλλωσης EMITECH SC7620 της Quorum Technologies	41

<b>Σχήμα 5.14</b> Επιμεταλλωμένα δοκίμια με χρυσό (Au) ελεύθερης επιφανείας (B, B') και εμποτισμένο σε θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη με στίλβωση (A). Μη επιμεταλλωμένο ελεύθερης επιφανείας (B1) και μη επιμεταλλωμένο εμποτισμένο με ρητίνη (A1).	41
<b>Σχήμα 5.15</b> Διάγραμμα ροής πειραματικής διαδικασίας	42
<b>Σχήμα 6.1</b> Πρόοδος αυτο-ίασης του δοκιμίου M1	45
<b>Σχήμα 6.2</b> Ποσοτική αποτίμηση της αυτο-ίασης για το δοκίμιο M1	45
<b>Σχήμα 6.3</b> Πρόοδος αυτο-ίασης του δοκιμίου M2	49
<b>Σχήμα 6.4</b> Ποσοτική αποτίμηση της αυτο-ίασης για το δοκίμιο M2	49
<b>Σχήμα 6.5</b> Πρόοδος αυτο-ίασης του δοκιμίου M3	53
<b>Σχήμα 6.6</b> Ποσοτική αποτίμηση της αυτο-ίασης για το δοκίμιο M3	53
<b>Σχήμα 6.7</b> Πρόοδος αυτο-ίασης του δοκιμίου M4	57
<b>Σχήμα 6.8</b> Ποσοτική αποτίμηση της αυτο-ίασης για το δοκίμιο M4	57
<b>Σχήμα 6.9</b> Πρόοδος αυτο-ίασης του δοκιμίου M5	61
<b>Σχήμα 6.10</b> Ποσοτική αποτίμηση της αυτο-ίασης για το δοκίμιο M5	61
<b>Σχήμα 6.11</b> Πρόοδος αυτο-ίασης του δοκιμίου M6	65
<b>Σχήμα 6.12</b> Ποσοτική αποτίμηση της αυτο-ίασης για το δοκίμιο M6	65
<b>Σχήμα 6.13</b> Πρόοδος αυτο-ίασης του δοκιμίου M7	69
<b>Σχήμα 6.14</b> Ποσοτική αποτίμηση της αυτο-ίασης για το δοκίμιο M7	69
<b>Σχήμα 6.15</b> Παρουσία ετρινγκίτη εντός της ρωγμής του μίγματος M5	73
<b>Σχήμα 6.16</b> Κρυσταλλικό μοντέλο του ασβεστίτη (α) και του αραγωνίτη (β)	74
<b>Σχήμα 6.17</b> Διαδοχικές μεγεθύνσεις της προς ανάλυσης δευτερογενούς φάσης επικάλυψης και δημιουργία Ασβεστίτη	74
<b>Σχήμα 6.18</b> Διαδοχικές μεγεθύνσεις της προς ανάλυσης δευτερογενούς φάσης επικάλυψης και δημιουργία Αραγωνίτη	75
<b>Σχήμα 6.19</b> Σύγκριση των επιφανειών και των εσωτερικών των ρωγμών για τα δείγματα M1, M2, M5 και M6	76







Στόχος, της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας, είναι η μελέτη αυτό-αποκατάστασης ή αυτο-ίασης (Self-Healing) τσιμεντοκονιαμάτων. Το πεδίο έδρασης της έρευνας αφορά, τα τεχνικά έργα τα οποία έχουν άμεση σχέση με υγρά περιβάλλοντα, όπως σήραγγες, φράγματα, λιμενικά έργα, γέφυρες και θεμελιώσεις.

Τα αυτο-ιάσιμα τσιμεντοειδή υλικά, αποτελούν ένα μέρος της οικογενείας των ευφυών υλικών. Πιο συγκεκριμένα, είναι σε θέση να αντιλαμβάνονται την αστοχία - ρηγμάτωση του έργου και να αποκαθιστούν την βλάβη μόνα τους χωρίς την επέμβαση του ανθρώπου. Ο σχεδιασμός αυτού του είδους των υλικών, δίνει τη δυνατότητα στην κατασκευή να αυξάνει τον μέσο όρο ζωής της, να προστατεύει τον οπλισμό περισσότερο, να προλαμβάνει την αστοχία, καθώς και να παρέχει οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Το κόστος παρασκευής ενός τέτοιου υλικού είναι κοντά στα συμβατικά και ο λόγος αυτός είναι που μπορεί να κάνει αυτή τη δομική ύλη ελκυστική στη κατασκευαστική βιομηχανία. Πρέπει να τονιστεί, ότι η χρήση των αυτο-ιασόμενων τσιμεντοειδών υλικών δεν έχει ως στόχο να αντικαταστήσει τον ανθρώπινο παράγοντα, στον τομέα των κατασκευών, αλλά να εναρμονίσει απόλυτα τις προδιαγραφές ασφαλείας με τις κατασκευές. Άλλωστε, η σημερινή εποχή, είναι εκείνη η οποία ζητά ολοένα καινούργια υλικά τα οποία να αποδίδουν τις μέγιστες ιδιότητες και να φέρουν αειφορία σε σχέση με τον χαμηλό οικονομικό παράγοντα.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας, είναι η παρασκευή στο εργαστήριο τσιμεντοκονιαμάτων, τα οποία θα φέρουν την ιδιότητα της αυτο-ίασης. Έτσι, παρασκευάζονται επτά (7) διαφορετικές σειρές δειγμάτων, με πρώτες ύλες, τσιμέντο Portland CEM I, δύο τύπους διαφορετικών εμπορικών προσθέτων, άμμου, ινών και υπερρυστοποιητή. Με το πέρας της παρασκευής των δοκιμίων και των 28 ημερών ωρίμανσης, τα δοκίμια αστοχούν τεχνητά, προς τη δημιουργία ρωγμών, οι οποίες είναι συμμορφωμένες με τον κατασκευαστικό κώδικα. Τέλος, αυτές μετρώνται με τη χρήση στερεοσκοπίου και εν συνεχεία εμβαπτίζονται σε νερό. Η μέτρηση με στερεοσκόπιο επαναλαμβάνεται σε 3 ηλικίες (10, 20 και 40 ημέρες). Με το πέρας των 40 ημερών, τα αποτελέσματα της στερεοσκοπικής επιθεώρησης επαληθεύονται και ερμηνεύονται με τη χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης.

Πιο συγκεκριμένα, η δομή της μελέτης διαμορφώθηκε ως εξής:

- Κεφάλαιο 1 «Εισαγωγή»: Παρατίθενται εισαγωγικά στοιχεία για την εργασία.
- Κεφάλαιο 2 «Θεωρητική επισκόπηση στην έννοια της Αυτο-Ίασης (Self-Healing) τσιμεντοειδών»: Παρουσιάζονται οι μηχανισμοί αυτο-ίασης των τσιμεντοειδών.
- Κεφάλαιο 3 «Ανάπτυξη της αυτο-ίασης με τη χρήση διογκωτικών και κρυσταλλικών πρόσθετων»: Αναπτύσσεται ο συγκεκριμένος μηχανισμός αυτό-ίασης, καθώς και οι λόγοι ανάπτυξης της μεθόδου.
- Κεφάλαιο 4 «Τοποθέτηση Θέματος»: Τεκμηριώνεται το αντικείμενο της εργασίας, καθώς και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη διεκπεραίωση της.

- Κεφάλαιο 5 «Πειραματικό μέρος»: Περιλαμβάνεται ο πλήρης χαρακτηρισμός των πρώτων υλών μαζί και των ιδιοτήτων τους. Επίσης, αναλύεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, τόσο κατά την παρασκευή των δοκιμίων όσο και κατά τον έλεγχο τους.
- Κεφάλαιο 6 «Αποτελέσματα και συζήτηση αποτελεσμάτων»: Παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα από την οπτική επιθεώρηση με την στερεοσκοπική μέθοδο και από τη χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σαρώσεως (SEM).
- Κεφάλαιο 7 «Συμπεράσματα»: Εκθέτονται τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

Τέλος, παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## Θεωρητική επισκόπηση στην έννοια της αυτο-ίασης τσιμεντοειδών

### 2.1 Η αυτο-ίαση στο πέρασμα των χρόνων

Το φαινόμενο της αυτο-ίασης (self-healing) και τα υλικά που είναι σε θέση να θεραπεύονται από μόνα τους, έχουν μακράν 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 του 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 2.1), καθώς και σε παρόμοιες, νεότερες γέφυρες, από αυτήν, όπου μπορούμε να τις δούμε στο Άμστερνταμ, στην Ουτρέχτη και στο Ντελφτ και ανήκουν στον 18<sup>ο</sup> αιώνα. Στις συγκεκριμένες, ο τρόπος αυτο-ίασης κατατάσσεται στην ανακρυστάλλωση του ασβεστίτη.



Σχήμα 2.1 Πέτρινη γέφυρα ρωμαϊκού υδραγωγείου [2]

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 ( $\text{CO}_2$ ) πρέπει να είναι διαθέσιμα, προκειμένου να υπάρξει η διάλυση και παράσυρση του ασβέστη ( $\text{CaO}$ ) προς το σχηματισμό ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ), είτε αυτό δοθεί υπό την μορφή ασβεστίτη είτε υπό αυτήν του αραγωνίτη [3, 4].

Τα όσα αναφέρθηκαν, λειτούργησαν ως ερεθίσματα στη σύγχρονη ερευνητική κοινότητα, με αποτέλεσμα, ένα αρκετά μεγάλο κομμάτι της να ασχολείται στην διερεύνηση, υπό διαφορετικές πάντα σκοπιές 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.

## 2.2 Μηχανισμοί αυτο-ίασης

Στις μέρες μας, ένα μεγάλο τμήμα της επιστημονικής κοινότητας ασχολείται με το θέμα της αυτο-ίασης τσιμεντοειδών υλικών. Οι μηχανισμοί που έχουν μελετηθεί και αναπτυχθεί για την εφαρμογή της αυτο-ίασης στην πράξη αναφέρονται παρακάτω:

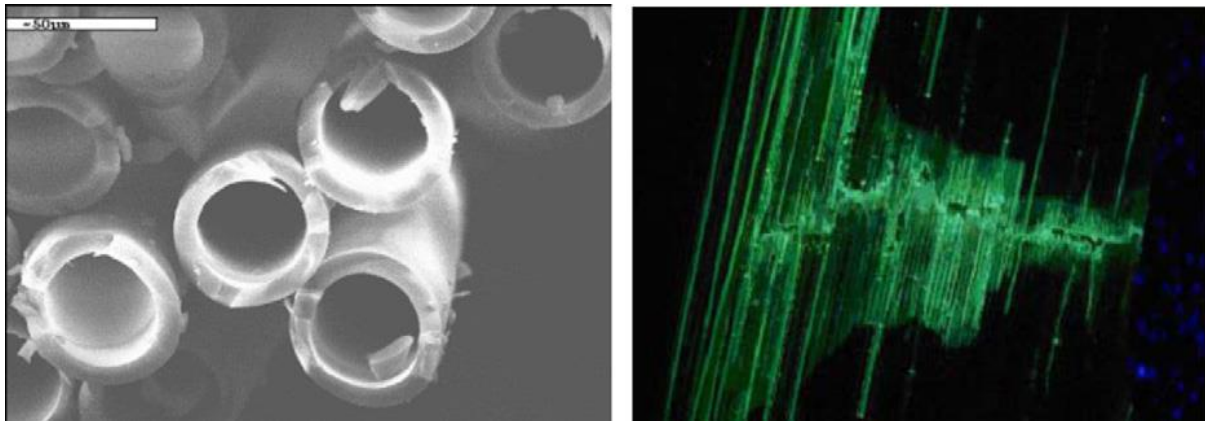
- α) Κοίλες ίνες (Hollow fibers)
- β) Μικρο-ενθυλάκωση (Microencapsulation)
- γ) Διογκωτικά και κρυσταλλικά πρόσθετα (Expansive agents and mineral admixtures)
- δ) Βακτήρια (Bacteria)
- ε) Μνημονικά, ως προς το σχήμα, υλικά (Shape memory materials)

### 2.2.1 Κοίλες ίνες

Η ιδέα για τη χρήση κοίλων ινών, όπου ορισμένες φορές ανάλογα με τη διάμετρο τους καλούνται πιπέτες ή σωλήνες, προήλθε, διότι μπορούν μέσα τους να φιλοξενήσουν ορισμένα λειτουργικά συστατικά και εν συνεχεία να ενσωματωθούν στη σύνθετη μήτρα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, όταν προκύψει οιαδήποτε αστοχία - ρωγμάτωση του υλικού, κάτω από ορισμένες συνθήκες, τα λειτουργικά συστατικά ή καλύτερα οι παράγοντες ίασης, θα εκχυθούν και θα θεραπεύσουν τη ρωγμή μεταγενέστερα.

Για την παρούσα μέθοδο αυτο-ίασης, οι κοίλες ίνες, ενσωματώνονται μέσα στο τεχνικό έργο, παρόμοια με τις αρτηρίες που υπάρχουν σε έναν φυσικό οργανισμό. Η παρούσα μέθοδος, έχει ερευνηθεί σε ποικίλες κλίμακες μήκους και σε διαφορετικά τεχνικά υλικά, όπως και σε μεγάλες ποσότητες πολυμερικών ινών σε πολυμερικά σύνθετα υλικά. Η καταλληλότητα των κοίλων ινών ή σωλήνων στο να επιτρέπουν την έκχυση των επουλωτικών ουσιών, έχει αποδειχτεί σε αρκετές περιπτώσεις. Προκειμένου να υπάρχει μία ταχεία κι εύκολη παρατήρηση, για την εσωτερική αστοχία στο σύνθετο υλικό, οι **Pang** και **Bond** [5, 6] σχεδίασαν μία βελτιωμένη μέθοδο οπτικής παρακολούθησης. Στην εργασία τους,

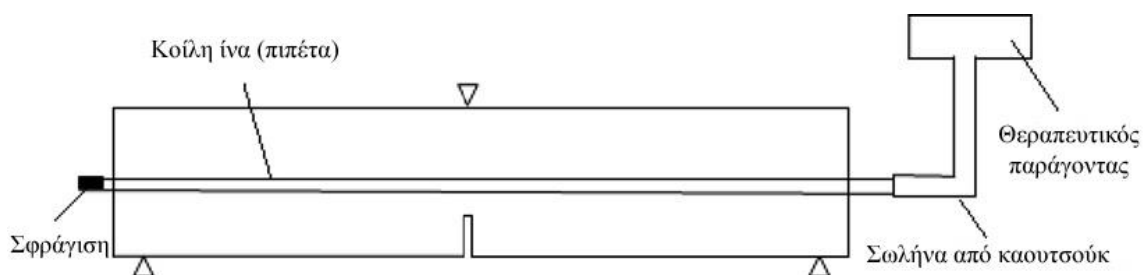
ο επουλωτικός παράγοντας, ο οποίος και θα πληρώσει τις ίνες, αναμιγνύεται με φθορίζουσα χρωστική ουσία, ούτως ώστε να είναι εφικτή η παρατήρηση της διαδικασίας ίασης (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 Κοίλες ίνες (αριστερά) και επουλωτικά συστατικά με φθορίζουσες χρωστικές ουσίες (δεξιά)

Οι πειραματικές μέθοδοι, αυτού του τρόπου αυτο-ίασης τσιμεντοειδών υλικών, έχουν συζητηθεί και καταδειχθεί, όσο είναι εφικτό από αρκετές έρευνες. Μία εξ αυτών των ερευνών, είναι και εκείνη του *Dry* [7-10], ο οποίος προσαρμόζει την ιδέα του, σε μία έννοια της βιολογικής προσέγγισης της αυτο-ίασης, σε εφαρμογή της στο σκυροδέμα. Κατ' αυτόν, η ιδέα του περιλαμβάνει την αποθήκευση των επισκευαστικών συστατικών μέσα σε εύθραυστα «αιμοφόρα αγγεία» τα οποία και διανέμονται μέσα σε ένα δείγμα σκυροδέματος, που εν συνεχεία 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, όπου όταν ελευθερωθεί, μειώνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος μέσα στο οποίο είναι διασκορπισμένες αυτές. Επίσης, μία περαιτέρω έρευνα που πραγματοποιήθηκε, ήταν στην απελευθέρωση του υλικού αποκατάστασης, το οποίο και προσκολλάται στις επιφάνειες της ρωγμής, από γυάλινες κοίλες πιπέτες που βρίσκονται μέσα στο σκυροδέμα, κατά την διάρκεια δοκιμής κάμψης. Μετά τη συγκόλληση, το δείγμα παρουσίασε ικανότητα στο να φέρει 20% περισσότερο φορτίο σε μία μεταγενέστερη καμπτική δοκιμή.

Όπως περιγράφηκε παραπάνω η ενεργός λειτουργία από τον *Dry*, έτσι και οι *Mihashi et al.* και *Joseph et al* διενήργησαν παρόμοιες εργασίες. Ένα αντιπροσωπευτικό σχηματικό διάγραμμα των δοκιμών τους δίδεται στο Σχήμα 2.3. Οι κοίλες ίνες (πιπέτες), τοποθετήθη-



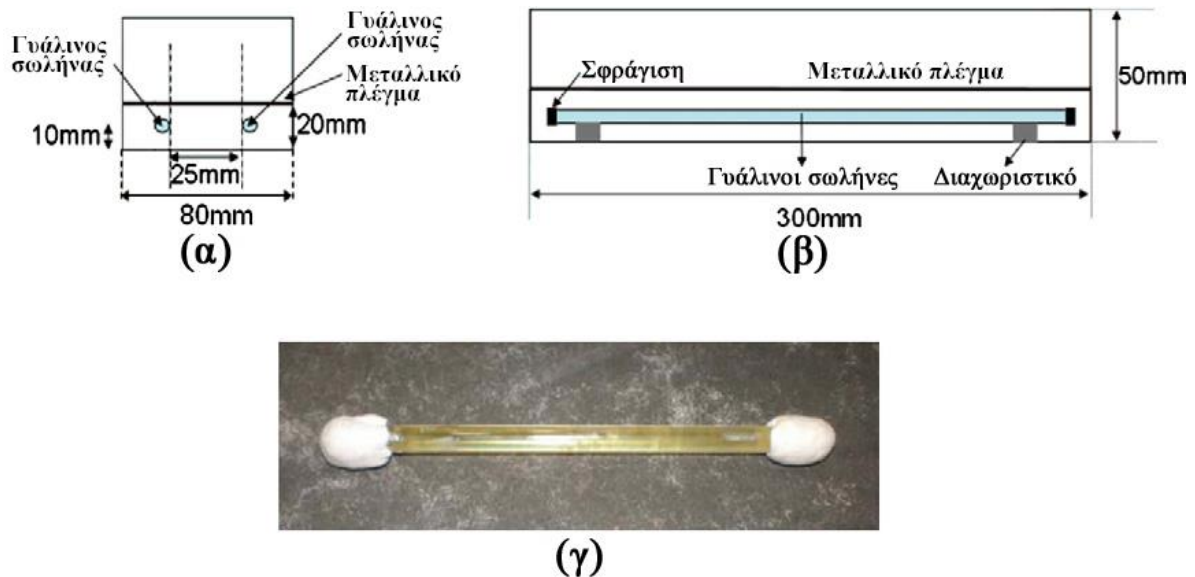
Σχήμα 2.3 Σχηματική παράσταση των πειραμάτων των Mihashi και Joseph

καν εντός τσιμεντοειδούς μήτρας, οι οποίες εν συνεχεία συνδέθηκαν από το ένα άκρο με την παροχή του παράγοντα επούλωσης και από το άλλο άκρο σφραγίστηκαν. Στο πείραμα του **Mihashi**, τα τσιμεντοειδή δείγματα έφεραν εντός τους γυάλινες πιπέτες με εξωτερική και εσωτερική διάμετρο 2 mm και 0.8 mm αντίστοιχα. Ως θεραπευτικός παράγοντας χρησιμοποιήθηκαν τέσσερεις διαφορετικές συνθέσεις. Οι δύο πρώτες, ήταν αραιωμένο κατά 27% αλκαλοπυριτικό διάλυμα και μη αραιωμένο. Οι υπόλοιπες δύο, ήταν μίξη των δύο παραπάνω συστατικών με χαμηλού ιξώδους εποξειδική ρητίνη. Μετά την προετοιμασία, τα δείγματα αρχικά φορτίστηκαν, μέχρις ότου το στόμιο της ρωγμής και το μέγεθος της μετατόπισης να φτάσουν τα 0.03-2 mm, ενώ έπειτα ακολουθήθηκε απομάκρυνση της φόρτισης. Εν συνεχεία, τα ρωγματωμένα πλέον δοκίμια, αφέθηκαν να σκληρυνθούν, ώστε να αναπτυχθεί η ικανότητα αυτο-ίασης. Τα αποτελέσματα, μετά την ανάπτυξη αντοχών, έδειξαν, σε σύγκριση με το δείγμα αναφοράς, στο οποίο δεν έγινε χρήση επουλωτικού παράγοντα, ότι τα δοκίμια με το αραιωμένο και μη αραιωμένο αλκαλοπυριτικό διάλυμα ως θεραπευτικό μέσο, έλαβαν μέσο όρο αντοχής κατά την αποκατάσταση περί τα 1.1 με 1.5 αντίστοιχα. Στον αντίποδα, τα δοκίμια στα οποία έγινε χρήση του μέσου ίασης με εποξειδική ρητίνη, η αντίστοιχη σύγκριση της αντοχής κατά την αποκατάσταση βελτιώθηκε ελάχιστα. Η τελευταία τιμή ανάκτησης, ήταν πολύ χαμηλότερη από εκείνη που λαμβάνεται με άμεση ανάμιξη και χειροκίνητη έκχυση στις ρωγμές της ρητίνης, η οποία δίνει τουλάχιστον τρεις φορές καλύτερη ίαση. Ο συγγραφέας αποδίδει αυτήν την ασυμφωνία στην ανεπαρκή ανάμιξη και ανάδευση των δύο συστατικών. Έτσι λιγότερη ρητίνη σκληρύνεται και οδηγεί στην χαμηλή αναλογία ανάκτησης, καθώς και ότι ορισμένο υλικό από την εποξειδική ρητίνη μπορεί να εξακολουθεί να παραμένει εντός των σωλήνων. Το καθεστώς δοκιμών των εργασιών των **Joseph et al.** ήταν παρόμοιο, πέραν κάποιων μικρών διαφορών, με την προηγούμενη μελέτη. Κατ' αυτούς, γίνεται χρήση καμπύλων πλαστικών σωλήνων, εξωτερικής διαμέτρου 4 mm και εσωτερικής διαμέτρου 3 mm, ως φορέων του παράγοντα επούλωσης, ενώ σαν μέσο ίασης χρησιμοποιήθηκε αιθυλική κυανοακρυλική σύνθεση. Το συμπέρασμα ήταν, ότι το αιθυλοκυανοακρυλικής βάσης μέσο επούλωσης, το οποίο παρείχετο, όπως και πριν, μέσω ενός εξωτερικού συστήματος εφοδιασμού, ήταν ικανό να επιφέρει μια επιτυχημένη αυτο-ίαση. Μετά τη ρωγμάτωση, τόσο η ακαμψία, το μέγιστο φορτίο όσο και η ολκιμότητα, παρατηρήθηκαν να αυξάνονται μετά την ίαση. Σχόλια που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια και με το πέρας της δοκιμής, έκαναν σαφές ότι, η αιθυλική κυανοακρυλική κόλλα ήταν ικανή να διεισδύσει σημαντικά μέσα στην περιοχή των επιφανειών της ρωγμής, υπό την επίδραση τόσο των τριχοειδών δυνάμεων αναρρόφησης, όσο και λόγω της βαρύτητας.

Εκτός από το εξωτερικό σύστημα παροχής του παράγοντα ίασης, μελετήθηκε επίσης και η μέθοδος της συγκολλητικής επούλωσης μέσω της εσωτερικής ενθυλάκωσης. Έτσι, οι **Li et al.** [11], διερεύνησαν τη δυνατότητα αυτή, στη χρήση της μεθόδου, σε σύνθετες τσιμεντοειδείς κατασκευές με ιδιότητα αυτο-ίασης. Ακόμα, οι **Thao et al.** μελέτησαν την επιλογή του επουλωτικού μέσου, του φορέα αυτού και του περιορισμού ενός παράγοντα ίασης καθώς και την εφαρμογή της παρούσας μεθόδου ενθυλάκωσης στο σκυρόδεμα. Στην μελέτη τους, ένα μέρος χαμηλού ιξώδους εποξειδικής ρητίνης, με εύρος ιξώδους στα 250 - 500 cPa.s επιλέχθηκε ως φορέας ίασης. Επίσης, ως σωλήνες μεταφοράς και για χάρη συγκριτικής μελέτης, επιλέχθηκαν κοίλες σωλήνες από Perspex (πολυ-μεθακρυλικό μεθύλιο PMMA) και γυαλί. Τελικά, οι γυάλινοι σωλήνες ήταν περισσότερο κατάλληλοι, λόγω χημικής αδράνειας έναντι στην εποξειδική ρητίνη, καθώς και για την ευθραυστότητα που



παρείχαν. Επομένως, οι γυάλινες σωλήνες, σπάνε ευκολότερα, κατά τη διάνοιξη της ρωγμάτωσης και έτσι διασφαλίζεται η διαρροή του επολωτικού μέσου που περιέχεται στις σωληνώσεις. Επίσης, η διαστασιολογική μελέτη έδειξε ότι η βέλτιστη εσωτερική και εξωτερική διάμετρος ήταν 4 mm και 6 mm αντίστοιχα. Εν συνεχεία, έγινε διεξαγωγή του πειράματος για να αποδειχθεί ότι η ιδέα μπορεί να εφαρμοστεί (**Σχήμα 2.4**). Τα δοκίμια ελέγχου, φορτίστηκαν έως ότου να επέλθει αστοχία και έτσι να προσδιορισθεί η καμπύλη φορτίου μετατόπισης. Έτσι, τα δείγματα με γυάλινες σωλήνες, καταπονήθηκαν έως ότου να ακουστεί η ηχητική αστοχία, η οποία ανέφερε και τη διάρρηξη των σωλήνων. Η φόρτιση όμως συνεχίστηκε, μέχρι η διαρροή της εποξειδικής ρητίνης να παρατηρηθεί στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου. Το δείγμα, κατόπιν εκτονώνεται και αφήνεται εκτός φόρτισης για 4 ημέρες πριν ξεκινήσει εκ νέου να φορτίζεται με τον ίδιο λόγο μετατόπισης. Η δοκιμή τερματίζεται αμέσως μετά την παρατήρηση περεταίρω έκχυσης του εποξικού παράγοντα ίασης. Έτσι, εφόσον σταματάει η φόρτιση, το δοκίμιο αφήνεται να επολωθεί για 3 ημέρες, πριν φορτιστεί ξανά και να δοκιμαστεί σε αστοχία για μία τρίτη δοκιμή φόρτισης. Τα αποτελέσματα, έδειξαν ότι οι γυάλινοι σωλήνες ήταν σε θέση να διαρρηχθούν όταν τεμνό-ντουσαν από τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος και έτσι να διευκολυνθεί η έγκαιρη απελευθέ-ρωση των εποξειδικών ουσιών για την επισκευή. Επίσης απεδείχθη, η ρευστότητα της πα-ρούσας εποξειδικής μέσα στις ρωγμές, διαμέσου της βαρύτητας, της τριχοειδούς δράσης και η συγκόλληση των επιφανειών της ρωγμής στο σκυρόδεμα. Ακόμα, το δοκίμιο ανέκτησε μέρος της αντοχής του, μετά από 4 ημέρες θεραπείας, ενώ τέλος, για να ελαχιστοποιηθεί η θραύση των γυάλινων σωλήνων κατά τη διάρκεια της χύτευσης από τα δομικά μέλη, προτάθηκε οι ενσωματωμένοι γυάλινοι σωλήνες να προστατεύονται από ένα πάχους 6.5 mm περιμετρικό στρώμα κονιάματος, το οποίο και σκληραίνεται σε μία ημέρα.

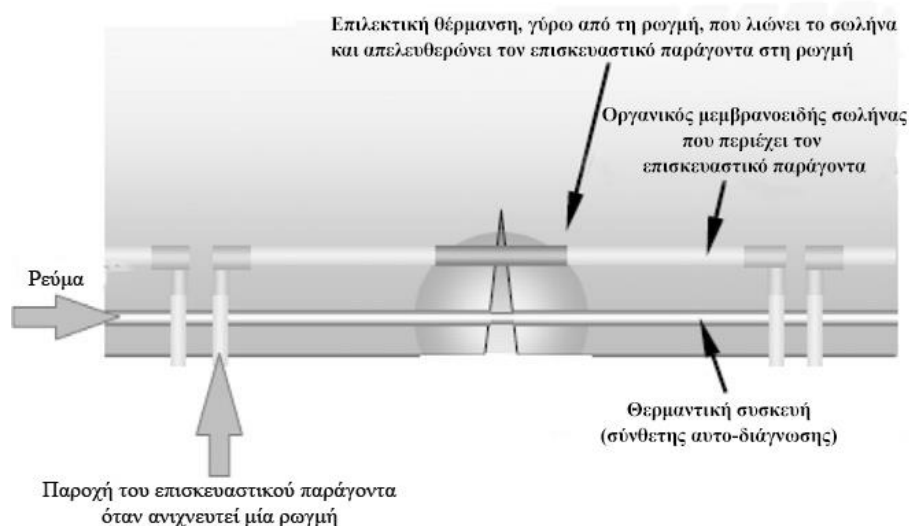


Σχήμα 2.4 Σύστημα αυτο-ίασης με τη μέθοδο της εσωτερικής ενθυλάκωσης με κοίλους γυάλινους σωλήνες. (α) Εγκάρσια τομή (β) Πλευρική τομή (γ) Σφραγισμένος γυάλινος σωλήνας γεμάτος με εποξειδική ρητίνη [5].

Παρόμοια πειράματα διενεργήθηκαν και από τους *Joseph et al.*, οι οποίοι επέλεξαν έναν τύπο κυανοακρυλικής κόλλας με εξαιρετικά χαμηλό ιξώδες 5 cPa.s, ενώ μαζί με αυτήν

στις σωλήνες πρόσθεσαν και μελάνη για την ευκολότερη παρατήρηση της διαρροής. Το συμπέρασμα ήταν ότι, παρά τις κάποιες ενδείξεις ενός μικρού ποσοστού ίασης, στις υπό δοκιμή δοκούς που περιείχαν ένα διπλό στρώμα σωλήνων, η κόλλα δεν είχε εκχυθεί μέσα στις ρωγμές σε επαρκή ποσότητα, ώστε να επιτευχθεί η επούλωση. Το παραπάνω αποτέλεσμα, της μη επιτυχημένης διαρροής του παράγοντα θεραπείας, πιστεύεται ότι έγκειται στις αρνητικές δυνάμεις πίεσης που δημιουργήθηκαν από τα πώματα της στεγανοποίησης στο κάθε άκρο των τριχοειδών σωλήνων. Έτσι, η τριχοειδής ελκτική δύναμη της ρωγμής και η βαρυτική δύναμη στη μάζα του ρευστού, ήταν ανεπαρκείς για να υπερνικήσουν την τριχοειδή δύναμη αντίστασης που ασκείται από τη γυάλινη σωλήνα και την αρνητική δύναμη πίεσης που προκαλείται από τα σφραγισμένα άκρα. Κατ' αυτά, η μικρή ποσότητα ροής μελάνης που παρατηρήθηκε στις προσόψεις της ρωγμής οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στο μελάνι που απελευθερώνεται από το άμεσο περιβάλλον του τόπου της ρωγμής, όπως από την θραύση των γυάλινων σωλήνων. Δεδομένου ότι η ρωγμή διαδίδεται σε μία διεύθυνση κάθετη προς τον προσανατολισμό των σωλήνων, η ποσότητα της κόλλας που απελευθερώνεται τοπικά ήταν ελάχιστη σε σύγκριση με τον όγκο που παραμένει στις σωληνώσεις.

Εν κατακλείδι, οι *Nishiwaki et al.* [12] προτείνουν ένα σύστημα αυτο-ίασης το οποίο αποτελείται από μία σύνθετη αυτο-διάγνωση, τον θεραπευτικό παράγοντα και ένα θερμοπλαστικό οργανικό μεμβρανοειδή σωλήνα. Η σύνθετη αυτο-διάγνωση, η οποία μπορεί να εντοπίσει τη συχνότητα εμφάνισης των ρωγμών, χρησιμοποιήθηκε ως θερμαντική συσκευή κατά τέτοιον τρόπο ώστε να αυξήσει την ηλεκτρική αντίσταση γύρω από τις ρωγμές και να θερμαίνει τα κατεστραμμένα μέλη επιλεκτικά ηλεκτρίζοντας τα. Τότε, ένας θερμοπλαστικός οργανικός μεμβρανοειδής σωλήνας, που περιέχει ένα συστατικό εποξειδικής ρητίνης με εξαιρετικά χαμηλό ιξώδες, ενσωματώνεται στο σκυρόδεμα δίπλα στη συσκευή θέρμανσης, λιώνει και απελευθερώνει τους θεραπευτικούς παράγοντες για να γεμίσει τις ρωγμές. (Σχήμα 2.5) [5].

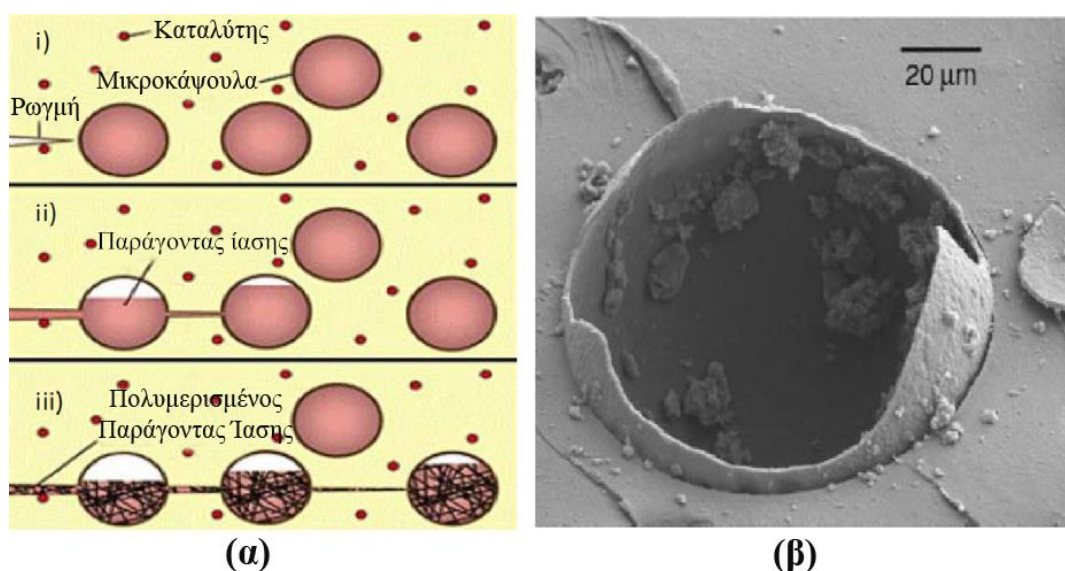


Σχήμα 2.5 Σύστημα αυτο-ίασης για σκυρόδεμα με επιλεκτική θέρμανση γύρω από τις ρωγμές

## 2.2.2 Μικρο-ενθυλάκωση

Η ενθυλάκωση των υλικών έχει εξελιχθεί από παραδείγματα στη φύση, που κυμαίνονται από την μακροκλίμακα έως και την μικροκλίμακα. Το απλούστερο παράδειγμα σε μακροσκοπική κλίμακα είναι το αυγό ενός πουλιού ή ένας σπόρος, ενώ σε μία μικροσκοπική κλίμακα το καλλίτερο παράδειγμα είναι αυτό ενός κυττάρου, μαζί με τα περιεχόμενα αυτού. Η ανάπτυξη της μικροενθυλάκωσης, ξεκίνησε με την παρασκευή καψουλών που περιείχαν βαφές. Οι τελευταίες, ενσωματώνονταν εντός του χαρτιού για αντιγραφικούς σκοπούς ώστε να αντικατασταθεί έτσι το χαρτί άνθρακα. Όσο περνούσε ο καιρός, πολλές νέες τεχνολογίες είχαν προκύψει και αναπτύσσονταν σε πολλούς τομείς. Η μικροενθυλάκωση, δεν μπορεί να οριστεί όμως ως ένα ξεχωριστό προϊόν ή ως ένα συστατικό ενός προϊόντος. Μάλλον, περιγράφεται καλύτερα, ως μία διαδικασία στην οποία περικλείονται μικρού μεγέθους σωματίδια στερεών ή σταγονιδίων, υγρών ή αερίων, σε ένα αδρανές κέλυφος, το οποίο με τη σειρά του τα απομονώνει και τα προστατεύει από ανεπιθύμητες αντιδράσεις με το εξωτερικό περιβάλλον.

Η εφαρμογή της χρησιμοποίησης της μικροενθυλάκωσης, προσεγγίστηκε ενσωματώνοντας σε αυτήν τον επουλωτικό παράγοντα για την αυτο-ίαση των υλικών. Η μέθοδος αυτή, καταδείχθηκε από τους *White et al.* [13]. Αυτή η έννοια της αυτο-ίασης παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.6α**. Όταν η ρωγμή θραύσει τις ενσωματωμένες μικροκάψουλες, ο παράγοντας επούλωσης απελευθερώνεται εντός των επιφανειών της ρωγμής δια μέσου της τριχοειδούς δράσης. Στη συνέχεια, η ουσία έρχεται σε επαφή με τον ενσωματωμένο καταλύτη προκαλώντας πολυμερισμό και εξασφαλίζοντας το κλείσιμο των ρωγμών. Μια τυπική εικόνα ρήξης μικροκάψουλας παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.6β**.



Σχήμα 2.6 Μικρο-ενθυλάκωση α) Τρόπος λειτουργίας μικροκάψουλας. β) Μικροκάψουλα μετά από τη ρήξη [13]

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 εντός της μήτρας. 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, αναμιγνύοντας το με ίνες (π.χ. αμίαντος, συνθετικές ίνες) και μικροκάψουλες που περιείχαν νερό για σκλήρυνση. Οι οικοδομικές δοκοί με ενιαία αντοχή, κατασκευάστηκαν σε μάντα 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 φιλοξενούν 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 πέραν αυτού της ίασης. Οι υποψήφιες εφαρμογές για την μέθοδο της μικρο-ενθυλάκωσης 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.

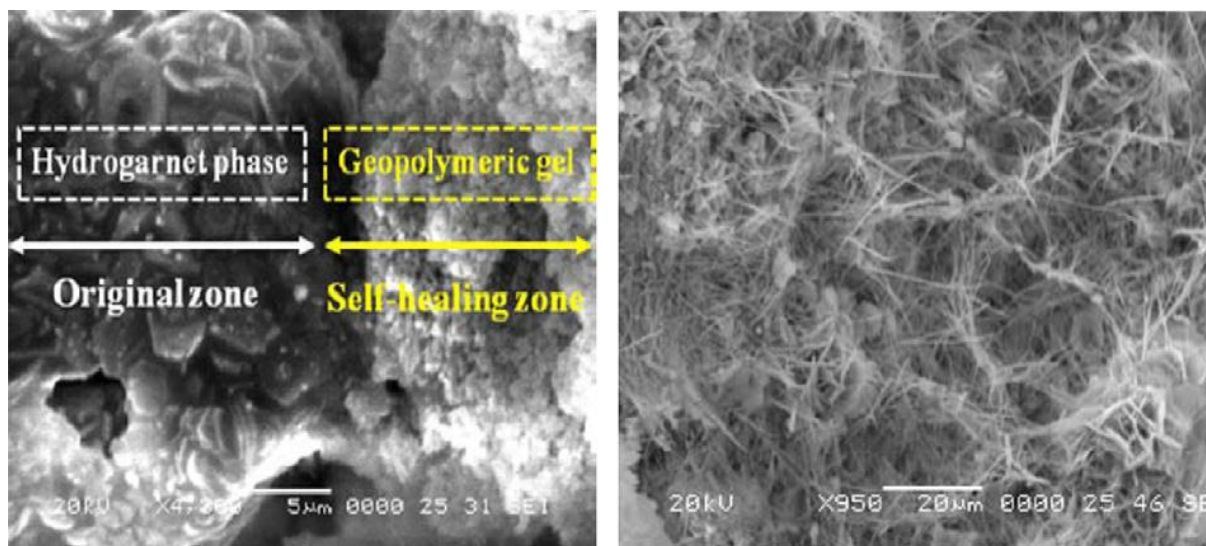
Στην εργασία που πραγματοποιήθηκε από τον *Nishiwaki*, χρησιμοποιούνται δύο ειδών μικροκάψουλες. Οι μεν πρώτες, γεμίζουν με εποξειδική ρητίνη ως συστατικό του παράγοντα επούλωσης (το υλικό του κελύφους τους αποτελείται από ουρία - φορμαλδεΰδη - φορμαλίνη και έχει διάμετρο 20-70 μm), ενώ οι δε δεύτερες πληρώνονται με ακρυλική ρητίνη ως σκληρυντή (το υλικό κελύφους παρασκευάζεται από ζελατίνη και έχει διάμετρο 125-297 μm). Αμφότερα τα 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 μικροκαψουλών. 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% μικροενθυλακωμένο 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 δε, ότι ο λόγος ανάκτησης αντοχής θα μπορούσε να είναι ακόμα υψηλότερος με την αύξηση της ποσότητας του παράγοντα επούλωσης [5].

### 2.2.3 Διογκωτικά και κρυσταλλικά πρόσθετα

Ο σχηματισμός τσιμεντοειδών προϊόντων, όπως αυτών του ετρινγκίτη (AFt, AFm) και του ασβεστίτη ( $\text{CaCO}_3$ ) στις ρωγμές και κρυστάλλων πορτλαντίτη ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), στα κενά εντός αυτών, έχουν παρατηρηθεί σε δείγματα σκυροδέματος. Υποτέθηκε, ότι αυτά τα προϊόντα ενυδάτωσης, δημιουργήθηκαν κατά την είσοδο νερού στις ρωγμές η οποία προκάλεσε ανακρυσταλλώσεις στον χώρο της ρωγματωμένης ζώνης. Με βάση αυτή τη σκέψη και σε μία προσπάθεια να αναπτυχθεί μία μέθοδος αυτο-ίασης, ο *Kishi* και οι συνεργάτες του [14,15] μελέτησαν την επίδραση διαφόρων παραγόντων επί της συμπεριφοράς του σκυροδέματος στην αυτο-ίαση. Οι διερευνηθέντες παράγοντες, περιλαμβάνουν μέσα διόγκωσης, γεω-υλικά, χημικά πρόσμικτα, 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  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$ , ανυδρίτη ( $\text{CaSO}_4$ ) και ασβέστη ( $\text{CaO}$ ), 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 [14], μαζί με τον διογκωτικό παράγοντα, προστέθηκε ένα γεω-υλικό το οποίο είχε περιεκτικότητα σε  $\text{SiO}_2$  71.3% και σε  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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, τα οποία 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  $\mu\text{m}$  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 2.7**, σχηματίζονται από τον διογκωτικό παράγο-



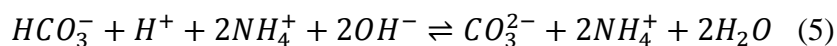
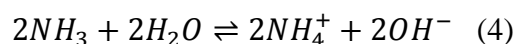
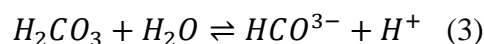
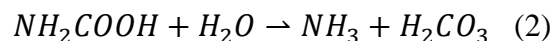
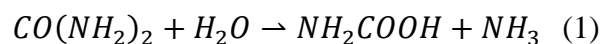
Σχήμα 2.7 Εικόνα ESEM των προϊόντων επούλωσης στην περίπτωση χρήσης διογκωτικών υλών [15]

να 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 [14,15]. Το συμπέρασμα που εξήχθη, ήταν, ότι η προσθήκη ανθρακικών αλάτων, όπως  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  και  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  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 [5].

## 2.2.4 Βακτήρια

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* [16], 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 ( $\text{CaCO}_3$ ) στην περιοχή των μικρορωγμών. Η μικροβιακή κατακρήμνιση του ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ) 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.

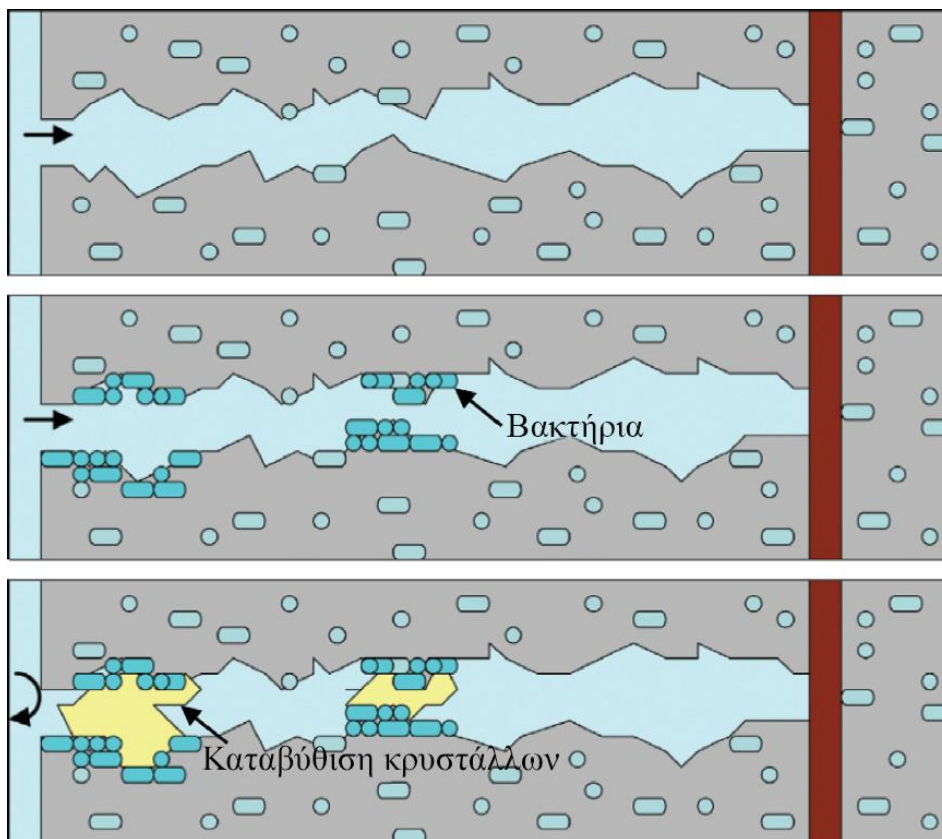
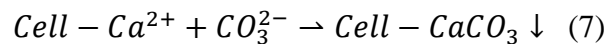
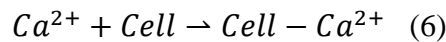
Τα βακτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την έρευνα που διεξήχθη από τον *Tittelboom* και τους συνεργάτες του, για το σκυρόδεμα, είχαν ως στόχο να παράγουν ουρεάση, ένα ένζυμο που καταλύει την ουρία ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) σε αμμώνιο ( $\text{NH}_4^+$ ) και ανθρακική ρίζα ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Η χημική διαδικασία εμφανίζεται ως εξής: 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).



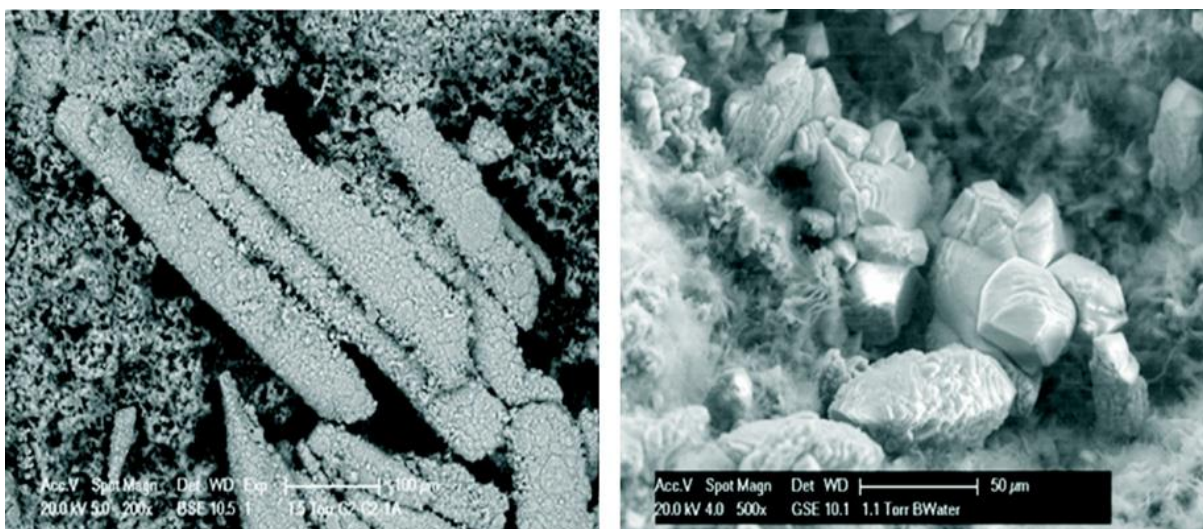


Επειδή το κυτταρικό τοίχωμα των βακτηρίων είναι αρνητικά φορτισμένο, τα βακτήρια είναι σε θέση να δημιουργήσουν κατιόντα από το περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων θετικών φορτισμένων ιόντων ασβεστίου, το οποίο αποθηκεύεται στην επιφάνεια του κυτταρικού τοιχώματος. Τα ιόντα  $Ca^{2+}$  εν συνεχεία αντιδρούν με τα  $CO_3^{2-}$  ιόντα τα οποία οδηγούν στην καταβύθιση του ανθρακικού ασβεστίου ( $CaCO_3$ ) στην κυτταρική επιφάνεια. Αυτή η κατακρήμνιση χρησιμεύει ως θέση πυρήνωσης (εξ. 6 και 7). Με αυτή την μέθοδο, τα βακτήρια προκαλώντας την τοπική καθίζηση  $CaCO_3$ , θα μπορούν να καλύψουν τις ραγισμένες επιφάνειες.

Η διαδικασία της ίασης των ρωγμών στο σκυρόδεμα, από ακινητοποιημένα βακτήρια, γίνεται από την δημιουργία αυτών στην φρέσκια επιφάνεια της ρωγμής και ενεργοποιούνται λόγω εισροής του νερού. Με αυτόν τον τρόπο, αρχίζουν να πολλαπλασιάζονται και να δημιουργούν κρυσταλλικά ιζήματα, όπως ασβεστίτη, τα οποία σφραγίζουν εν τέλει τη ρωγμή και προστατεύουν τον οπλισμό από περαιτέρω εξωτερική χημική προσβολή (Σχήμα 2.8). Εικόνες από ESEM για το ίζημα  $CaCO_3$  με διαφορετικά σχήματα επί της επιφάνειας των ρωγμών παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.9 [5].



Σχήμα 2.8 Σχηματικό σενάριο της ίασης ρωγμής από σκυρόδεμα με ακινητοποιημένα βακτήρια [5]



Σχήμα 2.9 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 [5]

### 2.2.5 Μνημονικά, ως προς το σχήμα, υλικά

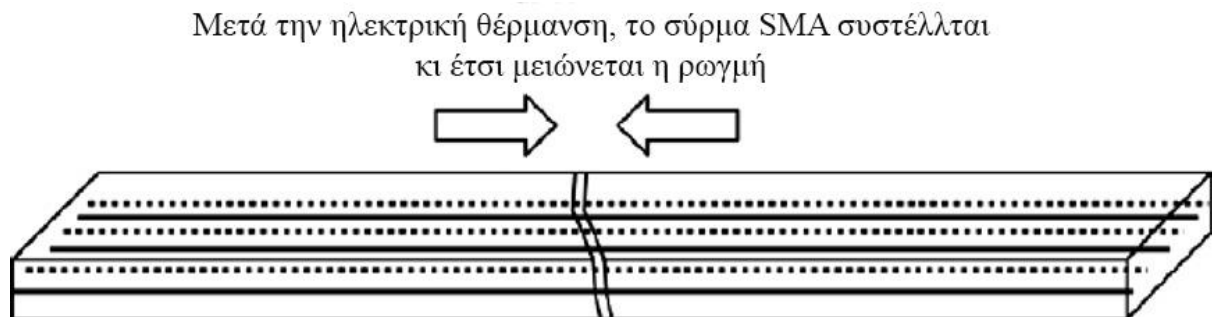
Ο τελευταίος μηχανισμός που αναφέρεται στην αυτο-ίαση, είναι η χρήση μνημονικών ως προς το σχήμα υλικών. Σημειώνεται ότι ορισμένοι ερευνητές [17], πρότειναν την ενσωμάτωση λειτουργικών υλικών, δηλαδή διαμορφωμένων μνημονικών κραμάτων ή πολυμερών μέσα σε τσιμεντοειδή υλικά. Η βασική ιδέα είναι, ότι όταν οι ρωγμές αρχίζουν, τα μνημονικά ως προς το σχήμα υλικά, τα οποία έχουν ένα βραχύτερο, προκαθορισμένο, απομνημονευμένο σχήμα κατά την τρέχουσα κατάσταση θα συρρικνωθούν ή θα συσταλαθούν σε μία συγκεκριμένη μορφή, έτσι ώστε θα παράγεται μία δύναμη συστολής η οποία βέλτιστα θα οδηγήσει στο κλείσιμο των ρωγμών.

Το 1932, οι **Chang** και **Read** παρατήρησαν την αναστρέψιμη φάση μετασχηματισμού του κράματος χρυσού - καδμίου (AuCd), η οποία είναι η πρώτη πειραματική καταγραφή για μετασχηματισμό σχήματος μνήμης [18]. Μέχρι σήμερα, έχουν ανακαλυφθεί πολλοί τύποι κραμάτων μνήμης σχήματος (SMAs). Μεταξύ αυτών είναι το Nitinol, το οποίο ανακαλύφθηκε από τον **Buechler** και τους συνεργάτες του και διαθέτει ανώτερες θερμομηχανικές και θερμοηλεκτρικές ιδιότητες και είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο (SMAs). Το Nitinol (SMAs) έχει δύο μοναδικές ιδιότητες: το φαινόμενο της μνήμης του σχήματος και την υπερπλαστικότητα. Το φαινόμενο της μνήμης σχήματος, αναφέρεται στην ιδιότητα ότι τα SMAs επιστρέφουν πίσω στο προκαθορισμένο σχήμα τους κατά την θέρμανση. Η υπερπλαστικότητα παραπέμπει στην ικανότητα των SMAs τα οποία μπορούν να υποβληθούν σε μεγάλο ποσοστό ανελαστικής παραμόρφωσης και να ανακτήσουν το σχήμα τους μετά την εκφόρτιση.

Αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των συρμάτων SMAs που φέρουν την ικανότητα μνήμης σχήματος, οι **Song** και **Mo** πρότειναν την έννοια του ευφυούς οπλισμένου σκυροδέματος (IRC). Το IRC χρησιμοποιεί λανθάνοντα μαρντενσίτη σε μορφή συρμάτων SMA για προένταση (όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.10**). Με την παρακολούθηση της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης των συρμάτων του κράματος του υλικού μνήμης σχήματος, θα μπορούσε να ληφθεί η κατανομή του στελέχους μέσα στο σκυρόδεμα. Με την παρουσίαση των



ρωγμών, λόγω εκρήξεων ή σεισμών, γίνεται ηλεκτρική θέρμανση των συρμάτων SMA και έτσι παρατηρείται συρρίκνωση και μείωση των ρωγμών. Αυτός ο τρόπος αυτο-αποκατάστασης θα μπορούσε να χειριστεί τις μακροσκοπικές ρωγμές. Η δομή του σκυροδέματος ήταν ευφυής με την έννοια ότι ήταν σε θέση να ανιχνεύσει την αυτο-αποκατάσταση. Οι *Sakai et al.*, διερεύνησαν την αυτο-αποκατάσταση του σκυροδέματος με τη χρήση δεσμίδων συρμάτων τύπου SMA με μεγάλη ελαστικότητα. Τα πειραματικά αποτελέσματα, αποκάλυψαν ότι το κονίαμα με τις δεσμίδες συρμάτων SMA ιάθηκαν σχεδόν πλήρως μετά από τη δημιουργία μίας εξαιρετικά μεγάλης ρωγμής.



Σχήμα 2.10 Σχηματική αναπαράσταση δείγματος ευφυούς οπλισμένου σκυροδέματος [5]

Ομοίως, πολυμερή υλικά με σχηματική μνήμη (SMP) προτείνονται, προς ενσωμάτωση σε τσιμεντοειδή μήτρα [17]. Η βασική ιδέα είναι η εξής: (1) το ράισμα που συμβαίνει στα τσιμεντοειδή υλικά οφείλεται σε πρόωμη ηλικία συρρίκνωσης, στις θερμικές επιδράσεις και / ή στις μηχανικές φορτίσεις που υποβάλλονται. (2) Ο μηχανισμός συρρίκνωσης στα ενσωματωμένα πολυμερή υλικά μνήμης (τα οποία λειτουργούν ως τένοντες) ενεργοποιούνται με θέρμανση, η οποία οδηγεί τη ρωγμή σε κλείσιμο και στην ανάπτυξη θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος των κλειστών μετώπων των επιφανειών της ρωγμής. Το κλείσιμο των ρωγμών, μπορεί να ενισχύσει τη φυσική διαδικασία αυτο-ίασης και γενικά τέτοια κλεισίματα χρησιμεύουν στο να ενισχύουν την ανθεκτικότητα του δομικού συστατικού. Βασισμένοι σε πειράματα, οι *Jeferson et al.* [17] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η έννοια της πρό-έντασης σε κονίαμα με προσανατολισμένες δεσμίδες συρρικνωμένων πολυμερών τενόντων ήταν βιώσιμη για το κλείσιμο των ρωγμών και για χαμηλού επιπέδου προ-έντασης. Αποδεικνύεται επίσης στην εργασία τους, ότι το πιο αποτελεσματικό υλικό μνήμης σχήματος, για τους τένοντες, όπως κρίνεται από μία σειρά δοκιμών διαλογής, ήταν το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) Shrinktite. Αυτό το υλικό, έχει μία δυνατότητα συρρίκνωσης περί τα 34 MPa υπό συγκρατημένες συνθήκες, όταν θερμαίνεται σε μία θερμοκρασία 90 °C και αφήνεται να ψυχθεί. Τέλος, η επίδραση της θέρμανσης σε συνδυασμό με επιπλέον σκλήρυνση βοήθησε να αυξηθεί η αντοχή του κονιάματος περίπου κατά 25% [5].



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

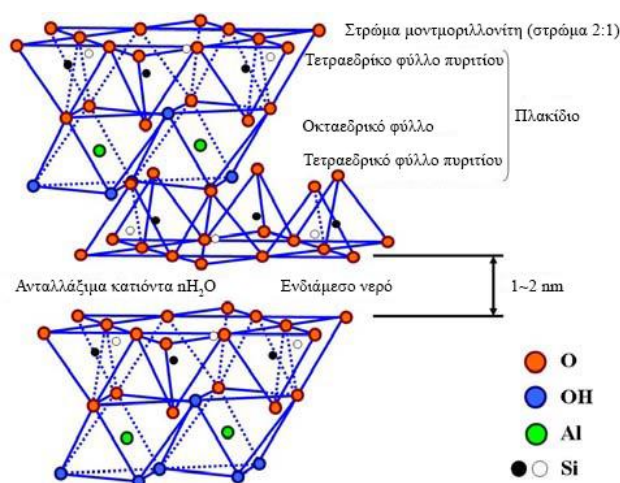
## Αυτο-ίαση με χρήση διογκωτικών και κρυσταλλικών πρόσθετων

### 3.1 Η τεχνική των διογκωτικών και κρυσταλλικών προσθέτων

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, μία εκ των τεχνικών αυτο-ίασης είναι και εκείνη της χρήσης τσιμεντοειδών διογκωτικών και κρυσταλλικών πρόσθετων. Πάνω σε αυτό τον μηχανισμό, ξεχωρίζουν δύο διαφορετικές εργασίες, οι οποίες όμως συναντώνται σε κομβικά ως προς τη διαδικασία σημεία.

Οι προσεγγίσεις αυτές, προέρχονται, η μεν πρώτη, από το *Ινστιτούτο Βιομηχανικών Επιστημών, του Πανεπιστημίου του Τόκιο Ιαπωνίας*, από τους **Tae-Ho Ahn** και **Toshiharu Kishi**, ενώ η δεύτερη, από το *Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Γεωεπιστημών, του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου DELFT Ολλανδίας* σε συνεργασία με το *Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, COPPE / του Ομοσπονδιακού Πανεπιστημίου του Ρίο ντε Τζανέιρο Βραζιλίας*, υπό τους **K. Sisomphon, O. Copuroglu, E.A.B. Koenders**.

Κατά την πρώτη ερευνητική εργασία, οι **Ahn** και **Kishi** [14, 15] χρησιμοποιούν τσιμέντο Portland τύπου I, σε μίγματα που περιέχουν κρυσταλλικά και χημικά πρόσθετα. Για να είναι δυνατή η σύγκριση στην ικανότητα της 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,  $C_4A_3\bar{S}$  (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  $[Na_{0.6}Al_{4.7}Si_{7.32}O_{20}(OH)_4]$ . Επιπλέον περιέχει μοντμοριλλονίτη, αστρίους και χαλαζία, καθώς



Σχήμα 3.1 Χημική δομή του γεω-υλικού (Li, 1995) [15]

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 3.1). Από την άλλη μεριά, το δεύτερο γεω-υλικό φέρει παρόμοια διάταξη, αλλά με λίγο διαφορετική χημική

σύνθεση από το πρώτο. Ακολούθως, στο στάδιο των χημικών παραγόντων, επιλέχθηκαν διάφοροι τύποι ανθρακικών αλάτων, όπως  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  και  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  ώστε να ενισχύσουν το αποτέλεσμα της ανακρυστάλλωσης των τσιμεντοειδών, με τη χρήση διογκωτικών παραγόντων, στα κενά του ραϊσμένου 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.

Στην προκείμενη έρευνα, τα παραπάνω μίγματα πάστας, έγιναν με λόγο νερού προς τσιμεντοειδή υλικά (W/B) 0.45, ενώ ως τσιμεντοειδή, για την πάστα, χρησιμοποιήθηκαν τα υλικά που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.1**. 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 ανάμιγμα να έχει κατάλληλη ρευστότητα. Η ρευστότητα του μίγματος (κάθιση), μετρήθηκε σε χρονικό διάστημα από 30 έως και 90 λεπτά από την ανάμιξη.

**Πίνακας 3.1** Σύνθεση τσιμεντοειδών υλικών για αυτο-ίαση (Ahn and Kishi) [15]

Δείγμα	OPC	Διογκωτικός Παράγοντας (CSA)	Γεω - Υλικά (A, B τύπος)	Χημικά πρόσθετα
I	90 %	✓	✓	
II	90 %	✓	✓	✓
III	90 %	✓	✓	✓

Ακολούθως, έγινε χύτευση της σύνθεσης σε κυλινδρικά καλούπια διαστάσεων  $5\Phi \times 10$  cm. Έπειτα, αφήθηκαν να ωριμάσουν για 120 μέρες και εν συνεχεία δημιουργήθηκαν τεχνητές ρωγμές. Το εύρος της ρωγμής ελέγχθηκε να είναι μεταξύ 0.1 και 0.3 mm και αυτό, σε συνεκτίμηση με το μέγιστο ανεκτό πλάτος ρωγμής, σύμφωνα με τον κατασκευαστικό κώδικα. Μετά την τεχνητή αστοχία, τα δείγματα εμβαπτίστηκαν εκ νέου στο νερό για παραπάνω ωρίμανση 200 ημερών.

Οι αναλογίες ανάμιξης των σκυροδεμάτων, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.2** και **Πίνακα 3.3**. Οι λόγοι νερού προς συνδετικό υλικό (W/B) και άμμου προς αδρανή υλικά (S/A), είναι 47.3% και 46.6% αντίστοιχα. Οι αναλογίες που δίδονται, ισχύουν σε όλους τους τύπους σκυροδέματος.

**Πίνακας 3.2** Σύνθεση σκυροδέματος (Ahn and Kishi)

Πρώτη Ύλη	kg/m <sup>3</sup>
Συνδετικό υλικό	370
Νερό / Συνδετικό υλικό	175
Άμμος	809
Χαλίκια	920
Υπερευστοποιητής	4.26 ~ 4.99

Πίνακας 3.3 Σύσταση συνδετικού υλικού του Πίνακα 3.2

Δείγμα	Συνδετικό υλικό		
	OPC	Κρυσταλλικά πρόσθετα	
		ΔΠ*	ΠΑΙ**
Απλό σκυρόδεμα	100%	0%	0%
Διογκούμενο σκυρόδεμα	90%	10%	0%
Σκυρόδεμα με αυτο-ίαση	93%	5%	2%

\*ΔΠ: Διογκωτικός Παράγοντας, \*\*ΠΑΙ: Παράγοντας Αυτο-ΐασης

Εφόσον παρασκευάστηκαν τα δείγματα, έγιναν δοκιμές, κάθισης σκυροδέματος, η οποία μετρήθηκε σε χρόνους 0, 30 και 60 min και θλιπτικής αντοχής, η οποία μετρήθηκε μετά από 1, 3, 7, και 28 ημέρες. Επιπλέον, τα δείγματα σκυροδέματος, διαμορφώθηκαν σε κυλίνδρους διαστάσεων  $10\Phi \times 20$  cm.

Περίληπτικά, τα πειράματα της παραπάνω έρευνας χωρίστηκαν σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο, μελετήθηκαν βασικές ιδιότητες, όπως κάθιση, θλίψη, δοκιμή TSTM (Temperature Stress Testing Machine) και υδατοαπορροφητικότητα. Ενώ στο δεύτερο μέρος, τα δοκίμια ωρίμασαν για ένα μήνα και έπειτα υπέστησαν τεχνητή ρηγμάτωση, προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα αυτο-ίασης. Το εύρος των ρωγμών, όπως και αναφέρθηκε, ελέγχθηκε να είναι μεταξύ των 0.1 mm και 0.3 mm ανάλογα με τα μέγιστα επιτρεπτά πλάτη ρωγμών που υπαγορεύονται από τον κατασκευαστικό κώδικα. Μετά την δημιουργία ρωγμών τα δείγματα αφέθηκαν για άλλον ένα μήνα εντός νερού.

Στην επόμενη μελέτη, των **K. Sisomphon**, **O. Copuroglu**, και **E.A.B. Koenders**, χρησιμοποιήθηκαν, σύνηθες τσιμέντο Portland 42.5 N, καθώς κρυσταλλικά και διογκωτικά πρόσθετα [20]. Το κρυσταλλικό πρόσθετο (CA) (*Xypex Admix C-1000NF*), αποτελεί ένα σύνθετο τσιμεντοειδές υλικό, το οποίο περιέχει πυριτικά αντιδρώντα και ορισμένους κρυσταλλικούς καταλύτες. Τα δραστικά συστατικά του, αντιδρούν με τον πορτλαντίτη ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) για να σχηματιστούν κρυσταλλικά προϊόντα τα οποία θα μειώσουν το πορώδες και θα πληρώσουν τις ρωγμές του τσιμέντου. Τα κρυσταλλικά προϊόντα, μπορούν να δημιουργηθούν μόνο όταν υπάρχει επαρκής υγρασία. Η κύρια εφαρμογή του παραπάνω πρόσθετου, είναι να βελτιώνει τη στεγανότητα του σκυροδέματος στο νερό και να σταματάει την προσπέλαση αυτού δια μέσου της μάζας του. Το συγκεκριμένο, επίσης κατατάσσεται ως ένα υδρόφιλο στεγανωτικό υλικό. Πέραν αυτού, συντίθεται και ένα τριμερές μίγμα (χαουνίτη, ανυδρίτη και ασβέστη) διογκωτικού πρόσθετου (**CSA**) σουλφοαργιλικού ασβεστίου, το οποίο αποτελεί εμπορικό προϊόν (*Denka CSA#20*) που χρησιμοποιείται κανονικά για την αντίσταση προς την συρρίκνωση. Στο πρόσθετο αυτό, διακρίνονται δύο τύποι, ο **CSA -  $\alpha$**  και **CSA -  $\beta$**  οι οποίοι και έχουν διαφορετικές χημικές συνθέσεις, όπως αυτές παρουσιάζονται στους **Πίνακες 3.4** και **3.5**. Σημειώνεται, ότι το **CSA -  $\beta$**  είναι τροποποιημένη ουσία, που περιέχει περισσότερο ασβέστη (CaO) από τον αρχικό. Με βάση τις συμβουλές των παραγωγών και τα δοκιμαστικά μίγματα, οι μελετητές έθεσαν ως κατάλληλες δόσεις των κρυσταλλικών (CA) και διογκωτικών προσθέτων (CSA) αυτές των 1.5% και 10% κατά βάρος, αντίστοιχα, ως προς το σύνολο των τσιμεντοειδών υλικών.

Πίνακας 3.4 Χημικές αναλύσεις των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για αυτό-ίαση (Sisomphon et al.)

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

Πίνακας 3.5 Ορυκτολογική ανάλυση των CSA-α και CSA-β του Πίνακα 3.4

Σύνθεση Ορυκτών (% wt.)	CSA - α	CSA - β
Χαουνίτης (C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> S̄)	32	10
Ασβέστης (C)	20	50
Ανυδρίτης (CS̄)	40	30
Λοιπά	8	10

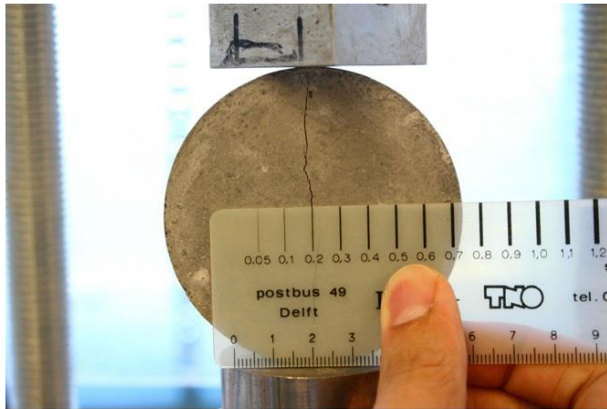
Συμπτώσεις, C = CaO, A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S̄ = SO<sub>3</sub>

Τα μείγματα που σχηματίστηκαν στην παρούσα μελέτη (Πίνακας 3.6), σχεδιάστηκαν με βάση το λόγο νερού προς τσιμέντο (W/C) να ισούται με 0.25 και τον λόγο άμμου προς τσιμέντο (S/C) να είναι 2. Επίσης έγινε χρήση υπερευστοποιητή Glenium ACE30, για να επιτευχθεί η εργασιμότητα στα κονιάματα. Για την παρασκευή των δειγμάτων, η αλληλουχία της ανάμιξης που ακολούθησαν οι μελετητές ήταν, 2 min σε χαμηλή ταχύτητα που ακολούθηθηκε από 2 min σε υψηλή, με εμπορικό αναμικτή. Στη συνέχεια, έγινε χύτευση σε κυλινδρικές μήτρες διαστάσεων, 75 mm διάμετρος και 20 mm ύψος. Για να μπορέσει η ομάδα του Sisomphon να επιτύχει ένα μεγάλο εύρος ρωγμής, όλα τα δοκίμια τα ενισχύει με γαλβανισμένο συρμάτινο πλέγμα το οποίο τοποθετείται στο μέσο του ύψους των δοκιμίων. Εν συνεχεία, οι πληρωμένες μήτρες, δονήθηκαν για 20 sec σε δονούμενη τράπεζα. Έπειτα από 24 h, τα δείγματα ξεκαλουπώνονται και ακολούθως ωριμάζουν σε ελεγχόμενη θερμοκρασία 25 ± 2 °C και 95 ± 5 % σχετική υγρασία για τρεις ημέρες. Τέλος, αφήθηκαν σε εργαστηριακές συνθήκες για τις υπόλοιπες 25 ημέρες.

Πίνακας 3.6 Σύνθεση κονιαμάτων (g.) για αυτο-ίαση (Sisomphon et al.)

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

Μετά το πέρας της ωρίμανσης, στα δοκίμια έγιναν τεχνητές ρωγμές με τη μέθοδο της δοκιμής σε διάρρηξη, προκειμένου να δημιουργηθούν σε αυτά πλάτος - εύρος ρωγμής περίπου στα 100 - 400  $\mu\text{m}$ , όπως παρουσιάζεται και στην **Εικόνα 3.2**. Μετά από τη ρηγμάτωση,



**Σχήμα 3.2** Ρηγμάτωση δοκιμίου με δοκιμή σε διάρρηξη

τα δείγματα προσδένονται, όσο πιο σφιχτά γίνεται, με σωληνοειδή βραχίονα PVC διαμέτρου 75 mm (**Εικόνα 3.3**). Ο σκοπός της ε-φαρμογής αυτής, είναι για να προσομοιωθεί η πραγματική συμπεριφορά, όπου το σκληρυμένο σκυρόδεμα βρίσκεται συνήθως υπό κάποιο περιορισμό. Για την παρακολούθηση των ρωγμών, χρησιμοποιήθηκε στερεοσκόπιο Leica MZ10 με λογισμικό ανάλυσης εικόνας Leica LAS με το οποίο γίνεται η μέτρηση των ρωγμών στην επιφάνεια των δοκιμίων σε πέντε διαφορετικά σημεία. Η απόσταση της κάθε θέσης μέτρησης είναι περίπου 10 mm, ενώ τα σημεία βρίσκονται και στις δύο επιφάνειες του δοκιμίου. Τα αρχικά πλάτη των ρωγμών μετρήθηκαν αμέσως μετά την τοποθέτηση του βραχίονα. Μετά τις μετρήσεις, τα δείγματα εμβαπτίστηκαν στο νερό, το οποίο και αλλάζόταν κάθε 7 ημέρες. Τα πλάτη των ρωγμών, μετρήθηκαν μετά από 4, 7, 14 και 28 ημέρες διαβροχής. Τέλος τα δοκίμια με διαφορετική σύνθεση βυθίστηκαν σε ξεχωριστά δοχεία κατά τη φάση επούλωσης.



**Σχήμα 3.3** Δοκίμιο σε σφικτήρα PVC. Σημεία μέτρησης ανά 10 mm

Στη σειρά των πειραμάτων τους, έγινε επίσης και δοκιμή διαπερατότητας νερού στα προραγισμένα κονιάματα, για να διερευνηθεί η διαπερατότητα των ρωγμών με την εξέλιξη της ίασης. Τα δοκίμια συνδέθηκαν με ένα πλαστικό κυλινδρικό δοχείο και στερεοποιήθηκαν σφιχτά με ένα σφικτήρα από PVC, ενώ κατά μήκος της ραφής εφαρμόστηκε σιλικόνη για σφράγιση και αποφυγή της διαρροής του νερού (**Σχήμα 3.4**). Επίσης, μία σταθερή στήλη νε-



(α) Δείγμα για την δοκιμή διέλευσης του νερού



(β) Ρύθμιση της δοκιμής διερχόμενου νερού

**Σχήμα 3.4** Δοκιμή διαπερατότητας σε νερό

ρού των  $100 \pm 5$  mm διατηρείται σε όλο το πείραμα με προσθήκη νερού. Το δείγμα, τοποθετείται πάνω σε στηρίγματα, ώστε να διευκολύνεται η ροή. Τα ποσοστά διερχόμενου νερού, μετρήθηκαν σε διαστήματα των 4, 7, 8, 14, 15 και 28 ημερών διαβροχής. Η διάρκεια της κάθε μέτρησης ήταν 10 λεπτά.

Τέλος, η επούλωση των ρωγμών παρατηρήθηκε στο εσωτερικό αυτών και όχι κοντά στην επιφάνεια. Το προφίλ της ρωγμής και ο σχηματισμός των προϊόντων αποκατάστασης, μελετήθηκαν σε στιλβωμένα δείγματα στο στερεοσκόπιο. Τα δοκίμια εμποτίστηκαν, σε μία χαμηλού ιξώδους φθορίζουσα εποξειδική χρωστική ουσία υπό κενό για να διατηρηθούν και να προστατευθούν. Έπειτα, κόπηκαν κατακόρυφα σε φέτες, εγκάρσια προς την κατεύθυνση της ρωγμής, σε ένα πάχος περίπου 10 mm με συσκευή κοπής. Μετά την κοπή, αφέθηκαν σε πυριατήριο στους 35 °C για 24 ώρες. Ακολούθως, οι φέτες των δοκιμίων εμποτίστηκαν και βάφηκαν με εποξειδική χρωστική ουσία υπό κενό για άλλη μία φορά. Με την επίτευξη της σκλήρυνσης της ρητίνης, οι επιφάνειες λειοτριβήθηκαν χρησιμοποιώντας DBT Diamond Roller και Grinder/86 μονάδα λεπτών τομών, για την αρχική παρασκευή των κατεργασμένων τμημάτων. Τέλος τα δείγματα στιλβώθηκαν με 6  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  και 0.25  $\mu\text{m}$  πάστα διαμαντιού αντίστοιχα.

Το τελευταίο πείραμα, στο οποίο προχώρησε η ερευνητική ομάδα, ήταν ο προσδιορισμός των ιόντων ασβεστίου. Για να αξιολογηθεί η ποσότητα των ιόντων ασβεστίου, τα δείγματα χυτεύθηκαν σε πλαστικά δοχεία με διάμετρο 33 mm και ύψος περίπου 50 mm. Οι γεμισμένες μήτρες, δονήθηκαν για 20 sec σε δονούμενη τράπεζα. Εν συνεχεία τα δείγματα υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με παρόμοιο τρόπο με τα δισκοειδή δοκίμια. Έπειτα από 28 ημέρες ωρίμανσης, έγιναν τεχνητές ρωγμές με δοκιμή σε διάρρηξη. Η περιφερειακή, άνω και κάτω επιφάνεια των δειγμάτων επικαλύφθηκε με εποξειδική ρητίνη, ενώ οι επιφάνειες θραύσης, ήταν το μόνο σημείο το οποίο αφέθηκε εκτεθειμένο στο περιβάλλον. Κάθε δείγμα, εμβαπτίστηκε σε 100 mL απιονισμένου νερού. Η τιμή του pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του διαλύματος μετριόντουσαν τακτικά. Στις 7 ημέρες, συλλέχθηκαν 5 mL του διαλύματος και εν συνεχεία αραιώθηκαν με 2%  $\text{HNO}_3$  για να αποφευχθεί η καταβύθιση. Τέλος, η συγκέντρωση των ιόντων ασβεστίου μετρήθηκε με ICP-AES.

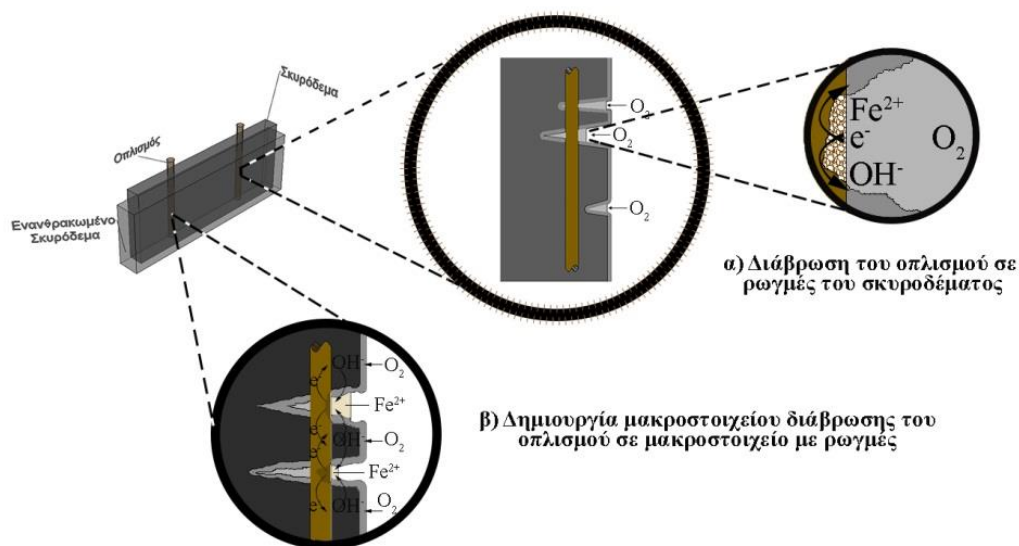
### 3.2 Λόγοι ανάπτυξης της μεθόδου αυτο-ίασης

Η παρούσα ενότητα, θα αναπτυχθεί και θα σχολιασθεί από δύο σκοπιές, η μεν πρώτη προσεγγίζει το κατασκευαστικό κομμάτι, ενώ η δεύτερη τον οικονομικό παράγοντα.

Ως προς τον κατασκευαστικό τομέα, ένα μέρος της βαρύτητας του έργου, είναι η ανθεκτικότητα της κατασκευής, η οποία αντανακλάται στην ικανότητα αυτής, στο να ανθίσταται στις περιβαλλοντικές επιδράσεις, είτε φυσικές είτε χημικές, κατά τη διάρκεια του χρόνου, χωρίς να παρουσιάζει απώλεια της επιτελεστικότητάς της (ασφάλεια, λειτουργικότητα και αισθητική εμφάνιση) κάτω από ένα ανεκτό όριο. Έτσι, ένας από τους λόγους από τους οποίους προσβάλλεται η ανθεκτικότητα του έργου στο βάθος του χρόνου, είναι η παρουσία ρωγμών στο σκυρόδεμα [21]. Γενικά, υπάρχουν στο μετόν ρωγμές πλάτους μικρότερες των 2 με 3 mm. Συνήθως, «θεωρείται» ότι οι διακλάσεις αυτές δεν έχουν σημαντική επίδραση στην διάβρωση του σιδηροπλισμού, λόγω της μικρής μεταφοράς των παραγόντων εξαλλοίω-



σης μέσα από αυτές και την πλήρωση των ρωγμών με προϊόντα διάβρωσης του οπλισμού, το οποίο είναι εν μέρει αληθές. Ο δε σχηματισμός, συνεκτικού στρώματος προϊόντων διάβρωσης, εξαρτάται από τις συνθήκες γένεσης και απόθεσης. Ακόμη, λεπτά στρώματα προϊόντων διάβρωσης, αναδιαλύονται όταν οι συνθήκες αλλάξουν. Η εμφάνιση ρωγμών, μπορεί να οφείλεται σε εσφαλμένο υπολογισμό των τάσεων, σε μεταβολές της θερμοκρασίας, στην ανεπαρκή συντήρηση του έργου και σε άλλους παράγοντες. Ενώ οδηγούν την κατασκευή σε άμεση προσβολή του οπλισμού και του εσωτερικού του σκυροδέματος από την διέλευση του οξυγόνου ( $O_2$ ), την μεταφορά του διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ) και των χλωριόντων στην επιφάνεια του οπλισμού. Ως επί το πλείστον, ρωγμές μεγαλύτερες από το πλάτος των 0.3 mm οδηγούν σε διάβρωση του σκελετού με σημαντικό ρυθμό μεταφοράς, ενώ επιταχύνουν τη διάχυση των διαβρωτικών ουσιών του περιβάλλοντος στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Η διάχυση, είναι ταχύτερη όσο το πλάτος και το βάθος των ρωγμών είναι μεγαλύτερο, με αποτέλεσμα, εάν οι ρωγμές φθάσουν στην επιφάνεια του χάλυβα, τότε υπάρχουν όλες οι προϋποθέσεις για τη διάβρωση του. Με την περιγραφή των παραπάνω, η διάβρωση διακρίνεται σε δύο περιπτώσεις, αυτήν της διάβρωσης (ιδιοδιάβρωση) του οπλισμού στη ρωγμή και στη διάβρωση του σκελετού με σχηματισμό γαλβανικού στοιχείου μεταξύ του τμήματος του οπλισμού στη ρωγμή και του τμήματος του χάλυβα στο σκυρόδεμα. Επιπλέον, στην περίπτωση ύπαρξης διαφορετικού πλάτους ρωγμών, σε ένα σκυρόδεμα μπορεί να συνυπάρχουν και οι δύο τύποι διάβρωσης του οπλισμού. Στην πρώτη περίπτωση, αυτής της ιδιοδιάβρωσης του οπλισμού στο σκυρόδεμα (**Σχήμα 3.5.α**) παρατηρείται μεγάλο πλάτος ρωγμής και η κάλυψη του οπλισμού φέρει μεγάλο πάχος, ενώ στην περίπτωση του γαλβανικού μακροστοιχείου (**Σχήμα 3.5.β**) εμφανίζεται μικρό πλάτος ρωγμής, καθώς η κάλυψη του οπλισμού από το σκυρόδεμα φέρει μικρό πάχος ή το σκυρόδεμα είναι πορώδες. Τέλος, στις περιπτώσεις αυτές, καθοριστικός παράγοντας είναι η υγρασία.



Σχήμα 3.5 Η διάβρωση του οπλισμού σε σκυρόδεμα με ρωγμές

Από την άλλη μεριά, μία βελτιωμένη διάρκεια ζωής του σκυροδέματος θα οδηγούσε στη μείωση της ζήτησης για νέες κατασκευές. Αυτό με τη σειρά του, ωθεί στη χρήση όλο και λιγότερων πρώτων υλών, με αποτέλεσμα να υπάρχει μία σχετική μείωση της ρύπανσης, της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Οι στατιστικές δείχνουν πειστικά τα τεράστια ποσά των χρημάτων που δαπανώνται από την κοινωνία λόγω έλλειψης της ποιότητας και της αντοχής του σκυροδέματος. Το κόστος για την ανοικοδόμηση των γεφυρών των ΗΠΑ έχει εκτιμηθεί μεταξύ \$ 20 δισεκατομμυρίων και 200 δισεκατομμυρίων ευρώ. Το μέσο ετήσιο κόστος συντήρησης για γέφυρες στην Αμερική εκτιμάται σε 5.2 δις €. Στις Κάτω χώρες, το 1/3 του ετήσιου προϋπολογισμού για μεγάλα έργα πολιτικού μηχανικού, δαπανώνται για την επιθεώρηση, τον έλεγχο, τη συντήρηση, την αναβάθμιση και την επισκευή. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, η επισκευή και συντήρηση αντιπροσωπεύει σχεδόν το 45% της δραστηριότητας του Ηνωμένου Βασιλείου για την κατασκευή και οικοδομική βιομηχανία. Σύμφωνα με το DEFRA, τα κτήρια και η βιομηχανία κατασκευών εκτιμάται ότι είναι υπεύθυνα για μέχρι και το 50% των εκπομπών CO<sub>2</sub> στο Ηνωμένο Βασίλειο. Το CO<sub>2</sub>, που συνδέεται με την παραγωγή του τσιμέντου, εκτιμάται σε 5-7% των συνολικών εκπομπών στον κόσμο. Με δεδομένη την ταχεία οικονομική ανάπτυξη της Κίνας και της Ινδίας, το ποσοστό αυτό αναμένεται να αυξηθεί δραστικά, αν η τεχνολογία για την παραγωγή τσιμέντου παραμείνει αμετάβλητη [22].

Η αναπτυξιακή πορεία της βιομηχανίας κατασκευών, με τέτοιον τρόπο, ώστε να ικανοποιούνται οι επισκευαστικές ανάγκες των τεχνικών έργων, χωρίς όμως να καταστρέφεται το φυσικό περιβάλλον και να διακυβεύεται η ικανοποίηση των αναγκών του μέλλοντος, έφερε στο προσκήνιο την δημιουργία των έξυπνων υλικών.

Μέχρι πρότινος, η επισκευή των ρωγμών σε ένα μεγάλο τεχνικό έργο, ακόμα και σε μικρής κλίμακας κατασκευές, γίνονταν με συμβατικά επισκευαστικά υλικά τα οποία ξεκινούσαν από ρητίνες και συνέχιζαν σε τσιμεντενέσεις. Όλοι οι τρόποι επισκευών συνεπάγονται, τόσο οικονομική επιβάρυνση, όσο και περιβαλλοντική. Οικονομική, από το νέο κόστος που προκύπτει για την προμελέτη και την επισκευή, περιβαλλοντική για τους ρύπους που εκπέμπουν οι βιομηχανίες προκειμένου να παραχθούν οι πρώτες ύλες επισκευής.

Πέραν των όσων αναφέρθηκαν, περί οικονομικής και περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, εισέρχεται και ο παράγοντας του κατά πόσο η επιθεώρηση των κατασκευών γίνεται με ακρίβεια και καθ' όλη την έκταση τους. Στην περίπτωση που δεν γίνει αντιληπτή η αστοχία, τότε αυτή δεν θεραπεύεται και λειτουργεί ως σημείο αδυναμίας της κατασκευής.

Λόγω των παραπάνω, οι νέες μελέτες των τσιμεντοβιομηχανιών, θέλουν υλικά τα οποία να αντιλαμβάνονται την φθορά τους και να την επισκευάζουν από μόνα τους, σαν «ζωντανοί οργανισμοί». Τα αυτο-ιασόμενα τσιμέντα, αποτελούν τμήμα των ευφυών υλικών τα οποία μόλις «αντιληφθούν» τη ρωγμή, δια μέσου της υγρασίας, ενεργοποιούν τους μηχανισμούς επούλωσης προς την προστασία του οπλισμού και του συνολικού έργου. Η χρησιμότητα τους είναι εμφανής σε σήραγγες, φράγματα, ακόμα και σε θεμέλια κατασκευών, διότι σε αυτές τις περιοχές η υγρασία βρίσκεται σε μεγάλα ποσοστά.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας, είναι η παρασκευή στο εργαστήριο τσιμεντοκοκκιομαμάτων, τα οποία θα φέρουν την ιδιότητα της αυτο-ίασης. Έτσι, παρασκευάζονται επτά (7) διαφορετικές σειρές δειγμάτων, με πρώτες ύλες, τσιμέντο Portland CEM I, δύο τύπους διαφορετικών εμπορικών προσθέτων, άμμου, ινών και υπερρευστοποιητή. Με το πέρας της παρασκευής των δοκιμίων και των 28 ημερών ωρίμανσης, τα δοκίμια αστοχούν τεχνητά, προς την δημιουργία ρωγμών, οι οποίες είναι συμμορφωμένες με τον κατασκευαστικό κώδικα. Τέλος, αυτές μετρώνται με τη χρήση στερεοσκοπίου και εν συνεχεία εμβαπτίζονται σε νερό. Η μέτρηση με στερεοσκόπιο επαναλαμβάνεται σε 3 ηλικίες (10, 20 και 40 ημέρες). Με το πέρας των 40 ημερών, τα αποτελέσματα της στερεοσκοπικής επιθεώρησης επαληθεύονται και ερμηνεύονται με τη χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης. Από τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, αναμένεται να προκύψει το βέλτιστο μίγμα τσιμέντου και εμπορικών προσθέτων, καθώς και να κατανοήσουμε το φαινόμενο της αυτο-ίασης.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## Πειραματικό μέρος

### 5.1 Πρώτες ύλες

Για τη διερεύνηση και την εμφάνιση επί του θέματος της αυτο-ίασης, παρασκευάστηκε μία σειρά δοκιμίων με διαφορετικά ποσοστά ως προς την ανάμιξη των πρώτων υλών. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν για την προσέγγιση του φαινομένου ήταν, τσιμέντο τύπου CEM I 52.5 R, δύο τσιμεντοειδή εμπορικά πρόσμικτα, «DENKA CSA#20» και «Penetron® Admix», ασβεστολιθική άμμος, ρευστοποιητής Domyloco Chemium 172 και ίνες Harbourite 324 (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1 Πρώτες ύλες για την Παρασκευή των δοκιμίων (πραγματικές ποσότητες για δοκίμιο M6)

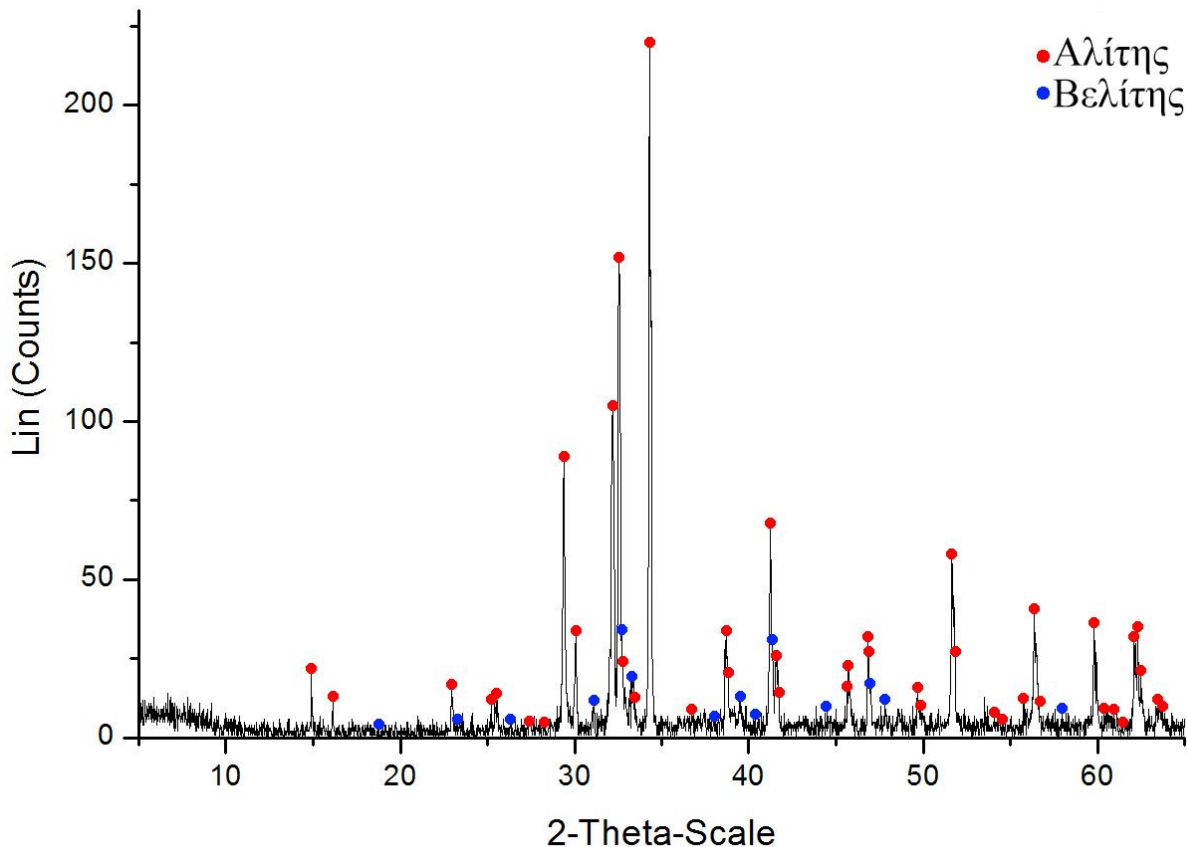
Για την κατανόηση του φαινομένου της αυτο-ίασης, στις ακόλουθες υποενότητες, γίνεται ανάλυση των πρώτων υλών, τόσο βιβλιογραφική (εμπεριεχομένων και των ιδιοτήτων που δίνουν οι προμηθευτές των πρώτων υλών) όσο και με τη χρήση της περιθλασιμετρίας ακτίνων X. Η συσκευή XRD που χρησιμοποιήθηκε, είναι η SIEMENS D-5000 με ακτινοβολία Cu K $\alpha$ 1 και μήκος κύματος  $\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$ . Η χρήση της μεθόδου αυτής πραγματοποιήθηκε στο τσιμέντο CEM I 52.5 R, στα τσιμεντοειδή πρόσμικτα και στην άμμο.

#### 5.1.1 Τσιμέντο CEM I 52.5 R (OPC)

Το τσιμέντο CEM I (τσιμέντο Πόρτλαντ) αποτελεί ένα εκ των πέντε τύπων που προδιαγράφονται στο Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1. Μαζί με το CEM II (σύνθετα τσιμέντα Πόρτλαντ) είναι τα μοναδικά τσιμέντα που φέρουν το χαρακτηριστικό του Πόρτλαντ, καθώς είναι οι μόνοι τύποι, που το κλίνκερ (K), είναι το βασικό τους συστατικό και συμμετέχει τουλάχιστον κατά 65%. Συγκεκριμένα για το CEM I, το κλίνκερ συμμετέχει σε ένα εύρος από 95 μέχρι και 100%. Στις περιπτώσεις εκείνες που δεν λαμβάνει το 100%, το υπολειπόμενο ποσοστό καλύπτεται με δευτερεύοντα συστατικά (MAC). Ακολούθως, η τιμή 52.5 R αφορά

τις μηχανικές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί το συγκεκριμένο τσιμέντο και μεταφράζεται ως προς τις κανονικές αντοχές του τσιμέντου (standard strength) που είναι οι θλιπτικές (προσδιορίζονται σύμφωνα με το EN 196-1 στις 28 ημέρες) και μετρούνται σε MPa ή σε  $N/mm^2$ . Τέλος το γράμμα R, συμβολίζει τις μεγάλες πρώιμες αντοχές ή διαφορετικά, εκφράζει τα τσιμέντα ταχείας ανάπτυξης αντοχών [1].

Το διάγραμμα περιθλασιμετρίας ακτίνων X που ακολουθεί (Σχήμα 5.2), παρουσιάζει τις κύριες φάσεις του κλίνκερ που εμπεριέχονται στο συγκεκριμένο τσιμέντο. Αυτές είναι ο αλίτης  $C_3S$  ( $3CaO \cdot SiO_4$ ) και ο βελίτης  $C_2S$  ( $2CaO \cdot SiO_4$ ).



Σχήμα 5.2 Ακτινοδιάγραμμα XRD του CEM I 52.5 R

### 5.1.2 DENKA CSA#20

Το DENKA CSA#20, είναι ένα ασβεστοσουλφοαργιλικό (CSA) τσιμέντο το οποίο παράγεται από ένα ειδικό κλίνκερ. Το συγκεκριμένο τσιμεντοειδές, αναπτύχθηκε για να μειώνει και να αντισταθμίζει την υδραυλική συρρίκνωση του τσιμέντου. Στην Ιαπωνία, η τεχνολογία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για πάνω από 40 χρόνια για το χημικώς προεντεταμένο σκυρόδεμα.

Τα ορυκτολογικά μέρη του DENKA CSA#20, αντιδρούν με το νερό και παράγουν λεπτές βελόνες ετρινγκίτη. Ταυτόχρονα με τη φάση της σκλήρυνσης του τσιμέντου, οι βελόνες θα αναπτυχθούν μαζί με μεγαλύτερους κρυστάλλους, δίνοντας μία αύξηση του όγκου (ανάπτυξη / επέκταση / διαστολή). Η δομή αυτή προκαλεί μία προένταση (διόγκωση) η οποία

αντισταθμίζει τη συρρίκνωση λόγω ξήρανσης του κονιάματος, με αποτέλεσμα μια μειωμένη συστολή.

Κατ' αυτά, τα πλεονεκτήματα που προστίθενται στο υλικό είναι:

- Μειωμένη συρρίκνωση
- Αυξημένη στεγανότητα στο νερό
- Αυξημένη μηχανική αντοχή
- Χημική προένταση (διόγκωση)
- Καλή πρόσφυση σε υποστρώματα και οπλισμένο σκυρόδεμα
- Καλή εργασιμότητα

Καθώς και οι εφαρμογές για τις οποίες προορίζεται είναι σε:

- Επισκευαστικά κονιάματα
- Κονιάματα υποστρώματος
- Κονιάματα επιχρισμάτων επιφανείας σκυροδέματος
- Δάπεδα
- Υψηλής πυκνότητας κονιάματα και σκυρόδεμα

Τα τυπικά επίπεδα προσθήκης είναι 8 - 15 % επί του βάρους του τσιμέντου, ενώ η διόγκωση και η μειωμένη συρρίκνωση είναι ανάλογη με το επίπεδο προσθήκης. Συνιστάται ιδιαίτερα να πραγματοποιούνται εργαστηριακές δοκιμές ώστε να καθοριστεί το σωστό επίπεδο προσθήκης του DENKA CSA#20. Πάρα πολύ υψηλό επίπεδο προσθήκης DENKA CSA#20 έχει ως αποτέλεσμα εξαιρετικά ισχυρή διόγκωση, με μειωμένη αντοχή, υψηλό πορώδες και μειωμένη αντίσταση στον παγετό [23].

Εν συνεχεία δίνονται, η χημική ανάλυση (**Πίνακας 5.1**), η ορυκτολογική ανάλυση (**Πίνακας 5.2**) και οι φυσικές ιδιότητες (**Πίνακας 5.3**) του DENKA CSA#20. Τέλος, παρουσιάζεται το διάγραμμα περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ, από το οποίο προκύπτουν ως κρυσταλλικές φάσεις της πρώτης ύλης ο ανυδρίτης ( $\text{CaSO}_4$ ), το οξείδιο του ασβεστίου ( $\text{CaO}$ ) και ο γελιμίτης ( $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{12}\text{SO}_4$ ) (**Σχήμα 5.3**).

**Πίνακας 5.1 Χημική ανάλυση DENKA CSA#20 (w/w %) [23]**

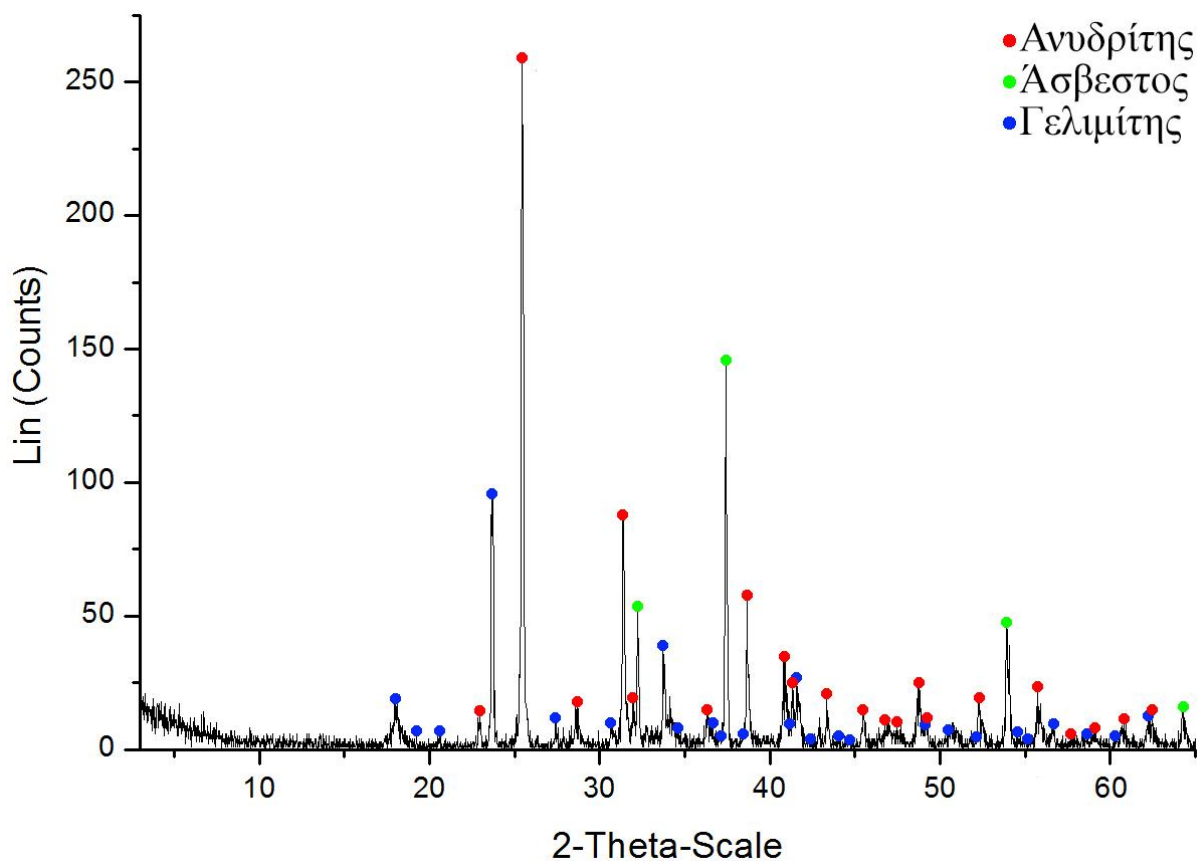
Χημική ανάλυση	(w/w %)
$\text{SiO}_2$	1 - 2 %
$\text{Al}_2\text{O}_3$	12 - 15 %
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.3 - 0.8 %
$\text{CaO}$	50 - 54 %
$\text{MgO}$	0.4 - 2.3 %
$\text{Na}_2\text{O}$ - equi.	< 0.75 %
$\text{SO}_3$	27 - 31 %
Cl	< 0.05 %
LOI	< 3 %

Πίνακας 5.2 Ορυκτολογική ανάλυση DENKA CSA#20 [23]

Ορυκτολογική Φάση	Διακύμανση (%)
Οξείδιο του ασβεστίου (CaO)	15 - 25
Θεικό ασβέστιο (CaSO <sub>4</sub> )	55 - 65
Θεικό αργιλικό ασβέστιο (Ca <sub>4</sub> Al <sub>6</sub> O <sub>12</sub> SO <sub>4</sub> )	15 - 25

Πίνακας 5.3 Φυσικές ιδιότητες DENKA CSA#20 [23]

Φυσική ιδιότητα	Χαρακτηρισμός
Εμφάνιση	Υπόλευκο, εύκολος χειρισμός, ρέουσα σκόνη
Ειδική πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	2.86
Ειδική επιφάνεια (cm <sup>2</sup> /g)	3700
Φαινόμενη πυκνότητα χαλαρή (g/cm <sup>3</sup> )	0.8 - 0.9
με συμπύκνωση (g/cm <sup>3</sup> )	1.5



Σχήμα 5.3 Ακτινοδιάγραμμα XRD του DENKA CSA#20



### 5.1.3 Penetron® Admix

Το Penetron® Admix, αποτελεί ένα πρόσμικτο στεγανωτικό υλικό σκυροδέματος χημικής δράσης και ανάπτυξης κρυστάλλων στο εσωτερικό του. Η συγκεκριμένη πρώτη ύλη, προστίθεται στο σκυρόδεμα τη στιγμή της παρασκευής του. Περιέχει τσιμέντο Portland, πυριτική άμμο και διάφορα ενεργά χημικά. Τα τελευταία αρχίζουν να αντιδρούν με την παρουσία του νερού στο φρέσκο σκυρόδεμα και τα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου, παράγοντας ένα μη διαλυτό σχηματισμό κρυστάλλων εσωτερικά των πόρων και των τριχοειδών του σκυροδέματος. Κατ' αυτά, το σκυρόδεμα γίνεται στεγανό ενάντια στην διείσδυση του νερού και άλλων υγρών από οποιαδήποτε κατεύθυνση, ενώ ταυτόχρονα προστατεύεται από τυχόν υποβάθμιση εξαιτίας των σκληρών περιβαλλοντικών συνθηκών.

Οι προτεινόμενες εφαρμογές που δίνονται από τον παρασκευαστή είναι:

- Δεξαμενές
- Εγκαταστάσεις επεξεργασίας υδατικών αποβλήτων
- Θεμέλια
- Σήραγγες και συστήματα υπόγειων διαβάσεων
- Υπόγειοι θόλοι
- Κατασκευές χώρων στάθμευσης
- Κολυμβητικές πισίνες
- Προκατασκευασμένα στοιχεία και εφαρμογές εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Επίσης, τα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν το συγκεκριμένο τσιμεντοειδές είναι:

- Η αντοχή σε υψηλές υδροστατικές πιέσεις που ασκούνται είτε από την θετική είτε από την αρνητική επιφάνεια του σκυροδέματος
- Γίνεται αναπόσπαστο τμήμα του σκυροδέματος
- Παρουσιάζει χημική αντοχή σε δραστικά χημικά
- Έχει ικανότητα σφράγισης στατικών τριχοειδών ρωγμών έως 0.4 mm
- Επιτρέπει στο σκυρόδεμα να αναπνέει
- Μη τοξικό (NSF 61 πιστοποίηση για εφαρμογές πόσιμου ύδατος)
- Λιγότερο δαπανηρό από τις παραδοσιακές μεθόδους
- Παρέχει μόνιμη στεγανωτική δράση
- Προστίθεται στο σκυρόδεμα την ώρα της παραγωγής
- Μειώνει το χρόνο κατασκευής

Η επιτρεπτή δΟΣΟΛΟΓΙΑ ανέρχεται στα 0.8-1% στο βάρος του τσιμέντου. Σημειώνεται, ότι υπό ορισμένες συνθήκες, η δΟΣΟΛΟΓΙΑ μπορεί να αυξηθεί μέχρι 2-3%, ανάλογα με την ποσότητα και τον τύπο του συνόλου των τσιμεντοειδών συστατικών και των αδρανών [24].

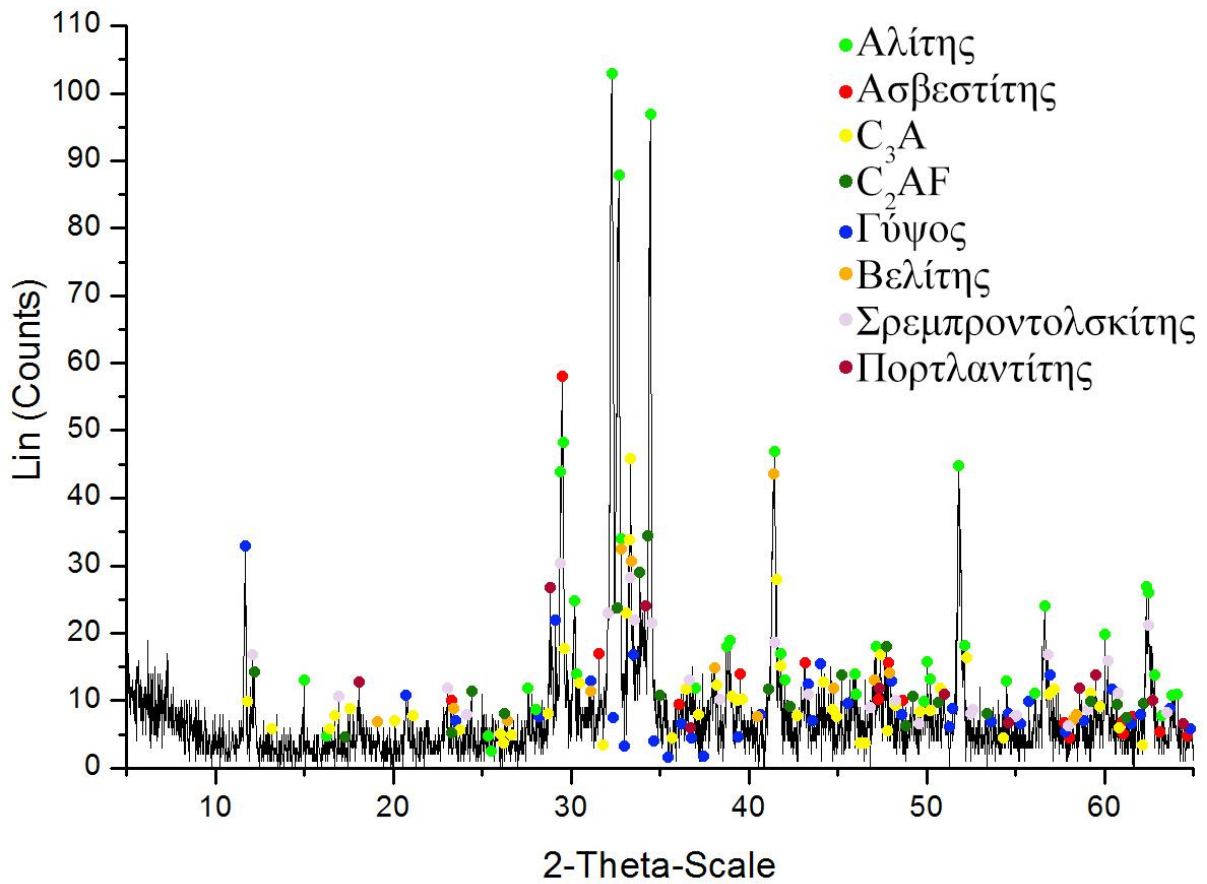
Τέλος, ακολουθούν οι φυσικοχημικές ιδιότητες του Penetron (**Πίνακας 5.4**), όπως και η σύσταση του (**Πίνακας 5.5**) [26]. Επίσης, δίνεται το ακτινοδιάγραμμα XRD (**Σχήμα 5.4**), στο οποίο παρουσιάζονται οι ορυκτολογικές φάσεις, κατά φθίνουσα σειρά έντασης: αλίτης ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_4$ ), ασβεστίτης ( $\text{CaCO}_3$ ),  $\text{C}_3\text{A}$  ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ),  $\text{C}_2\text{AF}$  ( $\text{Ca}_2\text{Al}_{1.38}\text{Fe}_{0.62}\text{O}_5$ ), γύψος ( $\text{CaSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ ), βελίτης ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_4$ ), σρεμπροντολσκίτης ( $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ ) και πορτλαντίτης ( $\text{CaOH}$ ).

Πίνακας 5.4 Φυσικοχημικές ιδιότητες Penetron® Admix [25]

Φυσικοχημική ιδιότητα	Χαρακτηρισμός
Όψη	Γκρι σκόνη
Οσμή	Άοσμο
Φυσική κατάσταση	Στερεό (σκόνη)
pH	10 - 13 (όταν είναι σε διάλυμα)
Σημείο τήξης	> 1100 °C
Π.Ο.Ε. (VOC)	Καμία

Πίνακας 5.5 Σύσταση Penetron® Admix [25]

Σύσταση	w/w %
Τσιμέντο Πόρτλαντ	40 - 70
Μέταλλα αλκαλικών γαιών	10 - 30

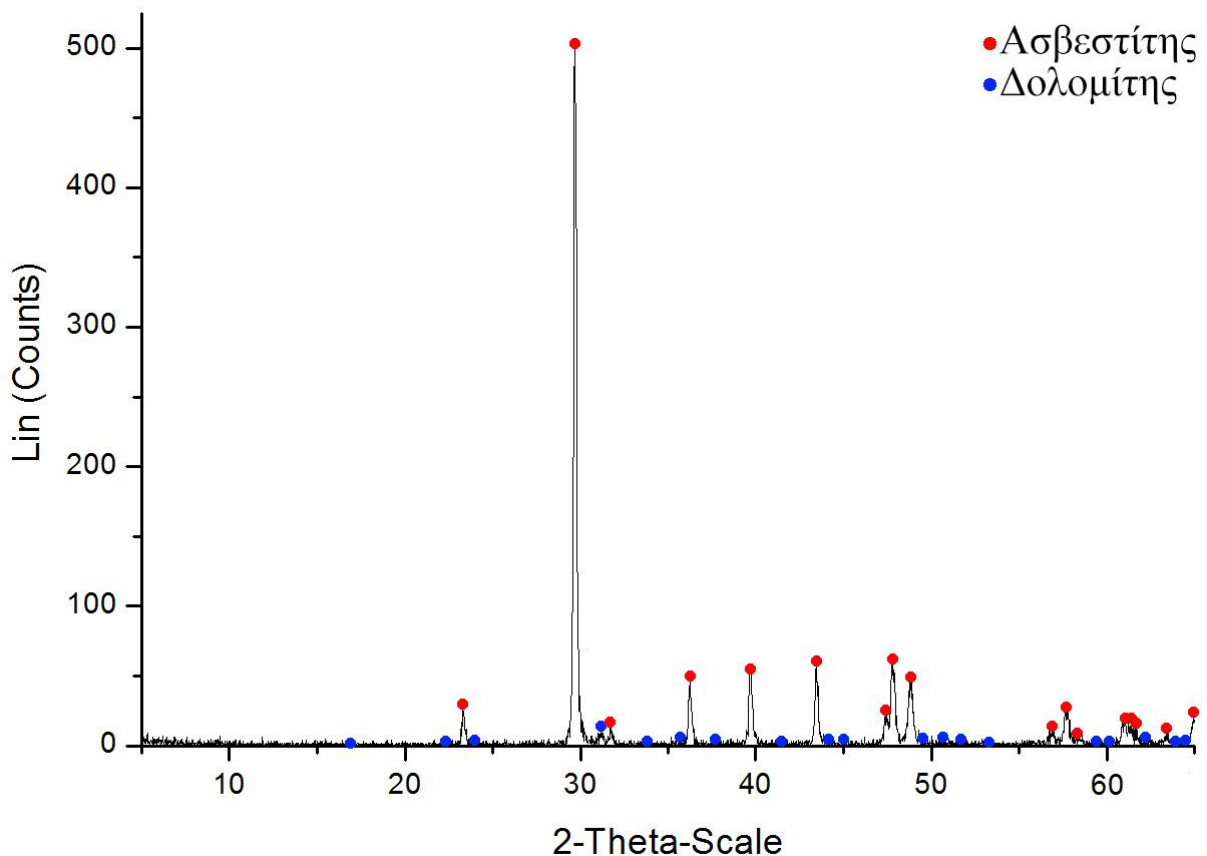


Σχήμα 5.4 Ακτινοδιάγραμμα XRD του Penetron® Admix

#### 5.1.4 Άμμος

Οι συγκολλητικές ύλες (τσιμέντο), χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντοτε μαζί με άμμο ως κονιάματα και σπανιότατα μόνες τους. Η καλύτερη άμμος προς παρασκευή κονιάματος είναι η ανάμικτου κόκκου και προερχόμενη από πετρώματα υγιή και σκληρά, απαλλαγμένα από αργλικές και οργανικές ουσίες [26]. Τέτοια πετρώματα απαντούν σε ανθρακικούς σχηματισμούς, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων είναι ασβεστίτης, ενώ μαγνησιούχες ανθρακικές ενώσεις, όπως ο δολομίτης, είναι ανεκτές εντός ορισμένων πλαισίων. Η άμμος η οποία χρησιμοποιείται ως αδρανές στα τσιμεντοκονιάματα δεν πρέπει να περιέχει προσμίξεις ώστε να αποφεύγονται: μειώσεις στην αντοχή, επιβλαβείς χημικές αντιδράσεις με την εκάστοτε συνδετική ύλη και για να μην επηρεάζονται δυσμενώς άλλες ιδιότητες των κονιαμάτων.

Στη συνέχεια, ακολουθεί το διάγραμμα περιθλασιμετρίας ακτίνων X (XRD) (Σχήμα 5.5), από το οποίο παρατηρείται, ότι η άμμος που χρησιμοποιήθηκε είναι σχεδόν εξ' ολοκλήρου ασβεστολιθική (ασβεστίτης  $\text{CaCO}_3$ ) ενώ φέρει ένα μικρό ποσοστό δολομίτη ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) το οποίο όμως δεν επηρεάζει τις μηχανικές και χημικές ιδιότητες των κονιαμάτων.



Σχήμα 5.5 Ακτινοδιάγραμμα XRD της άμμου

### 5.1.5 Υπερρευστοποιητής Domylo Chemium 172 (SP)

Το Chemium 172, είναι ένα υδατικό διάλυμα τροποποιημένων πολυμερών για χρήση πολύ μεγάλης απόδοσης, τόσο σε ρευστότητα όσο και σε διάρκεια της ρευστότητας. Πληροί τις προδιαγραφές EN 934-2 π. 3.1.-3.2., ASTM C 494 A & F (ΣΚ 308) και C 1 017 (ΣΚ 316).

Χρησιμοποιείται ιδανικά ως πρόσθετο για σκυρόδεμα μεγάλων απαιτήσεων, όπως παραδείγματος χάριν πολύ χαμηλός λόγος νερού / τσιμέντο (W/C). Έχοντας αυτήν την δυνατότητα χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία προκατασκευών και προεντεταμένου σκυροδέματος επιτυγχάνοντας πολύ υψηλές αρχικές και τελικές αντοχές και υψηλές πυκνότητες σκυροδέματος. Στα συνήθη σκυροδέματα προσδίδει ρευστότητα πολύ μεγάλης διάρκειας.

Τα πλεονεκτήματα του είναι τα παρακάτω:

- Ρευστό αντλητό σκυρόδεμα, με πολύ χαμηλό λόγο νερού / τσιμέντο (W/C)
- Αυξάνει τη στεγανότητα, λόγω υψηλής μείωσης του νερού
- Ελαττώνει και αφαιρεί την απαραίτητη χρήση θέρμανσης στις προκατασκευές
- Δεν απαιτεί δόνηση του σκυροδέματος
- Βελτιώνει τη δομή και την εμφάνιση του σκυροδέματος
- Αυξάνει πολύ τις αρχικές (18 - 24 h) και τις τελικές αντοχές
- Αυξάνει την πρόσφυση του σκυροδέματος στον οπλισμό
- Μειώνει τον ερπυσμό και τις ρηγματώσεις
- Δεν περιέχει χλώριο

Τέλος, για συνήθεις θερμοκρασίες και για τα ελληνικά τσιμέντα συνίσταται δοσολογία 0.5 - 0.9 kg για 100 kg τσιμέντου. Η δόση μπορεί να αυξηθεί ως και 4 kg στα 100 kg τσιμέντου ή και παραπάνω ανάλογα με τις ανάγκες και πάντα κατόπιν δοκιμών. Η δοσολογία εξαρτάται από την θερμοκρασία, την ποσότητα και την ποιότητα τσιμέντου και αδρανών και από τον λόγο νερού / τσιμέντου [27].

### 5.1.6 Ίνες Harbourite 324

Οι ίνες Harbourite, για μικρο-οπλισμένο σύστημα σκυροδέματος, αποτελούν 100 % καθαρές ίνες ομοιοπολυμερούς προπυλενίου που δεν περιέχουν επανепεξεργάσιμα υλικά ολεφινών και έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σε μονάδες βάση του ISO 9002 για τη χρήση σε οπλισμένο σκυρόδεμα κατ' ελάχιστο όγκο 0.1 %. Οι παρούσες ίνες είναι συμμορφωμένες και εναρμονισμένες με τον εθνικό κατασκευαστικό κώδικα και με τα ASTM C-1116 τύπος III 4.1.3., ASTM C-1116 Level Performance I.

Η λειτουργία των ινών Harbourite 324 είναι η εξής:

- Εναλλακτικό κατασκευαστικό σύστημα στην κλασσική ενίσχυση που χρησιμοποιείται συνήθως στο δευτερογενή τρόπο (έλεγχος ρωγμών) οπλισμένου σκυροδέματος
- Εμποδίζει και ελέγχει το σχηματισμό των εγγενών ρωγμών στο σκυρόδεμα
- Ενισχύει ενάντια των δυνάμεων κρούσης
- Ενισχύει ενάντια της επίδρασης των δυνάμεων θραύσης

- Ενισχύει ενάντια στην απώλεια υλικού από δυνάμεις απόξεσης
- Ενισχύει ενάντια από την μετανάστευση του νερού
- Δίνει αντοχή στο σκληρυμένο σκυρόδεμα
- Μειώνει την πλαστική συρρίκνωση και ελέγχει το ράγισμα
- Παρέχει παραμένουσα αντοχή

Επιπλέον, τα πλεονεκτήματα που δίνει είναι τα παρακάτω:

- Αποδεκτό από τους εθνικούς κώδικες, ως εναλλακτική μέθοδο για τη δευτεροβάθμια ενίσχυση
- Μη μαγνητικό
- Δεν οξειδώνεται
- Φέρει αλκαλική αντοχή
- Δεν απαιτεί ελάχιστο ποσό κάλυψης σκυροδέματος
- Τοποθετείται πάντα σύμφωνα με τους κώδικες
- Ασφαλές και εύκολο στη χρήση
- Μειώνει το χρόνο κατασκευής

Πίνακας 5.6 Φυσικοχημικές ιδιότητες ινών Harbourite 324 [28]

Φυσικοχημική ιδιότητα	Χαρακτηρισμός
Απορρόφηση	Μηδενική
Ειδικό βάρος	0.91
Μήκος ινών (Inch)	0.25 - 2
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Χαμηλή
Αντίσταση σε οξέα και άλατα	Υψηλή
Μέτρο του Young (kN / mm <sup>2</sup> )	3.5
Σημείο τήξης (°C)	162.22
Σημείο ανάφλεξης (°C)	593.33
Θερμική αγωγιμότητα	Χαμηλή
Αντίσταση στα αλκάλια	Αντιστέκεται

Τέλος, η διαδικασία ανάμιξης δεν έχει κάποια ιδιαιτερότητα, καθώς αυτές μπορούν να προστεθούν στον αναμικτήρα πριν, κατά την διάρκεια ή μετά την προσθήκη των άλλων υλικών του σκυροδέματος. Ο χρόνος και η ταχύτητα μίξης, προσδιορίζονται βάση των προδιαγραφών του ASTM C-94. Επιπροσθέτως, οι ίνες Harbourite έχουν συμβατότητα με όλα τα πρόσθετα σκυροδέματος ενώ αυξάνουν την απόδοση των χημικών ουσιών χωρίς να απαιτούν προσμίξεις για να εμφανίσουν τις ιδιότητες τους [28].

## 5.2 Παρασκευή δοκιμίων και τεχνητή αστοχία

Επιλέχθηκαν επτά (7) διαφορετικές συνθέσεις, οι οποίες πριν οριστικοποιηθούν, δοκιμάστηκαν ως προς την εργασιμότητα τους με αρχικά δοκιμαστικά αναμίγματα. Τα δοκίμια αυτά έφεραν, ποικιλία ως προς τον λόγο νερού προς τσιμεντοειδή υλικά και τον υπερρευστο-

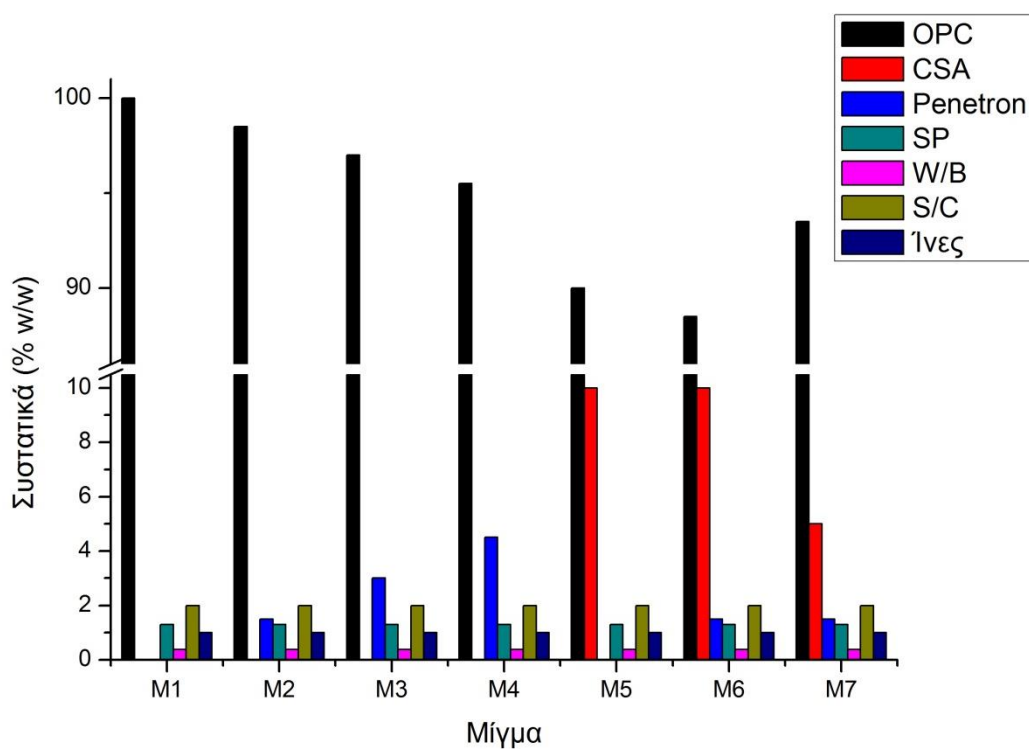
ποιητή, ούτως ώστε να προσδιορισθούν οι κατάλληλες ποσότητες τους και να επέλθει η βέλτιστη εργασιμότητα. Ακολούθως, παρασκευάστηκαν έξι (6) σειρές δειγμάτων και ένα δοκίμιο αναφοράς (Πίνακας 5.7 & Σχήμα 5.6).

Ως προς τις υπόλοιπες έξι (6) πειραματικές συνθέσεις, αυτές αποτελούνται από δυαδικά και τριαδικά αναμίγματα των τσιμεντοειδών υλικών, καθώς ο υπερρευστοποιητής (SP), οι λόγοι νερού προς τσιμεντοειδή υλικά (W/B) και άμμου προς τσιμέντο (S/C) όπως και οι ίνες διατηρήθηκαν σε όλα τα αναμίγματα σε σταθερά ποσοστά.

Πίνακας 5.7 Συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων (% w/w)

Μίγμα	Τσιμεντοειδή			SP	W/B	S/C	Ίνες
	OPC	CSA	Penetron				
M1	100.0	-	-				
M2	98.5	-	1.5				
M3	97.0	-	3.0				
M4	95.5	-	4.5	1.3*	0.38	2	1*
M5	90.0	10	-				
M6	88.5	10	1.5				
M7	93.5	5	1.5				

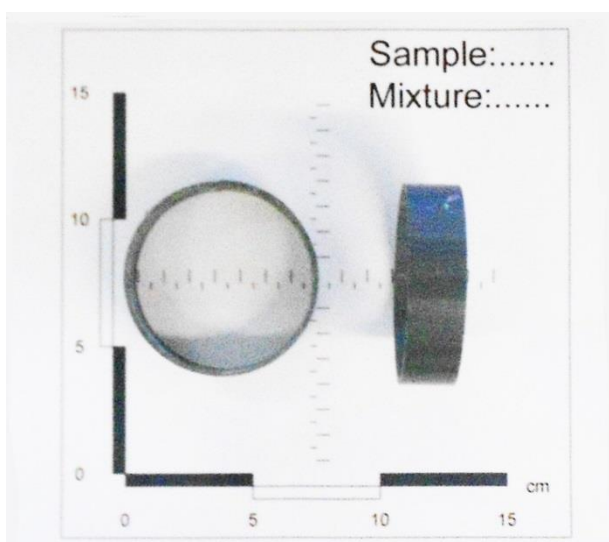
\*SP και ίνες υπολογίζονται σε επί τοις εκατό των τσιμεντοειδών



Σχήμα 5.6 Συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων (% w/w)



Σχήμα 5.7 Εργαστηριακός αναμικτήρας



Σχήμα 5.8 Κυλινδρικές μήτρες 75Φ×20 mm

προηγήθηκε ομογενοποίηση των τσιμεντοειδών (CEM I 52.5 R, DENKA CSA#20, Penetron® Admix) με την άμμο και εν συνεχεία των ινών. Με το πέρας της ανάδευσης έγινε χύτευση των δοκιμίων σε κυλινδρικές μήτρες διαστάσεων 75Φ×20 mm (Σχήμα 5.8) οι οποίες δονήθηκαν για 1 min. Τα δοκίμια ακολούθως αφήθηκαν για 24 h σε συνθήκες εργαστηρίου (T: 25 ± 5 °C & H: 95 ± 5%). Μετά από μία ημέρα, αφαιρέθηκαν τα καλούπια και τα δείγματα εμβαπτίστηκαν για μία εβδομάδα στο νερό, σε ξεχωριστά δοχεία αναλόγως του μίγματος. Εν συνεχεία, συντηρήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου μέχρι να συμπληρωθούν οι 28 ημέρες.

Οι δυαδικές συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν τέσσερις, τρεις με διαφορετικά ποσοστά Penetron® Admix, το οποίο κυμάνθηκε από 1.5% (M2) και με σταθερό βήμα αύξησης 1.5% δόθηκαν και τα άλλα δύο μίγματα των 3% (M3) (ανώτερο όριο ιδικών περιπτώσεων) και 4.5% (M4) (κατά 1.5% πάνω από το επιτρεπτό όριο των ειδικών περιπτώσεων), ενώ το τέταρτο δυαδικό μίγμα (M5) αποτελείτο από προσθήκη 10% DENKA CSA#20 (εντός των ορίων που δίνει ο παραγωγός). Τα τριαδικά αναμίγματα ανέρχονται σε δύο και σχεδιάστηκαν με γνώμονα τη διατήρηση, σε σταθερά ποσοστά, της τάξης του 1.5%, του Penetron® Admix και διακύμανση του ποσοστού του DENKA CSA#20 στις ποσοστιαίες τιμές των 5% (M7) (3% κάτω από το κατώτερο όριο προσθήκης) και 10% (M6) (5% κάτω από το ανώτερο όριο). Τέλος, σημειώνεται, ότι για κάθε μίγμα παρασκευάστηκαν πέντε δοκίμια.

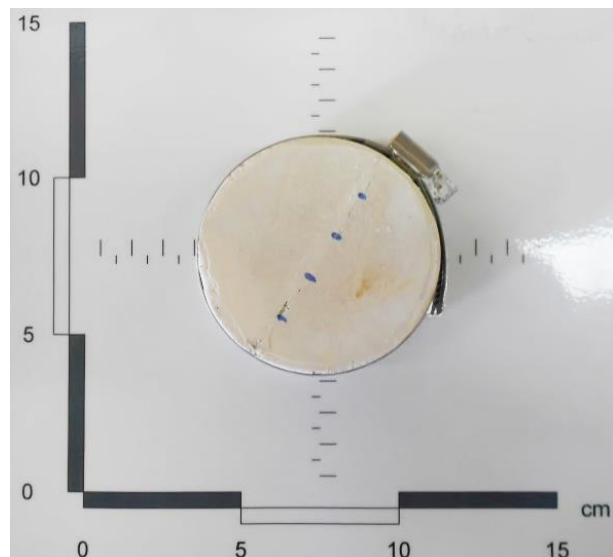
Όλα τα αναμίγματα, τόσο τα δοκιμαστικά όσο και τα πειραματικά, έγιναν με τη χρήση εργαστηριακού αναμικτήρα (20063 Cernusco CONTROLS) (Σχήμα 5.7) ακολουθώντας το πρότυπο EN 196-1 (ανάδευση σε χαμηλή ταχύτητα για 60 sec, εν συνεχεία σε υψηλή ταχύτητα για 30 sec, στάση για 1 min και 30 sec και εκ νέου σε υψηλή ταχύτητα για 60 sec), με λόγους νερού προς τσιμεντοειδή υλικά (W/B) 0.38 και άμμου προς τσιμέντο (S/C) 2. Πριν την ανάδευση τους,



Ακολούθως, τα δείγματα αστόχησαν τεχνητά με τη χρήση της δοκιμής σε διάρρηξη (Σχήμα 5.9). Οι συνθήκες στις οποίες συμμορφώθηκε η εργαλειομηχανή ήταν 0.50 kN/sec, ως προς το ρυθμό φόρτισης, ενώ η απόδοση της δυναμικότητας ρυθμίστηκε στο 30% της μέγιστης φόρτισης, η οποία ανέρχεται σε 600 kN. Οι ρωγμές που προέκυψαν ήταν διαμπερείς και αντιδιαμετρικές, ενώ το εύρος του πλάτους των ρωγμών κυμάνθηκε από 20 έως 160  $\mu\text{m}$ . Εν συνεχεία, τα δοκίμια δεθηκαν με μεταλλικούς σφικτήρες, προς αποφυγή της διεύρυνσης των ρωγμών κατά την ίαση από πιθανές διογκώσεις, ενώ κατά μήκος της ρωγμής αποτυπώθηκαν σημεία σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις, προς διευκόλυνση των μετρήσεων οπτικής επιθεώρησης (Σχήμα 5.10). Έπειτα, τα δοκίμια εκ νέου εμβαπτίστηκαν σε νερό, όπως και στη διαδικασία ωρίμανσης, σε διαφορετικά δοχεία ανά ξεχωριστή σύνθεση και αποτέθηκαν πάνω σε γυάλινες ράβδους, ώστε η διαβροχή να γίνεται ομοιόμορφα. Σε τακτά χρονικά διαστήματα, τρεις ηλικίες των 10, 20 και 40 ημερών, από το σύνολο των δοκιμίων του εκάστοτε μίγματος επιλεγόταν ένα τυχαίως για να παρακολουθείται οπτικά, ενώ τα υπόλοιπα δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν ως αντιδείγματα. Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε αφότου εφαρμόστηκαν οι βραχίονες μετά τη διάρρηξη.



Σχήμα 5.9 Δοκίμιο σε διαδικασία τεχνικής θλίψης με δοκιμή σε διάρρηξη



Σχήμα 5.10 Δοκίμιο μετά από την διάρρηξη με χαραγμένα τα σημεία οπτικής επιθεώρησης (κατά την διάρκεια ίασης)

### 5.3 Διαδικασία οπτικής επιθεώρησης της αυτο-ίασης

Προκειμένου να διασαφηνιστεί το φαινόμενο της αυτο-ίασης, τα δοκίμια εξετάστηκαν με την βοήθεια στερεοσκοπίου και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM).



Κατά το πρώτο στάδιο, τα δοκίμια επιθεωρούνται με τη χρήση στερεοσκοπίου (Leica MZ 8) σε μεγέθυνση  $\times 50$ , το οποίο ήταν συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή και έφερε πρόγραμμα ανάλυσης εικόνας (ProgRes Capture Pro 2.1) (Σχήμα 5.11) για την αποδοτικότερη επιθεώρηση και επεξεργασία των προς οπτικής ανάλυσης σημείων (Σχήμα 5.10). Τα δοκίμια του εκάστοτε μίγματος, εξετάστηκαν σε τέσσερις διαφορετικές ηλικίες, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 5.2, τόσο στην άνω όσο και στην κάτω επιφάνεια. Μεταξύ των μετρήσεων της κάθε ηλικίας, πραγματοποιήθηκε σύγκριση τόσο στα μίγματα, προς διασαφήνιση της προόδου αυτο-ίασης, όσο και συγκριτικά στα διάφορα μίγματα, ούτως ώστε να παρατηρηθεί η βέλτιστη σύνθεση.



Σχήμα 5.11 Στερεοσκόπιο Leica MZ 8 και πρόγραμμα ανάλυσης εικόνας ProgRes Capture Pro 2.1

Προκειμένου να τεκμηριωθούν ισχυρότερα οι μετρήσεις στο στερεοσκόπιο, πέραν της οπτικής παρατήρησης, κρίθηκε σκόπιμη και η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Βάση αυτής, εισάγονται οι έννοιες του βαθμού ίασης (Grade of Healing - GH), του ποσοστού μείωσης της επιφάνειας της ρωγμής (Area Reduction - AR) και του βήματος μείωσης του εύρους της επιφάνειας της ρωγμής (Relative Area Reduction - RAR). Για τον υπολογισμό του βαθμού ίασης, λαμβάνονται υπόψη μόνο οι περιοχές στις οποίες η μέτρηση έδειξε ολική έκλειψη του εύρους της ρωγμής (δηλαδή πλήρης ίαση), ενώ τα σημεία στα οποία δεν παρατηρήθηκε μηδενικό άνοιγμα αγνοήθηκαν (**εξίσωση 1**). Για το ποσοστό μείωσης της επιφάνειας της ρωγμής, έγινε χρήση του αριθμητικού μέσου όρου της ποσοστιαίας μεταβολής του ανοίγματος, σε διάφορα σημεία της ρωγμής (**εξίσωση 2**). Τέλος, το βήμα μείωσης του εύρους της επιφάνειας της ρωγμής, ορίζεται για διαδοχικές ηλικίες και υπολογίζεται όπως και το AR (ενώ στο AR η μέτρηση γίνεται από την πρώτη ηλικία  $ICW = 0d.$ , για την περίπτωση του RAR το ICW παίρνει την τιμή της ακριβώς προηγούμενης ηλικίας από αυτήν του FCW).

$$GH = \frac{HP}{n} \times 100 \quad (1)$$

$$AR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{ICW - FCW}{ICW} \times 100 \right) \quad (2)$$

Όπου:

- **GH** (Grade of Healing): βαθμός ίασης
- **HP** (Healing Points): σημεία πλήρους ίασης
- **n**: συνολικός αριθμός σημείων μέτρησης
- **AR** (Area Reduction): μείωση επιφάνειας ρωγμής
- **ICW** (Initial Crack Width): αρχικό εύρος ρωγμής
- **FCW** (Final Crack Width): τελικό εύρος ρωγμής.

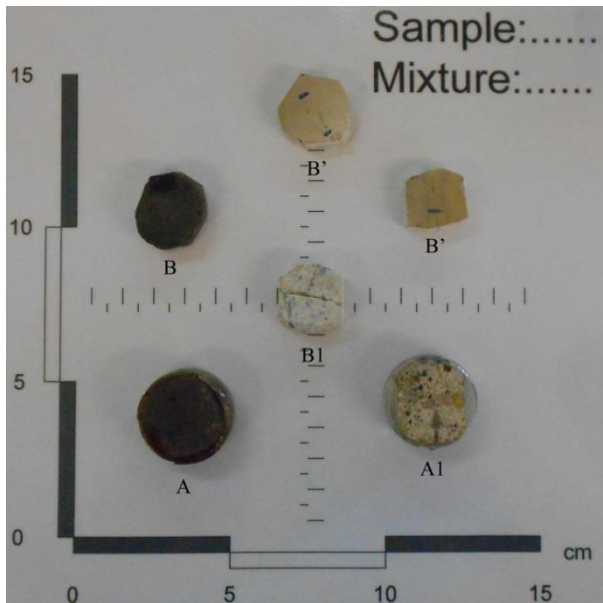
Με το πέρας της αξιολόγησης της οπτικής επιθεώρησης, μέσω στερεοσκοπίου και της στατιστικής επεξεργασίας, ως δεύτερο στάδιο ακολουθεί η οπτική παρατήρηση με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Η έναρξη της οπτικής επιθεώρησης με χρήση SEM (SEM - EDAX / FEI Quanta 200 στα 30 keV με ανιχνευτή LFD) (Σχήμα 5.12) γίνεται με την πάροδο των 40 ημερών και έχει ως σκοπό τόσο να διασαφηνιστεί η τελική πρόοδος ίασης, όσο και να παρατηρηθεί η γένεση δευτερογενών φάσεων στο χώρο της ρωγμής, είτε αυτή, τόσο μακροσκοπικά, όσο και με τη χρήση στερεοσκοπικής επιθεώρησης, έδειξε συμπεριφορά αυτο-ίασης, ολοκληρωτικής ή μη, είτε παρέμεινε με εμφανή τη ρωγμή.



Σχήμα 5.12 SEM / FEI Quanta 200



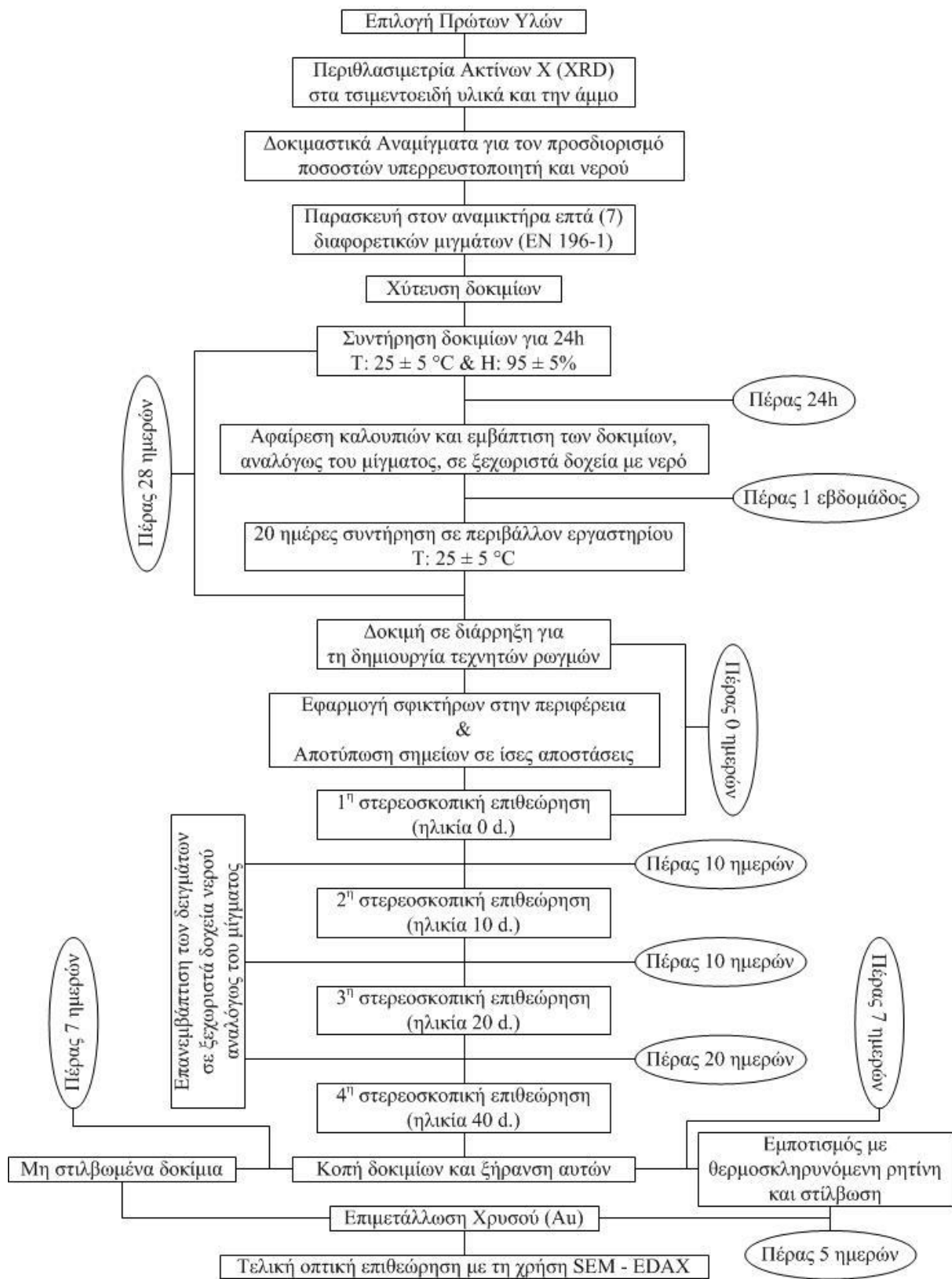
Σχήμα 5.13 Συσκευή επιμετάλλωσης EMITECH SC7620 της Quorum Technologies



Σχήμα 5.14 Επιμεταλλωμένα δοκίμια με χρυσό (Au) ελεύθερης επιφανείας (B, B') και εμποτισμένο σε θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη με στίλβωση (A). Μη επιμεταλλωμένο ελεύθερης επιφανείας (B1) και μη επιμεταλλωμένο εμποτισμένο με ρητίνη (A1).

rum Technologies, **Σχήμα 5.13**) προκειμένου να είναι αγώγιμα. Το μέταλλο επικάλυψης είναι χρυσός (Au) και η εναπόθεση του γίνεται σε πάχος 20 nm (**Σχήμα 5.14**). Μετά από τα παραπάνω στάδια, τα δείγματα είναι έτοιμα προς μελέτη, με τη χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας. Τέλος, δίνεται το διάγραμμα ροής (**Σχήμα 5.15**).

Τα δοκίμια, προτού μελετηθούν με τη χρήση SEM, κόπηκαν με υδροκοπή στο μισό του ύψους τους και ακολούθως συνεχίστηκε η διαδικασία, στα δύο πλέον τεμάχια του ίδιου αναμίγματος, ούτως ώστε να απομονωθεί το σημείο στο οποίο προϋπήρχε η ευρύτερη ρωγμή. Η τελική τους γεωμετρία ήταν περίπου κυλινδρική και είχε διαστάσεις  $25\Phi \times 10$  mm, ενώ στο κέντρο του, κυλινδροειδούς πλέον, νέου δοκιμίου βρισκόταν τμήμα της προϋπάρχουσας ρωγμής. Η επιλογή του τμήματος εκείνου της ρωγμής, το οποίο μελετήθηκε με χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, γίνεται κατόπιν εξέτασης του δοκιμίου στο στερεοσκόπιο. Η ακόλουθη σε σειρά διαδικασία, για την προετοιμασία της εξέτασης στο SEM, είναι η ξήρανση των δειγμάτων. Η τελευταία πραγματοποιείται σε πυριατήριο (MATEST) στους  $70 \pm 5$  °C μέχρι τα δείγματα να παρουσιάζουν διαφορά μάζας μικρότερη του 0.1% σε 24 h. Με το πέρας της διαδικασίας αυτής, χωρίζονται δύο ομάδες δοκιμίων. Κατά την πρώτη ομάδα, τα δείγματα εμποτίζονται σε θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη και στίλβωνται, προκειμένου να ληφθεί καλύτερη μικροανάλυση, ενώ τα δείγματα της δεύτερης ομάδας, παραμένουν με ελεύθερη επιφάνεια, για να λάβουμε καλύτερες εικόνες μορφολογίας. Τα δείγματα τέλος επιμεταλλώνονται (συσκευή επιμετάλλωσης EMITECH SC7620 της Quorum Technologies



Σχήμα 5.15 Διάγραμμα ροής πειραματικής διαδικασίας

### 6.1 Στερεοσκοπική επιθεώρηση των δοκιμίων

Στην παρούσα ενότητα, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της οπτικής επιθεώρησης με τη χρήση στερεοσκοπίου. Ειδικότερα, θα δοθεί η εξέλιξη του εύρους των ρωγμών σε συνάρτηση με το χρόνο συντήρησης, για τις επτά (7) συνθέσεις που μελετήθηκαν. Επιπλέον, θα δοθούν αρχικά αριθμητικοί πίνακες προόδου της αυτο-ίασης, για το κάθε μίγμα, οι οποίοι θα περιέχουν, το βαθμό ίασης (GH), τη μείωση της επιφάνειας της ρωγμής (AR), για το εκάστοτε ανάμικτο σε κάθε ηλικία παρατήρησης, καθώς και το βήμα μείωσης τους εύρους της επιφάνειας της ρωγμής (RAR). Εν συνέχεια θα ακολουθήσουν διαγράμματα ανάλυσης προόδου της αυτο-ίασης, όπως και αντίστοιχες καμπύλες για την ποσοτική απόδοση. Τέλος, θα παρουσιαστούν οι φωτογραφίες της στερεοσκοπικής επιθεώρησης της άνω και κάτω επιφάνειας των κυλινδρικών δοκιμίων σε πίνακες, όπου στο κάτω μέρος της κάθε φωτογραφίας θα αποτυπώνεται το μέσο εύρος των ρωγμών (*αριθμητικός μέσος όρος*) από τα 4 σημεία των μετρήσεων, όπως εμφανίστηκε στο **Σχήμα 5.10**.

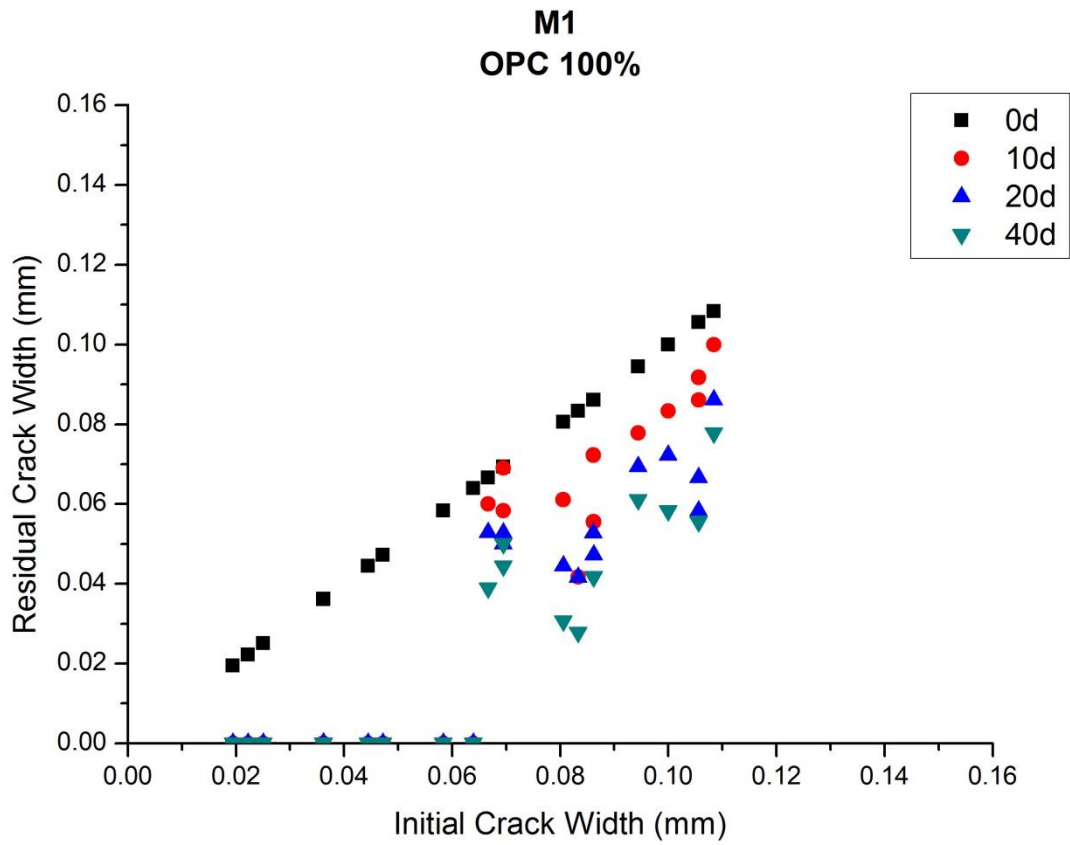
#### 6.1.1 Μίγμα M1 - Δοκίμιο αναφοράς (OPC 100%)

Το μίγμα M1 αποτελείται από 100% τσιμέντο CEM I 52.5 R, λόγο νερού προς τσιμέντο (W/C) 0.38, άμμο προς τσιμέντο (S/C) 2, ενώ ίνες και υπερρευστοποιητής προστέθηκαν σε 1.3 και 1 % επί το ποσοστό των τσιμεντοειδών αντίστοιχα.

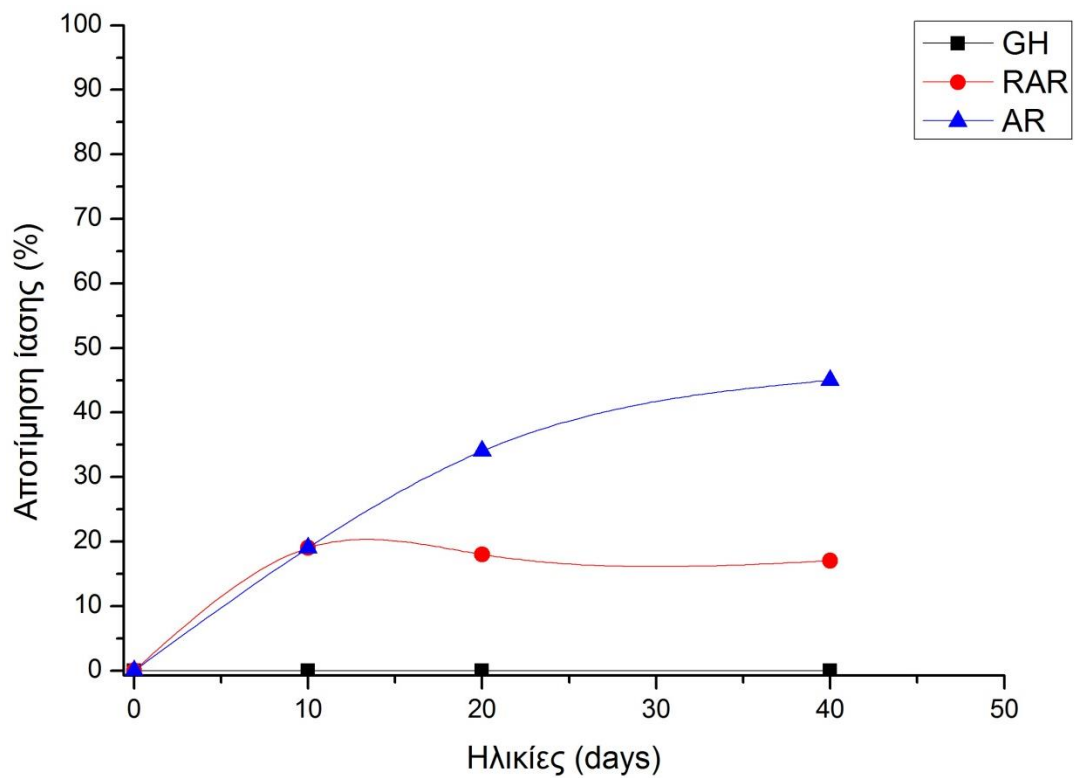
Από το πρώτο κομμάτι του **Πίνακα 6.1**, παρατηρείται ότι στο δοκίμιο αναφοράς παρουσιάζεται αυτο-ίαση. Στην πραγματικότητα, ο μηδενισμός των τιμών της άνω επιφάνειας, σε μικρό χρονικό διάστημα, οφείλεται στην καταβύθιση πορτλαντίτη ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) εντός των ρωγμών αυτής, που εμφανίζεται λόγω ενυδάτωσης. Ο λόγος αυτός, δικαιολογεί την απουσία αισθητής μείωσης του εύρους της ρωγμής στην κάτω επιφάνεια. Ακολούθως, μη λαμβάνοντας υπόψη το πρώτο τμήμα του πίνακα, για τον υπολογισμό των παραμέτρων GH, AR και RAR, δίνεται ως αποτέλεσμα, ο βαθμός ίασης να έχει μηδενική τιμή, η μείωση της επιφάνειας της ρωγμής, να μην αυξάνεται, αλλά να μην ξεπερνά το 50%, ενώ τέλος το βήμα μείωσης να ελαττώνεται ελάχιστα. Η διαγραμματική απεικόνιση του **Πίνακα 6.1** παρουσιάζεται στα **Σχήματα 6.1** και **6.2**, με το καθ' ένα από αυτά να εμφανίζει την πρόοδο του δοκιμίου και την ποσοτική αποτίμηση της αυτο-ίασης αντίστοιχα. Ακολούθως, δίνονται οι φωτογραφίες της στερεοσκοπικής επιθεώρησης στους **Πίνακες 6.2** και **6.3** για την άνω και κάτω επιφάνεια αντίστοιχα.

Πίνακας 6.1 Πρόδος αυτο-ίασης στις 4 ηλικίες για το M1

Επιφάνειες	A/A	Μέγεθος (εύρος) ρωγμών (mm)			
		0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
Άνω Επιφάνεια	1	0.036	0	0	0
	2	0.025	0	0	0
	3	0.036	0	0	0
	4	0.058	0	0	0
	5	0.047	0	0	0
	6	0.064	0	0	0
	7	0.019	0	0	0
	8	0.044	0	0	0
	9	0.022	0	0	0
	10	0.019	0	0	0
Κάτω Επιφάνεια	1	0.094	0.078	0.069	0.061
	2	0.069	0.058	0.053	0.050
	3	0.086	0.056	0.047	0.042
	4	0.069	0.069	0.050	0.044
	5	0.067	0.060	0.053	0.039
	6	0.100	0.083	0.072	0.058
	7	0.106	0.086	0.067	0.056
	8	0.108	0.100	0.086	0.078
	9	0.083	0.042	0.042	0.028
	10	0.106	0.092	0.058	0.056
	11	0.086	0.072	0.053	0.042
	12	0.081	0.061	0.044	0.031
Βαθμός Ίασης GH (%)		0	0	0	0
Μείωση Επιφάνειας Ρωγμής AR (%)		0	19	34	45
Βήμα μείωσης RAR (%)		0	19	18	17



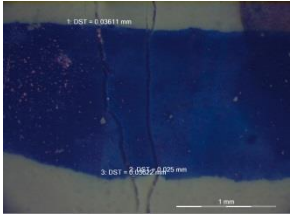
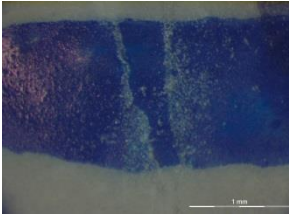
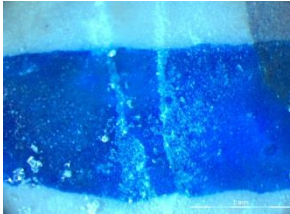
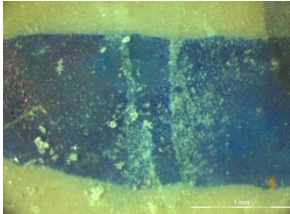
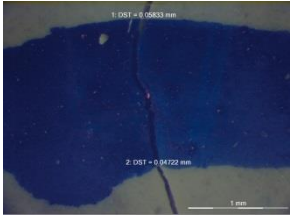
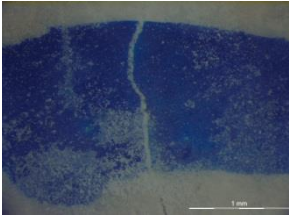
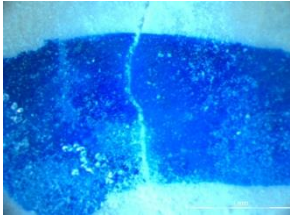
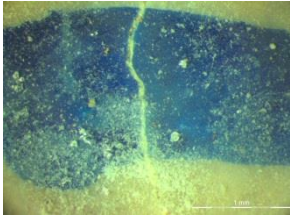
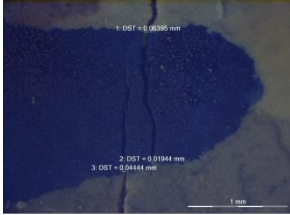
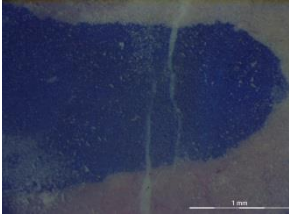
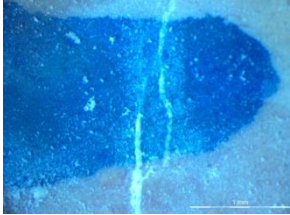
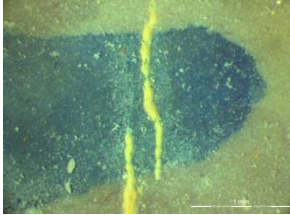
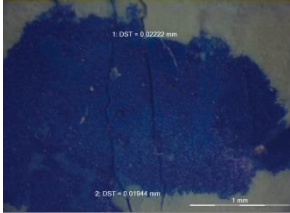
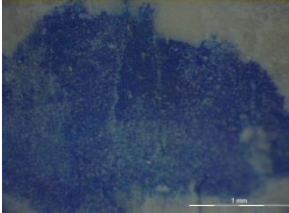

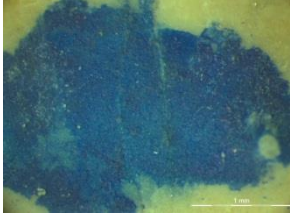
Σχήμα 6.1 Πρόοδος αυτο-ίασης του δοκίμιου M1



Σχήμα 6.2 Ποσοτική αποτίμηση της αυτο-ίασης για το δοκίμιο M1

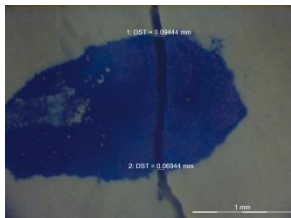
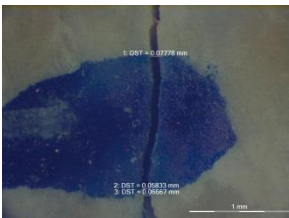
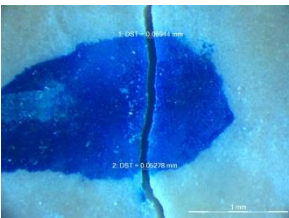

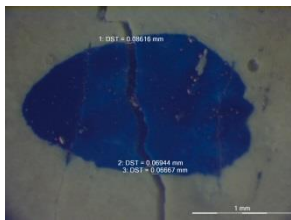
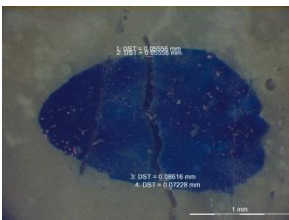
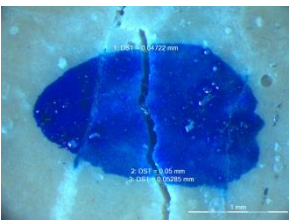
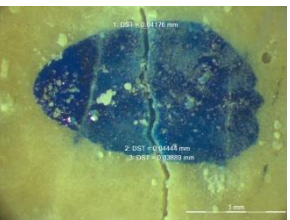
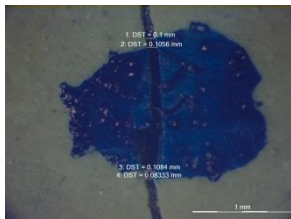
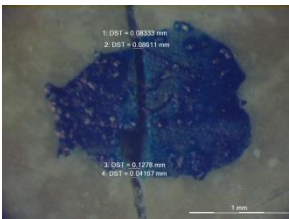

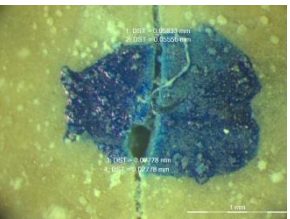
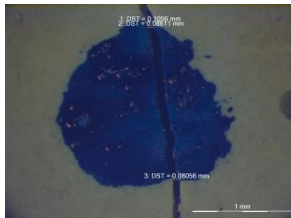
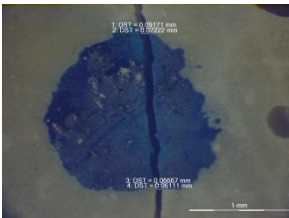
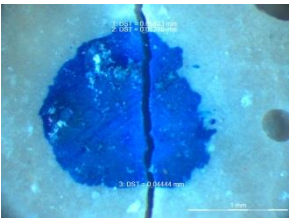
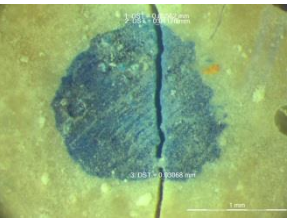


Πίνακας 6.2 Πρόσδος αυτο-ίασης άνω επιφάνειας δοκιμίου M1

0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
 <p>w: 0.032 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>
 <p>w: 0.053 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>
 <p>w: 0.043 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>
 <p>w: 0.021 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>



Πίνακας 6.3 Πρόοδος αυτο-ίασης κάτω επιφανείας δοκιμίου M1

0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
 <p>w: 0.082 mm</p>	 <p>w: 0.068 mm</p>	 <p>w: 0.061 mm</p>	 <p>w: 0.055 mm</p>
 <p>w: 0.074 mm</p>	 <p>w: 0.067 mm</p>	 <p>w: 0.050 mm</p>	 <p>w: 0.042 mm</p>
 <p>w: 0.099 mm</p>	 <p>w: 0.085 mm</p>	 <p>w: 0.068 mm</p>	 <p>w: 0.055 mm</p>
 <p>w: 0.091 mm</p>	 <p>w: 0.073 mm</p>	 <p>w: 0.052 mm</p>	 <p>w: 0.043 mm</p>

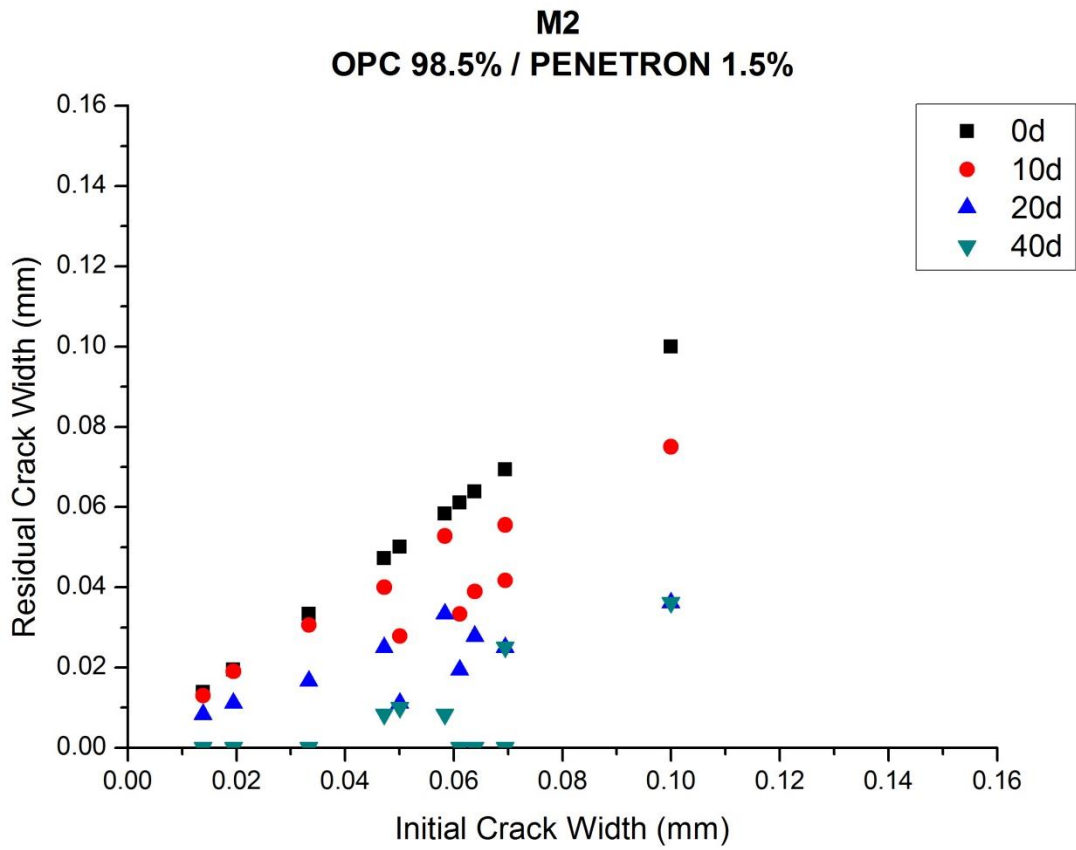
### 6.1.2 Μίγμα M2 - (OPC 98.5%, Penetron® Admix 1.5%)

Το μίγμα M2 αποτελείται από 98.5% τσιμέντο CEM I 52.5 R και 1.5% Penetron® Admix, λόγο νερού προς τσιμέντο (W/C) 0.38, άμμου προς τσιμέντο (S/C) 2, ενώ ίνες και υπερρυστοποιητής προστέθηκαν σε 1.3 και 1% επί το ποσοστό των τσιμεντοειδών αντίστοιχα.

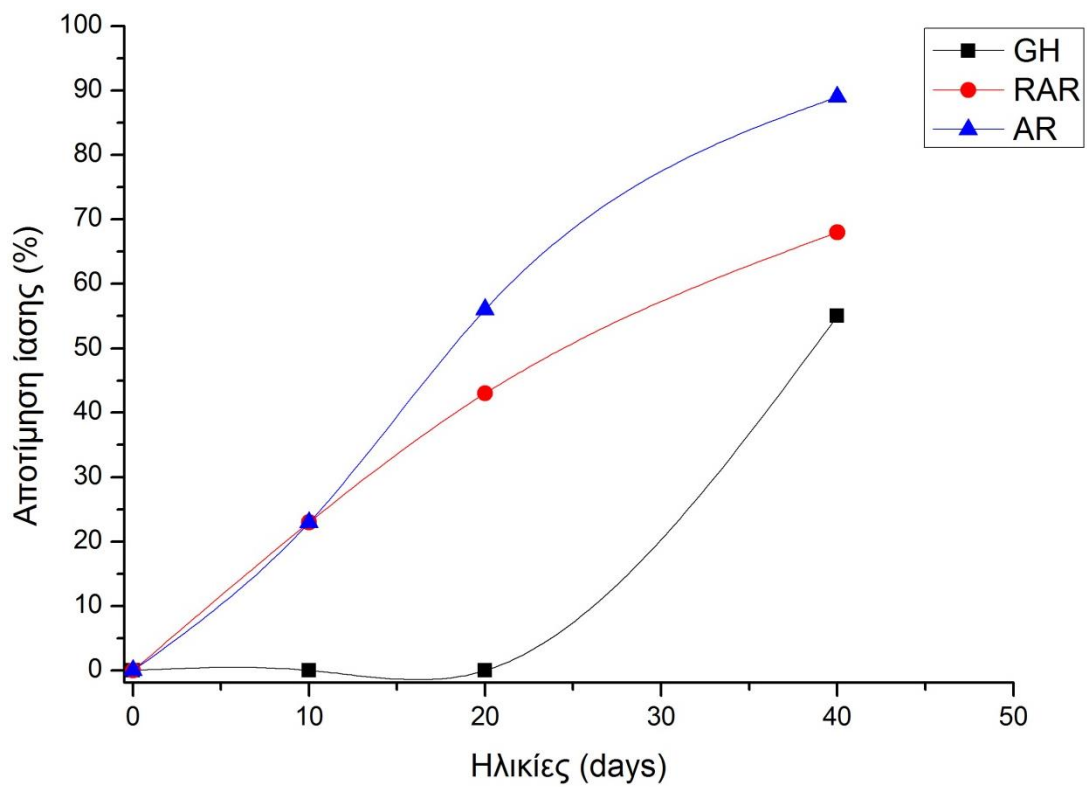
Από τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στον **Πίνακα 6.4** και όπως παρατηρείται από τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στα **Σχήματα 6.3** και **6.4**, το δοκίμιο του μίγματος M2, παρουσιάζει περίπου σταθερό βήμα μείωσης της επιφάνειας της ρωγμής μέχρι την ηλικία των 20 ημερών, ενώ υπάρχει ύφεση αυτού, σχεδόν στο μισό, για το διάστημα των ηλικιών από τις 20 μέχρι τις 40 ημέρες. Αντίστοιχα, ακολουθεί και το εύρος μείωσης της επιφάνειας της ρωγμής. Ως προς το βαθμό ίασης, μέχρι τις 20 ημέρες, δεν έχει μηδενιστεί κανένα σημείο παρατήρησης ολοκληρωτικά. Αντίθετα, με το πέρασ επιπλέον 20 ημερών, εμφανίζονται περιοχές πλήρους ίασης, ενώ τα υπολειπόμενα σημεία παρέμειναν περίπου σταθερά. Συμπλήρωση των παραπάνω, αποτελούν οι εικόνες της στερεοσκοπικής επιθεώρησης που δίνονται στους **Πίνακες 6.5** και **6.6** για την άνω και κάτω επιφάνεια του δοκιμίου M2.

Πίνακας 6.4 Πρόδος αυτο-ίασης στις 4 ηλικίες για το M2

Επιφάνειες	A/A	Μέγεθος (εύρος) ρωγμών (mm)			
		0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
Άνω Επιφάνεια	1	0.069	0.042	0.025	0.025
	2	0.100	0.075	0.036	0.036
	3	0.050	0.028	0.011	0.010
	4	0.064	0.039	0.028	0
	5	0.061	0.033	0.019	0
	6	0.069	0.056	0.025	0
Κάτω Επιφάνεια	1	0.047	0.040	0.025	0.008
	2	0.058	0.053	0.033	0.008
	3	0.033	0.031	0.017	0
	4	0.019	0.019	0.011	0
	5	0.014	0.013	0.008	0
Βαθμός Ίασης GH (%)		0	0	0	55
Μείωση Επιφάνειας Ρωγμής AR (%)		0	23	56	89
Βήμα μείωσης RAR (%)		0	23	43	68

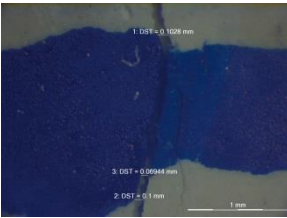
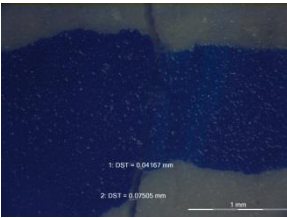
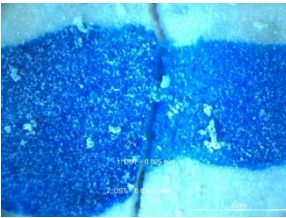
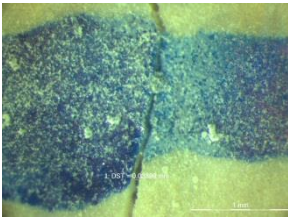
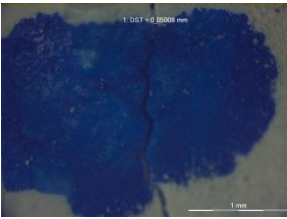
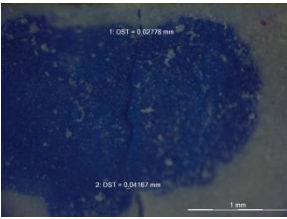
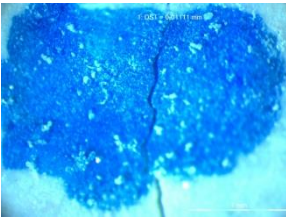
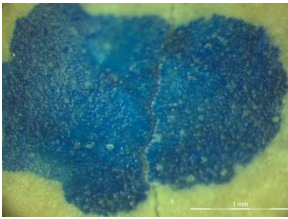
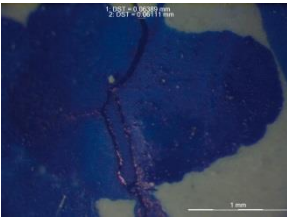
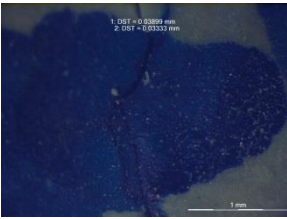
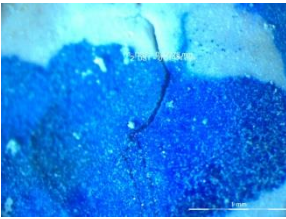
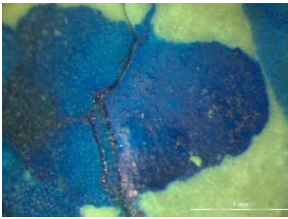
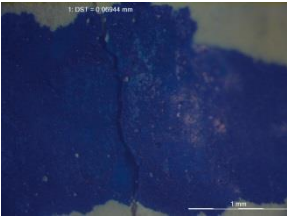
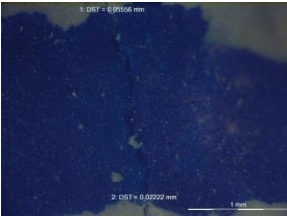
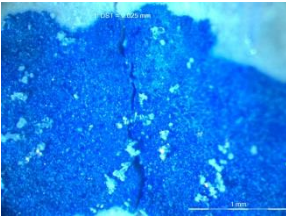
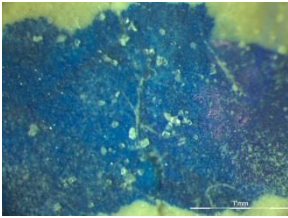


Σχήμα 6.3 Πρόοδος αυτο-ίασης του δοκίμιου M2



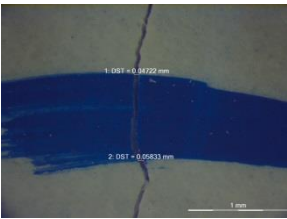
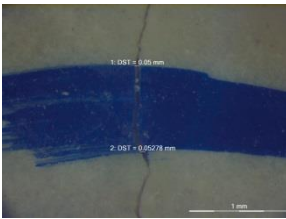
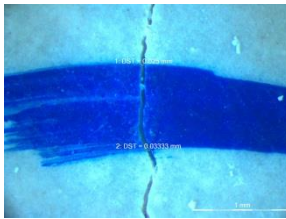

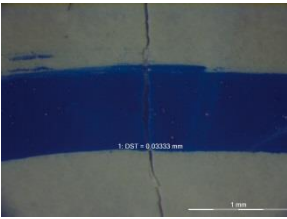
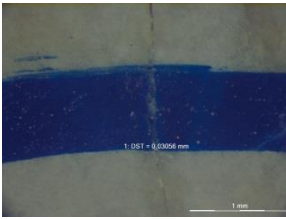
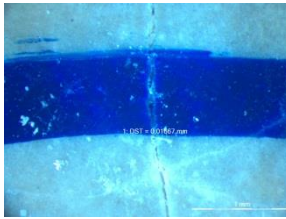
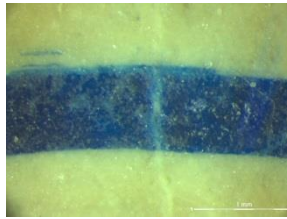
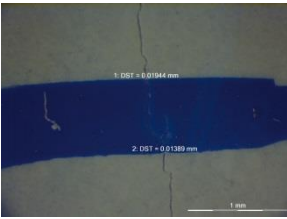
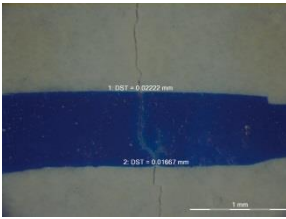
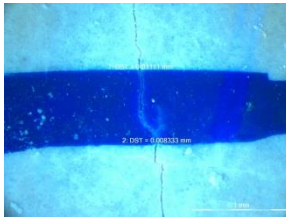
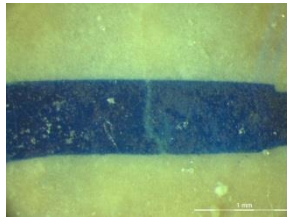
Σχήμα 6.4 Ποσοτική αποτίμηση της αυτο-ίασης για το δοκίμιο M2

Πίνακας 6.5 Πρόοδος αυτο-ίασης άνω επιφανείας δοκιμίου M2

0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
 <p>w: 0.091 mm</p>	 <p>w: 0.058 mm</p>	 <p>w: 0.031 mm</p>	 <p>w: 0.039 mm</p>
 <p>w: 0.050 mm</p>	 <p>w: 0.034 mm</p>	 <p>w: 0.011 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>
 <p>w: 0.063 mm</p>	 <p>w: 0.036 mm</p>	 <p>w: 0.023 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>
 <p>w: 0.069 mm</p>	 <p>w: 0.039 mm</p>	 <p>w: 0.025 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>



Πίνακας 6.6 Πρόοδος αυτο-ίασης κάτω επιφάνειας δοκίμιου M2

0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
 <p>w: 0.053 mm</p>	 <p>w: 0.051 mm</p>	 <p>w: 0.029 mm</p>	 <p>w: 0.008 mm</p>
 <p>w: 0.033 mm</p>	 <p>w: 0.031 mm</p>	 <p>w: 0.017 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>
 <p>w: 0.017 mm</p>	 <p>w: 0.019 mm</p>	 <p>w: 0.008 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>

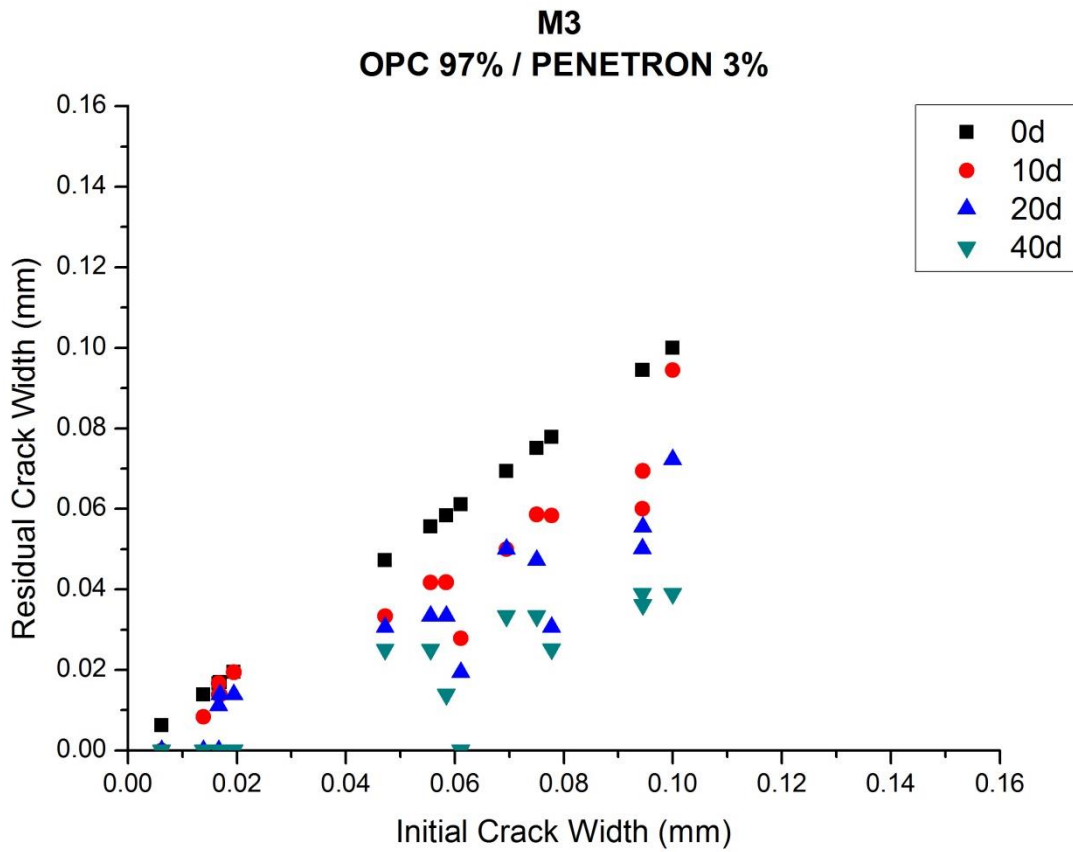
### 6.1.3 Μίγμα M3 - (OPC 97%, Penetron® Admix 3%)

Το μίγμα M3 αποτελείται από 97% τσιμέντο CEM I 52.5 R και 3% Penetron® Admix, λόγο νερού προς τσιμέντο (W/C) 0.38, άμμου προς τσιμέντο (S/C) 2, ενώ ίνες και υπερ-ρευστοποιητής προστέθηκαν σε 1.3 και 1% επί το ποσοστό των τσιμεντοειδών αντίστοιχα.

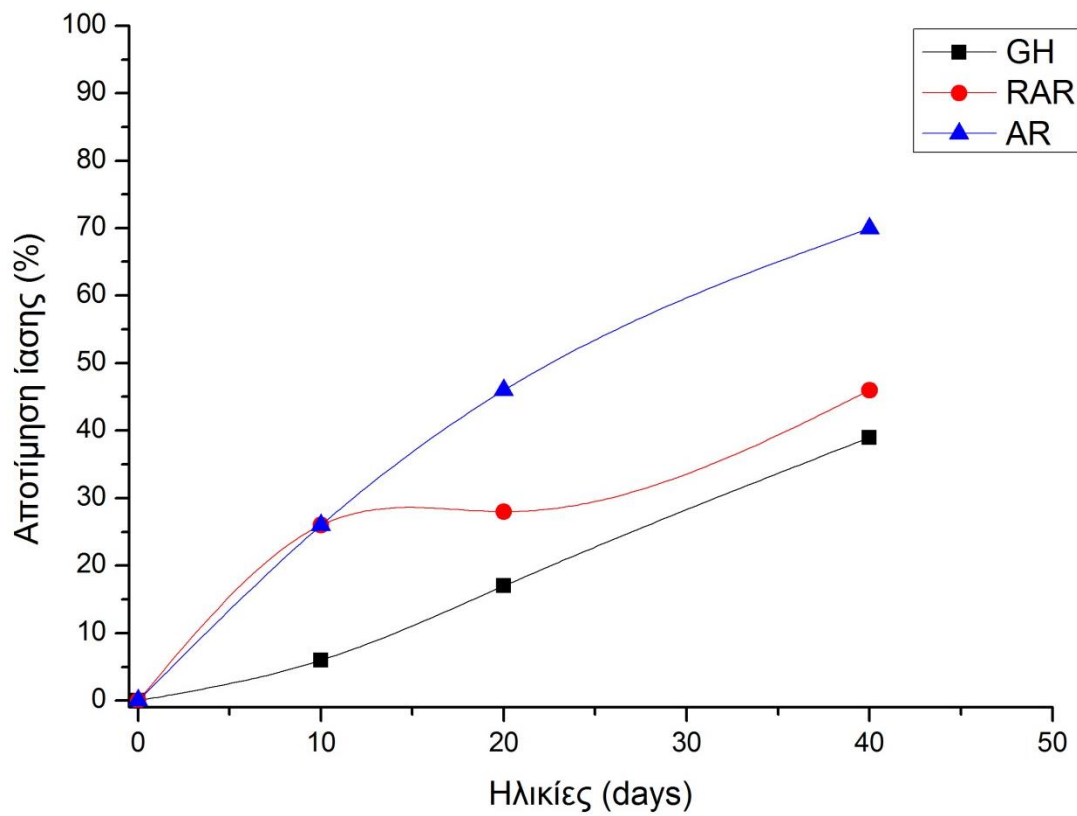
Κατά τα διαγράμματα των Σχημάτων 6.5 και 6.6 και τα δεδομένα του Πίνακα 6.7, παρατηρείται σχεδόν ομαλή αύξηση της μείωσης εύρους της ρωγμής με τάσεις ύφεσης από την πρώτη ηλικία των 10 ημερών. Το βήμα μείωσης είναι περίπου σταθερό και αυτό εμφανίζεται από το πλατό που παρουσιάζεται μεταξύ των 10 και 20 ημερών. Ο βαθμός ίασης είναι αρκετά χαμηλός, με αποτέλεσμα να μη θεωρείται το μίγμα ικανό για αυτο-ίαση. Ένας ακόμα αποτρεπτικός λόγος για το συμπέρασμα αυτό, είναι ότι ο μηδενισμός του εύρους της ρωγμής, έχει παρατηρηθεί σε ήδη σχεδόν χαμηλού ανοίγματος ρωγμές, οι οποίες και επηρεάζουν το τελικό ποσοστό της μείωσης της επιφάνειας της ρωγμής. Τέλος, δίνονται οι φωτογραφίες της στερεοσκοπικής επιθεώρησης στους Πίνακες 6.8 και 6.9.

Πίνακας 6.7 Πρόσδος αυτο-ίασης στις 4 ηλικίες για το M3

Επιφάνειες	A/A	Μέγεθος (εύρος) ρωγμών (mm)			
		0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
Άνω Επιφάνεια	1	0.094	0.060	0.051	0.039
	2	0.392	0.358	0.339	0.328
	3	0.317	0.310	0.300	0.294
	4	0.075	0.059	0.047	0.033
	5	0.069	0.050	0.050	0.033
	6	0.095	0.069	0.056	0.036
	7	0.047	0.033	0.031	0.025
	8	0.017	0.014	0	0
Κάτω Επιφάνεια	1	0.056	0.047	0.033	0.025
	2	0.100	0.094	0.072	0.039
	3	0.078	0.058	0.031	0.025
	4	0.058	0.042	0.033	0.014
	5	0.006	0	0	0
	6	0.017	0.014	0.014	0
	7	0.061	0.028	0.019	0
	8	0.019	0.019	0.014	0
	9	0.014	0.008	0	0
	10	0.017	0.017	0.011	0
Βαθμός Ίασης GH (%)		0	6	17	39
Μείωση Επιφάνειας Ρωγμής AR (%)		0	26	46	70
Βήμα μείωσης RAR (%)		0	26	28	46

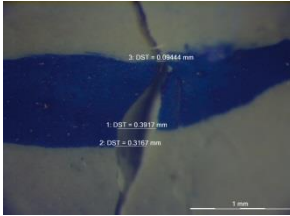
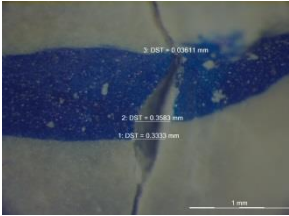
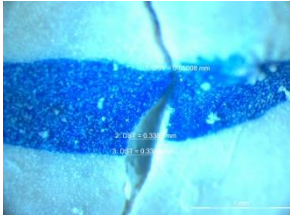
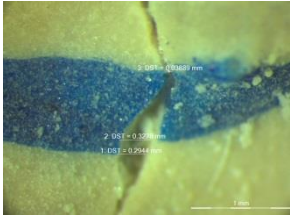
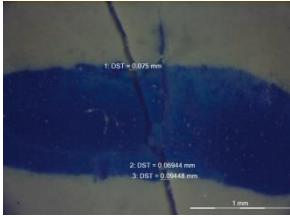
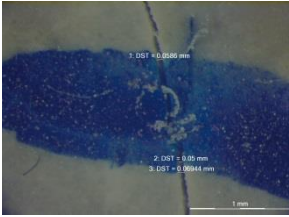
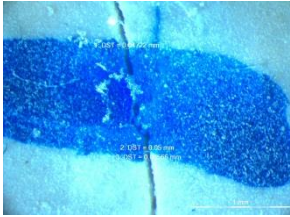
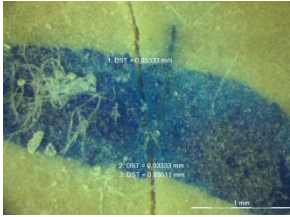
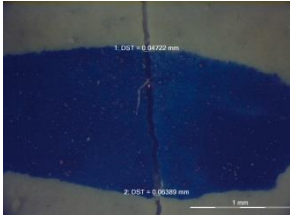
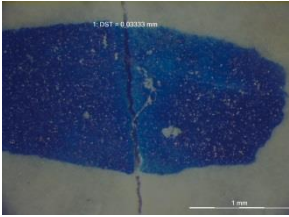
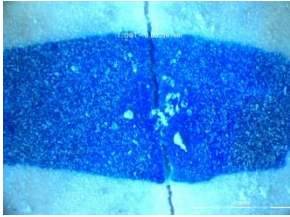
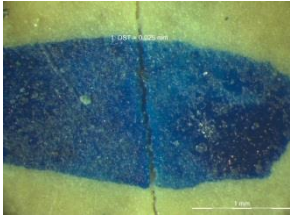
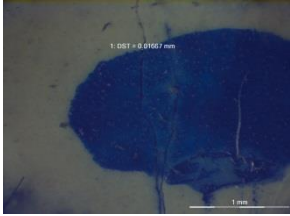
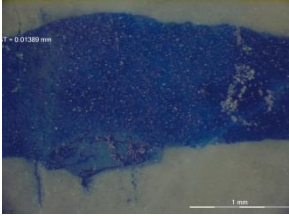
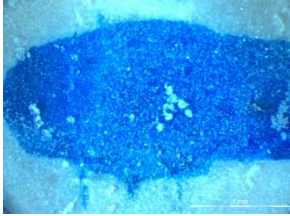
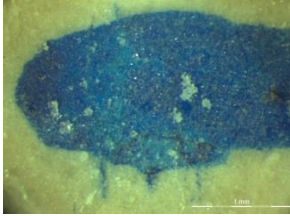


Σχήμα 6.5 Πρόοδος αυτο-ίσης του δοκιμίου M3



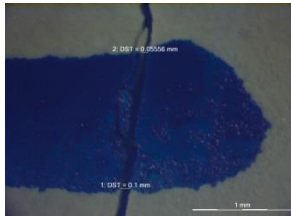
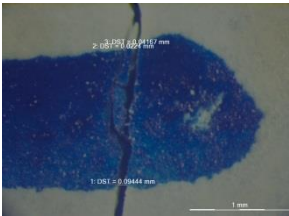
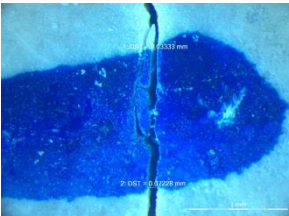
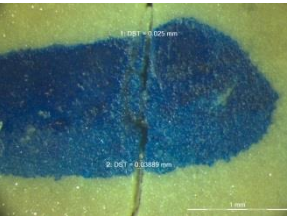
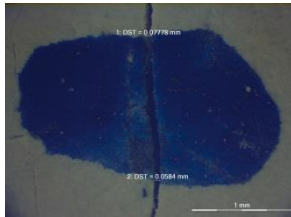
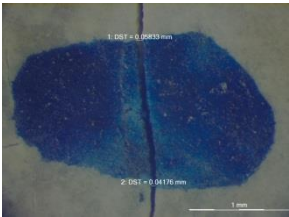
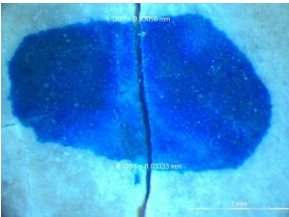
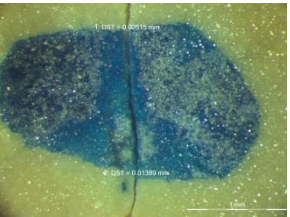
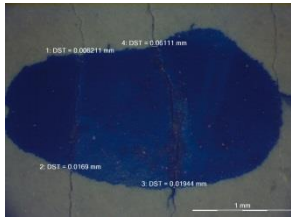
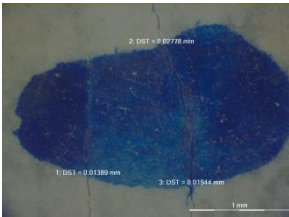
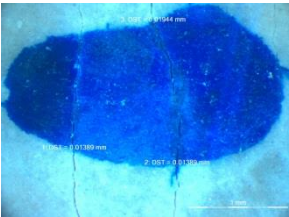
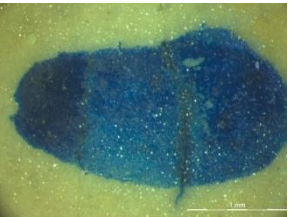
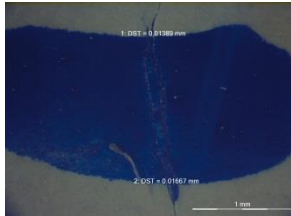
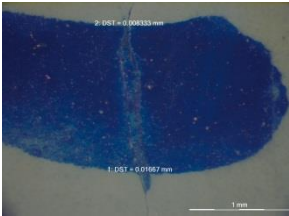
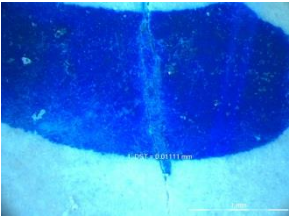
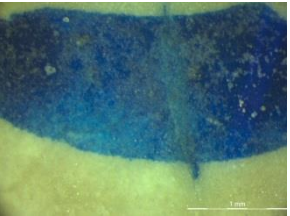
Σχήμα 6.6 Ποσοτική αποτίμηση της αυτο-ίσης για το δοκίμιο M3

Πίνακας 6.8 Πρόοδος αυτο-ίασης άνω επιφανείας δοκιμίου M3

0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
 <p>w: 0.268 mm</p>	 <p>w: 0.243 mm</p>	 <p>w: 0.243 mm</p>	 <p>w: 0.220 mm</p>
 <p>w: 0.080 mm</p>	 <p>w: 0.059 mm</p>	 <p>w: 0.051 mm</p>	 <p>w: 0.034 mm</p>
 <p>w: 0.055 mm</p>	 <p>w: 0.033 mm</p>	 <p>w: 0.031 mm</p>	 <p>w: 0.025 mm</p>
 <p>w: 0.017 mm</p>	 <p>w: 0.014 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>



Πίνακας 6.9 Πρόοδος αυτο-ίασης κάτω επιφάνειας δοκιμίου M3

0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
 <p>w: 0.078 mm</p>	 <p>w: 0.053 mm</p>	 <p>w: 0.053 mm</p>	 <p>w: 0.032 mm</p>
 <p>w: 0.068 mm</p>	 <p>w: 0.050 mm</p>	 <p>w: 0.032 mm</p>	 <p>w: 0.020 mm</p>
 <p>w: 0.026 mm</p>	 <p>w: 0.020 mm</p>	 <p>w: 0.016 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>
 <p>w: 0.015 mm</p>	 <p>w: 0.012 mm</p>	 <p>w: 0.011 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>

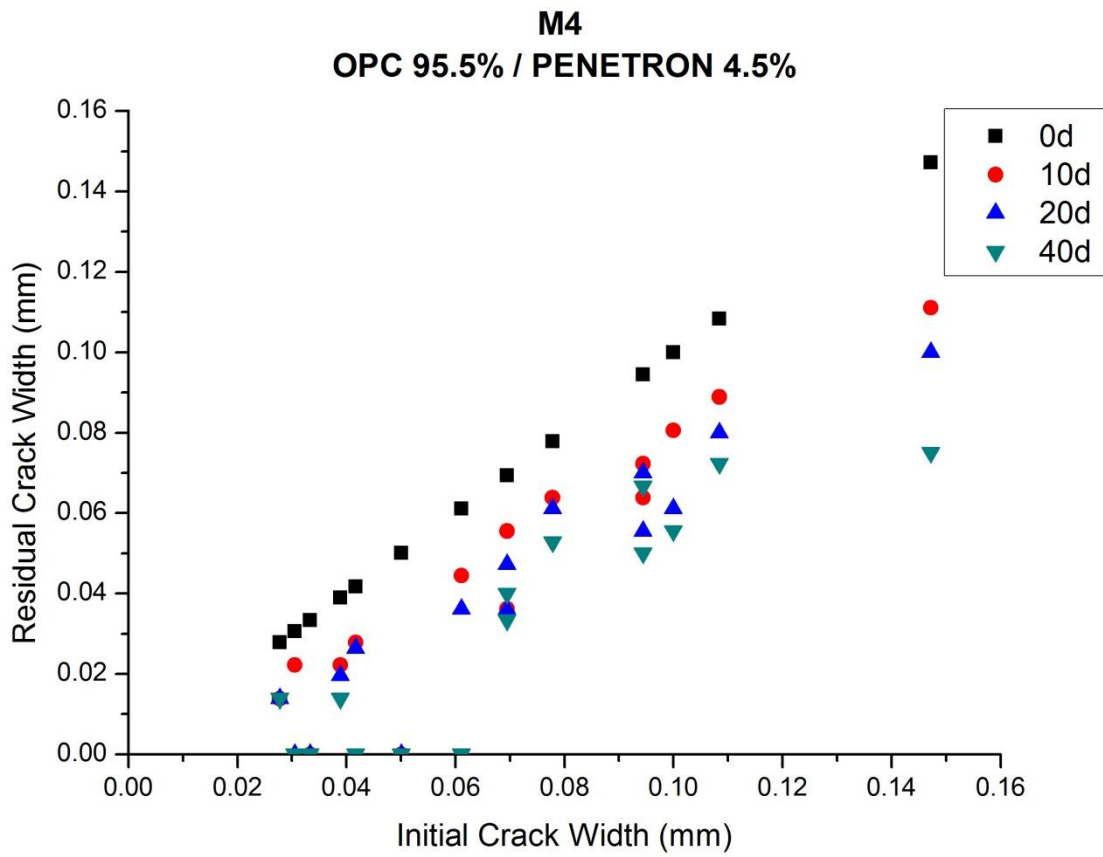
#### 6.1.4 Μίγμα M4 - (OPC 95.5%, Penetron® Admix 4.5%)

Το μίγμα M4 αποτελείται από 95.5% τσιμέντο CEM I 52.5 R και 4.5% Penetron® Admix, λόγο νερού προς τσιμέντο (W/C) 0.38, άμμου προς τσιμέντο (S/C) 2, ενώ ίνες και υπερευστοποιητής προστέθηκαν σε 1.3 και 1% επί το ποσοστό των τσιμεντοειδών αντίστοιχα.

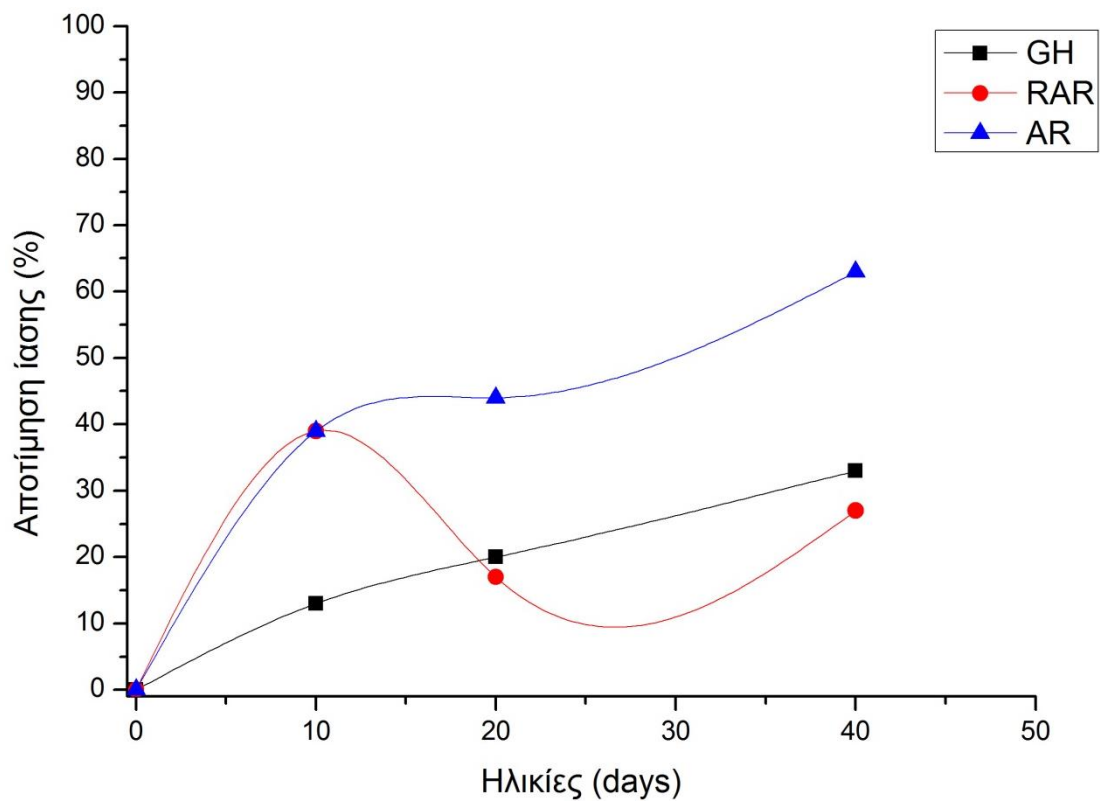
Όπως παρουσιάζεται από τον Πίνακα 6.10, στο παρόν μίγμα, εμφανίζεται μείωση της επιφάνειας της ρωγμής κατά 63%. Το βήμα μείωσης δεν ήταν σταθερό, καθώς παρουσίασε ύφεση στη διάρκεια από τις 10 στις 20 ημέρες και εν συνεχεία αύξηση μέχρι την τελευταία ηλικία παρατήρησης. Ο βαθμός ίασης αυξάνεται περίπου σταθερά, χωρίς όμως να ξεπερνά το 50% των σημείων μέτρησης. Η ολική αυτο-ίαση παρουσιάζεται σε 5 από τα 13 συνολικά σημεία μελέτης, ενώ στα υπόλοιπα υπάρχει εμφανής μείωση του αρχικού τους πλάτους. Το παρόν ανάμιγμα ναι μεν παρουσιάζει μείωση επιφάνειας πάνω από το 50% αλλά ο βαθμός ίασης δεν ξεπέρασε το ποσοστό αυτό που θεωρείται σημαντικό. Η γενικότερη εικόνα προόδου και ποσοτικής αποτίμησης φαίνεται στα Σχήματα 6.7 και 6.8 αντίστοιχα. Ακολούθως, στους Πίνακες 6.11 και 6.12, δίνονται οι φωτογραφίες από την στερεοσκοπική επιθεώρηση.

Πίνακας 6.10 Πρόοδος αυτο-ίασης στις 4 ηλικίες για το M4

Επιφάνειες	A/A	Μέγεθος (εύρος) ρωγμών (mm)			
		0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
Άνω Επιφάνεια	1	0.050	0	0	0
	2	0.033	0	0	0
	3	0.042	0.028	0.026	0
	4	0.039	0.022	0.020	0.014
	5	0.031	0.022	0	0
	6	0.028	0.014	0.014	0.014
Κάτω Επιφάνεια	1	0.147	0.111	0.100	0.075
	2	0.108	0.089	0.080	0.072
	3	0.094	0.073	0.070	0.067
	4	0.094	0.064	0.056	0.050
	5	0.069	0.036	0.036	0.033
	6	0.078	0.064	0.061	0.053
	7	0.100	0.081	0.061	0.056
	8	0.069	0.056	0.047	0.040
	9	0.061	0.044	0.036	0
Βαθμός Ίασης GH (%)		0	13	20	33
Μείωση Επιφάνειας Ρωγμής AR (%)		0	39	44	63
Βήμα μείωσης RAR (%)		0	39	17	27

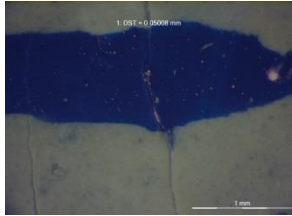
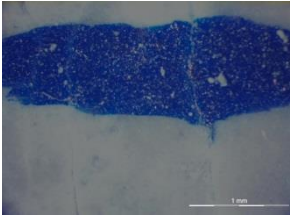
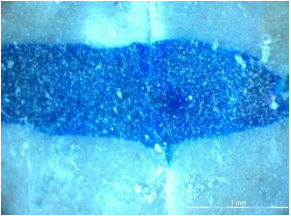
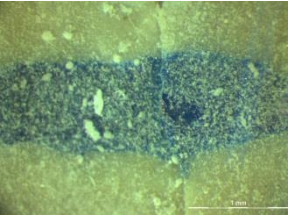
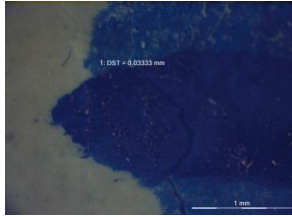
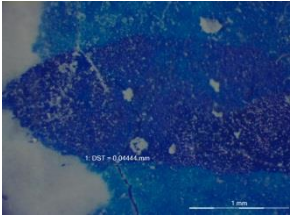
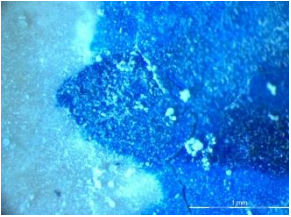
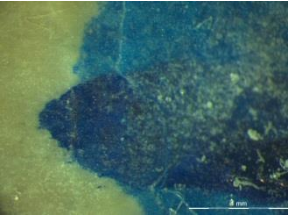
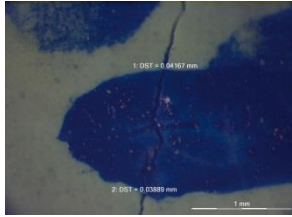
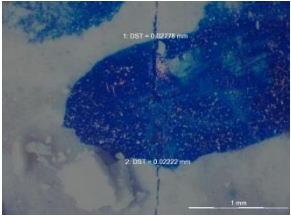
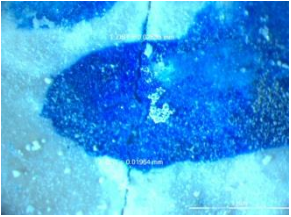
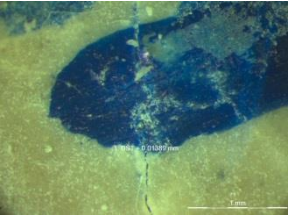
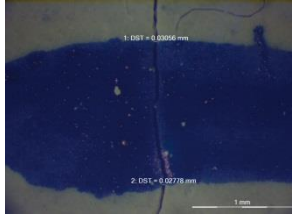
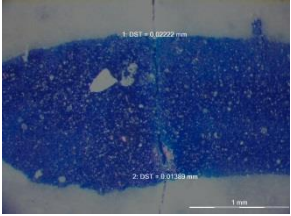
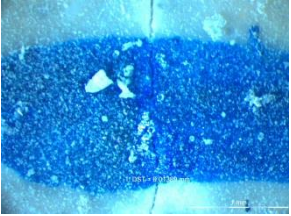
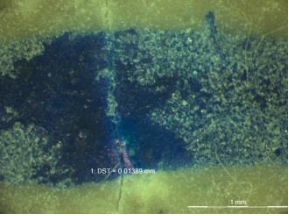


Σχήμα 6.7 Πρόοδος αυτο-ίασης του δοκμίου M4



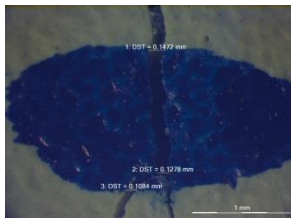
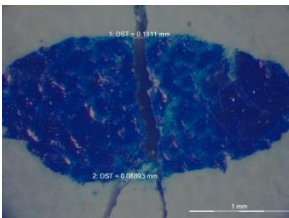
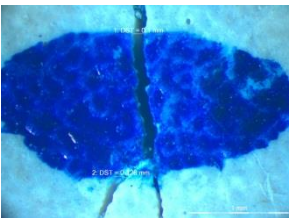
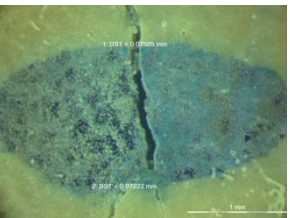
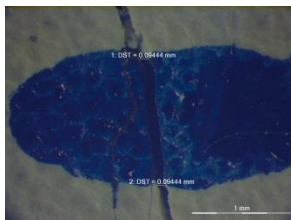
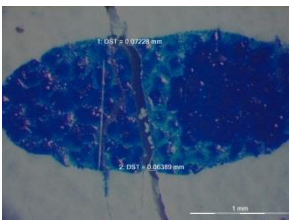
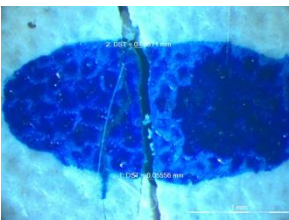
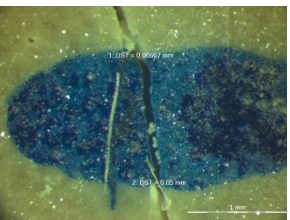
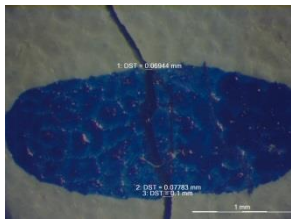
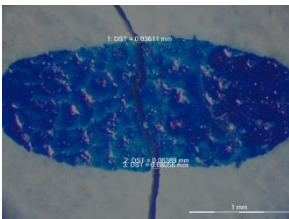
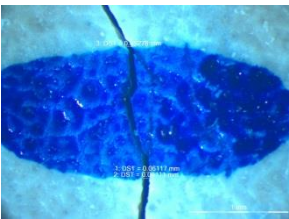
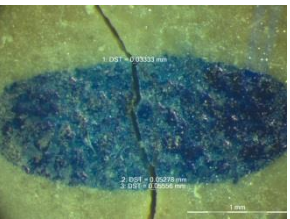
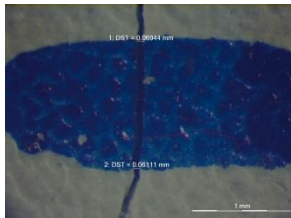
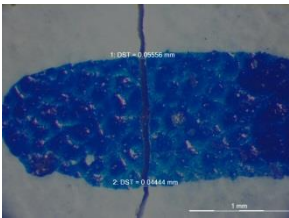
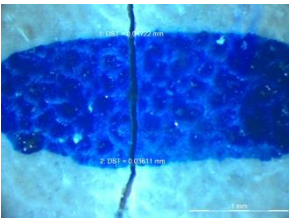
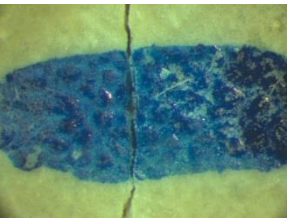
Σχήμα 6.8 Ποσοτική αποτίμηση της αυτο-ίασης για το δοκίμιο M4

Πίνακας 6.11 Πρόοδος αυτο-ίασης άνω επιφανείας δοκιμίου M4

0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
			
w: 0.050 mm	w: 0 mm	w: 0 mm	w: 0 mm
			
w: 0.033 mm	w: 0.044 mm	w: 0 mm	w: 0 mm
			
w: 0.040 mm	w: 0.025 mm	w: 0.023 mm	w: 0.014 mm
			
w: 0.029 mm	w: 0.018 mm	w: 0.014 mm	w: 0.014 mm



Πίνακας 6.12 Πρόοδος αυτο-ίασης κάτω επιφάνειας δοκιμίου M4

0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
 <p>w: 0.128 mm</p>	 <p>w: 0.100 mm</p>	 <p>w: 0.114 mm</p>	 <p>w: 0.074 mm</p>
 <p>w: 0.094 mm</p>	 <p>w: 0.068 mm</p>	 <p>w: 0.071 mm</p>	 <p>w: 0.058 mm</p>
 <p>w: 0.082 mm</p>	 <p>w: 0.060 mm</p>	 <p>w: 0.058 mm</p>	 <p>w: 0.047 mm</p>
 <p>w: 0.065 mm</p>	 <p>w: 0.050 mm</p>	 <p>w: 0.042 mm</p>	 <p>w: 0.040 mm</p>

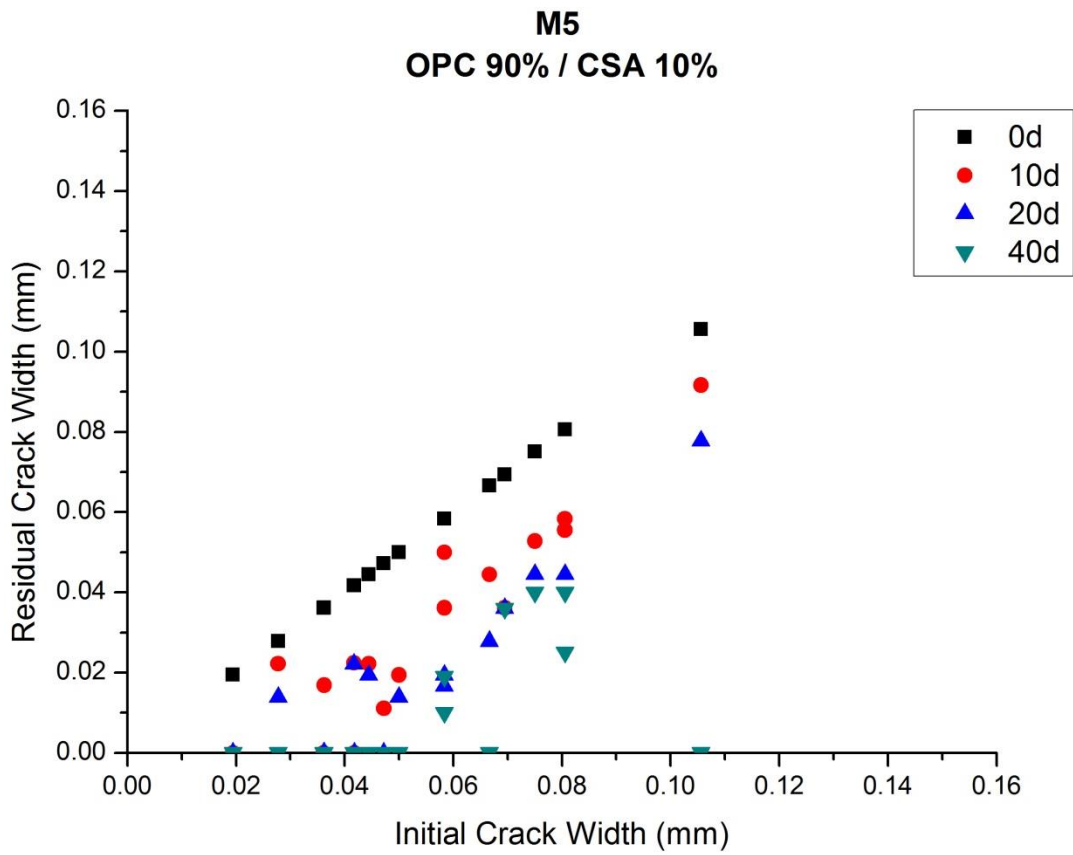
### 6.1.5 Μίγμα M5 - (OPC 90%, DENKA CSA#20 10%)

Το μίγμα M5 αποτελείται από 90% τσιμέντο CEM I 52.5 R και 10% DENKA CSA#20, λόγο νερού προς τσιμέντο (W/C) 0.38, άμμου προς τσιμέντο (S/C) 2, ενώ ίνες και υπερρυστοποιητής προστέθηκαν σε 1.3 και 1% επί το ποσοστό των τσιμεντοειδών αντίστοιχα.

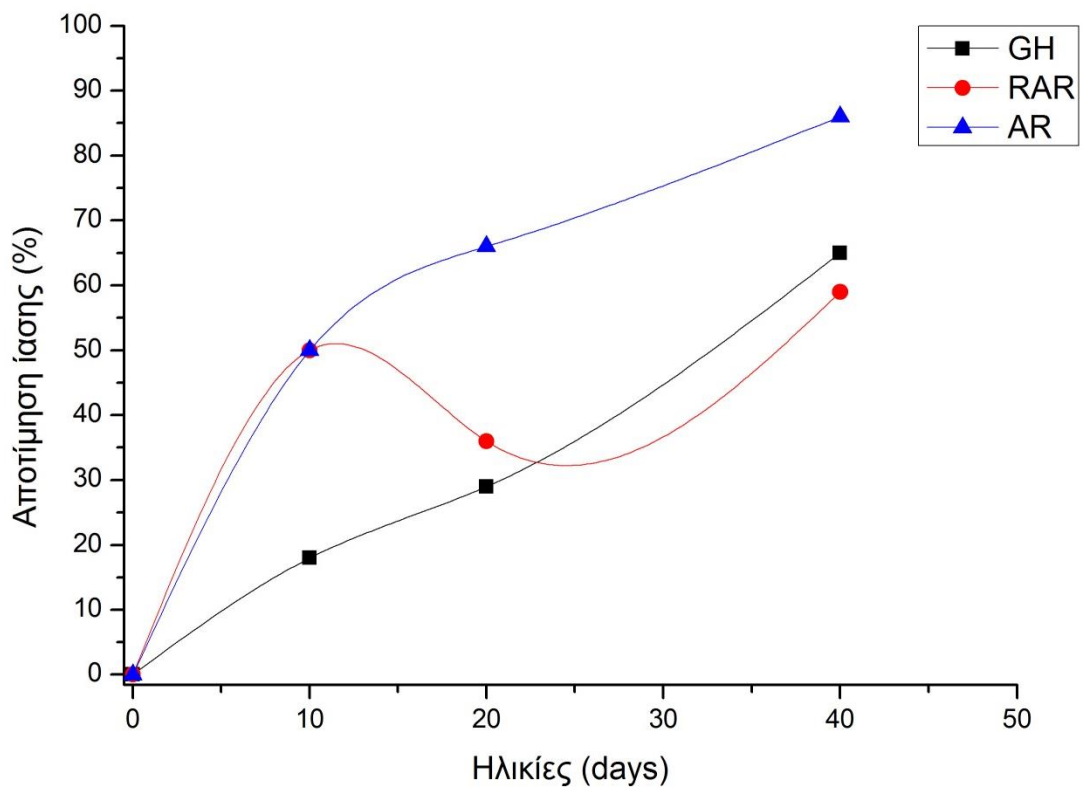
Όπως παρουσιάζεται από τον Πίνακα 6.13 και τα διαγράμματα των Σχημάτων 6.9 και 6.10, το μίγμα M5 εμφανίζει μία πολύ καλή συμπεριφορά σε σχέση με την αυτο-ίαση. Πιο συγκεκριμένα, μόλις στις 10 ημέρες, μειώνει κατά το μισό την επιφάνεια της αρχικής ρωγμής. Το βήμα μείωσης παρουσιάζει μία αυξομείωση με ύφεση από τις 10 στις 20 ημέρες και έπειτα αύξηση μέχρι την τελευταία ηλικία. Ο βαθμός ίασης είναι πάνω από το 50%, ενώ η μείωση επιφάνειας φτάνει το 86%. Επιπλέον, στον Πίνακα 6.14, η πρώτη στερεοσκοπική μέτρηση έχει σταθερό πλάτος σε όλες τις ηλικίες παρά να παρουσιάζει μείωση. Στην πραγματικότητα, λόγω του μεγάλου κενού που δημιουργήθηκε, εξαιτίας αποκόλλησης, δεν παρουσιάζεται ύφεση του πλάτους της ρωγμής αλλά ελάττωση του βάθους του σημείου αυτού.

Πίνακας 6.13 Πρόοδος αυτο-ίασης στις 4 ηλικίες για το M5

Επιφάνειες	A/A	Μέγεθος (εύρος) ρωγμών (mm)			
		0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
Άνω Επιφάνεια	1	0.036	0	0	0
	2	0.067	0.044	0.028	0
	3	0.058	0.036	0.019	0.019
	4	0.081	0.056	0.044	0.025
	5	0.069	0.036	0.036	0.036
	6	0.081	0.058	0.044	0.040
	7	0.028	0.022	0.014	0
	8	0.019	0	0	0
Κάτω Επιφάνεια	1	0.058	0.050	0.017	0.010
	2	0.075	0.052	0.044	0.040
	3	0.042	0	0	0
	4	0.050	0.019	0.014	0
	5	0.106	0.092	0.078	0
	6	0.047	0.011	0	0
	7	0.036	0.017	0	0
	8	0.044	0.022	0.019	0
	9	0.042	0.022	0.022	0
Βαθμός Ίασης (GH %)		0	18	29	65
Μείωση Επιφάνειας		0	50	66	86
Ρωγμής (AR %)		0	50	36	59
Βήμα μείωσης (RAR %)		0	50	36	59

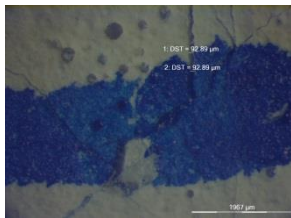
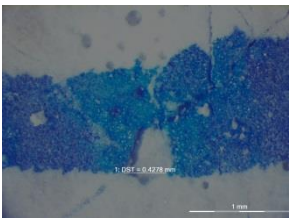
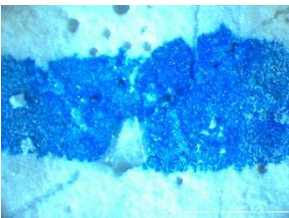
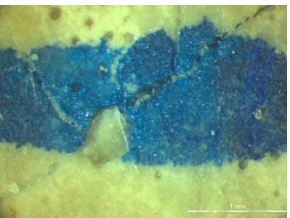
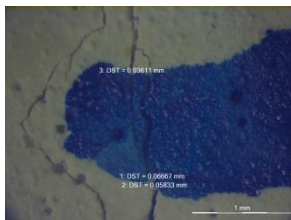
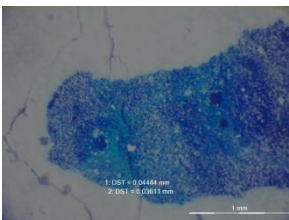
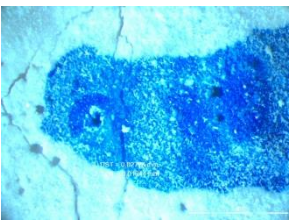
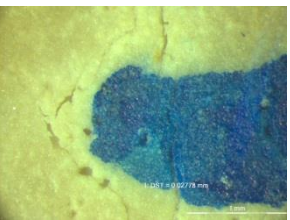
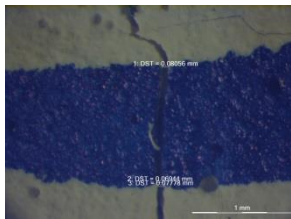
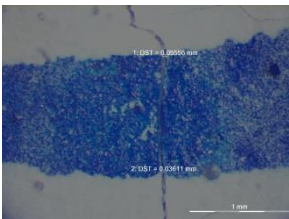
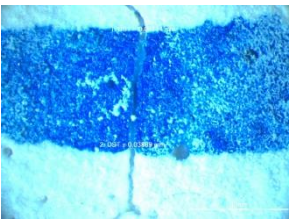
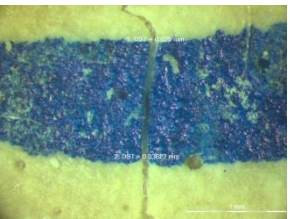
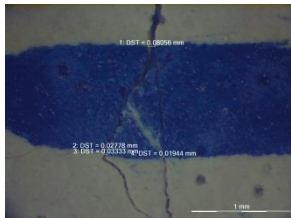
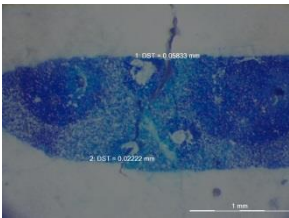
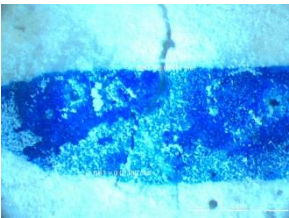
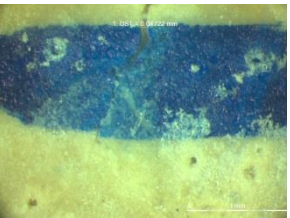


Σχήμα 6.9 Πρόοδος αυτο-ίσης του δοκιμίου M5



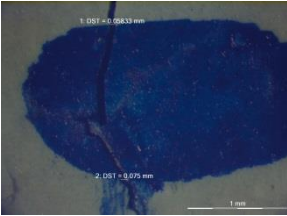
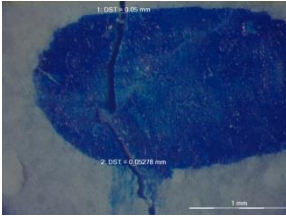
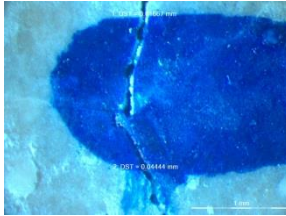
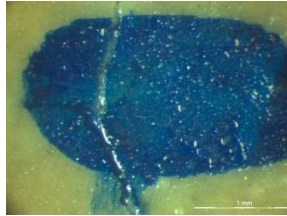
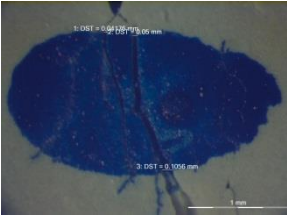
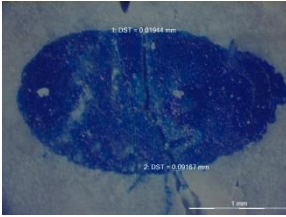
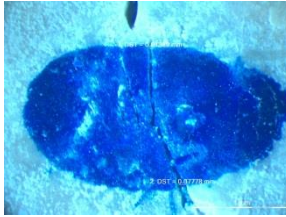
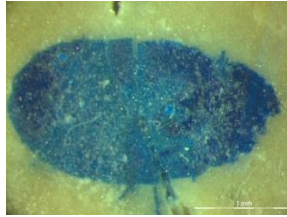
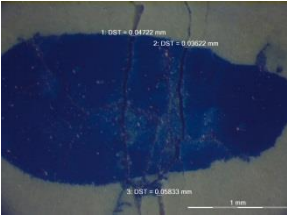
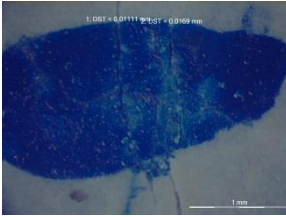
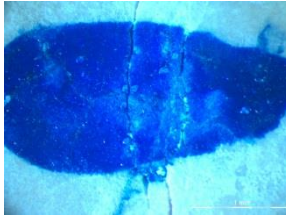
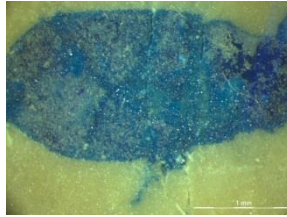
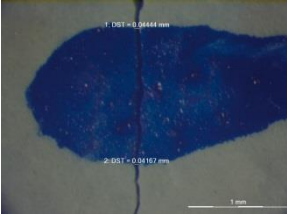
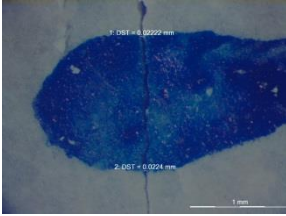
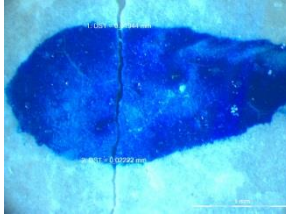
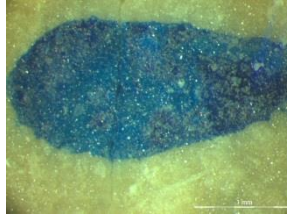
Σχήμα 6.10 Ποσοτική αποτίμηση της αυτο-ίσης για το δοκίμιο M5

Πίνακας 6.14 Πρόοδος αυτο-ίασης άνω επιφάνειας δοκιμίου M5

0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
 <p>w: 0.428 mm</p>	 <p>w: 0.428 mm</p>	 <p>w: 0.428 mm</p>	 <p>w: 0.428 mm</p>
 <p>w: 0.054 mm</p>	 <p>w: 0.040 mm</p>	 <p>w: 0.023 mm</p>	 <p>w: 0.028 mm</p>
 <p>w: 0.076 mm</p>	 <p>w: 0.046 mm</p>	 <p>w: 0.042 mm</p>	 <p>w: 0.031 mm</p>
 <p>w: 0.040 mm</p>	 <p>w: 0.040 mm</p>	 <p>w: 0.029 mm</p>	 <p>w: 0.047 mm</p>



Πίνακας 6.15 Πρόοδος αυτο-ίασης κάτω επιφάνειας δοκιμίου M5

0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
 <p>w: 0.067 mm</p>	 <p>w: 0.051 mm</p>	 <p>w: 0.031 mm</p>	 <p>w: 0.025 mm</p>
 <p>w: 0.066 mm</p>	 <p>w: 0.055 mm</p>	 <p>w: 0.046 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>
 <p>w: 0.047 mm</p>	 <p>w: 0.014 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>
 <p>w: 0.043 mm</p>	 <p>w: 0.022 mm</p>	 <p>w: 0.021 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>

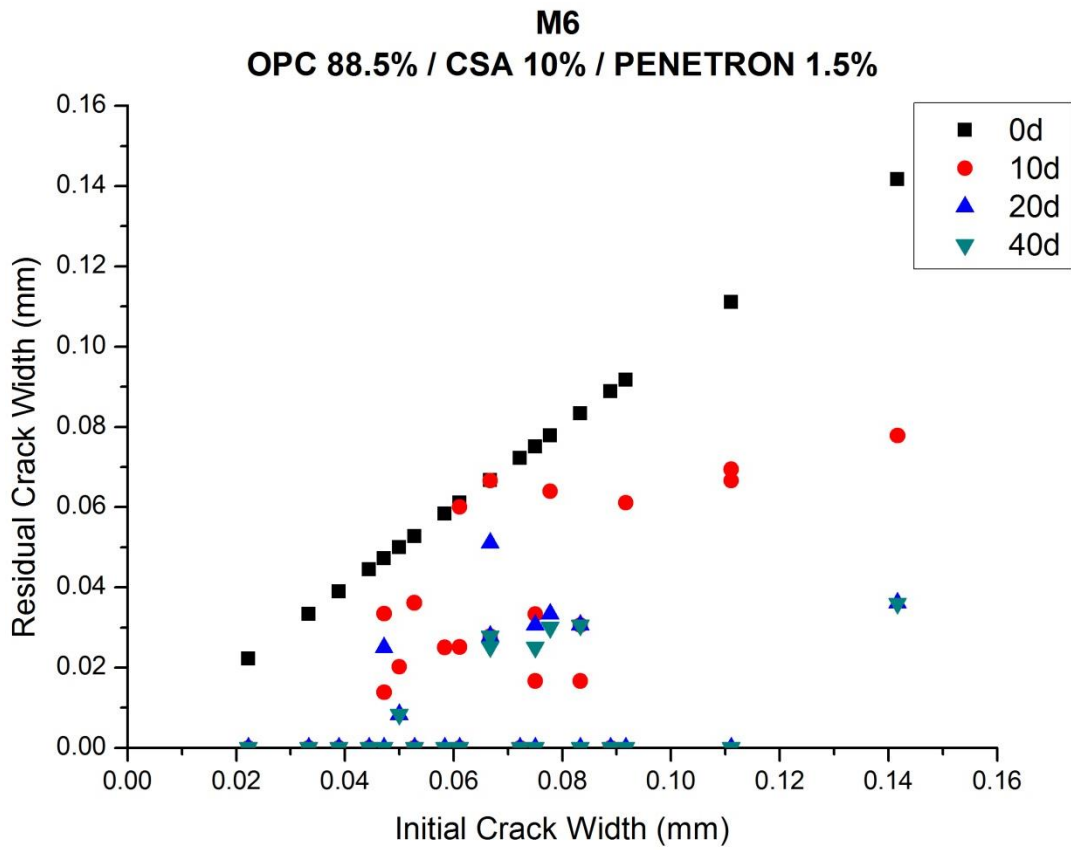
### 6.1.6 Μίγμα M6 - (OPC 88.5%, DENKA CSA#20 10%, Penetron® Admix 1.5%)

Το μίγμα M6 αποτελείται από 88.5% τσιμέντο CEM I 52.5 R, 10% DENKA CSA#20, και 1.5% Penetron® Admix, λόγο νερού προς τσιμέντο (W/C) 0.38, άμμου προς τσιμέντο (S/C) 2, ενώ ίνες και υπερρυστοποιητής προστέθηκαν σε 1.3 και 1% επί το ποσοστό των τσιμεντοειδών αντίστοιχα.

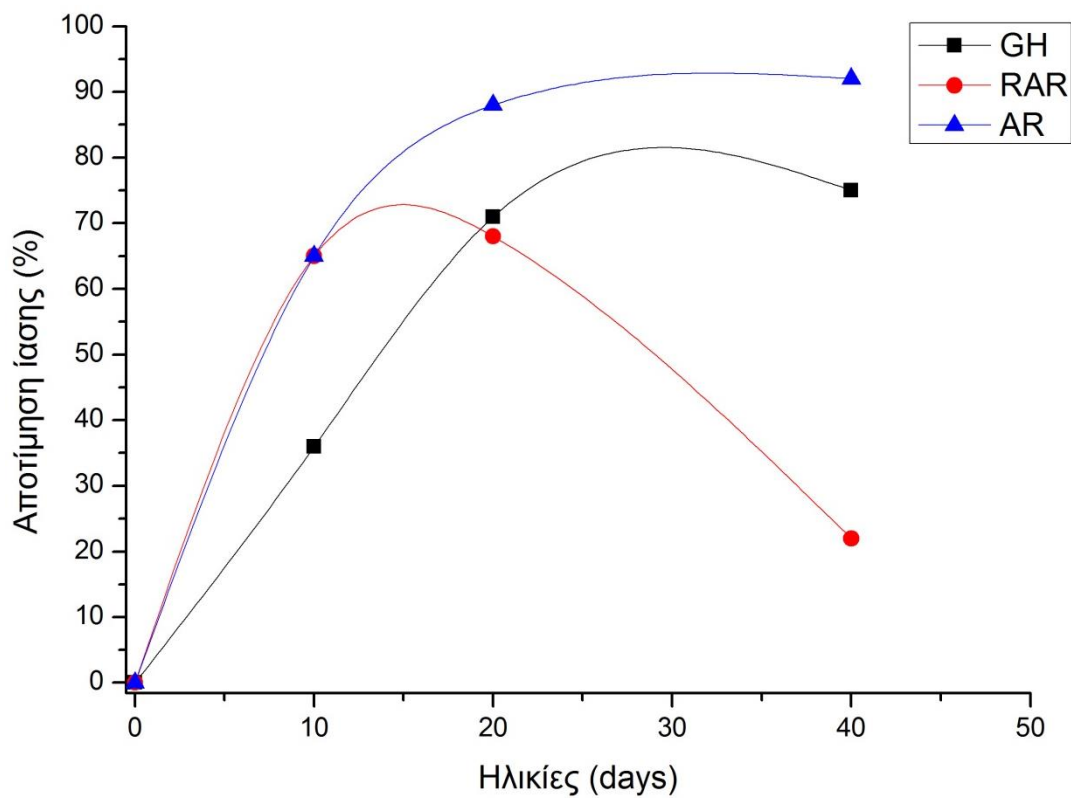
Από τον Πίνακα 6.16 και τα Σχήματα 6.11 και 6.12 παρατηρείται ικανοποιητική εξέλιξη του φαινομένου της αυτό-ίασης. Σε 10 μέρες έχει μειωθεί πάνω από το μισό εύρος της ρωγμής, ενώ στις 40 ημέρες υπάρχει σχεδόν ολική ίαση με τα περισσότερα μηδενικού πλάτους σημεία. Γενικότερη και καλύτερη εικόνα, του δοκιμίου M6 παρουσιάζεται στις φωτογραφίες της στερεοσκοπικής επιθεώρησης στους Πίνακες 6.17 και 6.18.

Πίνακας 6.16 Πρόοδος αυτο-ίασης στις 4 ηλικίες για το M6

Επιφάνειες	A/A	Μέγεθος (εύρος) ρωγμών (mm)			
		0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
Άνω Επιφάνεια	1	0.047	0.034	0.025	0
	2	0.078	0.064	0.033	0.030
	3	0.142	0.078	0.036	0.036
	4	0.053	0.036	0	0
	5	0.047	0.014	0	0
	6	0.061	0.025	0	0
	7	0.058	0.025	0	0
	8	0.075	0.017	0	0
	9	0.083	0.017	0	0
	10	0.033	0	0	0
	11	0.050	0.020	0.008	0.008
	12	0.083	0.031	0.031	0.031
	13	0.075	0.033	0.031	0.025
	14	0.067	0.028	0.028	0.028
Κάτω Επιφάνεια	1	0.072	0	0	0
	2	0.067	0.067	0.051	0.025
	3	0.052	0	0	0
	4	0.061	0	0	0
	5	0.044	0	0	0
	6	0.089	0	0	0
	7	0.111	0.067	0	0
	8	0.111	0.069	0	0
	9	0.061	0.060	0	0
	10	0.092	0.061	0	0
	11	0.039	0	0	0
	12	0.039	0	0	0
	13	0.022	0	0	0
	14	0.089	0	0	0
Βαθμός Ίασης GH (%)		0	36	71	75
Μείωση Επιφάνειας Ρωγμής AR (%)		0	65	88	92
Βήμα μείωσης RAR (%)		0	65	68	22

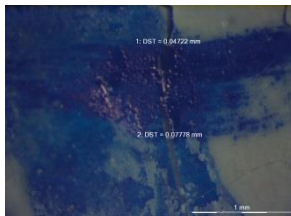
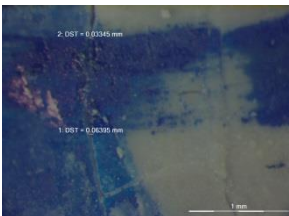
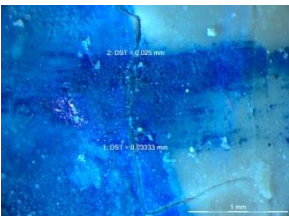
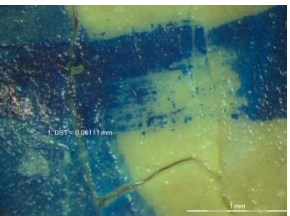
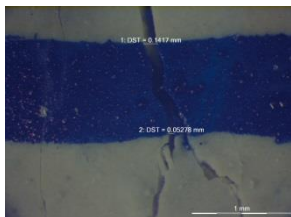
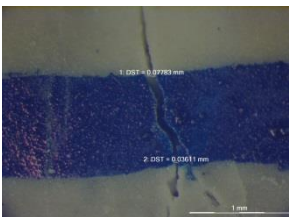
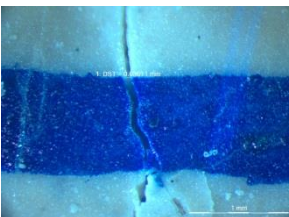
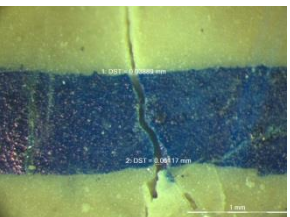
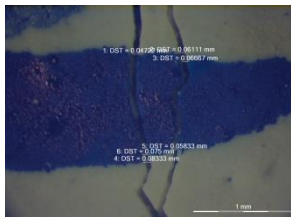
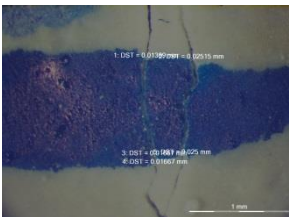
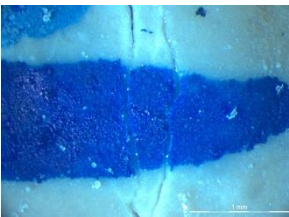
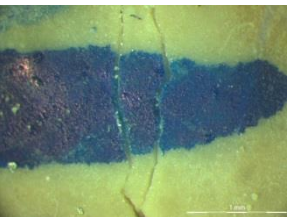
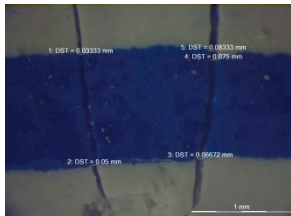
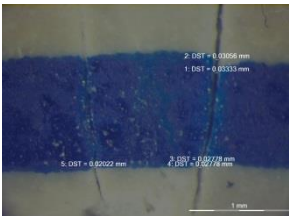
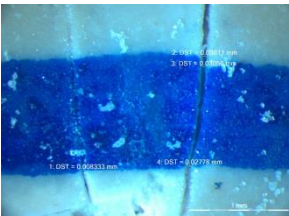
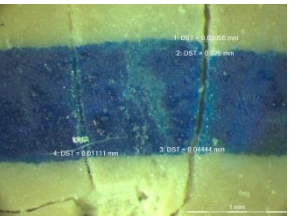


Σχήμα 6.11 Πρόοδος αυτο-ίσης του δοκιμίου M6



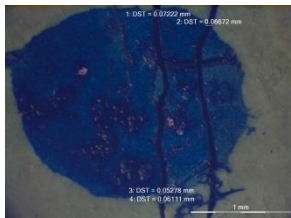
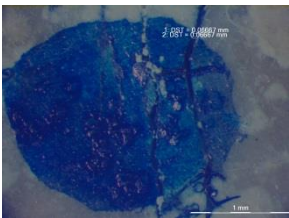
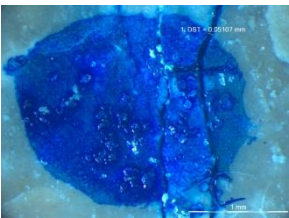
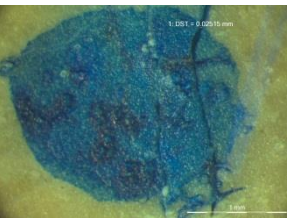
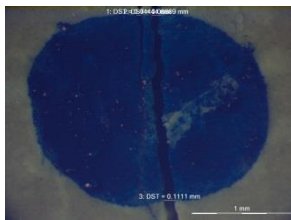
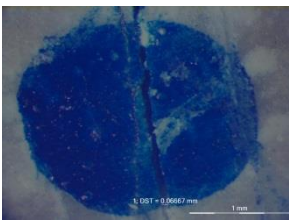
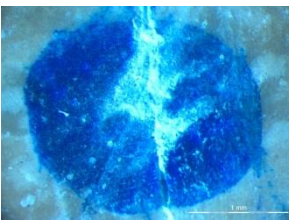
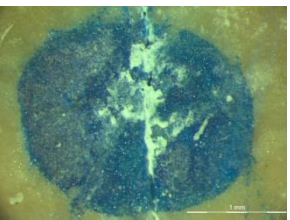
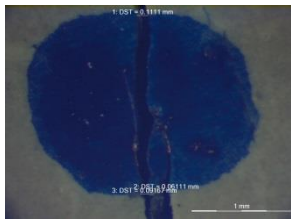
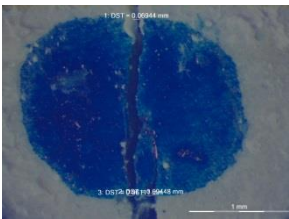
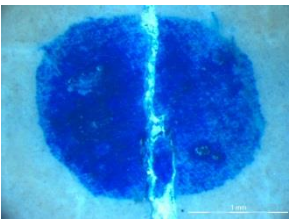
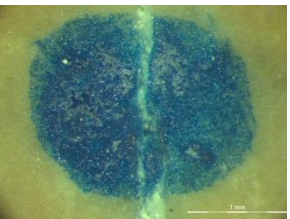
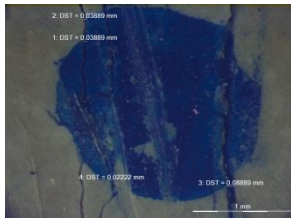
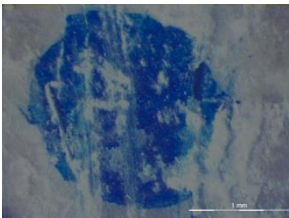
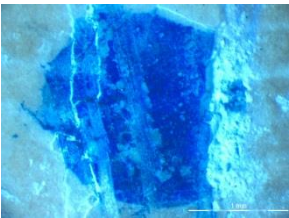
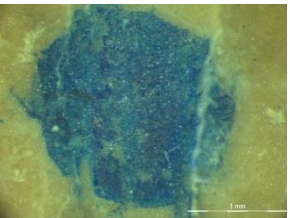
Σχήμα 6.12 Ποσοτική αποτίμηση της αυτο-ίσης για το δοκίμιο M6

Πίνακας 6.17 Πρόοδος αυτο-ίασης άνω επιφανείας δοκιμίου M6

0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
 <p>1. DST = 0.04722 mm 2. DST = 0.07778 mm</p> <p>w: 0.062 mm</p>	 <p>2. DST = 0.03345 mm 1. DST = 0.06395 mm</p> <p>w: 0.049 mm</p>	 <p>2. DST = 0.04000 mm 1. DST = 0.03333 mm</p> <p>w: 0.029 mm</p>	 <p>1. DST = 0.06117 mm</p> <p>w: 0.061 mm</p>
 <p>1. DST = 0.1417 mm 2. DST = 0.06278 mm</p> <p>w: 0.097 mm</p>	 <p>1. DST = 0.07793 mm 2. DST = 0.03811 mm</p> <p>w: 0.057 mm</p>	 <p>1. DST = 0.036 mm</p> <p>w: 0.036 mm</p>	 <p>1. DST = 0.050 mm 2. DST = 0.06117 mm</p> <p>w: 0.050 mm</p>
 <p>1. DST = 0.04722 mm 3. DST = 0.09667 mm 5. DST = 0.05833 mm 6. DST = 0.075 mm 4. DST = 0.06111 mm</p> <p>w: 0.065 mm</p>	 <p>1. DST = 0.01999 mm 3. DST = 0.04817 mm 4. DST = 0.02015 mm</p> <p>w: 0.020 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>
 <p>1. DST = 0.03333 mm 5. DST = 0.08333 mm 4. DST = 0.079 mm 2. DST = 0.05 mm 3. DST = 0.06672 mm</p> <p>w: 0.062 mm</p>	 <p>5. DST = 0.02022 mm 2. DST = 0.02778 mm 1. DST = 0.03333 mm 4. DST = 0.02778 mm 3. DST = 0.02778 mm</p> <p>w: 0.028 mm</p>	 <p>5. DST = 0.03333 mm 2. DST = 0.04444 mm 3. DST = 0.03333 mm 4. DST = 0.02778 mm</p> <p>w: 0.028 mm</p>	 <p>1. DST = 0.01111 mm 2. DST = 0.04444 mm 3. DST = 0.02778 mm 4. DST = 0.02778 mm</p> <p>w: 0.028 mm</p>



Πίνακας 6.18 Πρόοδος αυτο-ίασης κάτω επιφάνειας δοκιμίου M6

0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
 <p>w: 0.063 mm</p>	 <p>w: 0.067 mm</p>	 <p>w: 0.051 mm</p>	 <p>w: 0.025 mm</p>
 <p>w: 0.081 mm</p>	 <p>w: 0.067 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>
 <p>w: 0.088 mm</p>	 <p>w: 0.075 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>
 <p>w: 0.047 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>

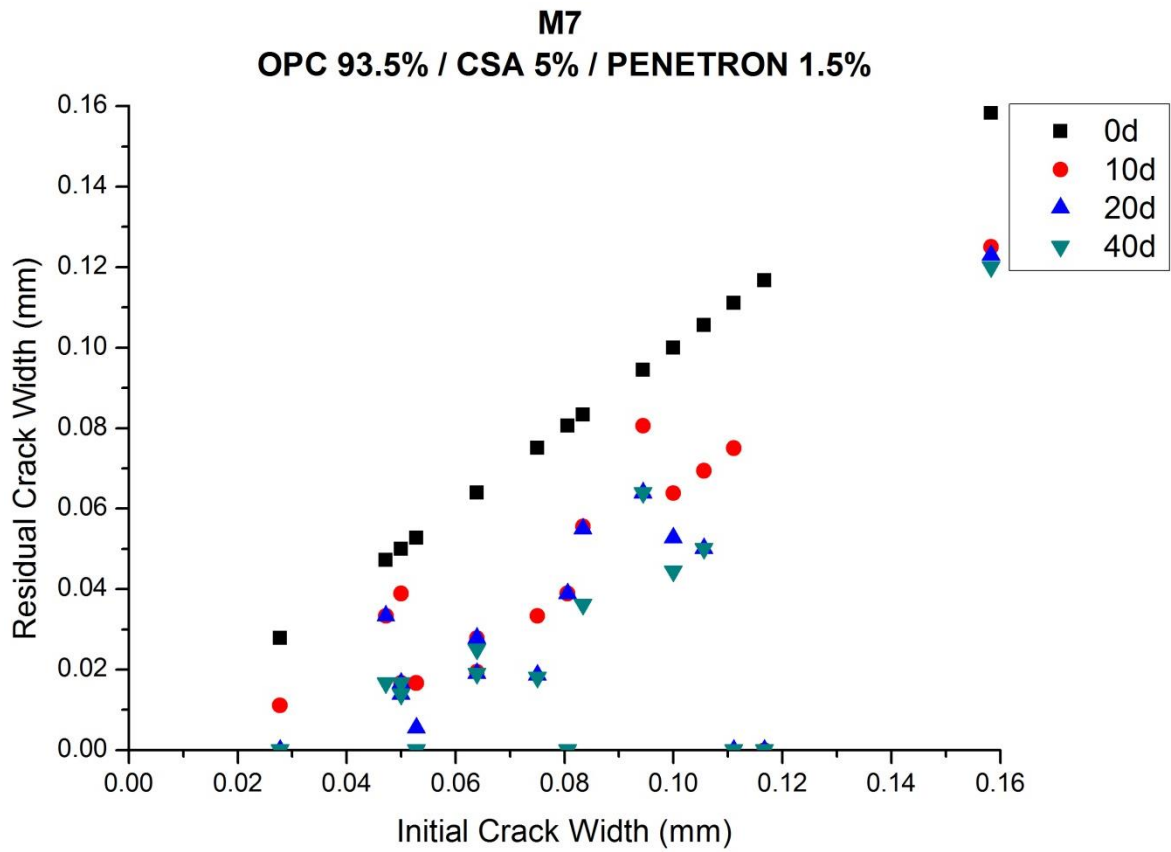
### 6.1.7 Μίγμα M7 - (OPC 93.5%, DENKA CSA#20 5%, Penetron® Admix 1.5%)

Το μίγμα M6 αποτελείται από 93.5% τσιμέντο CEM I 52.5 R, 5% DENKA CSA#20, και 1.5% Penetron® Admix, λόγο νερού προς τσιμέντο (W/C) 0.38, άμμου προς τσιμέντο (S/C) 2, ενώ ίνες και υπερρυστοποιητής προστέθηκαν σε 1.3 και 1% επί το ποσοστό των τσιμεντοειδών αντίστοιχα.

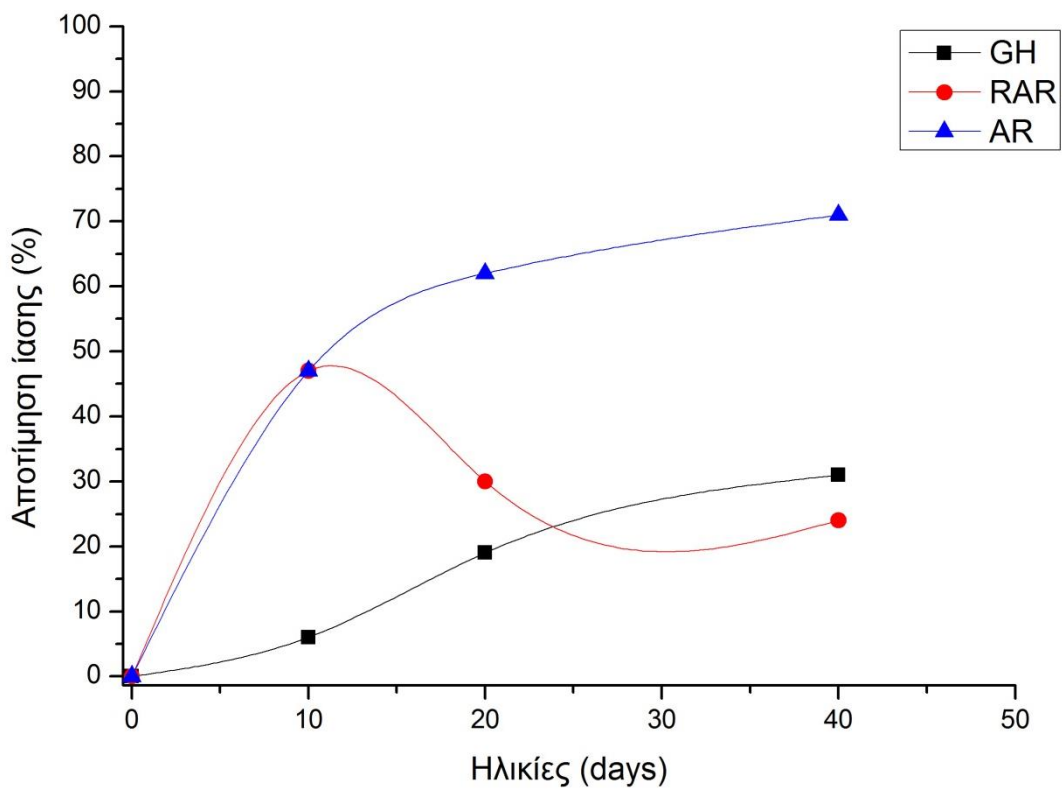
Συνεκτιμώντας τις αριθμητικές τιμές του Πίνακα 6.19 και τα διαγράμματα των Σχημάτων 6.13 και 6.14, παρουσιάζεται ικανοποιητική μείωση της επιφάνειας της ρωγμής με ποσοστό άνω του 50 %, πλην όμως, ο βαθμός ίασης είναι αρκετά κάτω από αυτό. Αποτέλεσμα είναι, το παρόν μίγμα να μη θεωρείται κατάλληλο για αυτο-ίαση. Επίσης, το βήμα μείωσης παρουσιάζει φθίνουσα πορεία, η οποία φανερώνει τη δυσκολία της αυτο-ίασης κάτω από αυτές τις αναλογίες. Τέλος, στους Πίνακες 6.20 και 6.21 παρουσιάζονται οι φωτογραφίες της στερεοσκοπικής επιθεώρησης.

Πίνακας 6.19 Πρόοδος αυτο-ίασης στις 4 ηλικίες για το M7

Επιφάνειες	A/A	Μέγεθος (εύρος) ρωγμών (mm)			
		0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
Άνω Επιφάνεια	1	0.158	0.125	0.123	0.120
	2	0.050	0.017	0.014	0.014
	3	0.075	0.033	0.019	0.018
	4	0.028	0.011	0	0
	5	0.053	0.017	0.006	0
	6	0.064	0.028	0.028	0.025
	7	0.050	0.039	0.017	0.017
	8	0.064	0.019	0.019	0.019
Κάτω Επιφάνεια	1	0.111	0.075	0	0
	2	0.117	0	0	0
	3	0.084	0.056	0.055	0.036
	4	0.081	0.039	0.039	0
	5	0.106	0.069	0.050	0.050
	6	0.094	0.080	0.064	0.064
	7	0.047	0.033	0.033	0.017
	8	0.100	0.064	0.053	0.044
Βαθμός Ίασης GH (%)		0	6	19	31
Μείωση Επιφάνειας Ρωγμής AR (%)		0	47	62	71
Βήμα μείωσης RAR (%)		0	47	30	24

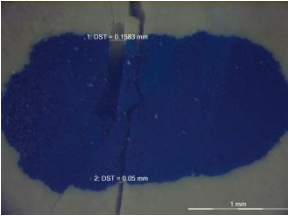
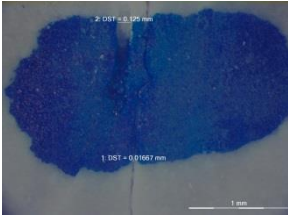
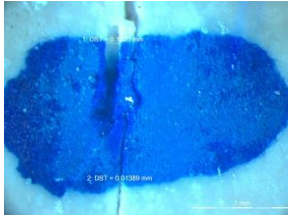
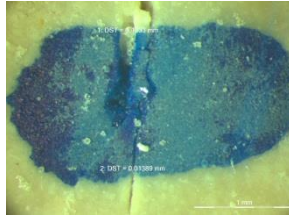
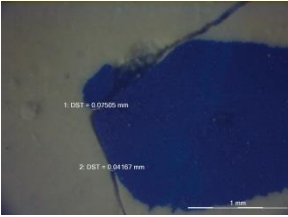
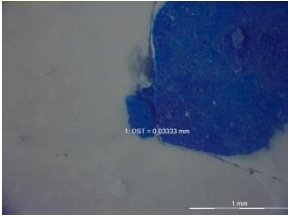
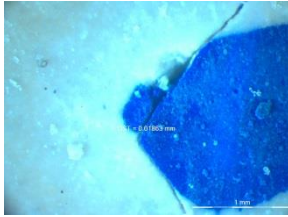
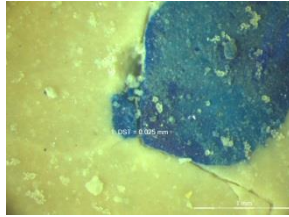
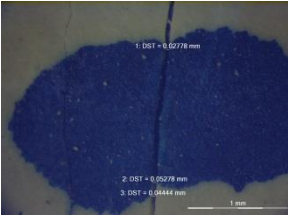
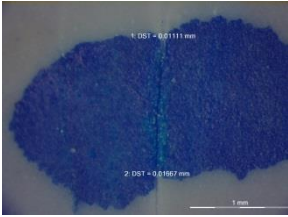
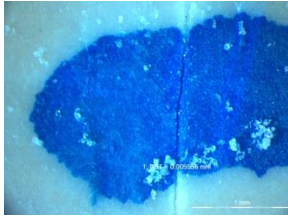
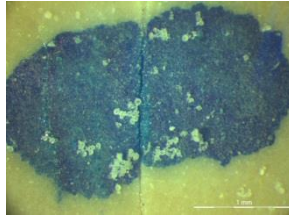
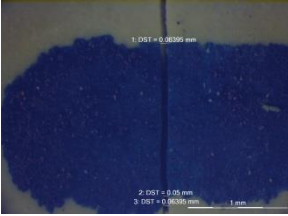
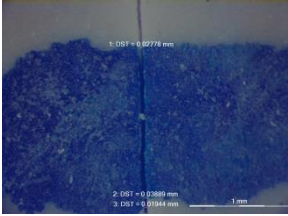
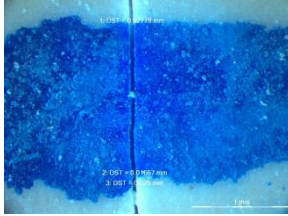
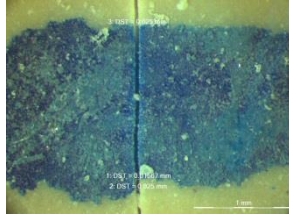


Σχήμα 6.13 Πρόσδος αυτο-ίσης του δοκιμίου M7



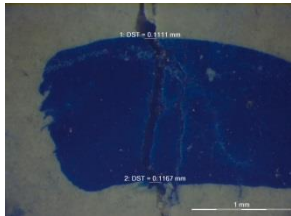

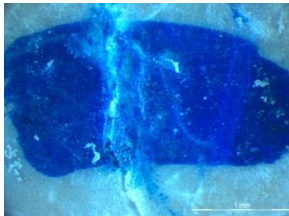

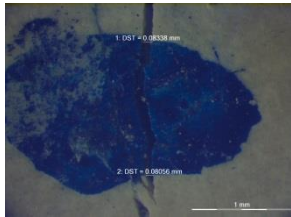
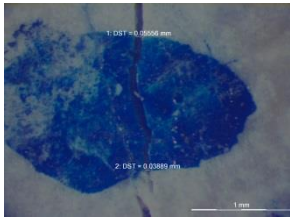
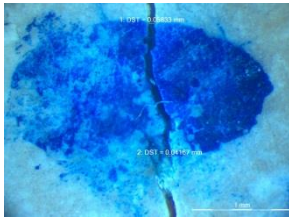
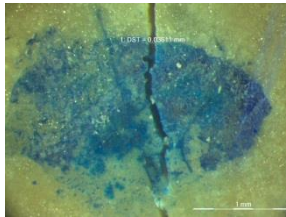
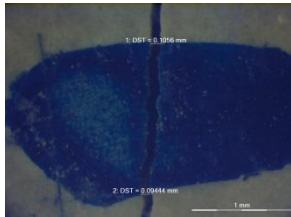
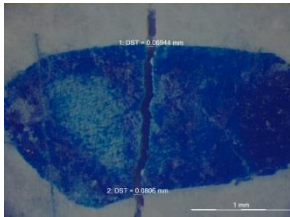
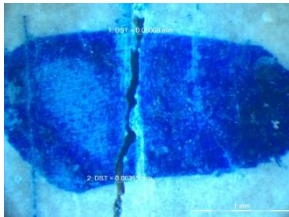
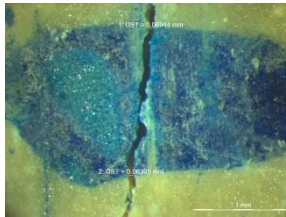
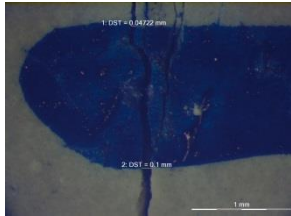
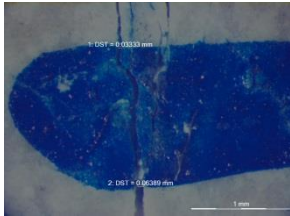
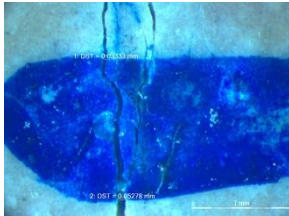
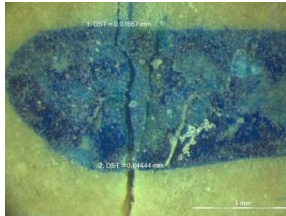
Σχήμα 6.14 Ποσοτική αποτίμηση της αυτο-ίσης για το δοκίμιο M7

Πίνακας 6.20 Πρόοδος αυτο-ίασης άνω επιφανείας δοκιμίου M7

0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
 <p>w: 0.104 mm</p>	 <p>w: 0.071 mm</p>	 <p>w: 0.068 mm</p>	 <p>w: 0.074 mm</p>
 <p>w: 0.058 mm</p>	 <p>w: 0.033 mm</p>	 <p>w: 0.019 mm</p>	 <p>w: 0.025 mm</p>
 <p>w: 0.042 mm</p>	 <p>w: 0.014 mm</p>	 <p>w: 0.006 mm</p>	 <p>w: 0 mm</p>
 <p>w: 0.059 mm</p>	 <p>w: 0.029 mm</p>	 <p>w: 0.023 mm</p>	 <p>w: 0.022 mm</p>



Πίνακας 6.21 Πρόοδος αυτο-ίασης κάτω επιφάνειας δοκιμίου M7

0 d.	10 d.	20 d.	40 d.
			
w: 0.114 mm	w: 0.075 mm	w: 0 mm	w: 0 mm
			
w: 0.082 mm	w: 0.047 mm	w: 0.050 mm	w: 0.036 mm
			
w: 0.100 mm	w: 0.075 mm	w: 0.057 mm	w: 0.070 mm
			
w: 0.073 mm	w: 0.049 mm	w: 0.043 mm	w: 0.031 mm

## 6.2 Συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της στερεοσκοπικής επιθεώρησης

Με το πέρας της διαδικασίας της στερεοσκοπικής επιθεώρησης, παρατηρήθηκε πως από το σύνολο των δειγμάτων, κανένα δεν έδωσε πλήρη αυτό-ίαση. Αντίθετα, σε όλα τα δείγματα παρατηρήθηκε μείωση της επιφάνειας της ρωγμής, μέχρι την τελική ηλικία των 40 ημερών, άνω του 50 %, ενώ μικρό μέρος αυτών, συγκεκριμένα τρία στα επτά, παρουσίασαν βαθμό ίασης άνω του 50%.

Παρακάτω, θα παρατεθούν πίνακες σύγκρισης των αποτελεσμάτων, οι οποίοι θα αφορούν το βαθμό ίασης και τη μείωση της επιφάνειας της ρωγμής του εκάστοτε μίγματος (**Πίνακας 6.22**), καθώς και το μέγιστο και ελάχιστο εύρος διάρρηξης, που το κάθε μίγμα μπόρεσε να αποκαταστήσει πλήρως (**Πίνακας 6.23**).

Πίνακας 6.22 Βαθμός ίασης και μείωση επιφάνειας ρωγμής

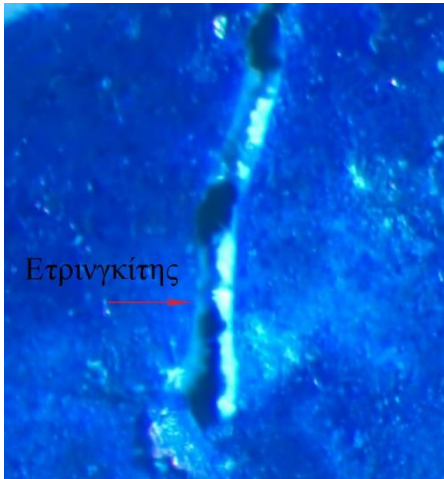
Μίγμα	Βαθμός Ίασης (%)	Μείωση Επιφάνειας Ρωγμής (%)
M1	45	70 / (45)
M2	54	89
M3	39	70
M4	33	63
M5	65	86
M6	75	92
M7	31	71

Πίνακας 6.23 Μέγιστα και ελάχιστα εύρη ρωγμών που έφεραν πλήρη ίαση για το εκάστοτε μίγμα

Μίγμα	Μέγιστο Εύρος (mm)	Ελάχιστο Εύρος (mm)
M1	0.064 / (-)	0.019 / (-)
M2	0.069	0.014
M3	0.061	0.006
M4	0.061	0.031
M5	0.106	0.019
M6	0.111	0.022
M7	0.117	0.028

Από τον **Πίνακα 6.22**, προκύπτει ότι το δοκίμιο M6 παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά με τα περισσότερα σημεία πλήρους αποκατάστασης (75%) και τη μεγαλύτερη μείωση επιφάνειας ρωγμής (92%). Επίσης, από τον **Πίνακα 6.23**, γίνεται αντιληπτό, ότι το ίδιο μίγμα έχει αποκαταστήσει πλήρως μεγαλύτερη ρωγμή σε σχέση με τις άλλες συνθέσεις.

Συγκρίνοντας τα δυαδικά μίγματα, M2, M3, M4 και M5, καλύτερη απόδοση εμφάνισε η σύνθεση η οποία έφερε το πρόσμικτο DENKA CSA#20 (M5). Από την στερεοσκοπική επιθεώρηση, παρατηρήθηκε εμφάνιση ετρινγκίτη, ο οποίος αξιολογήθηκε από τα μορφολογικά του χαρακτηριστικά. Επιπλέον, ο Γελιμίτης ( $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_{12}\text{SO}_4$ ) ή αλλιώς «Ένωση Κλάιν» που περιέχεται στην σύνθεση του DENKA CSA#20, κατά την ενυδάτωση του, υπό την πα-



Σχήμα 6.15 Παρουσία ετρινγκίτη εντός της ρωγμής του μίγματος M5

ρουσία ασβεστίου και θεικών ιόντων, σχηματίζει τη βελονοειδή φάση του ετρινγκίτη, ο οποίος παρέχει και τη δύναμη στο σκυρόδεμα. Η εικόνα του ετρινγκίτη ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ), παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6.15**, το οποίο αποτελεί μέτρηση της 30<sup>ης</sup> ημέρας συντήρησης του μίγματος M5 και έχει ληφθεί από την κάτω επιφάνεια του κυλινδρικού δοκιμίου και πιο συγκεκριμένα από το πρώτο σημείο μέτρησης. Εν συνεχεία, στα δυαδικά μίγματα, ακολουθεί το M2, το οποίο φέρει το χαμηλότερο ποσοστό Penetron<sup>®</sup> Admix. Το συγκεκριμένο πρόσμικτο, αντιδρά με τον πορτλαντίτη ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) προκειμένου να σχηματίσει κρυσταλλικά προϊόντα τα οποία θα πληρώσουν τις ρωγμές και θα μειώσουν το πορώδες. Τέλος, ακολουθούν τα μίγματα M3 και M4 τα οποία έχουν μεγαλύτερη δόση σε Penetron<sup>®</sup> Admix, στα 3.0 και 4.5% αντίστοιχα.

penetron<sup>®</sup> Admix, στα 3.0 και 4.5% αντίστοιχα.

Συνοψίζοντας, από τα δυαδικά μίγματα και κατά φθίνουσα ικανότητα αυτο-ίασης, αυτά κατατάσσονται ως M5, M2, M3, M4.

Στις τριαδικές συνθέσεις, αυτές των M6 και M7, όπως ήδη αναφέρθηκε, το M6 παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα, με περισσότερα σημεία πλήρους ίασης. Στο σημείο αυτό, αξιοσημείωτο είναι, ότι το μίγμα M6 συνδυάζει τις ιδιότητες των δυαδικών μιγμάτων M5 και M2, με τα οποία φέρει κοινές αναλογίες στα τσιμεντοειδή πρόσθετα.

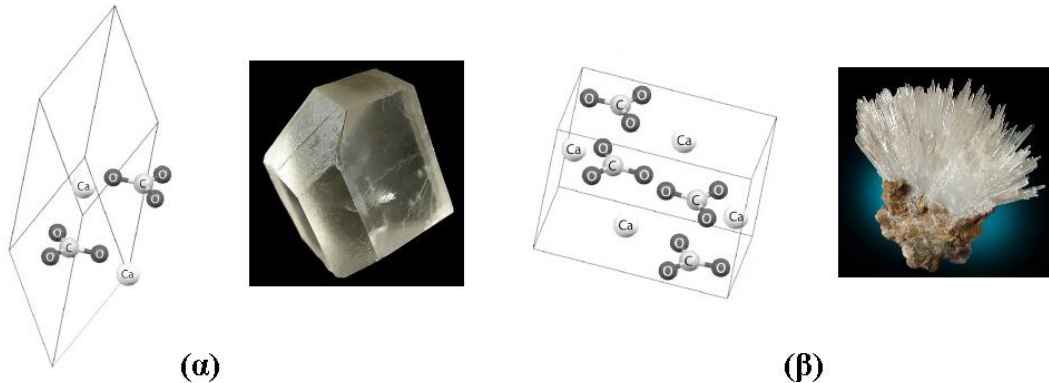
Εν κατακλείδι, μία πιο ολοκληρωμένη συγκριτική εικόνα, όλων των μιγμάτων, ως προς το βαθμό ίασης, είναι η εξής:  $M6 > M5 > M2 > M3 > M4 > M7 > M1$ , ενώ ως προς το βαθμό μείωσης της επιφάνειας της ρωγμής  $M6 > M2 > M5 > M7 > M3 > M4 > M1$ . Το δοκίμιο αναφοράς M1, τίθεται τελευταίο, καθώς η «ίαση» η οποία έχει παρουσιάσει έγκειται στην καταβύθιση πορτλαντίτη στην επιφάνεια της ρωγμής, ενώ στα άλλα δοκίμια τα προϊόντα ενυδάτωσης μεταβολίζονται προς την δημιουργία των δευτερογενών φάσεων από τις οποίες προκύπτει το φαινόμενο της αυτό-ίασης.

### 6.3 Επιθεώρηση των ρωγμών με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM)

Με το πέρας της στερεοσκοπικής επιθεώρησης της τέταρτης ηλικίας, των 40 ημερών, ακολούθησε η παρατήρηση των ζωνών ρηγμάτωσης με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM). Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε, προκειμένου να είναι δυνατή η εποπτεία των δευτερογενών φάσεων της ίασης.

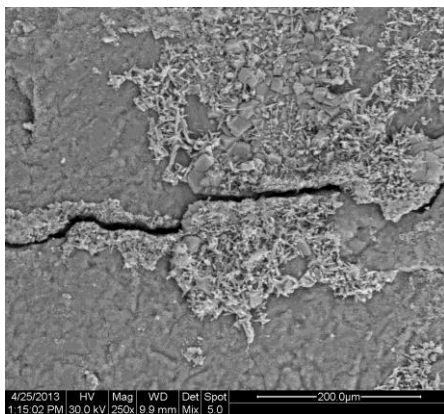
Πιο συγκεκριμένα, στο δοκίμιο M6, το οποίο έφερε την καλύτερη συμπεριφορά, παρουσιάστηκε ανάπτυξη δευτερογενών φάσεων οι οποίες έτειναν να επικαλύψουν πλήρως τις περιοχές ρηγμάτωσης. Μορφολογικά διακρίνονται κρύσταλλοι αραγωνίτη ( $\text{CaCO}_3$ ) (πολυμορφικό ορυκτό του ασβεστίου) και ασβεστίτη ( $\text{CaCO}_3$ ). Η διαφορά των δύο ορυκτών έγκειται στην κρυσταλλική δομή. Στον ασβεστίτη οι ανθρακικές ομάδες ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) σχηματίζουν

τρίγωνα με τον άνθρακα τοποθετημένο στο κέντρο και τα τρία άτομα οξυγόνου τοποθετημένα στις κορυφές του τριγώνου, προσδίδοντας την τριγωνική συμμετρία στο ορυκτό. Στον αραγωνίτη, αντίθετα, οι ανθρακικές ομάδες δεν είναι επίπεδες, αλλά διατάσσονται σε δύο επίπεδα αντίθετων διευθύνσεων, προσδίδοντας έτσι την ρομβική συμμετρία (Σχήμα 6.16).

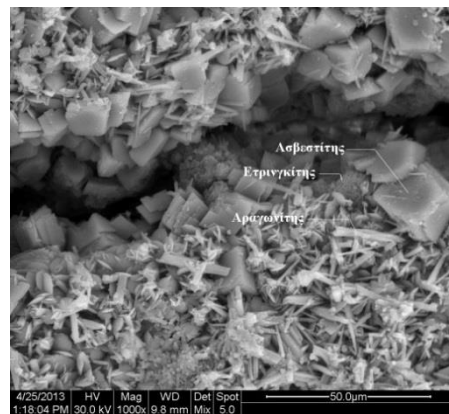


Σχήμα 6.16 Κρυσταλλικό μοντέλο του ασβεστίτη (α) και του αραγωνίτη (β) [29, 30, 31]

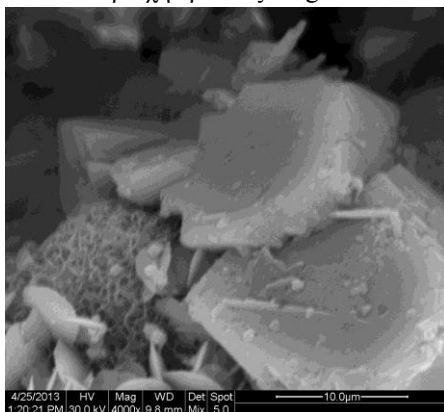
Έτσι, όπως παρουσιάζεται και από τις εικόνες SEM, που παρατίθενται παρακάτω, στα χείλη της ρωγμής παρατηρείται ανάπτυξη βελονοειδών κρυστάλλων αραγωνίτη και τριγωνικών κρυστάλλων ασβεστίτη. Ο αραγωνίτης εν συνεχεία μετατρέπεται σε ασβεστίτη ώστε να λάβει πιο σταθερή δομή με αποτέλεσμα να παρατηρείται η επούλωση της ρωγμής.



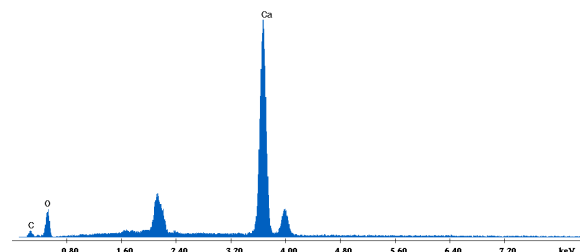
Περιοχή έρευνας Mag×250



Μεγέθυνση περιοχής έρευνας Mag×1000



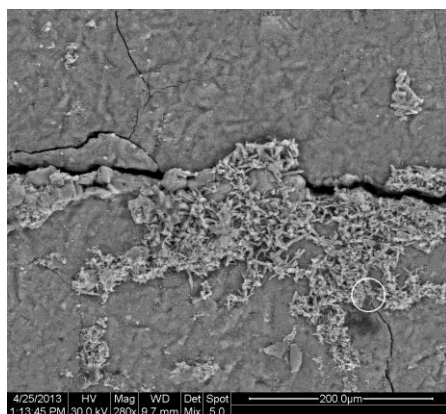
Κρύσταλλοι Ασβεστίτη Mag×4000



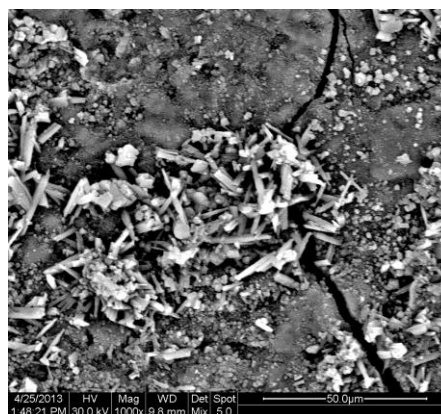
EDAX Ασβεστίτη

Σχήμα 6.17 Διαδοχικές μεγεθύνσεις της προς ανάλυσης δευτερογενούς φάσης επικάλυψης και δημιουργία Ασβεστίτη

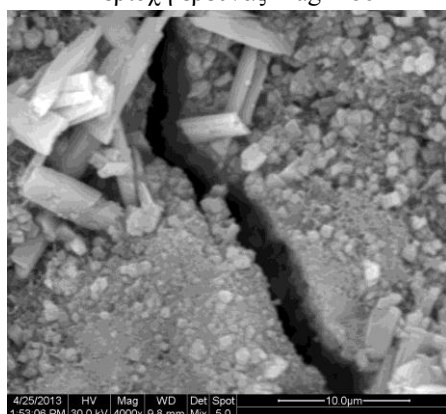




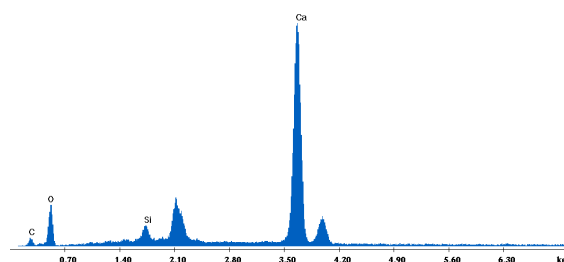
Περιοχή έρευνας Mag×280



Μεγέθυνση περιοχής έρευνας Mag×1000



Κρύσταλλοι Αραγωνίτη Mag×4000

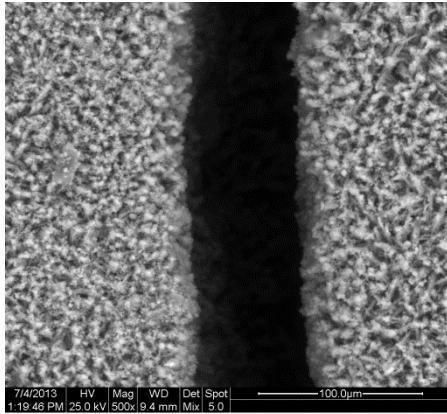


EDAX Αραγωνίτη

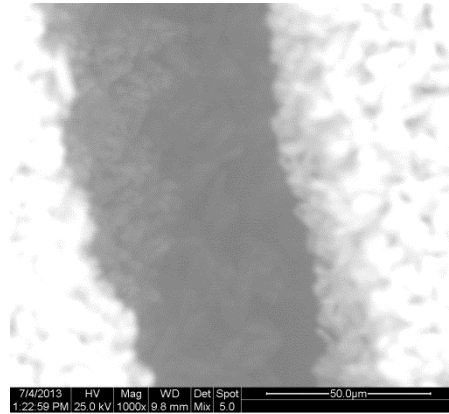
Σχήμα 6.18 Διαδοχικές μεγεθύνσεις της προς ανάλυσης δευτερογενούς φάσης επικάλυψης και δημιουργία Αραγωνίτη

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί, ότι παρατηρήθηκε η μείωση των ρωγμών να πραγματοποιείται με ανάπτυξη επιμέρους φάσεων από τα τοιχώματα των ρωγμών προς στο μέσον (περίπου) της ρωγμής.

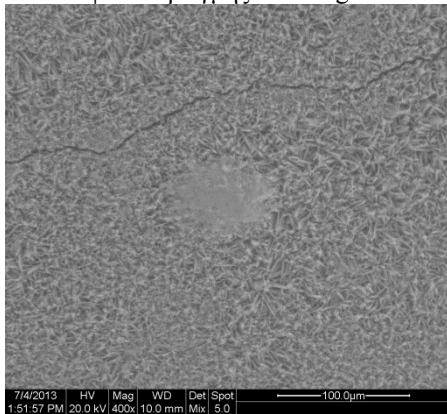
Θέλοντας να συγκριθούν τα αποτελέσματα του βέλτιστου μίγματος (M6) με τα άλλα δύο, τα οποία έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα και με το δείγμα αναφοράς, πραγματοποιήθηκε ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης στα δείγματα M2, M5 και M1. Στο **Σχήμα 6.19**, παρατηρείται σύγκριση μεταξύ των προηγούμενων δειγμάτων με το M6, ως προς την μορφολογία της επιφάνειας και τις φάσεις που παρουσιάζονται στο εσωτερικό της ρωγμής. Όπως εμφανίζεται, στο δείγμα αναφοράς M1, παρουσιάζεται η ίδια οικογένεια φάσεων στην επιφάνεια γύρω από την ρωγμή όσο και μέσα σε αυτή. Στο δείγμα M2, η επιφάνεια είναι καλυμμένη από βελονοειδείς κρυστάλλους οι οποίοι παρουσιάζονται και εντός της ρωγμής, καθώς αναπτύσσονται και τείνουν προς την ίαση αυτής. Αντίθετα, στο δείγμα M5 στην επιφάνεια γύρω από τη ρωγμή εμφανίζεται περίπου ομοιόμορφη διασπορά δύο διακριτών κρυσταλλικών φάσεων, βελονοειδούς και συμπαγούς γεωμετρίας, ενώ στο εσωτερικό αυτής παρατηρούνται πλακοειδείς και βελονοειδείς κρύσταλλοι οι οποίοι είναι καλυμμένοι από μία επιφάνεια μικρών, βοτρυοειδούς μορφολογίας κρυστάλλων οι οποίοι στην ανάλυση EDAX έδιναν ίχνη θείου. Τέλος, στο δείγμα M6, στην περιβάλλουσα επιφάνεια της ρωγμής, παρατηρούνται δύο οικογένειες κρυσταλλικών φάσεων, οι οποίες αναλύθηκαν προηγούμενος, ενώ στο εσωτερικό της ρωγμής, παρατηρείται η εκατέρωθεν από το κέντρο αυτής ανάπτυξη των κρυστάλλων, οι οποίοι συγκλίνουν ούτως ώστε να πραγματοποιηθεί η ίαση.



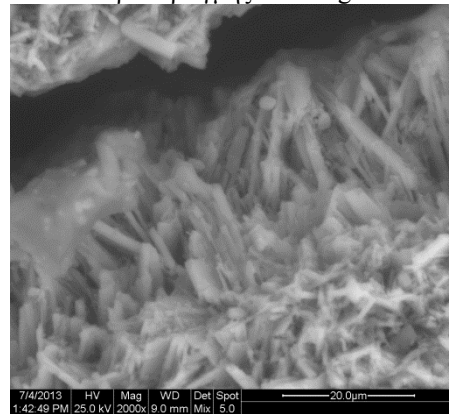
Επιφάνεια ρωγμής M1 Mag×500



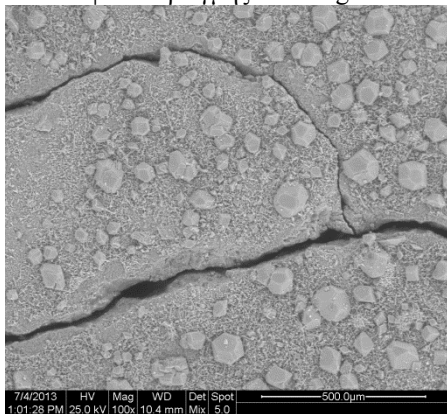
Εσωτερικό ρωγμής M1 Mag×1000



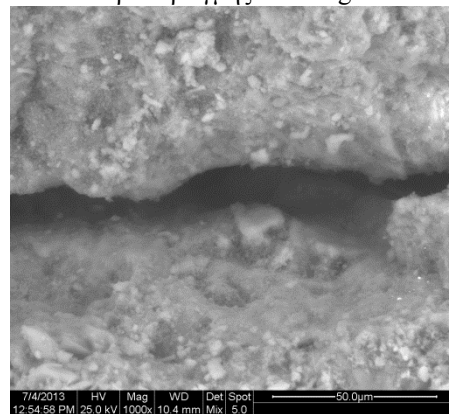
Επιφάνεια ρωγμής M2 Mag×400



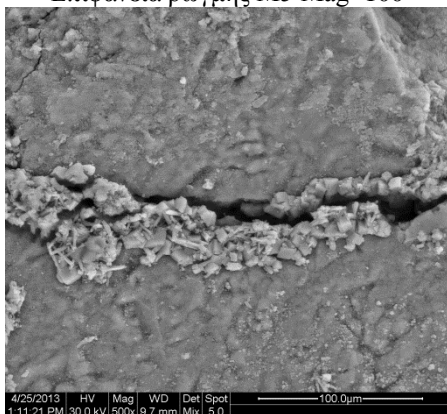
Εσωτερικό ρωγμής M2 Mag×2000



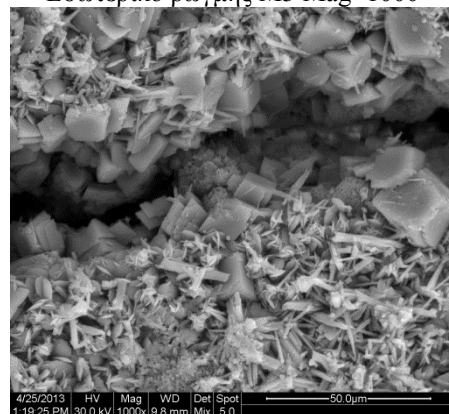
Επιφάνεια ρωγμής M5 Mag×100



Εσωτερικό ρωγμής M5 Mag×1000



Επιφάνεια ρωγμής M6 Mag×500



Εσωτερικό ρωγμής M6 Mag×1000

Σχήμα 6.19 Σύγκριση των επιφανειών και των εσωτερικών των ρωγμών για τα δείγματα M1, M2, M5 και M6

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 Συμπεράσματα

Τα κύρια συμπεράσματα, που προκύπτουν από την παρούσα μελέτη επί του φαινομένου της αυτο-ίασης (self-healing) τεχνητών ρωγμών σε κονιάματα τσιμέντου με χρήση διαφόρων εμπορικών προσθέτων, είναι τα ακόλουθα:

- Η αυτο-ίαση των κονιαμάτων λειτούργησε ικανοποιητικά και παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του πλάτους των ρωγμών. Ειδικά σε κάποιες συνθέσεις, η αυτο-ίαση ήταν σχεδόν πλήρης.
- Αξιολογήθηκε και ερμηνεύθηκε η συμβολή των χρησιμοποιηθέντων εμπορικών προσθέτων στη διαδικασία της αυτο-ίασης των κονιαμάτων. Την καλύτερη συμπεριφορά αυτο-ίασης παρουσίασε το κονίαμα του οποίου το συνδετικό υλικό περιείχε και τα δύο εμπορικά πρόσθετα DENKA CSA#20 (10% w/w) και Penetron® Admix (1.5% w/w).
- Η μελέτη των δειγμάτων με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) είναι απόλυτα απαραίτητη για την ερμηνεία τόσο της αυτο-ίασης όσο και του μηχανισμού δράσης των χρησιμοποιηθέντων προσθέτων. Πιστοποιήθηκε η ανάπτυξη στις ρωγμές κρυστάλλων αραγωνίτη, ασβεστίτη και ετρινγκίτη, συμβάλλοντας στη μείωση ή και στο πλήρες κλείσιμο της ρωγμής.
- Εισήχθησαν οι έννοιες του βαθμού ίασης (Grade of Healing - GH), του ποσοστού μείωσης της επιφάνειας της ρωγμής (Area Reduction - AR) και του βήματος μείωσης τους εύρους της επιφάνειας της ρωγμής (RAR) για τη στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων της εξέλιξης του μεγέθους των ρωγμών στο στερεοσκόπιο.





# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Τσίμας, Σ. Τσιβιλής, Σ. Επιστήμη & Τεχνολογία Τσιμέντου. - Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2010
- [2] <http://sfrang.com/historia/selida204.htm>
- [3] NL Agency, Ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovation. Self-healing materials concept and applications. Second edition, 2011
- [4] Qian S, Zhou J, de Rooij M.R, Schlangen E, Ye G, van Breugel K. Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials. *Cem Concr Compos* 2009;31:613-21.
- [5] Pang JWC, Bond IP. 'Bleeding composites' - damage detection and self-repair using a biomimetic approach. *Composites Part A* 2005;36:183-8.
- [6] Pang JWC, Bond IP. A hollow fiber reinforced polymer composite encompassing self-healing and enhanced damage visibility. *Compos Sci Technol* 2005;65:1791-9.
- [7] Wu M, Johannesson B, Geiker M. A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials* 2012;28:571-83.
- [8] Dry C. Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices. *Smart Mater Struct* 1994;3(2):118-23.
- [9] Dry C, McMillan W. Three-part methyl meth-acrylate adhesive system as an internal delivery system for smart responsive concrete. *Smart Mater Struct* 1996;5(3):297-300.
- [10] Dry C. Three design for the internal release of sealants, adhesives and waterproofing chemical into concrete to release. *Cem Concr Res* 2000;30:1969-77
- [11] Li VC, Lim YM, Chan YW. Feasibility of a passive smart self-healing cementitious composite. *Composites B* 1998;29:819-27.
- [12] Nishiwaki T, Mihashi H, Jang BK, Miura K. Development of self-healing system for concrete with selective heating around crack. *J Adv Concr Technol* 2006;4(2):267-75
- [13] White SR, Sottos NR, Geubelle PH, Moore JS, Kessler MR, Sriram SR, et al. Autonomic healing of polymer composites. *Nature* 2001;409(6822):794.
- [14] Ahn TH, Kishi T. The effect of geomaterials on the autogenous healing behavior of cracked concrete. In: *Proceeding of 2<sup>nd</sup> ICCRRR, Cape Town, South Africa; 2008.* p. 235-40.
- [15] Ahn TH, Kishi T. Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various miner admixtures. *J Adv Concr Technol* 2010;8(2):171-86.
- [16] Gollapudi UK, Knutson CL, Bang SS, Islam MR. A new method for controlling leaching through permeable channels. *Chemosphere* 1995;30:695-705.
- [17] Jefferson A, Joseph C, Lark R, et al. A new system for crack closure of cementitious materials using shrinkable polymers. *Cem Concr Res* 2010;40:795-801.
- [18] Song G, Ma N, Li HN. Application of shape memory alloys in civil structures. *Eng Struct* 2006;28:1266-74.
- [19] <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2004/Tempered.Martensite/tempered.martensite.html>

- [20] Sisomphon K, Copuroglu O, Koenders E.A.B. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. *Cement & Concrete Composites* 2012;34:566-74
- [21] Μπατής, Γ. Φθορά και προστασία υλικών Φθορά και προστασία οπλισμένου σκυροδέματος Ε.Μ.Π. Σημειώσεις ΔΠΜΣ «Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών», 2006
- [22] Breugel K. van. Is there a market for self-healing cement-based materials. *Proceedings of the First International Conference on Self-Healing Materials*, Delft, Netherlands, 2007.
- [23] [catalogue.newchem.org/great-britain/Up\\_files%5CMDS%20Denka%20CSA.pdf](http://catalogue.newchem.org/great-britain/Up_files%5CMDS%20Denka%20CSA.pdf)
- [24] <http://www.penetron.gr/>
- [25] [http://www.penetron.com/uploads/Penetron\\_Admix\\_MSDS\\_D04.pdf](http://www.penetron.com/uploads/Penetron_Admix_MSDS_D04.pdf)
- [26] Παπαθεοδώρου, Θ.Κ. Οικοδομική. - Έβδομη έκδοση, ΑΘΗΝΑ 1965
- [27] [http://www.domylco.gr/gr/products/item/chemium-172?category\\_id=8](http://www.domylco.gr/gr/products/item/chemium-172?category_id=8)
- [28] [http://www.prairie.com/pdfs/harbourite\\_prod\\_bulletin.pdf](http://www.prairie.com/pdfs/harbourite_prod_bulletin.pdf)
- [29] Edwin A. Schauble, Prosenjit Ghosh, John M. Eiler. Preferential formation of  $^{13}\text{C}$  -  $^{18}\text{O}$  bonds in carbonate minerals, estimated using first-principles lattice dynamics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. V70, Issue 10, 2006;2510-29.
- [30] [www.johnbetts-fineminerals.com/jhbnyc/mineralmuseum/picshow.php?id=16420](http://www.johnbetts-fineminerals.com/jhbnyc/mineralmuseum/picshow.php?id=16420)
- [31] [www.johnbetts-fineminerals.com/jhbnyc/mineralmuseum/picshow.php?id=20416](http://www.johnbetts-fineminerals.com/jhbnyc/mineralmuseum/picshow.php?id=20416)

# **ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ**



# ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

## ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Μ. ΑΣΠΙΩΤΗΣ

### Προσωπικές Πληροφορίες

Επώνυμο: Ασπιώτης  
Όνομα: Κωνσταντίνος  
Όνομα Πατρός: Μάρκος  
Όνομα Μητρός: Μαριάνθη

Υπηκοότητα: Ελληνική

Ημερομηνία Γέννησης: 15 Ιουλίου 1987  
Τόπος Γέννησης: Χολαργός Αττικής

Φύλο: Άρρεν

**2013-Σήμερα:** Υποψήφιος Διδάκτωρ της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

#### Θέμα Διδακτορικής Διατριβής

«Διερεύνηση παραμέτρων που διαμορφώνουν την ενσωμάτωση χαρακτηριστικών αυτο-ίασης στα τσιμεντοειδή υλικά»

### Στοιχεία Επικοινωνίας

Διεύθυνση Οικίας

Οδός: Ερρίκου Φορνέζη  
Αριθμός: 75  
Ταχυδρομικός Κώδικας: 18 345  
Πόλη: Μοσχάτο – Αττικής  
Χώρα: Ελλάδα

Τηλεφωνική Επικοινωνία

Τηλέφωνο: +30 2109565153  
Κινητό: +30 6939490390

Ηλεκτρονικό Ταχυδρομείο

[aspiotiskonstantinos@gmail.com](mailto:aspiotiskonstantinos@gmail.com)

### Τίτλοι Σπουδών

- **Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών**

Πτυχίο Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος  
(Λίαν Καλώς – 7,25 “Επτά και Είκοσι Πέντε Εκατοστά”)

Τίτλος διπλωματικής εργασίας “ Τρισδιάστατο Γεωλογικό – Γεωτεχνικό Μοντέλο της σήραγγας Renfe – Macgorozo της γραμμής L9 του μετρό Βαρκελώνης – Ισπανίας” (Βαθμός: Άριστα 10), Επιβλέπων Μαρία Χ. Σταυροπούλου, Επίκουρος Καθηγήτρια του τομέα Δυναμικής, Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

### Επαγγελματική Δραστηριότητα

- **1 Μαΐου 2008 – Σήμερα:** Βοηθητικό εργαστηριακό προσωπικό, στην διενέργεια ορυκτολογικών αναλύσεων και ερμηνείας των αποτελεσμάτων, δειγμάτων πετρωμάτων, με τη χρήση οργάνου Περιθλασιομετρίας Ακτίνων Χ (XRD) στα εργαστήρια Οικονομικής Γεωλογίας – Γεωχημείας, του Τομέα Οικονομικής Γεωλογίας – Γεωχημείας, του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, της Σχολής Θετικών Επιστημών, του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

- **1 Ιουλίου 2008 – 31 Αυγούστου 2008:** Πρακτική άσκηση, στα πλαίσια του προγράμματος ΕΠΕΑΕΚ II, στην Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Χίου, στην Διεύθυνση Τεχνικών Υπηρεσιών. Κατά την περάτωση της ασκήσεως μου, εκπαιδεύτηκα σε γνωστικά αντικείμενα που αφορούν θέματα Τεχνικής Γεωλογίας και Εδαφομηχανικής – Βραχομηχανικής. Πιο συγκεκριμένα, στον ποιοτικό έλεγχο σκυροδέματος και πρώτων υλών, στην γεωτεχνική μελέτη της κατασκευής του χωμάτινου φράγματος «Καλαμωτής – Νήσου Χίου», στην μελέτη έργου οδοποιίας με τίτλο «Βελτιώσεις και παρακάμψεις οικισμών του οδικού άξονα Χίου – Καρδαμύλων», καθώς και στην μελέτη Χ.Υ.Τ.Α. (βόρειας και νότιας Χίου). Επίσης εκπαιδεύτηκα, πρακτικά, με την αποτύπωση τοπογραφικών διαγραμμάτων, στην χρήση του υπολογιστικού προγράμματος AutoCAD 2007. Χρηματοδότηση προγράμματος: Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων.

## Συμμετοχή σε Ερευνητικά Προγράμματα

1. **1 Αυγούστου 2006 – 31 Αυγούστου 2006:** Συμμετείχα στο ερευνητικό πρόγραμμα, με τίτλο «Έκθεση απολιθωμάτων θηλαστικών Κερασιάς Ευβοίας», όπου η απασχόληση μου ήταν στην επεξεργασία του εκθεσιακού υλικού (Συντήρηση οστών).  
Επιστημονικός υπεύθυνος του προγράμματος: Καθηγητής Γεώργιος Θεοδώρου, Τομέας Ιστορικής Γεωλογίας και Παλαιοντολογίας.  
Φορέας χρηματοδότησης: Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Ευβοίας.
2. **1 Ιουνίου 2009 – 28 Φεβρουαρίου 2010:** Συμμετείχα στο ερευνητικό πρόγραμμα, με τίτλο «Investigation of Rocks that may Contain Asbestos Minerals in the Troodos Region, Cyprus», όπου η ενασχόληση μου ήταν στην προετοιμασία δειγμάτων, ορυκτολογικές, πετρολογικές αναλύσεις και ερμηνεία των αποτελεσμάτων με τη χρήση μικροσκοπίας και ακτίνων Χ (SEM – EDS & X – Ray Diffractometer).  
Επιστημονικός υπεύθυνος του προγράμματος: Καθηγητής Μιχαήλ Σταματάκης, Τομέας Οικονομικής Γεωλογίας και Γεωχημείας, Πρόεδρος του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.  
Φορέας χρηματοδότησης: Ecozem n.v. Ιδιωτική τεχνική εταιρία, ειδικευμένη στην εκτέλεση έργων στον τομέα του περιβάλλοντος. Έδρα, Βέλγιο (Βρυξέλες).

## Συνέδρια και Ημερίδες

- **Δημοσιεύσεις σε Πρακτικά Συνεδρίων**
  1. 9<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής  
«Η συμβολή της χημικής Μηχανικής στην αειφόρο ανάπτυξη»  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα, 23 – 25 Μαΐου 2013  
ΑΥΤΟ-ΙΑΣΗ (SELF-HEALING) ΡΩΓΜΩΝ ΣΕ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ  
Κ. Ασπιώτης<sup>1</sup>, Ε. Μπαδογιάννης<sup>2</sup>, Σ. Τσιβιλής<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π. Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Αθήνα  
<sup>2</sup>Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Αθήνα
  2. 2<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Φοιτητών Γεωλογίας  
Εκτεταμένες Περιλήψεις, Αθήνα 3 – 5 Ιουνίου 2008, Σελίδα 23

ΕΠΑΝΕΞΕΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΧΙΟΥ ΤΟΥ 1881 –  
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΒΛΑΒΩΝ  
Ασπιώτης Κ.<sup>1</sup>

• **Παρακολούθηση σε Συνέδρια**

1. 1<sup>ο</sup> Συνέδριο Πανελληνίου Σωματίου Εργαζομένων στα Ελληνικά Πετρέλαια  
Ξενοδοχείο CARAVEL  
Αθήνα 22 – 23 Ιανουαρίου 2010
2. Εργαστήριο Σεισμολογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών  
Ευρωπαϊκό Κέντρο Πρόληψης και Πρόγνωσης των Σεισμών  
Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών  
«10 χρόνια από το σεισμό της Αθήνας: εμπειρίες και διδάγματα»  
Αμφιθέατρο «Αριστοτέλης» Τμήματος Φυσικής  
Πανεπιστημιούπολη Ζωγράφου  
3 – 4 Δεκεμβρίου 2009
3. 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Γεωεπιστημονικό Συμπόσιο  
Ξενοδοχείο Esperia Palace  
29 Φεβρουαρίου – 1<sup>η</sup> Μαρτίου 2008
4. 11<sup>ο</sup> Διεθνές Συνέδριο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας  
Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος  
Πανεπιστημιούπολη – 157 84, Αθήνα  
Θέμα «Γεωπεριβάλλον: χθες, σήμερα, αύριο»  
24 – 26 Μαΐου 2007

• **Ανακοινώσεις σε Ημερίδες**

1. Ημερίδα Φοιτητών Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος  
Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος  
Θέμα «Μάρμαρα / Γρανίτες»  
Συνεδριακό Κέντρο Μήλου Γ. Ηλιόπουλος  
12 Ιουνίου 2009
2. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος  
Πρακτική Άσκηση Φοιτητών – ΕΠΕΑΕΚ II  
Θέμα «Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Πρακτικής Άσκησης 2005 – 2008»  
Αμφιθέατρο «Ι. Δρακόπουλος»  
4 Ιουνίου 2009

• **Παρακολούθηση σε Ημερίδες**

1. National Technical University of Athens  
International Conference on the *promotion of sustainability and energy efficiency in the Tourism Sector*  
Divani Caravel Hotel  
10<sup>th</sup> December, 2012  
Athens, Greece
2. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο / Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Μονάδα Καινοτομίας και Επιχειρηματικότητας

- Θέμα Δημερίδα «Ερευνώ – Καινοτομώ – Επιχειρώ»  
Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών  
Παρασκευή 4 & Σάββατο 5 Μαΐου 2012
3. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Σχολή Θετικών Επιστημών  
Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος  
Θέμα «Κλίμα – Παλαιοπεριβάλλον – Γεωλογικές Διεργασίες»  
Αμφιθέατρο Ι.Δρακόπουλος  
Παρασκευή 10 Ιουνίου 2011
  4. Σύλλογος Ελλήνων Γεωλόγων (Σ.Ε.Γ.)  
Μέλος της Ευρωπαϊκής Ομοσπονδίας Γεωλόγων (Ε.Φ.Γ.)  
Θέμα «ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΓΕΩΛΟΓΩΝ»  
26 Νοεμβρίου 2010  
Εμπορικό και Βιομηχανικό Επιμελητήριο Αθηνών
  5. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Σχολή Θετικών Επιστημών  
Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος  
Θέμα «ΓΕΩΛΟΓΙΑ, ΑΝΑΠΤΥΞΗ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ & ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ»  
Αμφιθέατρο Ι. Δρακόπουλος  
Τρίτη 19 Οκτωβρίου 2010
  6. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος  
Τομέας Δυναμικής, Τεκτονικής & Εφαρμοσμένης Γεωλογίας  
Θέμα «Από τη Γη στο Ηλιακό μας σύστημα»  
Ξενοδοχείο CARAVEL  
7 Μαΐου 2010
  7. ΓΕΩΤ.Ε.Ε. / Παράρτημα Ανατ. Στερεάς Ελλάδας  
Θέμα «ΑΣΩΠΟΣ: μια ανοικτή περιβαλλοντική πληγή – Παρόν και μέλλον»  
Ξενοδοχείο TITANIA  
21 Απριλίου 2010
  8. Ελληνική Επιτροπή Υδρογεωλογίας  
Θέμα «Σύγχρονες προσβολές των υδάτινων συστημάτων και του περιβάλλοντος»  
Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος  
Αμφιθέατρο Δρακόπουλος  
30 Απριλίου 2009
  9. Ελληνική Επιτροπή Τεχνικής Γεωλογίας  
της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας  
Θέμα «ΟΙ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ»  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αίθουσα Τελετών, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου,  
Αθήνα  
25 Φεβρουαρίου 2008



10. ΓΕΩΤ.Ε.Ε. / Παράρτημα Ανατ. Στερεάς Ελλάδας  
Θέμα «Ένας νέος γεωλόγος στην αγορά εργασίας»  
Ξενοδοχείο TITANIA  
20 Ιανουαρίου 2007

### **Επικουρία σε Επιστημονικές Δημοσιεύσεις**

1. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy  
Volume 78, Issue 3, March 2011, Pages 949 – 960  
The chemistry and preparation of tantalum complexes with 2,3 – dihydroxy benzoic acid:  
Experimental and theoretical investigation  
Despina Hatzipanayioti and Konstantinos Kontotheodorou  
(Προετοιμασία δείγματος και ερμηνεία των αποτελεσμάτων με χρήση περιθλασιόμετρου ακτίνων Χ «XRD»)

### **Συμμετοχή σε Επιστημονικούς Συλλόγους – Επιμελητήρια**

- Γεωτεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (ΓΕΩΤ.Ε.Ε)  
Α.Μ.: 4-05000  
Αριθμός Άδειας Άσκησης Επαγγέλματος: 405000

### **Ξένες Γλώσσες**

1. **Αγγλικά:** Πολύ καλή γνώση, Lower – University of Central Lancashire «ESB – LEVEL 1  
CERTIFICATE IN ESOL – INTERNATIONAL ALL MODES (B2) – MAY 2009»
2. **Γαλλικά:** Καλή γνώση (Επίπεδο Delf A2)
3. **Ιαπωνικά:** Μέτρια γνώση

### **Ατομικές Δεξιότητες και Ικανότητες**

- **Χρήση οργάνων**
  1. XRD
  2. TG
  3. SEM – EDS
  4. Πολωτικό μικροσκόπιο
  5. Στερεοσκόπιο
  6. Συσκευών προετοιμασίας δειγμάτων (Σπαστήρας, Κονιοποιητής, Φούρνοι)
- **Δεξιότητες πληροφορικής**
  1. Κάτοχος πτυχίου πληροφορικής ECDL Core (09 / 11 / 2008)
  2. Γνώση χρήσης AutoCAD 2013
  3. Γνώση χρήσης MatLAB R2010a
  4. Γνώση χρήσης ArcGIS 10
  5. Γνώση χρήσης Surfer 11
  6. Γνώση χρήσης LogPlot 7
  7. Γνώση χρήσης EVA
  8. Γνώση χρήσης OriginPro 8
  9. Γνώση χρήσης ProgRes Capture Pro 2.1

- **Καλλιτεχνικές δεξιότητες και ικανότητες**  
Ωδείο – Γνώση Πιάνου (1<sup>η</sup> Ανωτέρα)

### **Στρατιωτικές Υποχρεώσεις**

Μη εκπληρωμένες, λόγω αναβολής σπουδών, μέχρι τις 31/12/2014

