

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΥΤΟΪΑΣΗΣ ΣΕ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ ΜΕ ΧΗΜΙΚΑ ΠΡΟΣΘΕΤΑ

Κ. Ασπιώτης^{1,*}, Α. Ντάσκα¹, Κ. Σωτηριάδης², Ρ. Μάκονά², Ε. Μπαδογιάννης³, Σ. Τσιβιλής¹

¹Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

²Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Czech Academy of Sciences, Prague, Czechia

³Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

(*aspiotis@mail.ntua.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της εργασίας, είναι η μελέτη της αποτελεσματικότητας της αυτοϊάσης (self-healing) ρωγμών σε δείγματα σκυροδέματος με χρήση νέων χημικών προσθέτων. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν, μία σύνθεση αναφοράς και τέσσερις διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος με χρήση κατάλληλου συνδυασμού προσμίκτων (εμπορικών και μη). Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τσιμέντο Portland τύπου Ι (CEM-I), εμπορικά διογκωτικά (CSA) και κρυσταλλικά (CA) πρόσθετα, δικαρβοξυλικά οξέα (DA), ανόργανα άλατα (SC), πυριτική παιπάλη (SF), υπερευστοποιητής (SP) και πολυμερικές ίνες (F). Μετά την ωρίμανση, τα παρασκευασθέντα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή διάρρηξης, με στόχο τη δημιουργία τεχνητών ρωγμών πλάτους ≈ 400 μm και κατόπιν βυθίστηκαν στο νερό μέχρι να εκδηλωθεί το φαινόμενο της αυτοϊάσης. Η αξιολόγηση της αυτοϊάσης βασίστηκε σε δοκιμές ανθεκτικότητας (υδατοαπορροφητικότητα, ανοιχτό πορώδες, ψύξη-απόψυξη, εμβάπτιση-ξήρανση, δειξοδυσση και διάχυση χλωριόντων) και σε μεθόδους ενόργανης ανάλυσης (στερεοσκόπιο, οπτικό μικροσκόπιο, φασματοσκοπία Raman, τομογραφία ακτίνων Χ). Οι δοκιμές ανθεκτικότητας πιστοποίησαν την αποτελεσματικότητα των προσθέτων στην αυτοϊάση του σκυροδέματος, ενώ οι οπτικές μέθοδοι επιθεώρησης πιστοποίησαν τη σημαντική μείωση του πλάτους των ρωγμών, ως και την πλήρη αυτοϊάσή τους. Τέλος, η τομογραφία ακτίνων Χ έδωσε πληροφορίες για το εσωτερικό τμήμα της ρωγμής στο στάδιο της ίασης.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκυρόδεμα, είναι το πιο διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό στον κόσμο. Συναντάται από τα ρείθρα των πεζοδρομίων μέχρι σε μεγάλης κλίμακας κατασκευές (π.χ. γέφυρες, σήραγγες, φράγματα). Οι αστοχίες του, συνήθως ρωγμές μικρού μεγέθους, εμφανίζονται συχνά κατά το κατασκευαστικό στάδιο (ρωγμές συρρίκνωσης) και κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής (φυσικοχημικοί παράγοντες διάβρωσης) μειώνοντας τη διάρκεια ζωής του έργου και επηρεάζοντας το κόστος συντήρησης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το πρόβλημα επικεντρώνεται στο κομμάτι της διάβρωσης του οπλισμού, το οποίο εντείνεται στα παράκτια έργα ^[1]. Στην πλειονότητά τους, τα κρούσματα αφορούν κατασκευές όπου η πρόσβαση, επιθεώρηση και επισκευή τους είναι δύσκολη (σήραγγες, φράγματα, γέφυρες, βαθιές θεμελιώσεις). Στις Η.Π.Α. υπολογίζεται πως έως το 2025 θα χρειαστεί επένδυση, για τη βελτίωση των υποδομών, περίπου 4.59 τρισ. δολάρια ^[2], ενώ το ετήσιο άμεσο κόστος διάβρωσης των γεφυρών οδικής κυκλοφορίας εκτιμάται στα 13.6 δισ. δολάρια ^[3, 4]. Αντίστοιχα στο Ηνωμένο Βασίλειο, το κόστος επισκευών και συντήρησης το 2010 υπολογίσθηκε σε 6.8 δισ. λίρες, το οποίο το 2017 ανήλθε σε 8.8 δισ. λίρες ^[5]. Ωστόσο, πέραν από οικονομικές, οι επιπτώσεις είναι τόσο περιβαλλοντικές, λόγω έκλυσης CO₂ (πρόσθετη παραγωγή τσιμέντου), όσο και λειτουργικές, καθώς η κατασκευή, μέχρι την ολοκλήρωση των επισκευών, περνάει σε περιορισμένη διαθεσιμότητα προς την κοινωνία. Συνεκτιμώντας τα παραπάνω, ένα τσιμεντοειδές υλικό με ενσωματωμένες ιδιότητες αυτοϊάσης και ανταγωνιστικό κόστος θεωρείται πως θα έχει θετικό αντίκτυπο στην κατασκευαστική κοινότητα, την αγορά και την κοινωνία.

Οι μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα αφορούν τεχνικές οι οποίες προσδίδουν την ιδιότητα της αυτοϊάσης, είτε με φορείς (κοίλες ίνες, μικροενθυλάκωση) οι οποίοι προστατεύουν

τους παράγοντες ίασης (σύστημα ρητίνης - επιταχυντή, μικροοργανισμοί) από την τσιμεντοειδή μήτρα, είτε με απευθείας προσθήκη των παραγόντων ίασης (τσιμεντοειδή πρόσθετα) χύδην στο σώμα του τσιμέντου, καθώς και με τη χρήση μνημονικών υλικών που αφορούν τον οπλισμό της κατασκευής [6]. Στην παρούσα εργασία, τα χημικά πρόσθετα, τα οποία αποτελούν τα μέσα ίασης, ενσωματώθηκαν πλήρως στο τσιμέντο το οποίο αποτέλεσε και το φορέα τους.

ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της αυτοΐασης, σε συνθέσεις σκυροδέματος με χημικά πρόσθετα, μέσω δοκιμών ανθεκτικότητας και ενόργανων τεχνικών ανάλυσης.

Για το σκοπό αυτό, παρασκευάστηκαν τέσσερις διαφορετικές συνθέσεις και μία αναφοράς οι οποίες ρηγματώθηκαν τεχνητά και στη συνέχεια συντηρήθηκαν στο νερό μέχρι την εκδήλωση της αυτοΐασης. Η εξέταση των δειγμάτων για τη μελέτη της πορείας της ίασης πραγματοποιήθηκε με στερεοσκοπική μελέτη ενώ η αποτελεσματικότητα αυτής μέσω των δοκιμών i. υδατοαπορροφητικότητας, ii. ανοιχτού πορώδους, κύκλων iii. ψύξης-απόψυξης και iv. εμβάπτισης-ξήρασης, καθώς και με δοκιμές προσβολής χλωριόντων (v. διείσδυση και vi. διάχυση). Για την περαιτέρω αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν οπτική μικροσκοπία, φασματοσκοπία Raman και τομογραφία ακτίνων Χ.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Για την παρούσα μελέτη παρασκευάστηκαν 5 διαφορετικά αναμίγματα σκυροδέματος (Πίνακες 1, 2 και 3) τα οποία χυτεύθηκαν σε κυβικές (100 × 100 × 100 mm) και κυλινδρικές (Φ100 × 200 mm) μήτρες. Για την παρασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν τσιμέντο Portland τύπου Ι (CEM Ι 52.5N), ασβεστολιθικά αδρανή (μέγιστο μέγεθος: 16 mm), ίνες πολυπροπυλενίου (F), δύο διαφορετικά δικαρβοξυλικά οξέα (DA), εμπορικά κρυσταλλικά (CA) και διογκωτικά (CSA) πρόσθετα, πυριτική παιπάλη (SF) και ανθρακικό νάτριο (SC). Για την επίτευξη της εργασιμότητας έγινε χρήση υπερρρευστοποιητή (SP) σε διαφορετικές ποσότητες αναλόγως του μίγματος [7, 8]. Όλες οι συνθέσεις αφέθηκαν για 24 h σε συνθήκες T: 25±5°C και H: 95±5%. Με την ολοκλήρωση της πρώτης ημέρας τα καλούπια αφαιρέθηκαν και τα δείγματα βυθίστηκαν στο νερό για 27 ημέρες (ξεχωριστά δοχεία ανά μίγμα). Στην 7^η, 28^η και 90^η ημέρα, από την ημέρα χύτευσης, τα κυβικά δείγματα υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλιπτικής αντοχής (Πίνακας 3). Ακολούθως όλα τα κυλινδρικά δοκίμια κόπηκαν σε τμήματα διαστάσεων Φ100 × 50 mm και έπειτα χωρίστηκαν σε δύο σύνολα ανά σύνθεση. Το πρώτο σύνολο αποτέλεσε την ομάδα αναφοράς, ενώ το δεύτερο ρηγματώθηκε τεχνητά (διαμετρής ρωγμή πλάτους ≈ 400 μm) και χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές αυτοΐασης. Κατόπιν τα διερρηγμένα δοκίμια δέθηκαν με σφικτήρες. Μετά τη διάρρηξη των δοκιμών, οι αρχικές ρωγμές μετρήθηκαν και απεικονίστηκαν με τη βοήθεια οπτικού στερεοσκοπίου (Stemi 2000-C, Zeiss) και κατάλληλου λογισμικού (ZEN 2012 - Blue Edition, Zeiss), ενώ στη συνέχεια τα δείγματα βυθίστηκαν εκ νέου στο νερό (διαφορετικά δοχεία ανά σύνθεση) μέχρι την εκδήλωση του φαινομένου. Με το πέρας 40 ημερών έγινε επανάληψη της μέτρησης του εύρους της ρωγμής και απεικόνισης της. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για τις 50 και τις 60 ημέρες.

Με την ολοκλήρωση της οπτικής επιθεώρησης έγιναν δοκιμές ανθεκτικότητας προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της αυτοΐασης στα δείγματα σκυροδέματος. Σε όλες τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δύο δείγματα ανά σύνθεση και ανά ομάδα, με εξαίρεση εκείνες των κύκλων κόπωσης όπου μελετήθηκαν δύο δοκίμια ανά σύνθεση της δεύτερης ομάδας μόνο.

Για τη δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας (ASTM C1585-04) τα δοκίμια ξηράθηκαν μέχρι σταθεροποίησης της μάζας τους. Ακολούθως μονώθηκαν πλευρικά και τοποθετήθηκαν σε δοχείο με νερό. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα (10, 20, 30, 45, 60, 90, 120 min) πραγματοποιήθηκαν ζυγίσεις, ώστε

να προσδιορισθεί η μάζα νερού που απορροφήθηκε από το δείγμα. Για τη δοκιμή ανοιχτού πορώδους ακολουθήθηκε το πρότυπο *ASTM C642-97*.

Πίνακας 1. Σύνθεση συνδετικού υλικού (τσιμεντοειδή και πρόσθετα) (%wt.).

Μίγμα	Περιγραφή	CEM-I	CA	CSA	DA-1	DA-2	SF	SC
C1	Control	100.00	-	-	-	-	-	-
C2	CA/CSA	88.50	1.50	10.00	-	-	-	-
C3	CSA	90.00	-	10.00	-	-	-	-
C4	CSA/2DA	88.80	-	10.00	0.26	0.08	-	0.86
C5	CSA/2DA/SF	88.55	-	10.00	0.10	0.03	1.00	0.32

Πίνακας 2. Σύνθεση σκυροδέματος (kg/m^3)

Μίγμα	Συνδετικό Υλικό	Αδρανή			Νερό ^α	Υπερρευστοποιητής ^β	Ίνες PP 6 mm
		0-4 mm	4-8 mm	8-16 mm			
C1	350	950	570	380	184	2.50	2.00
C2	350	950	570	380	184	3.21	2.00
C3	350	950	570	380	184	2.71	2.00
C4	350	950	570	380	184	3.54	2.00
C5	350	950	570	380	184	4.49	2.00

^αΟλικό νερό: $184 \text{ kg}/\text{m}^3$, απορροφούμενο νερό από αδρανή: $27 \text{ kg}/\text{m}^3$, ενεργό νερό: $157 \text{ kg}/\text{m}^3$ (W/B = 0.45, σύμφωνα με EN 206-1).

^βΥπερρευστοποιητής: Sika Viscocrete.

Πίνακας 3. Ιδιότητες σκυροδέματος

Μίγμα	Κάθιση (mm)	Πυκνότητα (kg/m^3)	Περιεχόμενος Αέρας (%)	Θλιπτική Αντοχή (MPa)		
				7 Ημερών	28 Ημερών	90 Ημερών
C1	800	2350	3.1	57.2	58.6	64.5
C2	800	2366	2.6	57.4	62.9	69.4
C3	850	2330	3.2	52.3	59.6	65.1
C4	500	2371	2.0	51.1	58.4	66.5
C5	800	2351	3.0	58.8	63.5	79.4

Σχετικά με τους κύκλους κόπωσης, τα δείγματα βυθίστηκαν στο νερό μέχρι κορεσμού. Και στις δύο δοκιμές διεξήχθησαν 40 κύκλοι. Στην περίπτωση της ψύξης-απόψυξης (*ASTM C666/C666M-03*), ως κύκλος ορίστηκε η διαδικασία κατά την οποία ένα δείγμα παραμένει για 4 h σε περιβάλλον θερμοκρασίας $-18 \pm 2^\circ\text{C}$ και για 4 h βυθισμένο σε νερό θερμοκρασίας $4 \pm 2^\circ\text{C}$. Ανά 10 κύκλους πραγματοποιήθηκε ζύγιση για έλεγχο απώλειας μάζας. Αντίστοιχα, στη διαδικασία εμβάπτισης-ξήρασης, ως κύκλος ορίστηκε η παραμονή των δοκιμίων μέσα σε νερό θερμοκρασίας $25 \pm 5^\circ\text{C}$ για 4 h και για 4 h σε πυριατήριο ρυθμισμένο σε θερμοκρασία $80 \pm 5^\circ\text{C}$. Ανά 5 κύκλους πραγματοποιήθηκε ζύγιση για έλεγχο απώλειας μάζας.

Η ανθεκτικότητα σε προσβολή χλωριόντων ελέγχθηκε μέσω δύο μεθόδων. Η πρώτη μέθοδος (διείσδυση χλωριόντων) έγινε βάσει του προτύπου *NT Build 492*. Για τον προσδιορισμό του βάθους διείσδυσης στο εσωτερικό του δείγματος πραγματοποιήθηκε αντιδιαμετρική θλίψη κάθετα και κατά μήκος της ρωγμής. Και στις δύο επιφάνειες έγινε ψεκασμός των εσωτερικών επιφανειών με AgNO_3 0.1M. Αντίστοιχα, η δεύτερη μέθοδος (διάχυση χλωριόντων) έγινε σύμφωνα με το πρότυπο *NT Build 443*. Με την ολοκλήρωση 35 ημερών έκθεσης των δοκιμίων σε υδατικό διάλυμα NaCl (165 g/L διαλύματος) πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός της συγκέντρωσης των χλωριόντων βάσει του προτύπου EN 196-2:2013.

Η σύνθεση με τα καλύτερα αποτελέσματα ανθεκτικότητας εξετάστηκε μέσω ενόργανων μεθόδων ανάλυσης, ώστε να διασαφηνιστεί ο μηχανισμός δράσης.

Κατά την οπτική μικροσκοπία ελέγχθηκε η δευτερογενής δομή ανάπτυξης και μορφολογίας των κρυστάλλων που «επούλωσαν» την περιοχή ρηγμάτωσης. Ακολούθως, η περιοχή ελέγχθηκε με την τεχνική φασματοσκοπίας *micro-Raman* (DXR, Thermo Scientific) με laser μηκούς κύματος 785 nm και αντικειμενικό φακό 20× (N.A = 0.40). Το φάσμα συλλέχθηκε στην περιοχή από 1875-50 cm^{-1} στην επιφάνεια του εκάστοτε υπό εξέταση κρυστάλλου. Η μέτρηση έγινε με 50 επαναλήψεις χρόνου έκθεσης 2 s και ισχύος 10 mW.

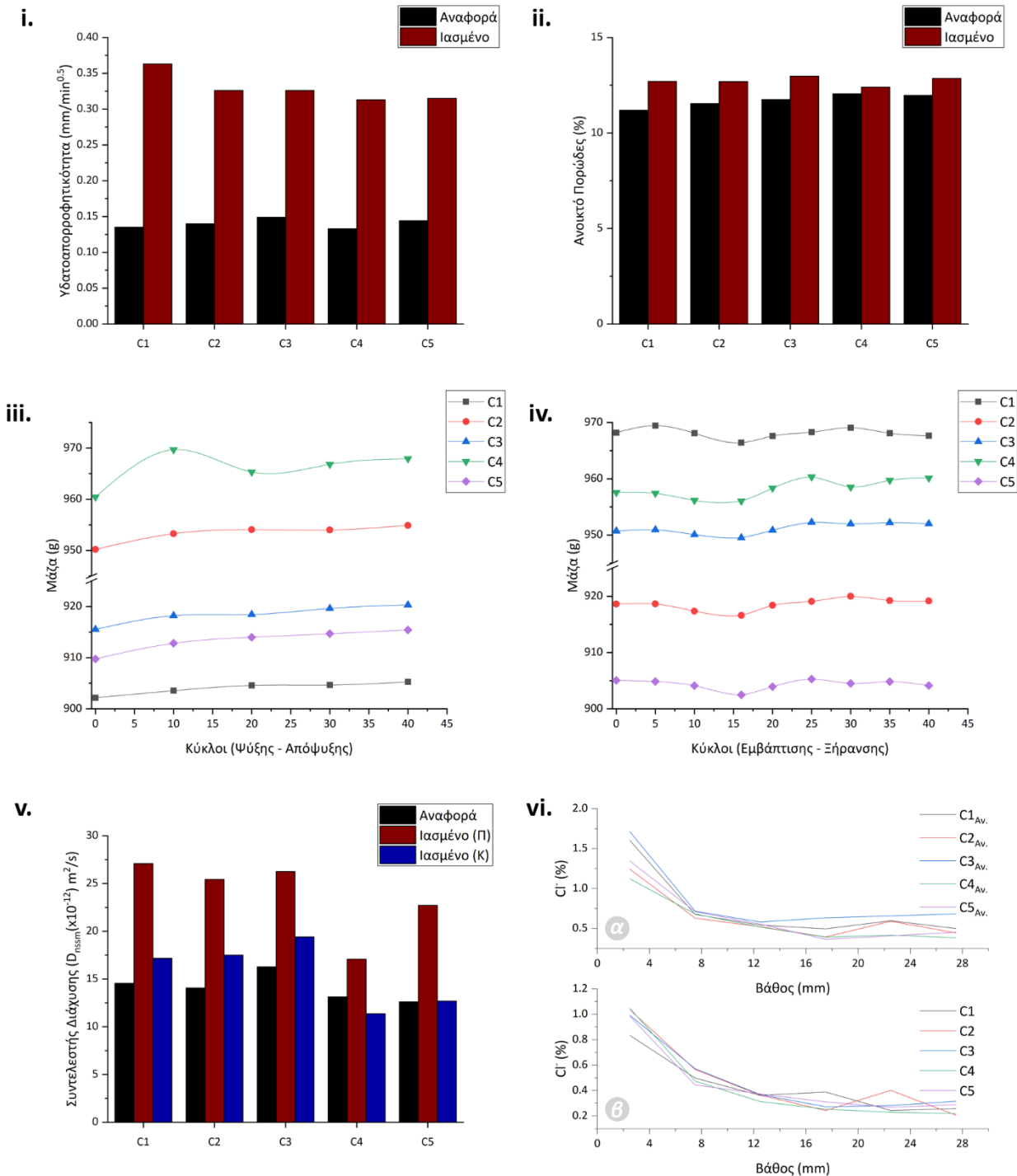
Για την εξέταση της εσωτερικής δομής του δικτύου της τεχνητής ρωγμής ακολουθήθηκε τεχνική τομογραφίας ακτίνων X. Ο αξονικός τομογράφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο TORATOM (Twinned Orthogonal Adjustable Tomograph) που αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο θεωρητικής και εφαρμοσμένης μηχανικής της τσέχικης ακαδημίας επιστημών. Το όργανο βασίζεται σε καθοδικό σωλήνα ακτίνων X / XWT-160-TCHR (X-ray WorX, Germany) με ελάχιστο εστιακό σημείο 4 μm , τάσης 60 kV, έντασης 275 μA και ισχύ εξόδου 16.5 W. Ο ανιχνευτής ήταν επίπεδο πανελ XRD-1622-AP-14 (Perkin Elmer, USA) διαστάσεων 40 × 40 cm^2 . Η απόσταση πηγής-δείγματος ήταν της τάξης των 39.99 mm και η απόσταση δείγματος-ανιχνευτή της τάξεως των 799.95 mm. Η επεξεργασία και απεικόνιση έγινε με το λογισμικό VGStudio MAX 3.0 (Volume Graphics).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

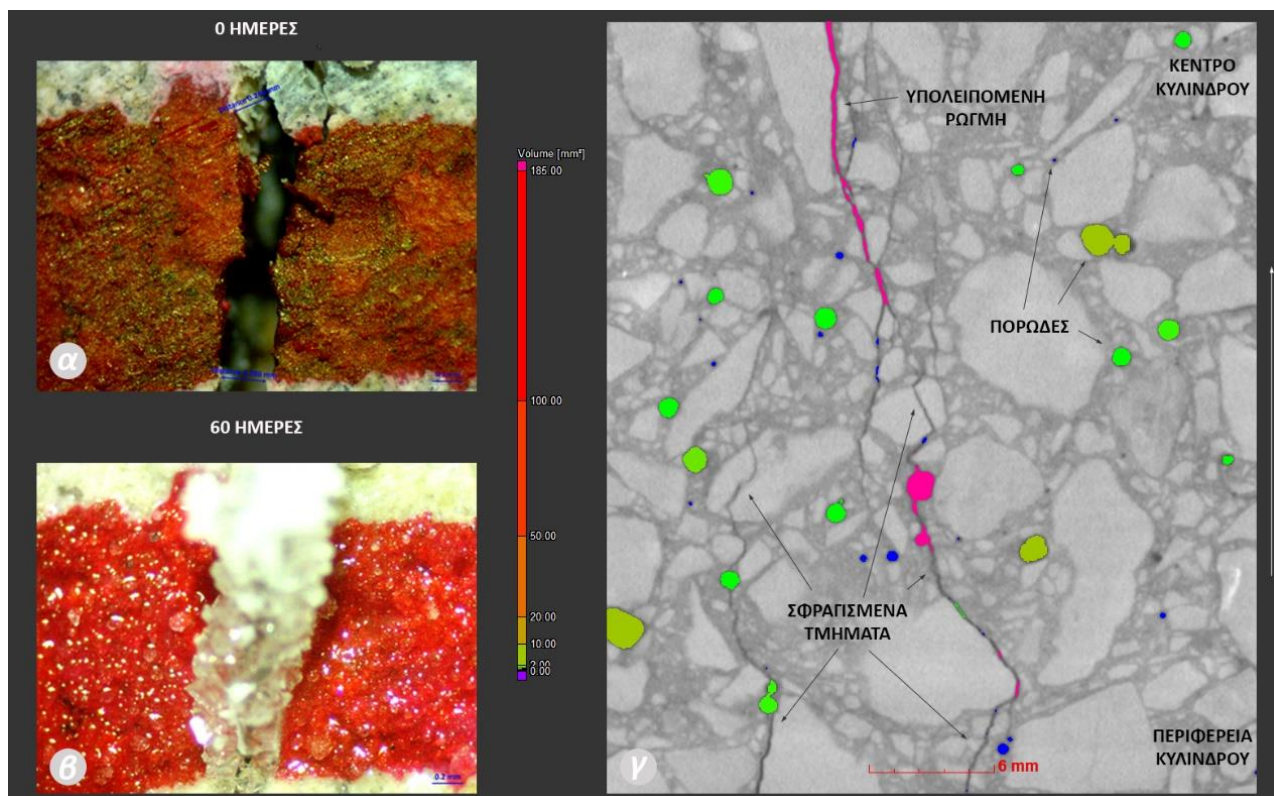
Κατά τη δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας (Σχ. 1i) τα δοκίμια αναφοράς κατατάχθηκαν σε αύξουσα σειρά ως (min < max) C4 < C1 < C2 < C5 < C3, ενώ σε εκείνα τα οποία υποβλήθηκαν στην διαδικασία ίασης η σειρά κατάταξης ήταν C4 < C5 < C3 < C2 < C1. Η μεταξύ τους σύγκριση έδειξε μία αύξηση της υδατοαπορροφητικότητας S για τα δείγματα τα οποία υποβλήθηκαν στη διαδικασία ίασης. Επιπλέον, οι συνθέσεις με τα χημικά πρόσθετα είχαν μικρότερο S μεταξύ τους σε σχέση με το δείγμα C1 και εκείνα με τα εμπορικά πρόσμικτα. Σχετικά με τη δοκιμή ανοικτού πορώδους (Σχ. 1ii) η σειρά αύξησης του ποσοστού ανοικτού πορώδους στα δείγματα αναφοράς ήταν C1 < C2 < C3 < C5 < C4, όπου μετά τη διαδικασία ίασης η σειρά διαμορφώθηκε ως C4 < C2 < C1 < C5 < C3. Αντίθετα με τη δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας, η διαφορά των τιμών των δειγμάτων αναφοράς και εκείνων που εκδήλωσαν ίαση ήταν μικρότερη. Στη φάση των κύκλων κόπωσης (Σχ. 1iii, iv) παρατηρήθηκε ότι οι μάζες των δοκιμών παρέμειναν πρακτικά σταθερές. Η σταθερότητα των μαζών υπέδειξε την ικανοποιητική ανθεκτικότητα των ιασμένων δειγμάτων. Στη δοκιμή διείδυσης χλωριόντων (Σχ. 1v) τα δείγματα αναφοράς κατατάχθηκαν ως C5 < C4 < C2 < C1 < C3 ενώ τα ιασμένα δείγματα είχαν κατάταξη, κατά μήκος της ρωγμής C4 < C1 < C2 < C5 < C3 και κάθετα της ρωγμής C4 < C5 < C1 < C2 < C3. Στη μεταξύ τους σύγκριση, όλες οι συνθέσεις είχαν μεγαλύτερο συντελεστή διάχυσης στην κατά μήκος και κάθετα ως προς τη ρωγμή εξέταση σε σχέση με τα δείγματα αναφοράς. Η σύνθεση C4 είχε τις χαμηλότερες τιμές διείδυσης χλωριόντων. Τέλος, στη δοκιμή διάχυσης χλωριόντων (Σχ. 1vi) τα δοκίμια αναφοράς κατατάχθηκαν ως C2 < C3 < C5 < C1 < C4, ενώ τα ιασμένα διαμορφώθηκαν ως C4 < C3 < C2 < C5 < C1. Σε σχέση με τις δύο τελευταίες μεθόδους, ασφαλέστερα αποτελέσματα θεωρούνται εκείνα του προτύπου NT 443 καθώς οι πειραματικές συνθήκες προσομοιάζουν με καλύτερο τρόπο τις πραγματικές συνθήκες στις οποίες εκτίθενται οι κατασκευές.

Τα παραπάνω αποτελέσματα των δοκιμών ανθεκτικότητας παρουσιάζουν την ευεργετική ιδιότητα των χημικών προσθέτων έναντι των υπόλοιπων συνθέσεων με τη σύνθεση C4 να έχει τα καλύτερα αποτελέσματα σε κάθε δοκιμή. Σχετικά με τη στερεοσκοπική επιθεώρηση (Σχ. 2α, β), η σύνθεση C4 μείωσε τη ρωγμή κατά $\approx 350 \mu\text{m}$ και ως δεύτερη καλύτερη κρίθηκε η C5 με μείωση $\approx 300 \mu\text{m}$. Ακολούθως για τη σύνθεση C4 η μικροσκοπική εξέταση παρουσίασε τη συναρμογή της δευτερογενής φάσης με το κύριο σώμα της πάστας του σκυροδέματος, ενώ η φασματογραφία Raman πιστοποίησε την παρουσία CaCO_3 (ασβεστίτης) ως πληρωτικό υλικό. Κλείνοντας, η τεχνική αξονικής τομογραφίας ακτίνων X, έδειξε μία κατά τόπους ίαση στο συνολικό μήκος της ρωγμής δημιουργώντας ένα δευτερογενές τεχνητό πορώδες (Σχ. 2γ).

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει πως ο επικρατέστερος μηχανισμός ίασης είναι η αντίδραση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ με τα προϊόντα υδρόλυσης του CO_2 στο νερό ^[9] με αποτέλεσμα την παραγωγή CaCO_3 . Η ανάπτυξη του CaCO_3 πραγματοποιείται σε θέσεις με μεγαλύτερη συγκέντρωση $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CO_3^{2-} και HCO_3^- , καθώς και σε περιοχές με πυρήνες κρυστάλλωσης, όπως είναι τα ανθρακικά αδρανή. Επίσης, η ενεργοποίηση μηχανισμών ενυδάτωσης στα μη ενυδατωμένα μέρη της πάσας θεωρείται πως συνεργεί στην περαιτέρω μείωση του εύρους της ρωγμής (επικουρική δράση του CSA) ^[7] με αποτέλεσμα και την ανάπτυξη τσιμεντοειδούς υλικού το οποίο είναι εξίσου διαπερατό από το νερό.



Σχήμα 1. Διαγραμματική απεικόνιση αποτελεσμάτων δοκιμών ανθεκτικότητας. *i.* Υδατοαπορροφητικότητα, *ii.* Ανοικτό πορώδες, *iii.* Κύκλοι Ψύξης - Απόψυξης, *iv.* Κύκλοι Εμβάπτισης- Ξήρανσης, *v.* Διάχυση χλωριόντων (Π: Κατά μήκος της ρωγμής, Κ: κάθετα επί της ρωγμής), *vi.* Διείσδυση χλωριόντων (α. Δοκίμια αναφοράς, β. Ιασμένα δοκίμια).



Σχήμα 2. Απεικόνιση αποτελεσμάτων ίασης δοκιμίου C4 με στερεοσκοπική επιθεώρηση (α. 0 ημερών, β. 60 ημερών) και τομογραφία ακτίνων X (γ). Εύρος αρχικής ρωγμής 300 - 350 μm και υπολειπόμενης <50 μm .

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι δοκιμές ανθεκτικότητας σε συνδυασμό με τη στερεοσκοπική επιθεώρηση και τα αποτελέσματα από τη μικροσκοπία, φασματογραφία Raman και αξονικό τομογράφο ακτίνων X, έδωσαν μία ολοκληρωμένη εικόνα του μηχανισμού δράσης των προσμίκτων και του τρόπου τελικής αποκατάστασης. Η σύνθεση με τα προτεινόμενα χημικά πρόσθετα παρουσίασε την καλύτερη συμπεριφορά σε όλες τις δοκιμές ανθεκτικότητας. Τέλος, ο μηχανισμός ίασης εκμεταλλεύεται το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ και τα προϊόντα υδρόλυσης του CO_2 προς σχηματισμό CaCO_3 , καθώς και τις άνυδρες εναπομείναντες φάσεις στο σώμα της πάστας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς εκφράζουν θερμές ευχαριστίες προς την Mgr. Ivana Kumpová (Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Czech Academy of Sciences) για τη διεξαγωγή των μετρήσεων Τομογραφίας Ακτίνων X.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Y. Cao, C. Gehlen, U. Angst, L. Wang, et al. Cem. Concr. Res. 117 (2019) 58-68
- [2] Asce. (2017) <https://www.asce.org/issues-and-advocacy/public-policy/policy-statement-299---infrastructure-investment/>
- [3] A. B. M. R. Haque, S. Sasibut, K. Siddiquee, M. S. Alam. 9th Intern. Conf. SMSB, Calgary, Alberta, Canada (2014)
- [4] Artba. (2018) <https://www.artba.org/2018/01/29/54000-american-bridges-structurally-deficient-analysis-new-federal-data-shows/>
- [5] J. Martin, H. Proctor. Office for National Statistics (2018)
- [6] M. Wu, B. Johannesson, M. Geiker. Constr. Build. Mater. 28 (1) (2012) 571-583
- [7] Κ. Ασπιώτης, Ε. Μπαδογιάννης, Σ. Τσιβιλής. 11^ο ΠΕΣΧΜ, Θεσσαλονίκη (2017)
- [8] Κ. Ασπιώτης, Α. Κοσμαδάκη, Ε. Μπαδογιάννης, Σ. Τσιβιλής. 18ο ΠΣΣ, Αθήνα (2018)
- [9] D. Homma, H. Mihashi, T. Nishiwaki. J. Adv. Concr. Technol. 7 (2) (2009) 217-228