

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΜΕ ΠΟΛΥΜΕΡΗ, ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, ΥΨΗΛΗΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΥΤΟΪΑΣΗΣ

BEHAVIOUR OF SBR LATEX MODIFIED, STEEL FIBER REINFORCED, HIGH PERFORMANCE, SELF-HEALING CONCRETE

ΓΚΑΡΑΚΛΟΒΑ ΣΟΦΙΑ

Προπτυχιακή φοιτήτρια Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., sofentgka@civil.auth.gr

ΚΑΓΙΟΓΛΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ

Προπτυχιακή φοιτήτρια Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., pankagkon@civil.auth.gr

ΣΤΑΥΡΙΔΟΥ ΕΥΔΟΚΙΑ

Προπτυχιακή φοιτήτρια Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., evdokisa@civil.auth.gr

ΧΟΤΖΟΓΛΟΥ ΠΑΥΛΟΣ

Προπτυχιακός φοιτητής Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., pavchogeo@civil.auth.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την επιρροή του πολυμερικού υλικού latex (συνθετικών ρητινών SBR – Styrene Butadiene Rubber) σε ινοπλισμένα σκυροδέματα πολύ υψηλής αντοχής με ιδιότητες αυτοϊασης. Αναλυτικότερα, η πειραματική διαδικασία χωρίζεται σε δύο τμήματα: το μεν πρώτο αφορά την σκυροδέτηση και εργαστηριακή μελέτη του μείγματος αναφοράς - χωρίς την παρουσία του πολυμερικού υλικού, το δε δεύτερο αφορά μείγματα (δύο συνθέσεις) ίδιας σύστασης εμπλουτισμένα με latex. Τα μείγματα διερευνώνται ως προς την συμπεριφορά τους τόσο σε συνθήκες συνθήκες περιβάλλοντος όσο και σε διαβρωτικές συνθήκες, παρουσία θαλασσινού νερού.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κεντρικός άξονας της έρευνας συνίσταται στην βελτιστοποίηση της ιδιότητας αυτοϊασης του σκυροδέματος. Για την επίτευξη αυτού του στόχου παρασκευάζεται μια σύνθεση με υψηλή περιεκτικότητα σε κονία (τσιμέντο Portland και Ιπτάμενη Τέφρα) ούτως ώστε να επιτευχθεί σκυρόδεμα κατηγορίας Υψηλής Επιτελεστικότητας (High Performance Concrete) [1] καθώς η αυτοϊαση αποδίδει καλύτερα στα μείγματα αυτής της κλάσης. Επιπλέον, η χρήση της ιπτάμενης τέφρας συμβάλλει μέσω της ποζολανικής αντίδρασης στην δευτερογενή σκλήρυνση του σκυροδέματος βελτιώνοντας με αυτό τον τρόπο την προαναφερθείσα ζητούμενη ιδιότητα του υπό μελέτη υλικού. Η όπλιση με ίνες [9], από την άλλη, αποτρέπει την δημιουργία μεγάλων ρωγμών, ακόμα και σε συνθήκες υψηλής φόρτισης, διατηρώντας έτσι τις

μικρές ρωγμές -οι οποίες αναπόφευκτα εμφανίζονται- στο κατάλληλο εύρος προκειμένου να επιτραπεί η λειτουργία του self-healing [6], [7].

Η καινοτομία της παρούσας μελέτης έγκειται στη χρήση του latex ως βελτιωτικό παράγοντα τόσο της ιδιότητας της αυτοϊάσης όσο και των μηχανικών ιδιοτήτων αλλά και της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με όσα απορρέουν είτε από άλλες έρευνες είτε πρόκειται να προκύψουν από την παρούσα, το πολυμερικό αυτό υλικό αυξάνει την εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και την πλαστιμότητα του μείγματος. Παράλληλα, δημιουργεί ένα προστατευτικό φιλμ γύρω από τους πόρους συντελώντας στην φραγή του τριχοειδούς δικτύου κενών της τσιμεντόπαστας καθιστώντας το σκυροδέμα ανθεκτικότερο στην διάβρωση. Αξίζει να σημειωθεί, ακόμη, ότι περιορίζεται σημαντικά το φαινόμενο της συστολής ξήρανσης [8], [11], [12], [13], [14].

Οι εργαστηριακοί έλεγχοι στους οποίους υποβάλλονται τα δοκίμια είναι οι ακόλουθοι: έλεγχος αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, έλεγχος αντοχής σε κάμψη τριών σημείων, διερεύνηση της ιδιότητας αυτοϊάσης του σκυροδέματος με την ελεγχόμενη πρόκληση μικρορωγμών διαφορετικού εύρους (50 - 300 μm), υπολογισμός του στατικού και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, υπολογισμός της ενέργειας θραύσης, μέτρηση της συστολής ξήρανσης και έλεγχος της επιρροής του θαλασσινού νερού στην αντοχή έναντι κάμψης και στην αυτοϊάση [2], [3], [4], [5].

II. ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ

A. Σύνθεση 1 (χωρίς latex)

Σύνθεση 1 (χωρίς latex)		
	kg/m^3	$\text{kg}/0.06\text{m}^3$
CEM I 42.5 R	600	36.00
Ιπτάμενη Τέφρα	400	24.00
Άμμος	1067	64.00
Νερό	275	16.50
Μεταλλικές ίνες χάλυβα 30mm 1.5%	118	7.10
Κρυσταλλίτες (lt)	12	0.72
Υπερρευστοποιητής SIKA 2% κονίας	20	1.20
λόγος W/C	0.317	

ΠΙΝ 1: ΣΥΝΘΕΣΗ 1

Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος	
Πυκνότητα (gr/m^3)	2217.48
Εξάπλωση πριν την προσθήκη των ινών (cm)	54
Εξάπλωση μετά την προσθήκη των ινών (cm)	43

ΠΙΝ 2: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 1

Οι ανωτέρω τιμές εξάπλωσης καθιστούν το μείγμα υπέρρευστο.

Σκυροδετήθηκε μείγμα ποσότητας $0.06m^3$ και δημιουργήθηκαν τα εξής δοκίμια:

- 4 κυβικά δοκίμια 15cm
- 2 κυλινδρικά δοκίμια ύψους 30cm & ακτίνας 15cm
- 1 πρισματικό δοκίμιο 10 X 10 X 100cm
- 1 πρισματικό δοκίμιο 15 X 15 X 55cm
- 2 πρισματικά δοκίμια 10 X 10 X 40cm
- 3 τριπλέτες (η καθεμία αποτελείται από 3 πρισματικά δοκίμια 4 X 4 X 16cm)

Όλα τα δοκίμια έχουν ακριβώς την ίδια σύνθεση, εκτός από τις τριπλέτες, οι οποίες ήταν και οι πρώτες στη σειρά πλήρωσης των μητρών. Η 1^η τριπλέτα (πρακτικά 3 πρισματικά δοκίμια 4 X 4 X 16cm) δεν περιέχει ούτε κρυσταλλίτες, ούτε ίνες. Η 2^η τριπλέτα περιέχει κρυσταλλίτες, είναι όμως και αυτή άοπλη και η 3^η έχει στη σύνθεση της και κρυσταλλίτες και ίνες χάλυβα. Η τελευταία τριπλέτα, δηλαδή, είναι ίδιας σύνθεσης με τα υπόλοιπα δοκίμια.

Ένα πρόβλημα κατά την σκυροδέτηση του πρώτου μείγματος (Σύνθεση 1) αποτέλεσε η γρήγορη πήξη αυτού -πριν ακόμη την ολοκλήρωση της διαδικασίας πλήρωσης των μητρών- με αποτέλεσμα να χαθεί πρόωρα η εργασιμότητά του. Οι παράγοντες που οδήγησαν στην ταχεία πήξη πιθανόν να είναι η χρήση τσιμέντου ταχείας πήξεως CEM I 42.5 R (rapid) σε συνδυασμό με το χαμηλό ποσοστό νερού στο μείγμα. Προκειμένου να αποφευχθεί το πρόβλημα αυτό στην Σύνθεση 2 αποφασίστηκε η χρήση επιβραδυντή πήξεως σε ποσοστό 0.2% επί της κονιάς.

B. Σύνθεση 2 (με latex)

Σύνθεση 2 (με latex)		
	kg/m^3	$kg/0.06m^3$
CEM I 42.5 R	600	36.00
Ιπτάμενη Τέφρα	400	24.00
Άμμος	1071	64.25
Νερό	185	11.10
Μεταλλικές ίνες χάλυβα 30mm 1.5%	118	7.10
Κρυσταλλίτες	12	0.72
Υπερρευστοποιητής SIKA 1.5% κονιάς	15	0.90
Επιβραδυντής SIKA 0.2% κονιάς	2	0.12
SBR Latex MACON	85	5.10
λόγος W/C	0.275	

ΠΙΝ 3: ΣΥΝΘΕΣΗ 2

Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος	
Πυκνότητα (gr/m^3)	2100.74
Κάθιση πριν την προσθήκη των ιών (cm)	19
Εξάπλωση πριν την προσθήκη των ιών (cm)	25
Κάθιση μετά την προσθήκη των ιών (cm)	13
Εξάπλωση μετά την προσθήκη των ιών (cm)	20

ΠΙΝ 4: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 2

Σκυροδετήθηκε μείγμα ποσότητας $0.06m^3$ και δημιουργήθηκαν τα εξής δοκίμια:

- 5 κυβικά δοκίμια 15cm
- 2 κυλινδρικά δοκίμια ύψους 30cm & ακτίνας 15cm
- 1 πρισματικό δοκίμιο 10 X 10 X 100cm
- 1 πρισματικό δοκίμιο 15 X 15 X 55cm
- 3 πρισματικά δοκίμια 10 X 10 X 40cm
- 3 τριπλέτες (η καθεμία αποτελείται από 3 πρισματικά δοκίμια 4 X 4 X 16cm)

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία η ποσότητα των στερεών συστατικών του latex πρέπει να ισούται με το 15% του συνολικού νερού του μείγματος. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε latex σε μορφή γαλακτώματος περιεκτικότητας 48% σε στερεά SBR.

Κατά τον σχεδιασμό της δεύτερης σύνθεσης η απαιτούμενη ποσότητα του γαλακτώματος υπολογίστηκε λαμβάνοντας τα στερεά latex ίσα με το 15% του αδέσμευτου νερού της σύνθεσης 1. Εν συνεχεία, υπολογίστηκε η νέα ποσότητα του ελεύθερου-προστιθέμενου νερού, αφαιρουμένων της υγρασίας της άμμου και των υγρών συστατικών του latex (52% του γαλακτώματος), πράγμα που και οδήγησε στην πτώση του ενεργού λόγου νερού/τσιμέντο, W/C από 0.317 σε 0.275. Αυτή η πτώση έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην εργασιμότητα του σκυροδέματος, καθώς αυτό προέκυψε κατηγορίας S3, αρκετά χαμηλότερη της αντίστοιχης του μείγματος 1 (υπερρευστο).

Η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος της Σύνθεσης 2 εμφανίζεται και αυτή χαμηλότερη της πρώτης – 2029.63 gr/m^3 έναντι 2217.48 gr/m^3 . Αυτό από μόνο του προϋποθέτει για την κακή ανταπόκριση των δοκιμών της Σύνθεσης 2 στα τεστ αντοχής. Τα δύο τρωτά σημεία του δεύτερου μείγματος σε σύγκριση με το πρώτο ήταν:

- **Η χρήση επιβραδυντή**

Πιθανώς τα δύο χημικά πρόσμεικτα, ο υπερρευστοποιητής και ο επιβραδυντής, να μην είναι συμβατά μεταξύ τους (ακόμη και αν αποτελούν προϊόντα ίδιας εταιρείας)

- **Η παρουσία του latex**

Το σκυρόδεμα διέθετε μία κολλώδη υφή και ήταν πολύ δύσκολο να συμπυκνωθεί ακόμη και με την χρήση της δονητικής τράπεζας. Εγκλώβιζε στη μάζα του μεγάλες ποσότητες αέρα οι οποίες δεν κατέστη δυνατό να απομακρυνθούν ούτε καν με την πρότυπη συμπύκνωση.

Έτσι, αποφασίστηκε η σκυροδέτηση τρίτου μείγματος, χωρίς την χρήση επιβραδυντή και με μία διαφορετική προσέγγιση στον υπολογισμό των ποσοτήτων latex και νερού.

Ο σχεδιασμός της σύνθεσης ξεκίνησε με ενεργό λόγο $W/C=0.25$. Υπολογίστηκε η απαιτούμενη ποσότητα latex κατά τον ίδιο τρόπο (15% του συνολικού νερού του μείγματος -μαζί με την υγρασία της άμμου και το νερό του latex) καθώς και το ελεύθερο-προστιθέμενο νερό. Ο σκοπός ήταν η επίτευξη της ίδιας εργασιμότητας με αυτή του μείγματος 1. Για την πραγματοποίηση του στόχου αυτού έγιναν αλληπάλληλες δοκιμές εξάπλωσης κατά την σκυροδέτηση και ελεγχόμενη προσθήκη μικρών ποσοτήτων νερού (0.5 lt τη φορά). Εντέλει επιτεύχθηκε λίγο μεγαλύτερη εργασιμότητα και το σκυρόδεμα χαρακτηρίστηκε ως αυτοσυμπυκνούμενο. Ο ενεργός λόγος W/C παρέμεινε ίδιος με αυτόν του μείγματος 2. Η σύνθεση διαμορφώθηκε ως εξής:

C. Σύνθεση 3 (με latex)

Σύνθεση 3 (με latex)		
	kg/m^3	$kg/0.04m^3$
CEM I 42.5 R	600	24.00
Ιπτάμενη Τέφρα	400	16.00
Άμμος	1054	42.15
Νερό	198	7.92
Μεταλλικές ίνες χάλυβα 30mm 1.5%	118	4.72
Κρυσταλλίτες (lt)	12	0.48
Υπερρευστοποιητής SIKA 2% κονιάς	20	0.80
SBR Latex MACON	62	3.73
λόγος W/C	0.275	

ΠΙΝ 5: ΣΥΝΘΕΣΗ 3

Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος	
Πυκνότητα (gr/m^3)	2029.63
Εξάπλωση πριν την προσθήκη των ινών (cm)	67

ΠΙΝ 6: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 3

Σκυροδετήθηκε μείγμα ποσότητας $0.04m^3$ και δημιουργήθηκαν τα εξής δοκίμια:

- 4 κυβικά δοκίμια 15cm
- 1 κυλινδρικό δοκίμιο ύψους 30cm & ακτίνας 15cm
- 1 πρισματικό δοκίμιο 15 X 15 X 55cm

- 2 πρισματικά δοκίμια 10 X 10 X 40cm
- 3 τριπλέτες (η καθεμία αποτελείται από 3 πρισματικά δοκίμια 4 X 4 X 16cm)

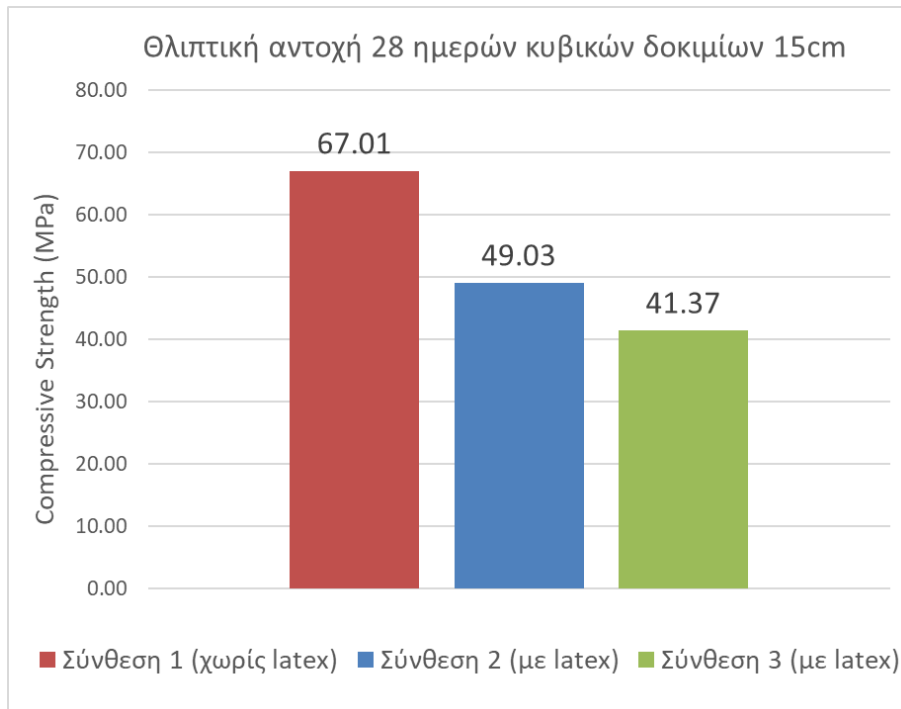
Το μείγμα της Σύνθεσης 3 προέκυψε ακόμα χαμηλότερης πυκνότητας:
Σύνθεση 1 (2217.48 gr/m³) > Σύνθεση 2 (2100.74 gr/m³) > Σύνθεση 3 (2029.63 gr/m³)
παρόλο που αποφεύχθηκε η χρήση επιβραδυντή και εφαρμόστηκε μία διαφορετική προσέγγιση σχετικά με τον υπολογισμό της ποσότητας του latex και του νερού. Πιθανότατα το πρόβλημα εντοπίζεται στην δυσκολία συμπύκνωσης του μείγματος.

III. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

A. Μηχανική Συμπεριφορά

1. Θλιπτική αντοχή

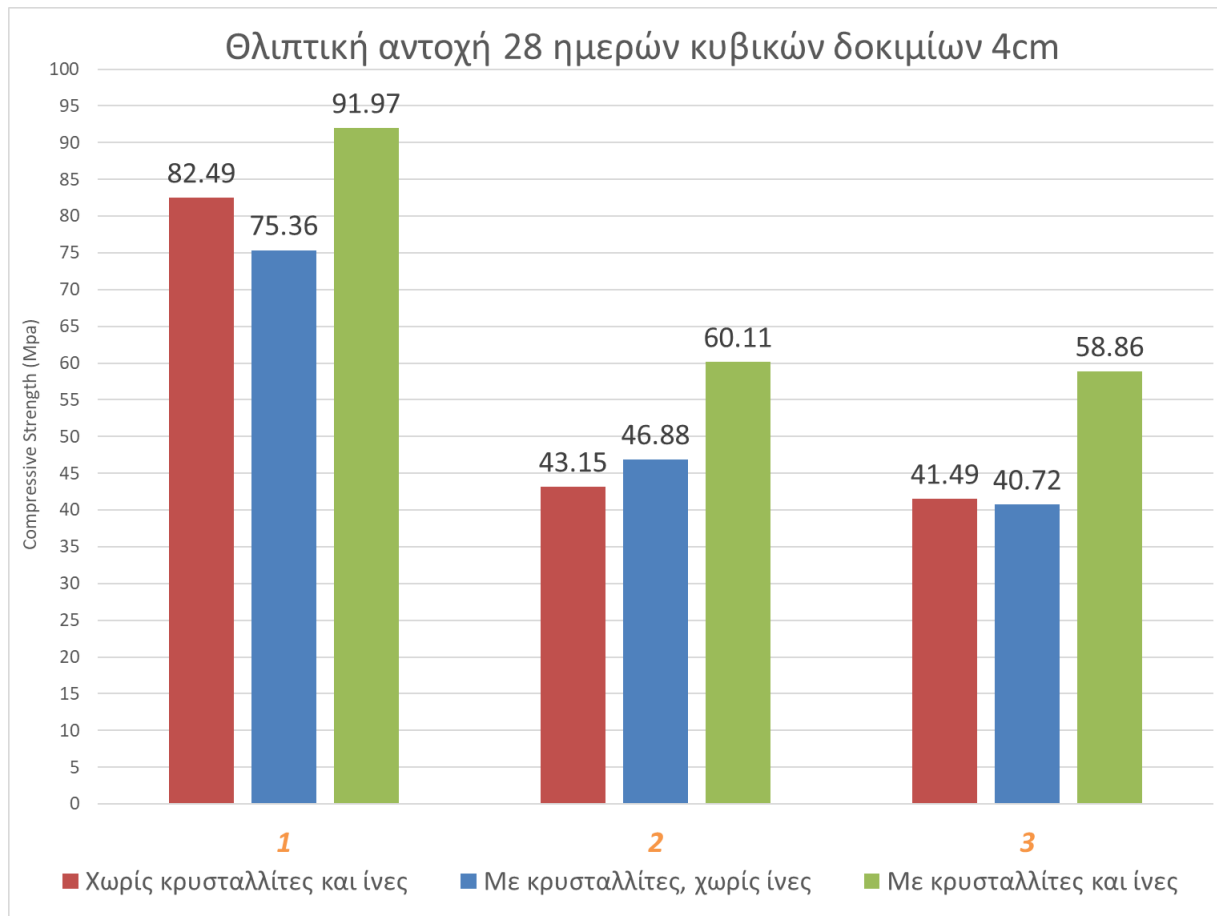
a. Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμών 15cm



ΣΧΗΜΑ 1: ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ 28 ΗΜΕΡΩΝ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 15CM

Έχοντας ως μείγμα αναφοράς τη Σύνθεση 1, παρατηρείται ότι η παρουσία του latex στη σύνθεση του σκυροδέματος συνέβαλε στην πτώση της θλιπτικής αντοχής των κυβικών δοκιμών 15cm της Σύνθεσης 2 κατά **25%** και της Σύνθεσης 3 κατά **38%**.

b. Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμίων 4cm



ΣΧΗΜΑ 2: ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ 28 ΗΜΕΡΩΝ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 4CM (Η ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΣΤΟΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΑΞΟΝΑ ΑΝΑΦΕΡΕΤΑΙ ΣΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ)

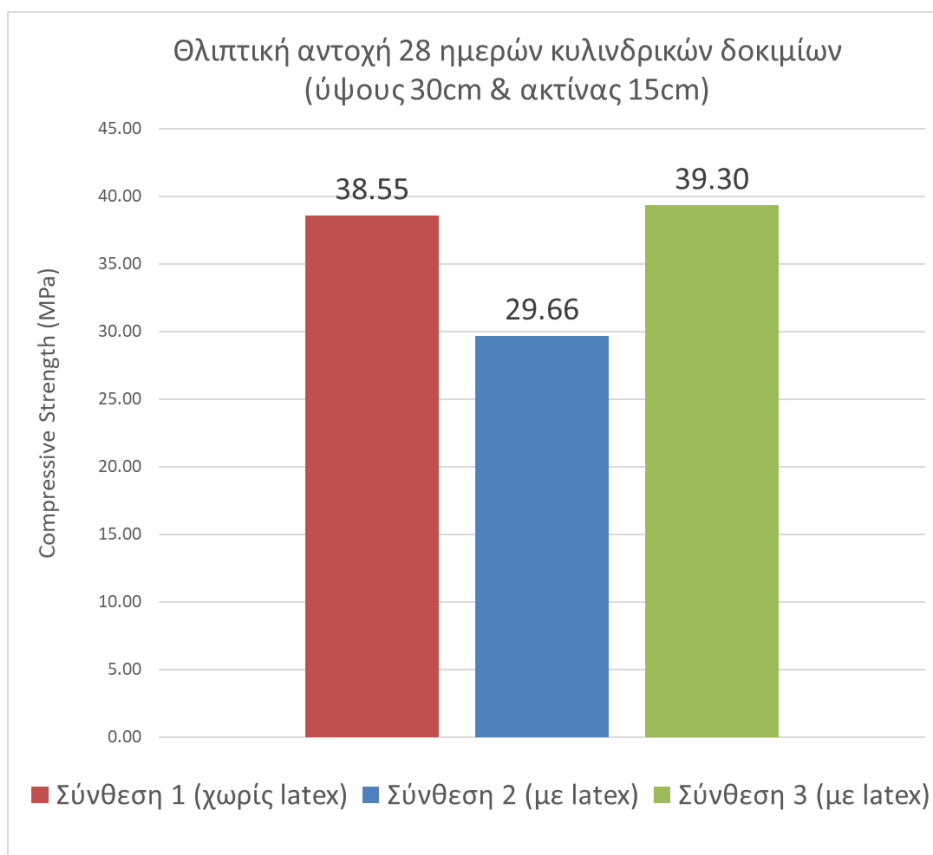
Τα κυβικά δοκίμια 4cm προήλθαν από τα δύο μισά των πρισματικών δοκιμίων 4 X 4 X 16cm (τριπλέτες) μετά την δοκιμή κάμψης.

Είναι προφανές ότι τα δοκίμια των τριπλετών που περιείχαν στη σύνθεσή τους και κρυσταλλίτες και ίνες είχαν την καλύτερη απόκριση στο τεστ μονοαξονικής θλίψης. Η Σύνθεση 1 αποδείχθηκε η βέλτιστη εκ αυτών, καθώς η αντοχή των δύο συνθέσεων που περιείχαν latex παρουσίασε πτώση της τάξεως του 35%

Η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων χωρίς κρυσταλλίτες και ίνες, με latex εμφάνισε πτώση 48% συγκριτικά με το μείγμα αναφοράς. Η αντοχή των άοπλων δοκιμίων με κρυσταλλίτες και latex είχε μία αντίστοιχη πτώση κοντά στο 42%.

Οι κρυσταλλίτες φαίνεται να έχουν μικρή επίδραση στην αντοχή υπό θλίψη, η οποία δεν είναι ξεκάθαρα αρνητική ή θετική.

c. Θλιπτική αντοχή κυλινδρικών δοκιμίων

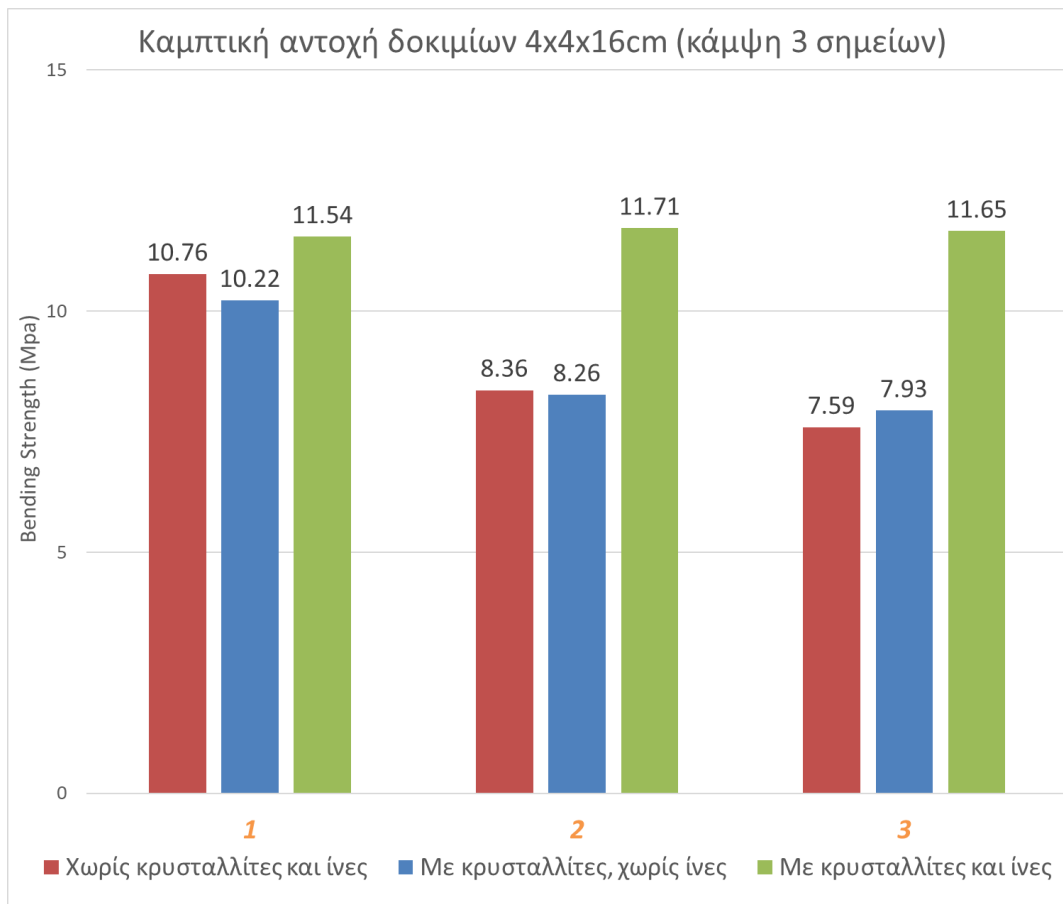


ΣΧΗΜΑ 3: ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ 28 ΗΜΕΡΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΥΨΟΥΣ 30CM & ΑΚΤΙΝΑΣ 15CM

Το πολύ ενδιαφέρον σε αυτό το διάγραμμα είναι ότι το latex «κατεβάζει» πολύ λίγο έως καθόλου την θλιπτική αντοχή των κυλινδρικών δοκιμίων. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια της δεύτερης σύνθεσης παρουσιάζουν μία πτώση **23%** αναφορικά με την πρώτη σύνθεση. Η τρίτη σύνθεση, όμως, δεν εμφανίζει καμία πτώση, αντιθέτως έχει μία ανεπαίσθητη αύξηση σε σύγκριση με το μείγμα αναφοράς. Ακόμη, η αντοχή υπό θλίψη του κυλίνδρου και του κύβου (15cm) της Σύνθεσης 3 βρίσκονται πάρα πολύ κοντά μεταξύ τους ($f_{c,κυλίνδρου} = 39.30\text{MPa}$ και $f_{c,κύβου} = 41.37\text{MPa}$), πράγμα παράδοξο. Αυτό καταδεικνύει την ανομοιομορφία του υλικού της τρίτης σύνθεσης, η οποία πιθανότατα οφείλεται στην ανεπιτυχή συμπύκνωση. Το ευχάριστο, ωστόσο, είναι ότι το υλικό της Σύνθεσης 3 δύναται να προσεγγίσει τις υψηλές επιθυμητές αντοχές, όπως αυτές της σύνθεσης αναφοράς, με την προϋπόθεση φυσικά να γίνει κατάλληλη συμπύκνωση και χειρισμός του μείγματος.

2. Καμπτική αντοχή

a. Καμπτική αντοχή πρισματικών δοκιμίων 4x4x16cm



ΣΧΗΜΑ 4: ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ 28 ΗΜΕΡΩΝ ΠΡΙΣΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 4x4x16CM (Η ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΣΤΟΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΑΞΟΝΑ ΑΝΑΦΕΡΕΤΑΙ ΣΤΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ)

Η καμπτική αντοχή των μικρών πρισματικών δοκιμίων (από τις τριπλέτες) και των τριών συνθέσεων κυμαίνεται στο ίδιο επίπεδο – γύρω από τα 10 MPa. Συγκεκριμένα, η αντοχή των δοκιμίων που περιέχουν στην σύνθεσή τους και κρυσταλλίτες και ίνες είναι απολύτως ίδια στα τρία μείγματα – 11.5 MPa. Η προσθήκη του latex στα δοκίμια χωρίς κρυσταλλίτες και ίνες αλλά και σε αυτά με κρυσταλλίτες, χωρίς ίνες επιφέρει μία μικρή σχετικά πτώση, της τάξεως του **20%**.

Το πρόβλημα της συμπύκνωσης της Σύνθεσης 3, πέρα από το γεγονός ότι οδήγησε στην παραγωγή ανομοιογενούς υλικού, όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, προκάλεσε την συγκέντρωση της συντριπτικής πλειοψηφίας των ινών στην κάτω παρειά των δοκιμίων, πράγμα που δεν συνέβη σε καμία από τις άλλες δύο συνθέσεις, στις οποίες οι ίνες βρέθηκαν να είναι ομοιόμορφα κατανομημένες σε όλη την διατομή του εκάστοτε δοκιμίου. Ως πιθανότερη αιτία για αυτή την αστοχία λογίζεται ο υπερβολικός βαθμός συμπύκνωσης. Το νωπό μείγμα προέκυψε πολύ εργάσιμο και χαρακτηρίστηκε ως αυτοσυμπυκνούμενο. Συνεπώς, το ορθό και φρόνιμο ήταν να ελαχιστοποιηθεί, αν γινόταν διόλου, η χρήση της δονητικής τράπεζας. Αντιθέτως, αυτό που έγινε ήταν να πραγματοποιηθεί η πρότυπη συμπύκνωση και για το τρίτο

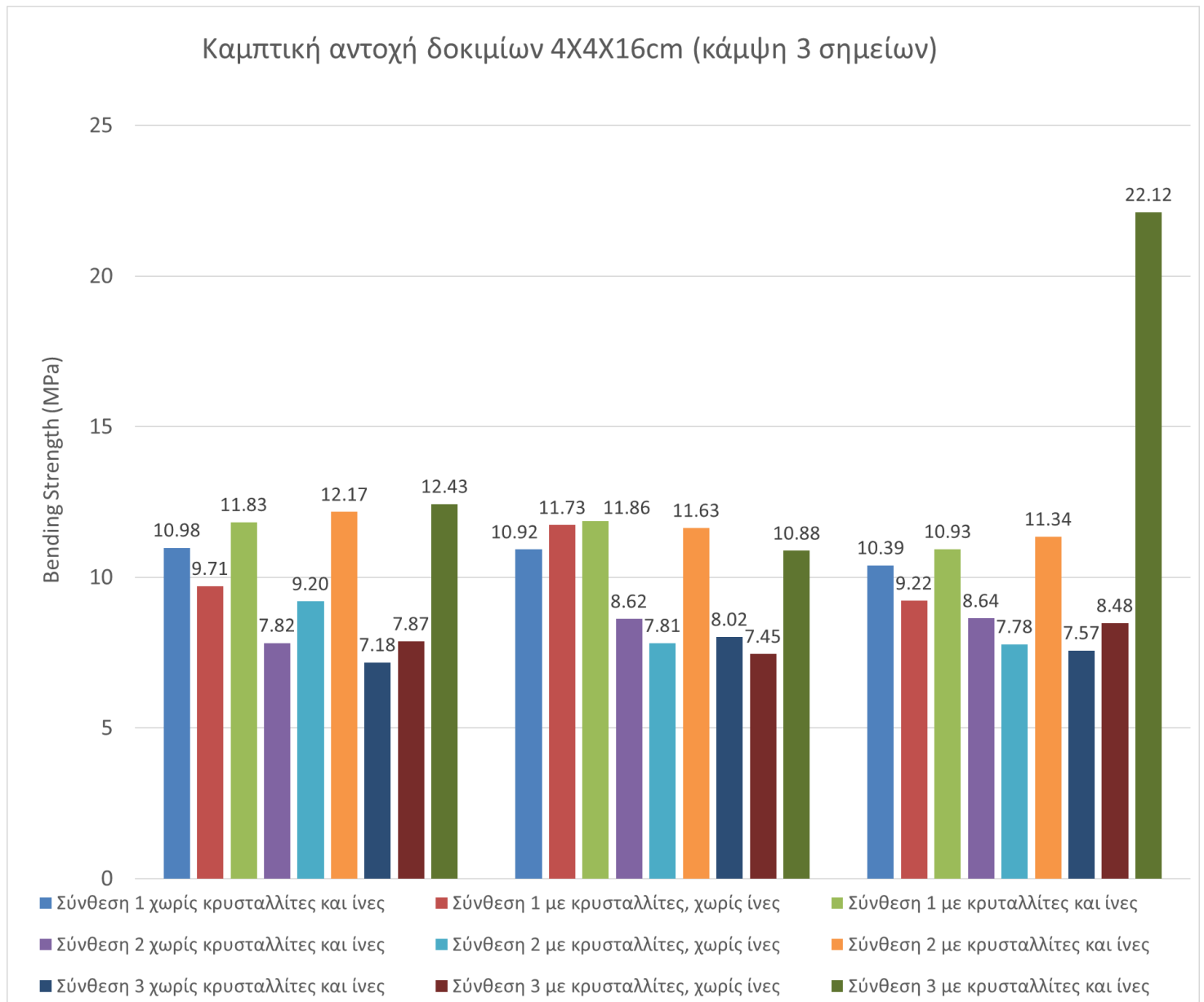
μείγμα, όπως ακριβώς συνέβη και με τα άλλα δύο. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, τα δοκίμια της τρίτης σύνθεσης κατέληξαν να λειτουργούν σχεδόν ως άοπλα, όταν η φόρτιση ήταν παράλληλη με την παρειά στην οποία συγκεντρώνονταν οι ίνες, καθώς αυτές αδυνατούσαν να συνεισφέρουν στην ανάληψη των καμπτικών φορτίων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο προσανατολισμός των ινών και στις τρεις συνθέσεις ήταν ο επιθυμητός – η μεγάλη τους διάσταση παράλληλη με την μεγάλη διάσταση του δοκιμίου.



ΣΧΗΜΑ 5: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΤΟΜΗ ΠΡΙΣΜΑΤΙΚΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 4x4x16CM ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 3

Κρίνεται απαραίτητο να τονιστεί ότι τα δοκίμια της τρίτης σύνθεσης κάμφθηκαν με τις ίνες να βρίσκονται παράλληλα στη διεύθυνση της φόρτισης, προς την πλευρά της ασφάλειας των αποτελεσμάτων. Σε αντίθετη περίπτωση, ωστόσο, αναμένονται αυξημένα όρια θραύσης στην κάμψη.



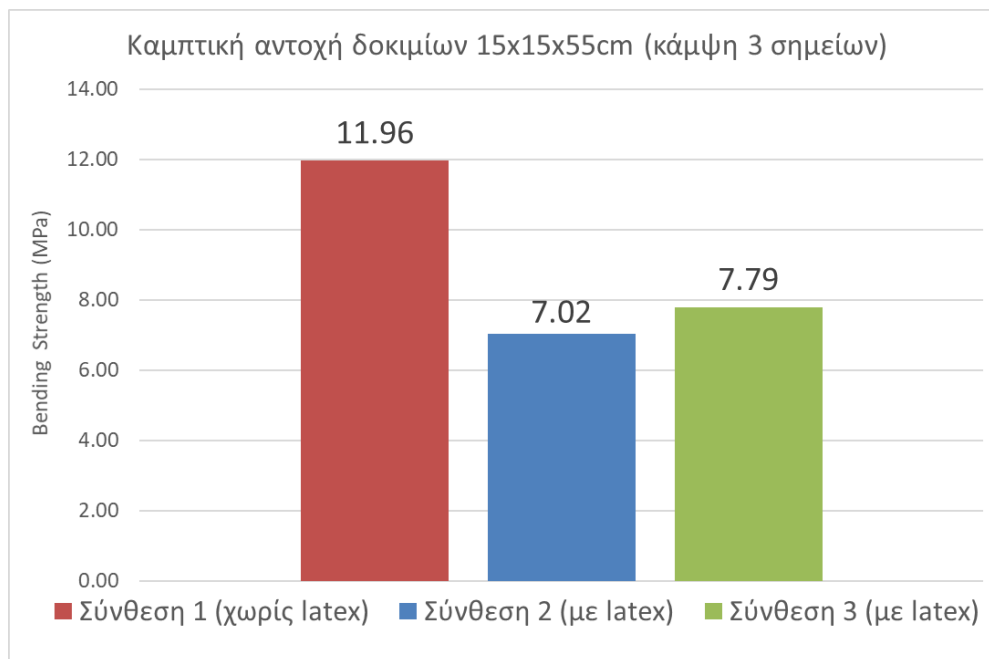
ΣΧΗΜΑ 6: ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ 28 ΗΜΕΡΩΝ ΠΡΙΣΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 4x4x16CM

Η εικασία που έγινε ανωτέρω, λοιπόν, επιβεβαιώνεται από ένα δοκίμιο της τρίτης σύνθεσης, το οποίο υπέστη κάμψη με τις ίνες να βρίσκονται στην εφελκόμενη πλευρά και να συνεισφέρουν δραματικά πολύ στην ανάληψη του καμπτικού φορτίου και συνεπώς στην ανάπτυξη της τελικής καμπτικής αντοχής του δοκιμίου. Συγκεκριμένα, η καμπτική αντοχή του δοκιμίου αυτού διπλασιάστηκε (**22.12 MPa**) σε σχέση με τα δοκίμια της ίδιας σύνθεσης τα οποία κάμφθηκαν με τις ίνες να συγκεντρώνονται σε κάθετη παρεία στην εφελκόμενη πλευρά των δοκιμίων (**12.43 MPa και 10.88 MPa**).

Σημειώνεται ότι η αντοχή του τελευταίου δοκιμίου δεν προσμετρήθηκε στον μέσο όρο καμπτικής αντοχής της τρίτης σύνθεσης και δεν συμπεριλήφθηκε στο διάγραμμα του ΣΧΗΜΑΤΟΣ 4 προκειμένου τα αποτελέσματα τα είναι αξιόπιστα και συγκρίσιμα. Επιπλέον, θα ήταν επικίνδυνο να θεωρείται εξασφαλισμένη η ανάληψη των καμπτικών φορτίων από τις ίνες ακόμα και όταν αυτές βρίσκονται στην εφελκόμενη

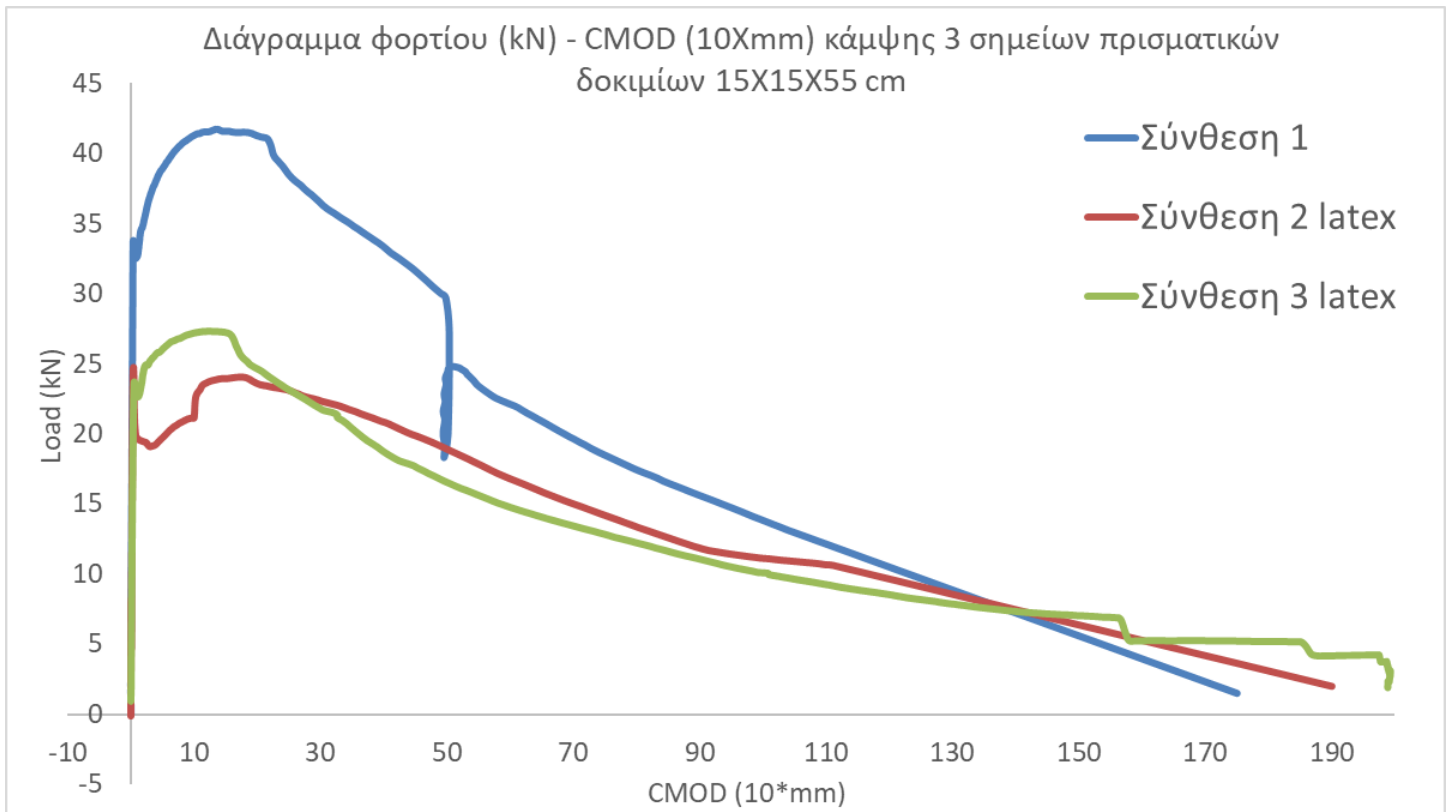
πλευρά του δοκιμίου εξαιτίας της μικρής επικάλυψης του σκυροδέματος. Αν αυτή αποβεί τελικά ανεπαρκής, δεν θα παρέχονται οι κατάλληλες συνθήκες συνάφειας προκειμένου τα δύο υλικά να καταφέρουν να λειτουργήσουν ως ένα και να επιτευχθεί πράγματι και σε όλες τις περιπτώσεις η αυξημένη αντοχή που παρατηρήθηκε στο τελευταίο δοκίμιο της Σύνθεσης 3.

b. Καμπτική αντοχή πρισματικών δοκιμίων 15x15x55cm



ΣΧΗΜΑ 7: ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ 28 ΗΜΕΡΩΝ ΠΡΙΣΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 15x15x55CM

Η καμπτική αντοχή του μεγάλου πρισματικού δοκιμίου (15x15x55cm) της πρώτης σύνθεσης είναι κατά τι μεγαλύτερη των άλλων δύο. Λαμβάνοντας, όμως, υπόψη την αδυναμία του δοκιμίου της τρίτης σύνθεσης, καθώς αυτό δεν κάμφθηκε με τον ενδεδειγμένο τρόπο -με τις ίνες στην εφελκυσόμενη πλευρά-, το δείγμα αυτό δεν θεωρείται αντιπροσωπευτικό καθώς πρόκειται για μεγάλα δοκίμια στα οποία η θέση των ινών παίζει πρωταρχικό ρόλο στην ανάπτυξη των καμπτικών αντοχών τους.

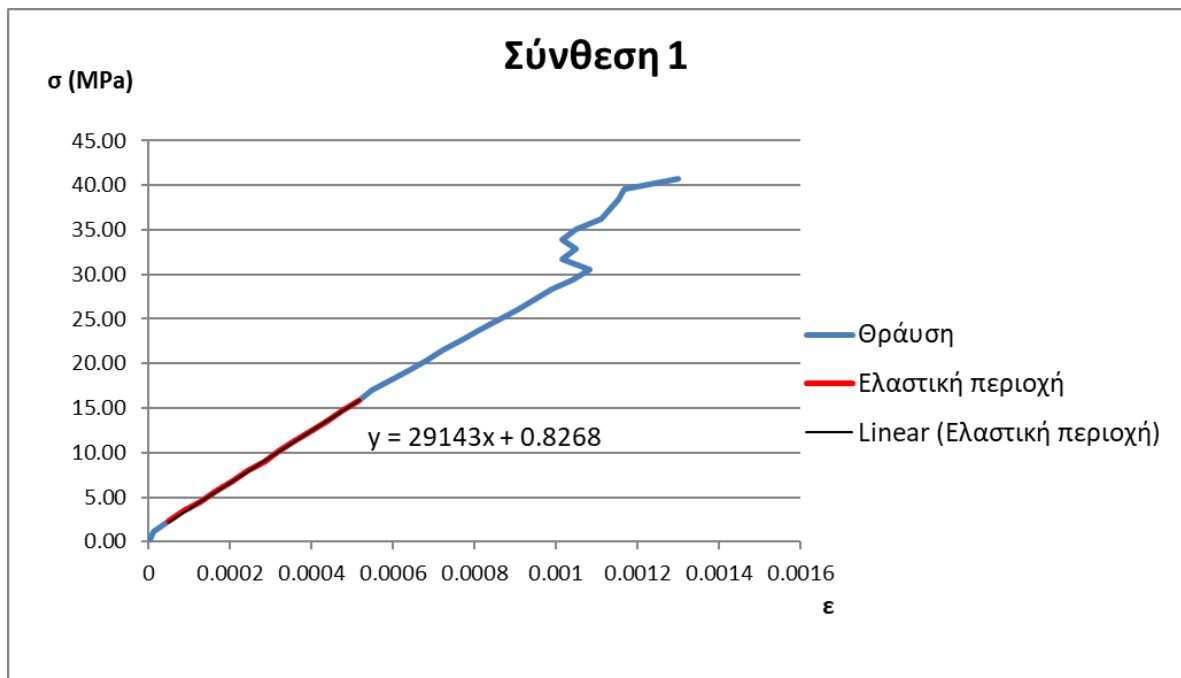


ΣΧΗΜΑ 8: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΧΕΙΛΙΩΝ ΤΗΣ ΡΩΓΜΗΣ [LOAD – CRACK MOUTH OPENING DISPLACEMENT] ΠΡΙΣΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 15x15x55CM

Ως συνέπεια του προηγούμενου διαγράμματος (ΣΧΗΜΑ 7), η ενέργεια που απορροφάει το πρισματικό δοκίμιο 15x15x55cm της πρώτης σύνθεσης υπό κάμψη είναι εμφανώς μεγαλύτερη από των υπολοίπων συνθέσεων. Εξακολουθεί όμως, να μην είναι πλήρως αντιπροσωπευτική η εικόνα του τρίτου δοκιμίου για τον λόγο που εξηγήθηκε εκτενώς ανωτέρω.

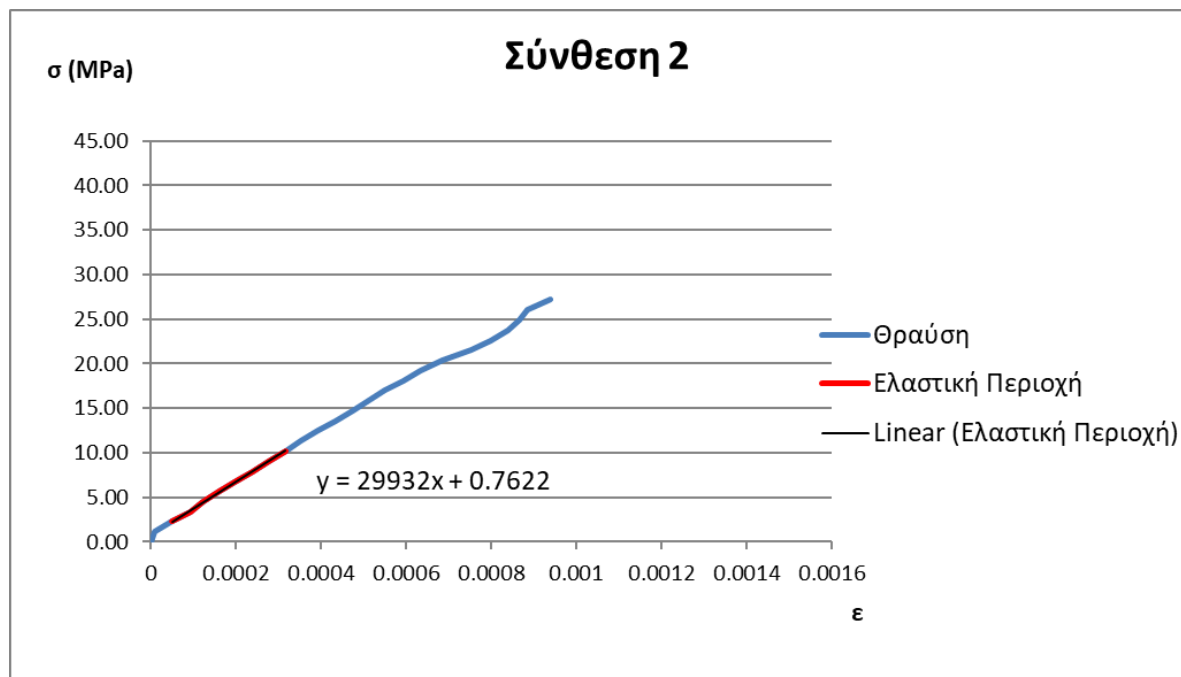
Παρατηρείται ότι με την προθήκη των ιών στο μείγμα το σκυρόδεμα δεν αστοχεί πλέον ψαθυρά αλλά πλάστιμα, απορροφώντας μεγάλα ποσά ενέργειας. Μετά την δημιουργία της πρώτης ρωγμής (Crack Mouth Opening) μεγέθους περίπου 0.1-0.2 mm, που για ένα άοπλο σκυρόδεμα θα σήμαινε και την αστοχία του, τα παρόντα ινοπλισμένα δοκίμια εμφανίζουν επιπλέον αύξηση του αναλαμβανόμενου φορτίου λόγω ακριβώς της ύπαρξης των ιών.

3. Στατικό μέτρο ελαστικότητας



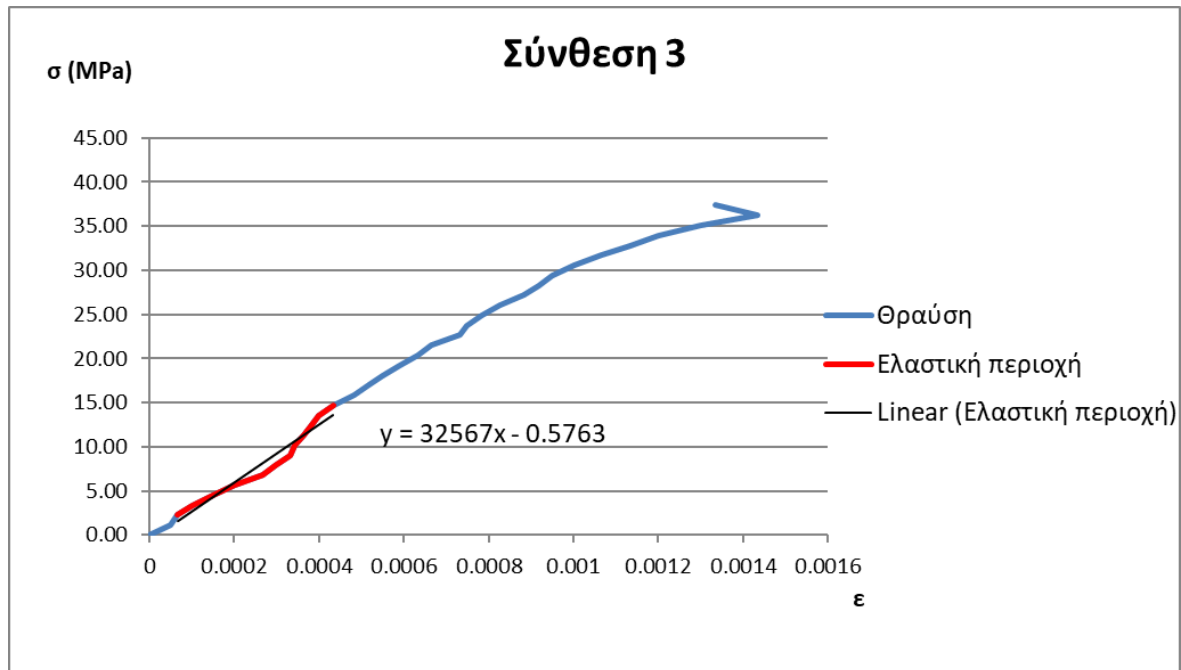
ΣΧΗΜΑ 9: ΣΤΑΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 1

$E_1 = 29.143 \text{ GPa}$



ΣΧΗΜΑ 10: ΣΤΑΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 2

$E_2 = 29.932 \text{ GPa}$

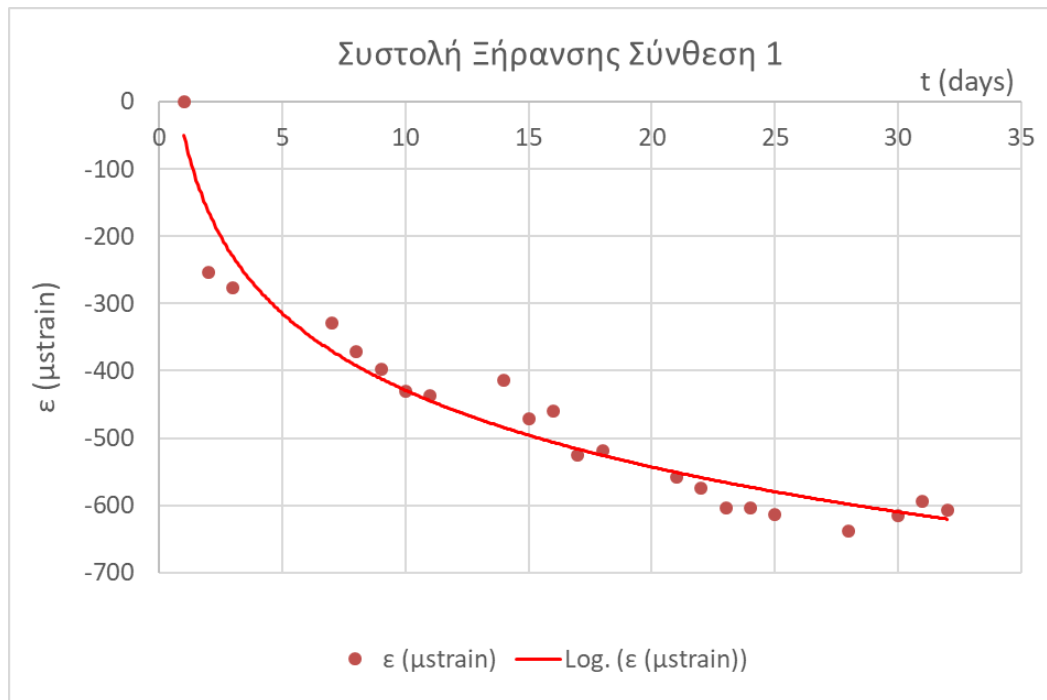


ΣΧΗΜΑ 11: ΣΤΑΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 3

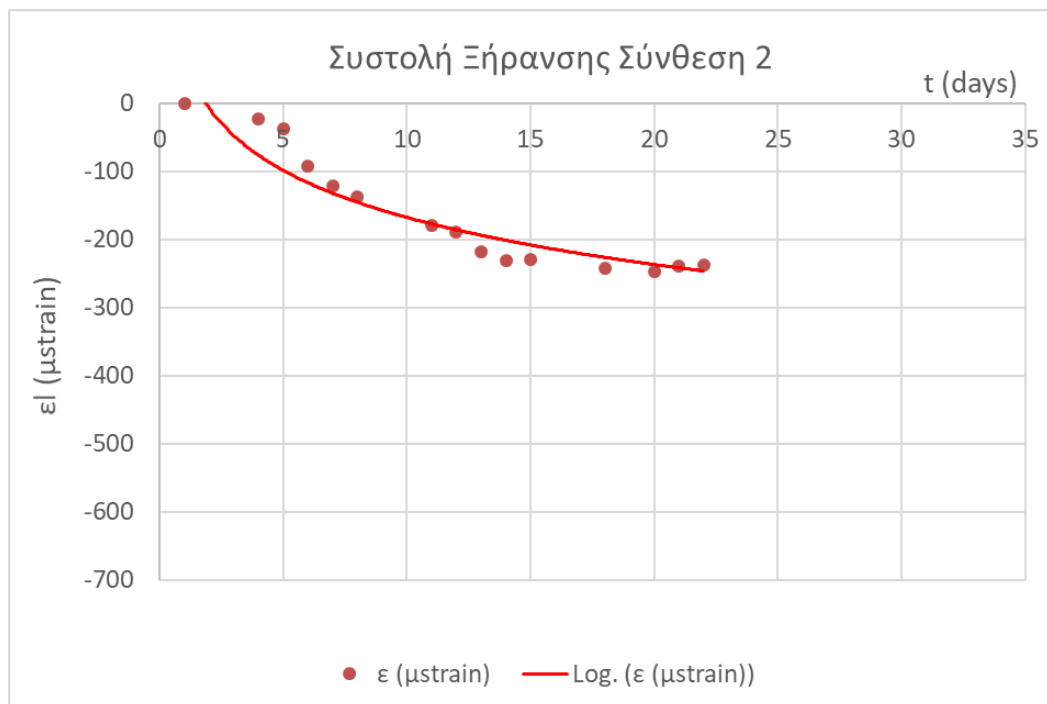
$E_3 = 32.567 \text{ GPa}$

Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος των μειγμάτων 1 και 2 είναι ίδιο (διαφορά μεγεθών της τάξεως του 3%), ενώ αυτό της Σύνθεσης 3 αυξήθηκε κατά περίπου **12%** αναφορικά με την πρώτη σύνθεση. Μοιάζει να επιβεβαιώνεται η αρχική υπόθεση, ότι το latex αυξάνει την ελαστικότητα του υλικού, ωστόσο, επειδή το ποσοστό της αύξησης είναι αρκετά μικρό πιθανόν να απαιτούνται περισσότερες συνθέσεις για την εκφορά ενός απολύτως ασφαλούς πορίσματος.

4. Συστολή Ξήρανσης



ΣΧΗΜΑ 12: ΣΥΣΤΟΛΗ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 1



ΣΧΗΜΑ 13: ΣΥΣΤΟΛΗ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 2

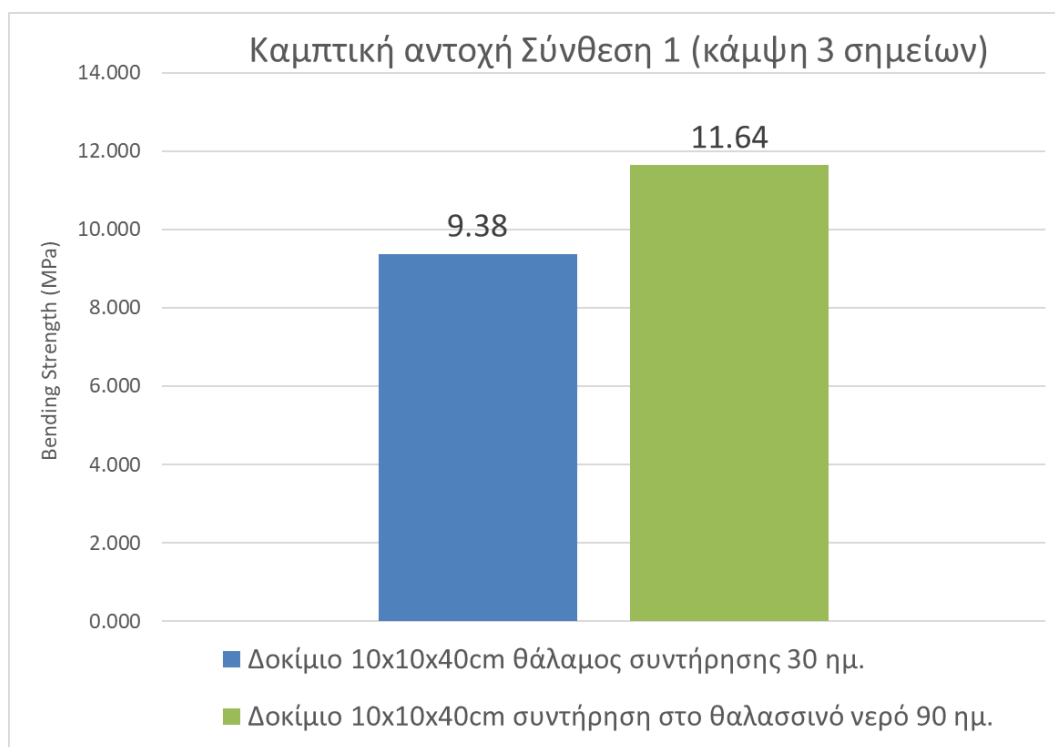
Η συστολή ξήρανσης μετρήθηκε στο μεγαλύτερο πρισματικό δοκίμιο που σκυροδετήθηκε, το 10x10x100cm και τοποθετήθηκε αμέσως μετά το ξεκαλούπωμά του στον θάλαμο ξήρανσης, όπου επικρατούν ελεγχόμενες και σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας (20° C) και υγρασίας (50%). Η μέτρηση αφορά τις Συνθέσεις 1 και 2.

Το δοκίμιο του πρώτου μείγματος παρουσίασε συστολή λίγο μεγαλύτερη των 600μm μετά το πέρας των 32 ημερών όποτε και έπαψε η τέλεση του φαινομένου σε μετρήσιμο -σε τακτική τουλάχιστον βάση- βαθμό.

Το δοκίμιο του δεύτερου μείγματος εμφάνισε συστολή ξήρανσης λίγο μικρότερη των 250μm κατά τη διάρκεια 22 ημερών και στη συνέχεια δεν υπήρξε περαιτέρω βράχυνση έως το πέρας ενός μήνα.

Η προσθήκη του latex στο σκυρόδεμα είχε εξαιρετικά θετική επίδραση όσον αφορά τη συστολή ξήρανσης μιας και περιόρισε το φαινόμενο κατά **60%**. Μάλιστα, η θετική δράση του φάνηκε τόσο καθαρά, χωρίς να αφήνει χώρο για διαφορετικές ερμηνείες, που δεν παρουσιάστηκε η ανάγκη να εξεταστεί ξανά στο δέμα της Σύνθεσης 3. Αυτή η ιδιότητα του latex έχει πολύ μεγάλη αξία ιδίως για τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής δεδομένου πως ακριβώς σε αυτά τα προβλήματα λόγω συστολής ξήρανσης είναι πολύ έντονα.

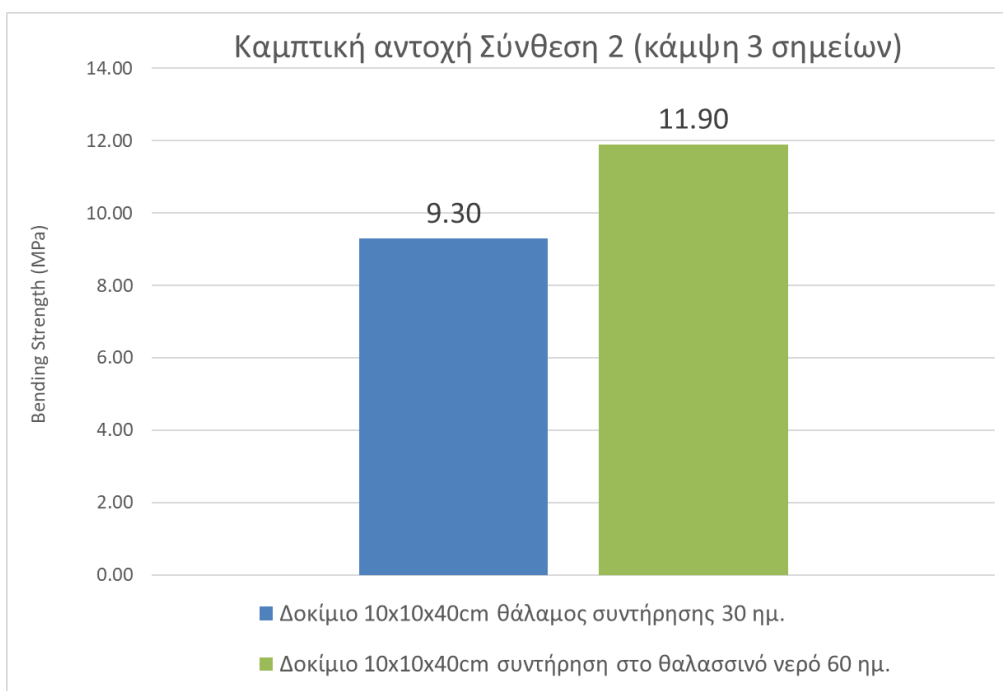
5. Επίδραση του θαλασσινού νερού στην καμπτική αντοχή



ΣΧΗΜΑ 14: ΕΠΙΡΡΟΗ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΠΡΙΣΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 10x10x40cm ΣΥΝΘΕΣΗΣ 1 (ΧΩΡΙΣ LATEX)

Το θαλασσινό νερό δεν ήταν μία προσομοίωση τέτοιου με ανάμειξη νερού της βρύσης με ιωδιούχο αλάτι. Ήταν πράγματι θαλασσινό νερό της περιοχής (Θερμαϊκός κόλπος, δήμος Καλαμαριάς).

Η συντήρηση του πρισματικού δοκιμίου 10x10x40cm της Σύνθεσης 1 (χωρίς latex) στο θαλασσινό νερό για χρονική διάρκεια 90 ημερών επέφερε αύξηση της καμπτικής αντοχής κατά **24%** συγκριτικά με αντίστοιχο δοκίμιο το οποίο βρισκόταν για 30 ημέρες στο ειδικό θάλαμο συντήρησης (ελεγχόμενες και σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας – τα δοκίμια θεωρείται ότι βρίσκονται σε κορεσμένη κατάσταση).



ΣΧΗΜΑ 15: ΕΠΙΡΡΟΗ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΠΡΙΣΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 10x10x40cm ΣΥΝΘΕΣΗΣ 2 (ME LATEX)

Η συντήρηση του πρισματικού δοκιμίου 10x10x40cm της Σύνθεσης 2 (με latex) στο θαλασσινό νερό για χρονική διάρκεια 60 ημερών έναντι αυτής στον θάλαμο συντήρησης για 30 ημέρες επέφερε και πάλι αύξηση της καμπτικής αντοχής, αυτή τη φορά κατά **28%**. Η αύξηση της αντοχής θεωρείται ίδιας τάξης και συνεπώς το latex δεν φαίνεται να επιδρά σημαντικά στην ευεργετική επιρροή της συντήρησης στο θαλασσινό νερό. Για να είναι όμως ακριβοδίκαιη η θεώρηση θα έπρεπε και το δοκίμιο της Σύνθεσης 2 να τοποθετηθεί στο θαλασσινό νερό για 90 (και όχι 60) ημέρες, όπως ακριβώς της Σύνθεσης 1. Η επίδραση του latex, αν τελικά υφίσταται τέτοια, μοιάζει στην προκειμένη περίπτωση να τείνει να είναι θετική.

Τα αποτελέσματα των δύο πρώτων συνθέσεων δείχνουν ότι η συντήρηση στο θαλασσινό νερό επιφέρει αύξηση της καμπτικής αντοχής. Προκειμένου να γίνει σαφές ότι η ευεργετική δράση οφείλεται στην παρουσία του θαλασσινού νερού και όχι της υγρασίας εν γένει ή της παράτασης του χρόνου συντήρησης απαιτούνται σαφώς περαιτέρω δοκιμές και έρευνα. Όπως και να έχει όμως, πιθανός μηχανισμός δράσης, υπεύθυνος για την «ευχάριστη» αυτή τροπή είναι η αυτοϊαση, η πλήρωση δηλαδή του τριχοειδούς και της εγγενούς στο σκυρόδεμα μικρορηγμάτωσης με σκληρό υλικό και συνεπώς αύξηση της καμπτικής (και όχι μόνο) αντοχής του υλικού. Το επόμενο κεφάλαιο πραγματεύεται αυτήν ακριβώς την ιδιότητα – το λεγόμενο self-healing.

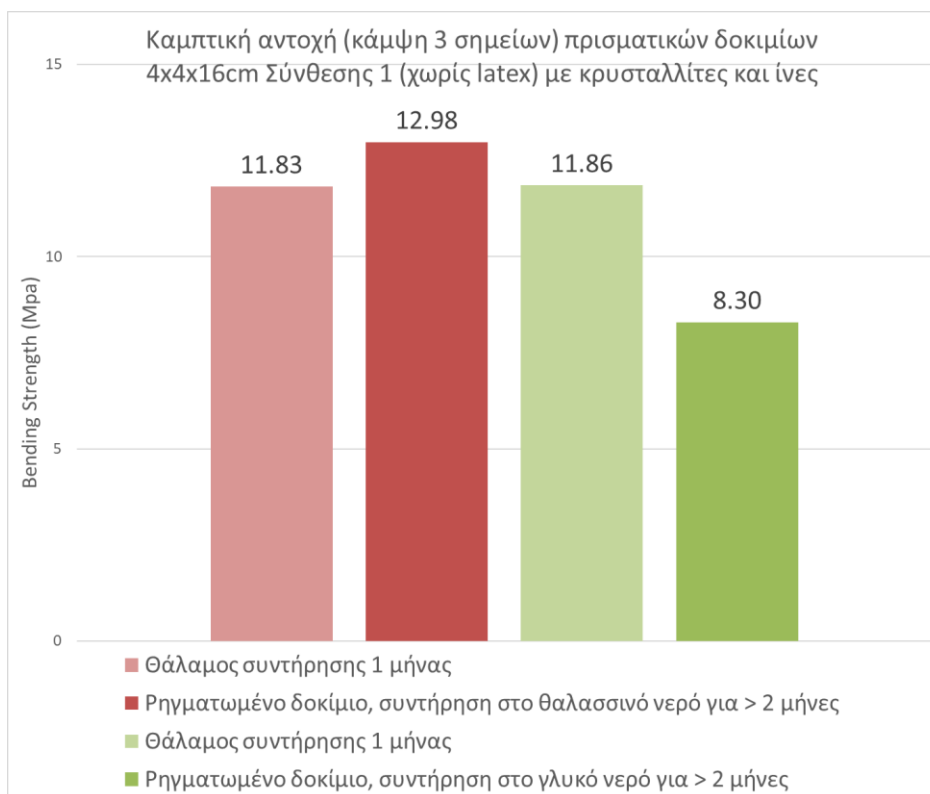
B. Αυτοϊαση – Self-healing

1. Ιδιότητα της αυτοϊασης στην κάμψη & η επίδραση του θαλασσινού νερού

Προκειμένου να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της ιδιότητας της αυτοϊασης υπό κάμψη σε περιβάλλοντα γλυκού (νερό της βρύσης) αλλά και θαλασσινού νερού δύο πρισματικά δοκίμια 4x4x16cm της Σύνθεσης 1 (χωρίς latex) υπόκεινται μετά το

πέρασ της παραμονής τους στον θάλαμο συντήρησης (28 ημέρες) στο τεστ κάμψης 3 σημείων. Καταγράφονται οι τελικές αντοχές τους (αχνό κόκκινο και πράσινο χρώμα στο διάγραμμα ΣΧΗΜΑΤΟΣ 16). Εξαιτίας, όμως, της παρουσίας ινών στη σύνθεση των εν λόγω δοκιμίων στη θέση αστοχίας σχηματίζονται μικρορωγμές, εύρους της τάξεως των 50 – 300μm. Το εύρος αυτό κρίνεται κατάλληλο για την δράση του μηχανισμού της αυτοϊασης. Έτσι, λοιπόν, το ένα δοκίμιο τοποθετείται για κάτι παραπάνω από 60 ημέρες σε δοχείο με γλυκό νερό και το άλλο, για ίδια διάρκεια, σε δοχείο με θαλασσινό νερό. Κατά τη λήξη του χρόνου τα δύο δοκίμια ξανά υποβάλλονται στη δοκιμή κάμψης 3 σημείων. Το εντυπωσιακό είναι ότι η τελική καμπτική αντοχή του δοκιμίου που συντηρήθηκε στο θαλασσινό νερό έφτασε και ξεπέρασε την πρότερη αντοχή αγγίζοντας τα 13 MPa (έντονο κόκκινο χρώμα στο ίδιο διάγραμμα), πρακτικά αυξάνοντας την αντοχή του σχεδόν κατά **10%**. Αντιθέτως, αυτό το οποίο συντηρήθηκε στο γλυκό νερό έφτασε μόλις τα 8.3 MPa (έντονο πράσινο χρώμα), περίπου το 70% της πρότερης αντοχής του. Αυτό αποτελεί μία από τις ενδείξεις που λήφθηκαν, ότι το self-healing σκυρόδεμα λειτουργεί καλύτερα παρουσία θαλασσινού νερού. Ακόμα, θα μπορούσε να αποτελεί μία «πρόχειρη», κατευθυντήρια απάντηση στο ερώτημα της προηγούμενης θεματικής ενότητας: αν πράγματι το θαλασσινό νερό ή άλλοι παράγοντες (υγρασία, αυξημένος χρόνος συντήρησης) δρα ευεργετικά στην ανάπτυξη των καμπτικών αντοχών του σκυροδέματος.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η θέση αστοχίας του δοκιμίου που τοποθετήθηκε στο θαλασσινό νερό, καθώς η αστοχία δεν συνέβη στη θέση του αρχικού μικρορήγματος, αλλά δίπλα από αυτό (ΣΧΗΜΑΤΑ 17 & 18). Το γεγονός αυτό δημιουργεί θετική εντύπωση καθώς δείχνει ακριβώς την καλή ποιότητα -σκληρότητα και μηχανικές αντοχές- του υλικού που πλήρωσε την αρχική ρωγμή.



ΣΧΗΜΑ 16: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΙΔΙΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΑΥΤΟΪΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΜΨΗ ΠΡΙΣΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ 4x4x16cm ΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 1 (ΧΩΡΙΣ LATEX) ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΚΑΙ ΓΛΥΚΟΥ ΝΕΡΟΥ



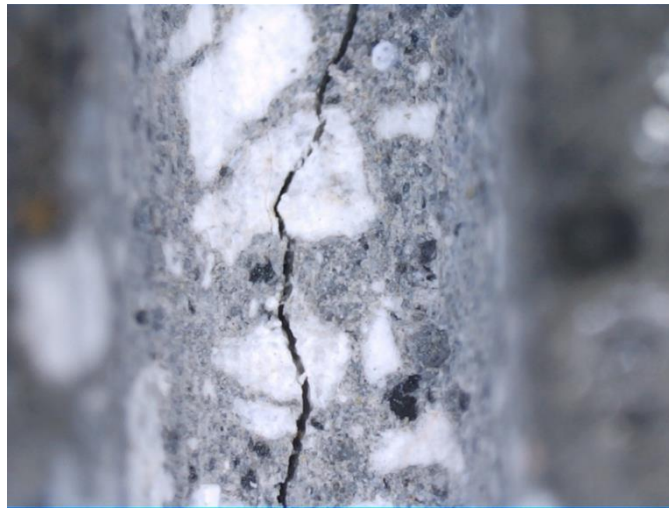
ΣΧΗΜΑ 17: ΘΕΣΕΙΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΡΩΓΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΠΟΥ ΣΥΝΤΗΡΗΘΗΚΕ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ



ΣΧΗΜΑ 18: ΘΕΣΕΙΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΡΩΓΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΠΟΥ ΣΥΝΤΗΡΗΘΗΚΕ ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ

2. Ιδιότητα της αυτοϊασης μικροσκοπικά & η επίδραση του θαλασσινού νερού

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η ιδιότητα της αυτοϊασης μικροσκοπικά. Για τον σκοπό αυτό γίνεται χρήση των μεσαίων πρισματικών δοκιμίων 10x10x40cm της Σύνθεσης 1 (χωρίς latex) και της Σύνθεσης 2 (με latex). Μετά το πέρας των 28 ημερών της παραμονής τους στον θάλαμο συντήρησης χαράσσονται κατά πλάτος κάθε δοκιμίου 3 εγκοπές, βάθους 3-10mm, προκειμένου να οδηγηθεί ο σχηματισμός των ρωγμών στα επιθυμητά σημεία. Στη συνέχεια τα δοκίμια υποβάλλονται σε ελεγχόμενη κάμψη 3 σημείων. Ο έλεγχος διενεργείται με την βοήθεια ενός ειδικού μηχανοστοιχείου, το οποίο τοποθετείται εκατέρωθεν των χειλιών της ρωγμής. Μόλις η ένδειξη του Crack Mouth Opening Displacement (CMOD) -η μέτρηση δηλαδή της μετατόπισης του ανοίγματος των χειλιών της ρωγμής- αγγίζει ένα εύρος της τάξεως των 50 με 300μm η δοκιμή σταματάει. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για την καθεμία από τις 3 εγκοπές του εκάστοτε δοκιμίου. Στις φωτογραφίες των ΣΧΗΜΑΤΩΝ 19 & 20 είναι διακριτές οι ρωγμές που δημιουργούνται εντός των εγκοπών. Στη συνέχεια, κάποια δοκίμια τοποθετούνται σε γλυκό και άλλα σε θαλασσινό νερό.



ΣΧΗΜΑ 19: ΡΩΓΜΗ ΕΝΤΟΣ ΤΗΣ ΕΓΚΟΠΗΣ



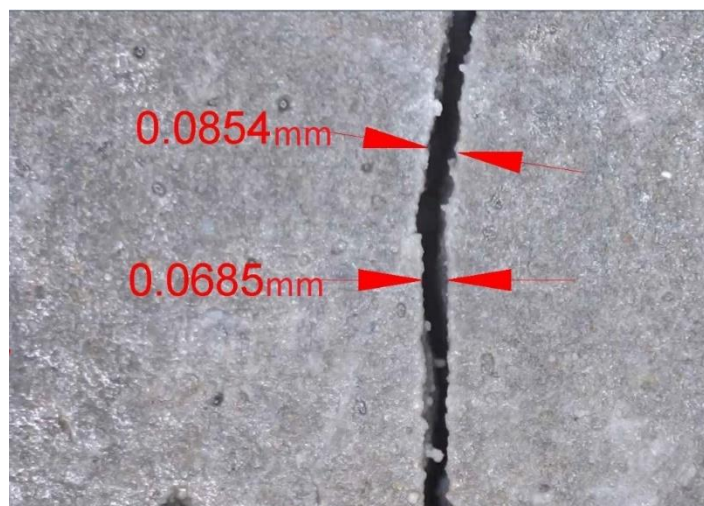
ΣΧΗΜΑ 20: ΡΩΓΜΗ ΕΝΤΟΣ ΤΗΣ ΕΓΚΟΠΗΣ

Οι φωτογραφίες έχουν τραβηχτεί με την βοήθεια μικροσκοπίου σταθερής μεγέθυνσης (zoom) και έχουν επεξεργαστεί σε πρόγραμμα σχεδίασης CAD υπό κλίμακα.

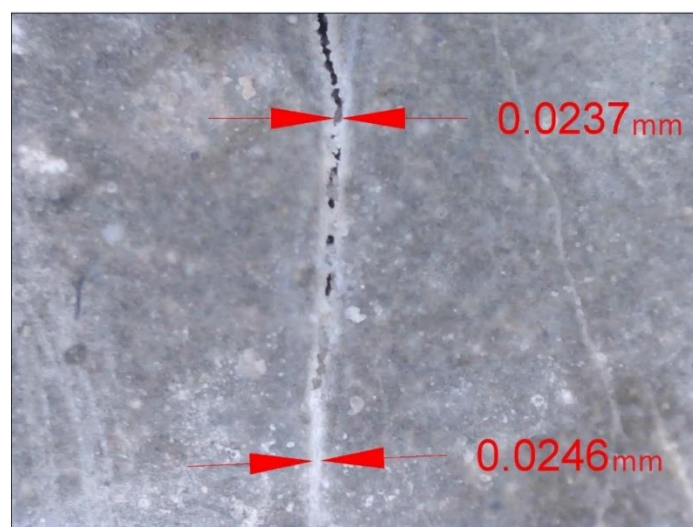
Το θολό τμήμα των φωτογραφιών οφείλεται στην αδυναμία του οπτικού μέσου να εστιάσει ταυτόχρονα σε δύο βάθη – σε αυτό μέσα στην εγκοπή (3-10mm βαθύτερα από την επιφάνεια του δοκιμίου) και σε αυτό της επιφάνειας του δοκιμίου.

a. Σύνθεση 1 – Συντήρηση σε γλυκό νερό 60 ημέρες

Εξετάζονται τα ρηγματωμένα δοκίμια της πρώτης σύνθεσης τα οποία βρίσκονταν σε δοχείο με γλυκό νερό για 60 ημέρες (φωτογραφίες των ΣΧΗΜΑΤΩΝ 21 & 22). Οι ρωγμές που προσεγγίζουν το πλάτος 1/10 του χιλιοστού του μέτρου (0.07-0.085mm) δεν έχουν κλείσει. Οι ρωγμές πλάτους κοντά στα 0.02 – 0.025mm φαίνεται να έχουν γεμίσει σε μερικά σημεία, όχι όμως σε όλο το μήκος της ρωγμής.



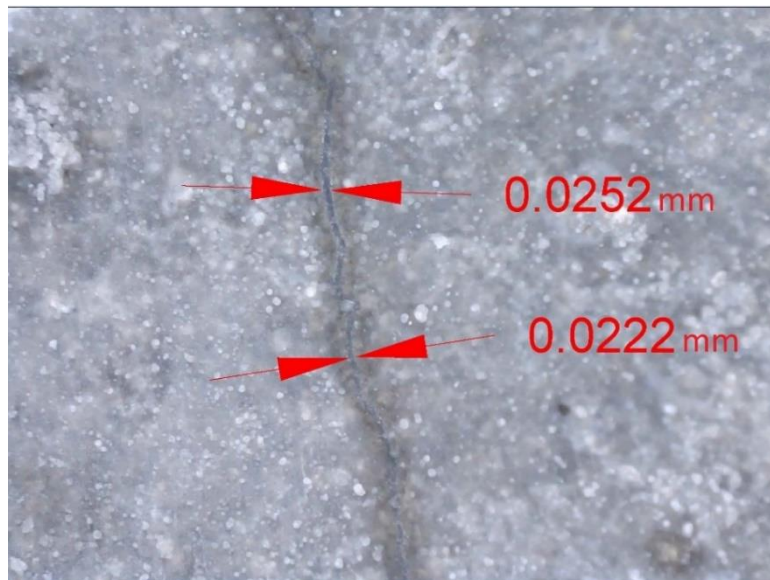
ΣΧΗΜΑ 21: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΣΕ ΘΕΣΗ ΡΩΓΜΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΠΕΡΙΠΟΥ 0.07-0.085 ΜΜ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 1, ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΕ ΓΛΥΚΟ ΝΕΡΟ 60 ΗΜΕΡΕΣ



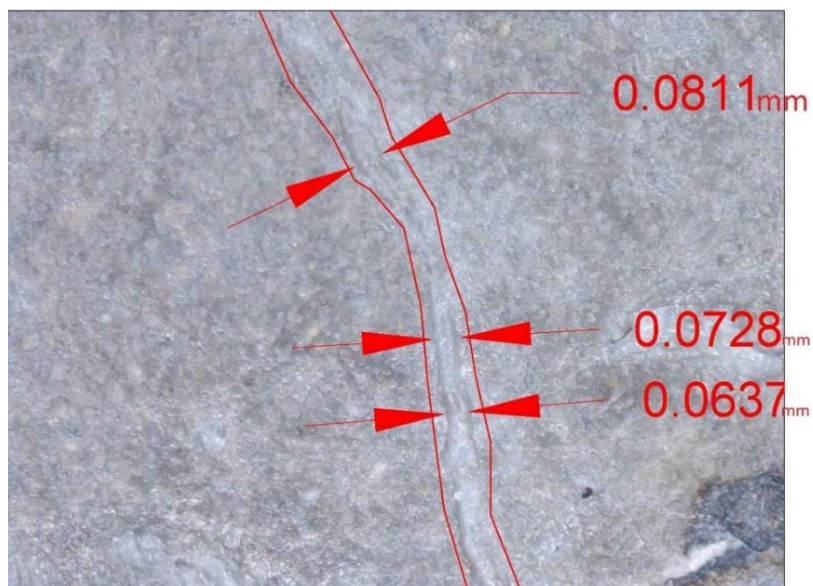
ΣΧΗΜΑ 22: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΣΕ ΘΕΣΗ ΡΩΓΜΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΠΕΡΙΠΟΥ 0.025 ΜΜ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 1, ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΕ ΓΛΥΚΟ ΝΕΡΟ 60 ΗΜΕΡΕΣ

b. Σύνθεση 1 – Συντήρηση σε θαλασσινό νερό 60 ημέρες

Στη συνέχεια εξετάζονται δοκίμια από την ίδια σύνθεση που συντηρήθηκαν στο θαλασσινό, αντί για γλυκό, νερό για τον ίδιο χρόνο των 60 ημερών. Εν αντιθέσει με τα προηγούμενα αποτελέσματα, οι ρωγμές που πλησιάζουν το 1/10 του χιλιοστού (0.065-0.08mm) έχουν πληρωθεί με υλικό σε σημείο που να γίνεται πια δυσδιάκριτη η ρωγμή.



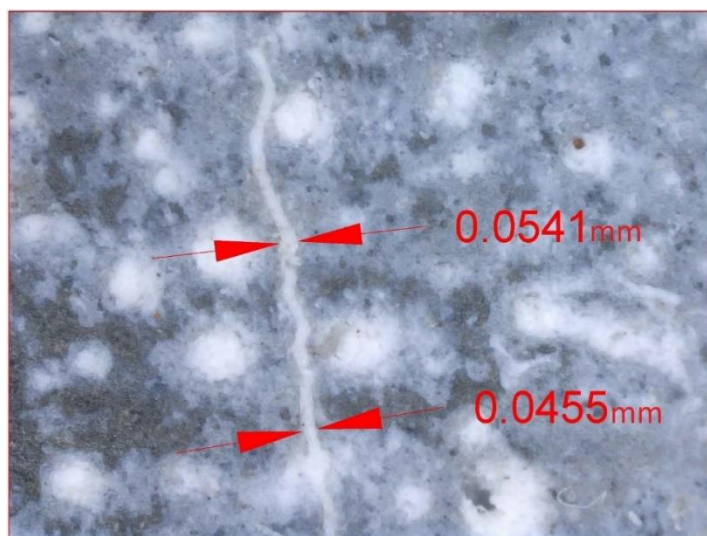
ΣΧΗΜΑ 23: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΣΕ ΘΕΣΗ ΡΩΓΜΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΠΕΡΙΠΟΥ 0.025 ΜΜ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 1, ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ 60 ΗΜΕΡΕΣ



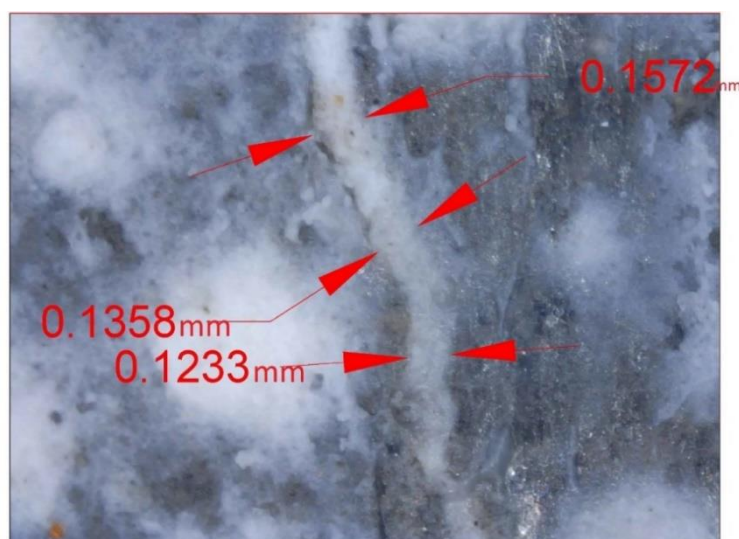
ΣΧΗΜΑ 24: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΣΕ ΘΕΣΗ ΡΩΓΜΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΠΕΡΙΠΟΥ 0.065-0.08 ΜΜ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 1, ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ 60 ΗΜΕΡΕΣ

c. Σύνθεση 2 – Συντήρηση σε γλυκό νερό 30 ημέρες

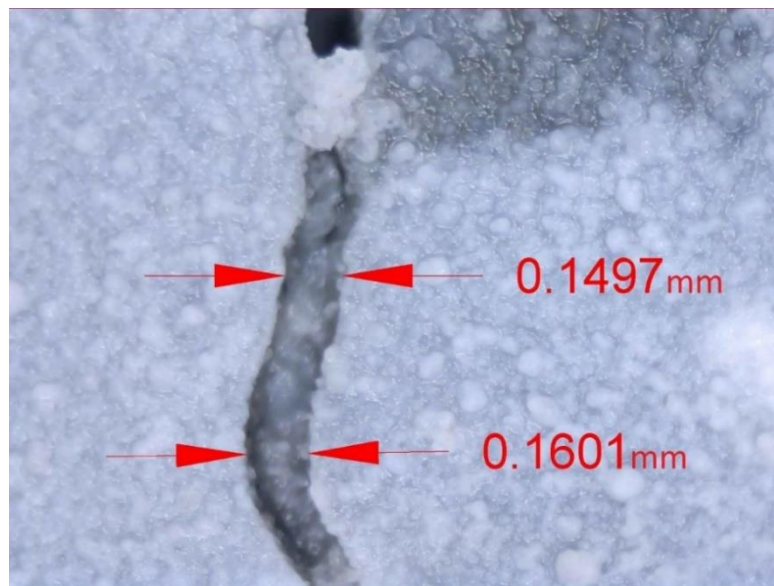
Η μελέτη προχωράει με την εξέταση των δοκιμίων της Σύνθεσης 2 (με latex). Υπέστησαν και αυτά με την σειρά τους ελεγχόμενη ρηγμάτωση μέσω κάμψης και συντηρήθηκαν για τις επόμενες 30 μέρες μέσα σε γλυκό νερό. Φαίνεται το σκυρόδεμα της Σύνθεσης 2 να έχει καλύτερη συμπεριφορά από το αντίστοιχο της Σύνθεσης 1 όσον αφορά την συμπεριφορά του στο κομμάτι της αυτοΐασης καθώς έχουν κλείσει ρωγμές εύρους μεγαλύτερου του 1/10 του χιλιοστού του μέτρου (**0.16mm**). Ακόμη και ο πόρος στη δομή του σκυροδέματος διαμέτρου λίγο μεγαλύτερης του μισού χιλιοστού (0.55m) έχει πληρωθεί με υλικό (φωτογραφία ΣΧΗΜΑΤΟΣ 28). Είναι φανερό ότι η παρουσία του latex έχει εξαιρετικά θετική επίδραση καθώς επέτρεψε στο μισό χρόνο -30 αντί για 60 ημέρες- το κλείσιμο των ρωγμών εύρους 10 φορές μεγαλύτερου από αυτό που κατέστη δυνατό να κλείσει στο δοκίμιο χωρίς latex μέσα σε γλυκό νερό.



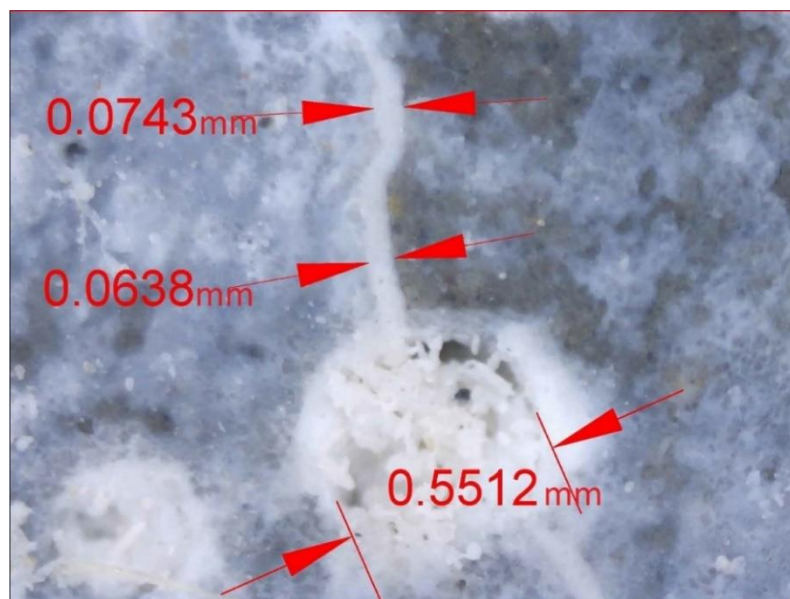
ΣΧΗΜΑ 25: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΣΕ ΘΕΣΗ ΡΩΓΜΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΠΕΡΙΠΟΥ 0.045-0.055 ΜΜ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 2, ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΕ ΓΛΥΚΟ ΝΕΡΟ 30 ΗΜΕΡΕΣ



ΣΧΗΜΑ 26: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΣΕ ΘΕΣΗ ΡΩΓΜΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΠΕΡΙΠΟΥ 0.12-0.16 ΜΜ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 2, ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΕ ΓΛΥΚΟ ΝΕΡΟ 30 ΗΜΕΡΕΣ



ΣΧΗΜΑ 27: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΣΕ ΘΕΣΗ ΡΩΓΜΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΠΕΡΙΠΟΥ 0.15-0.16 ΜΜ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 2, ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΕ ΓΛΥΚΟ ΝΕΡΟ 30 ΗΜΕΡΕΣ

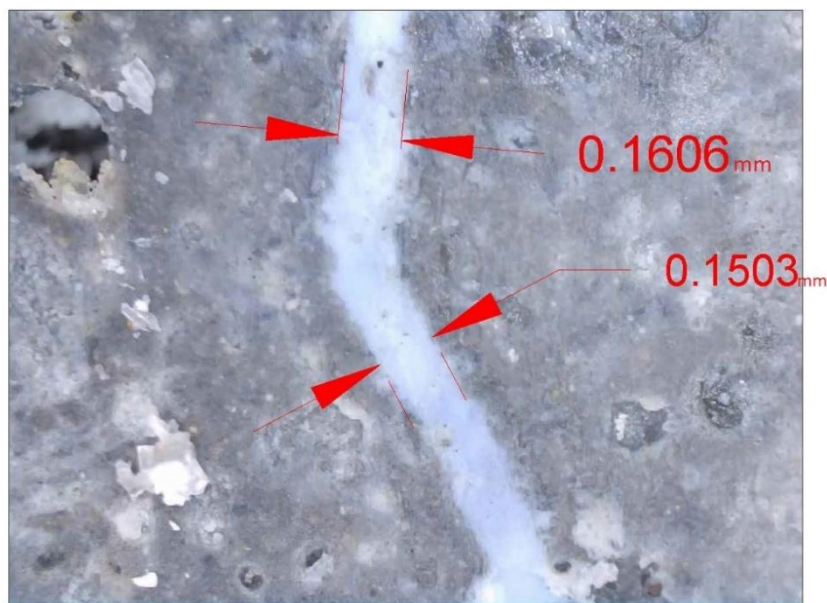


ΣΧΗΜΑ 28: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΣΕ ΘΕΣΗ ΡΩΓΜΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΠΕΡΙΠΟΥ 0.065-0.075 ΜΜ ΚΑΙ ΠΟΡΟΥ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ 0.55 ΜΜ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 2, ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΕ ΓΛΥΚΟ ΝΕΡΟ 30 ΗΜΕΡΕΣ

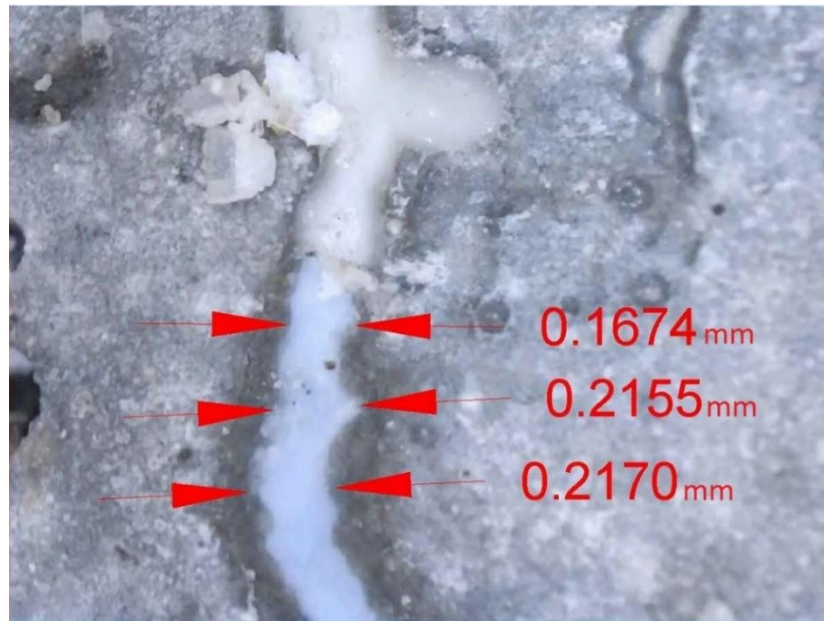
d. Σύνθεση 2 – Συντήρηση σε θαλασσινό νερό 30 ημέρες

Στην παρούσα υποενοότητα ελέγχεται δοκίμιο της Σύνθεσης 2, το οποίο μετά την ρηγμάτωσή του συντηρήθηκε σε θαλασσινό νερό για χρόνο ίσο με 30 ημέρες. Παρατηρείται ότι ρωγμές εύρους μεγαλύτερου ακόμα και των **0.2mm** πληρώνονται με υλικό. Συνεπώς, η χρήση του latex σε συνδυασμό με την συντήρηση σε θαλασσινό νερό φαίνεται να αποφέρει τα πιο διθυραμβικά αποτελέσματα στο πεδίο της αυτοϊάσης.

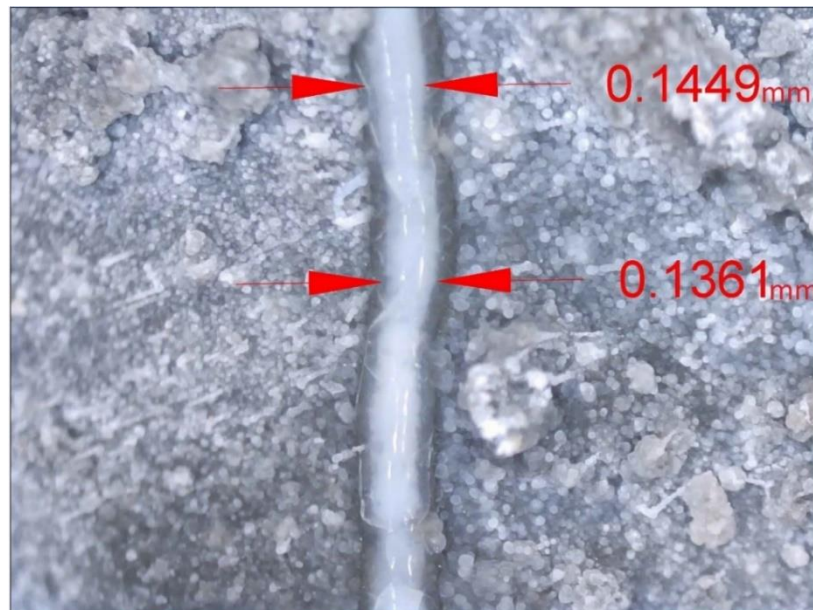
Αξίζει να σημειωθεί ότι η συντήρηση στο θαλασσινό νερό οδηγεί στον σχηματισμό ενός σκληρότερου υλικού πλήρωσης των ρωγμών σε σύγκριση με αυτό των δοκιμίων που συντηρήθηκαν σε γλυκό νερό. Το υλικό αυτό αναμένεται να είναι υψηλότερο σε περιεκτικότητα του C-H-S, ένωση υπεύθυνη για την ανάπτυξη των αντοχών του σκυροδέματος. Προκειμένου να αποκαλυφθεί το σκληρότερο αυτό υλικό απαιτείται ξύσιμο του επιφανειακού στρώματος υλικού (που είναι ως επί το πλείστον ανθρακικό ασβέστιο και άλατα) το οποίο σχηματίζεται πάνω στη ρωγμή. Το τελευταίο μπορεί να γίνει διακριτό στο πάνω μέρος της φωτογραφίας ΣΧΗΜΑΤΟΣ 30.



ΣΧΗΜΑ 29: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΣΕ ΘΕΣΗ ΡΩΓΜΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΠΕΡΙΠΟΥ 0.15-0.16 ΜΜ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 2, ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ 30 ΗΜΕΡΕΣ



ΣΧΗΜΑ 30: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΣΕ ΘΕΣΗ ΡΩΓΜΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΠΕΡΙΠΟΥ 0.17-0.22 ΜΜ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 2, ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ 30 ΗΜΕΡΕΣ



ΣΧΗΜΑ 31: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΣΕ ΘΕΣΗ ΡΩΓΜΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΠΕΡΙΠΟΥ 0.135-0.145 ΜΜ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ 2, ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ 30 ΗΜΕΡΕΣ

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ενότητα αυτή στοχεύει στην περιληπτική καταγραφή των σημαντικότερων εκ των συμπερασμάτων της παρούσας εργασίας και της ολικής εκτίμησης αυτής.

a. Το latex δυσχεραίνει τη συμπύκνωση των μειγμάτων.

Αυτός ήταν άλλωστε ο λόγος που αποφασίστηκε η σκυροδέτηση της Σύνθεσης 3. Το δέμα που περιέχει στη σύνθεση του latex έχει μία κολλώδη υφή και εγκλωβίζει στη μάζα του μεγάλες ποσότητες αέρα οι οποίες κατά τη συμπύκνωση είναι πολύ δύσκολο να απεγκλωβιστούν και να απομακρυνθούν.

b. Τα μείγματα τα οποία περιέχουν latex απαιτούν περισσότερο χρόνο των 28 ημερών προκειμένου να αναπτύξουν τις τελικές αντοχές τους.

c. Η παρουσία του latex στα μείγματα επιδρά θετικά στην ιδιότητα της αυτοϊασης.

d. Η συντήρηση του σκυροδέματος στο θαλασσινό νερό φαίνεται να συμβάλλει θετικά στη λειτουργία της αυτοϊασης συγκριτικά με αυτή στο γλυκό νερό.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση της θετικής επίδρασης του θαλασσινού νερού.

e. Το latex περιορίζει κατά ένα μεγάλο ποσοστό (60%) το φαινόμενο της συστολής ξήρανσης.

Η συστολή του σκυροδέματος αποτελεί πρόβλημα ιδιαίτερα στα μείγματα υψηλής αντοχής.

V. ΕΦΑΡΜΟΓΗ «ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΜΕ SBR LATEX, ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, ΥΨΗΛΗΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΥΤΟΪΑΣΗΣ»

Αξιολογώντας τα πορίσματα της εργασίας και λαμβάνοντας υπόψιν τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη σκυροδέματος καταρτίστηκε μία ενδεικτική λίστα με τις πιθανές εφαρμογές του υλικού.

a. Ενίσχυση κόμβου συστήματος στύλου-δοκού με μανδύα

Η ενίσχυση κόμβου με μανδύα ινοπλισμένου σκυροδέματος υψηλής επιτελεστικότητας έχει αποδειχθεί αποτελεσματικότερη της ενίσχυσης με συμβατικούς μανδύες από Ο/Σ (Οπλισμένο Σκυρόδεμα) και μανδύες FRP [10]. Οι ίνες προσδίδουν καλύτερη σεισμική συμπεριφορά και αυξημένη πλαστιμότητα στο υλικό και κατ' επέκταση στο δομικό στοιχείο. Οι κρυσταλλίτες, σε συνδυασμό με το πολυμερικό υλικό θα αυξήσουν τον χρόνο ζωής της διατομής. Επιπλέον, το latex αναμένεται να περιορίσει την συστολή και την διαπερατότητα του δομικού στοιχείου, δύο αρκετά σημαντικές πτυχές της ενίσχυσης κόμβου.

b. Κατασκευή, επισκευή και ενίσχυση

- *έργων γεφυροποιίας*
- *γεωτεχνικών έργων (όπως σήραγγες)*

Τα έργα αυτά απαιτούν την χρήση υπέρρευστων και αυτοσυμπυκνούμενων δεμάτων λόγω της παρουσίας πυκνού οπλισμού και μιας πιο εξεζητημένης γεωμετρίας (τόξα). Επιπλέον, η μικρορηγμάτωση σε τέτοιας εμβέλειας έργα μπορεί να αποβεί μοιραία καθώς βρίσκονται συνήθως σε άκρως διαβρωτικά περιβάλλοντα και το κόστος επισκευής και συντήρησης καθώς και η δυσκολία είναι τεράστια. Στην περίπτωση του προτεινόμενου σκυροδέματος εξασφαλίζεται **1.** η αντιμετώπιση της μικρορηγμάτωσης μέσω του μηχανισμού self-healing και **2.** η στεγανότητα, χωρίς κόστος επισκευής και συντήρησης.

c. Θαλάσσιες κατασκευές

Σε αυτό ακριβώς το περιβάλλον το self-healing μοιάζει να έχει την υψηλότερη αποτελεσματικότητα. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο διότι σε αυτές τις κατασκευές οι επισκευές και οι ενισχύσεις είναι πολύ δύσκολα υλοποιήσιμες και πολύ ακριβές, ενώ οι μικρορηγματώσεις αποτελούν τον μεγαλύτερο εχθρό.

d. Κατασκευές από υψηλής αντοχής σκυρόδεμα με απαίτηση μειωμένης συστολής ξήρανσης

Αυτή η μείωση της συστολής οδηγεί σε πρόληψη ρηγμάτωσης και συνεπώς στον περιορισμό ανάγκης για μελλοντικές επισκευές.

e. Εν γένει έργα με υψηλή απαίτηση σε ανθεκτικότητα

Τέτοια έργα θα μπορούσαν να αποτελούν οι δεξαμενές προϊόντων χημικής (και όχι μόνο) σύστασης, δεξαμενές ΕΕΛ καθώς και βιομηχανικά δάπεδα.

VI. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ε. Αναστασίου, Διδακτικές σημειώσεις επίκουρου καθηγητή Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 2012
- [2] ACI 363R-92 “State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete”
- [3] ACI363.2R-98 “Guide to Quality Control and Testing of High-Strength Concrete”
- [4] 544.1R-96 “State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete”
- [5] 544.2R-89 “Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete”
- [6] M. Roig-Flores, S. Moscato, P. Serna, L. Ferrara, “Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments”, Construction and Building Materials, Vol. 86, pp 1-11, July 2015
- [7] L. Ferrara “Self-healing capacity of cement-based materials”, unpublished
- [8] Concrete Construction Staff, “Latex-Modified Concrete and Mortar for Repair, October 01, 1984
- [9] K. P. Mehta, P. J. M. Monteiro, “Σκυρόδεμα, Μικροδομή, Ιδιότητες και Υλικά” σ. 570, Κλειδάριθμος, 2006
- [10] Α.Δ. Τσώνος, Χ. Αθανασιάδου, “Ίνοπλισμένο Σκυρόδεμα Υπερυψηλής Αντοχής για την Κατασκευή Μανδύων Αντισεισμικής Ενίσχυσης Κτιρίων. Μια Καινοτόμος Λύση”, άρθρο 2079, 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, 5–7 Νοεμβρίου 2008
- [11] ISOMAT A.B.E.E. - ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΧΗΜΙΚΩΝ & ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ, Φύλλο Τεχνικών Χαρακτηριστικών Προϊόντων LATEX
- [12] Sika Hellas ABEE, Φύλλο Τεχνικών Χαρακτηριστικών Προϊόντος LATEX
- [13] FINOMIX – ΕΤΟΙΜΑ ΚΟΜΙΑΜΑΤΑ, Φύλλο Τεχνικών Χαρακτηριστικών Προϊόντος LATEX, Έκδοση 1: 25/05/2009
- [14] MACON AE, Φύλλο Τεχνικών Χαρακτηριστικών Προϊόντος LATEX

VII. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ομάδα των συγγραφών θα ήθελε να ευχαριστήσει για όλη την πολύτιμη βοήθεια και συμβολή, χωρίς τα οποία δεν θα ήταν δυνατό να ολοκληρωθεί η εργασία:

*Όλο το προσωπικό του εργαστηρίου των Δομικών Υλικών Α.Π.Θ. και ιδιαίτερος τον επιβλέποντα της μελέτης, επίκουρο καθηγητή, **Αναστασίου Ελευθέριο** και τον επιστημονικό συνεργάτη και διδάκτορα, **Λιάπη Αλέξανδρο***

*Τον επίκουρο καθηγητή του εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας, **Παπανικολάου Βασίλειο***

*Τις εταιρείες **Neotex**, **Penetron** και **Sika** και τον **Τροφιάνη Γρηγόρη** και το Εργαστήριο Σκυροδέματος που διευθύνει*