

Χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων ως λεπτό υλικό πλήρωσης για την παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος και η επίδραση υψηλών θερμοκρασιών στα μηχανικά χαρακτηριστικά του

Νικόλαος Σ. Αναγνωστόπουλος, Κοσμάς Κ. Σίδερης, Άγγελος Σ. Γεωργιάδης,
*Εργαστήριο Δομικών Υλικών Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Δημοκριτείου Πανεπιστημίου
Θράκης, Βας. Σοφίας 12, Ξάνθη 671 00,*

Λέξεις-κλειδιά: Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, σκωρία κάδου, υαλόθραυσμα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η δυνατότητα παραγωγής μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ) κατηγοριών αντοχής C25/30 και C30/37, με χρήση σκωρίας κάδου και υαλοθραύσματος ως λεπτό υλικό πλήρωσης. Παράλληλα με την μελέτη της ικανότητας αυτοσυμπύκνωσης που παρουσιάζουν τα ΑΣΣ που παρασκευάζονται με τα υλικά αυτά, μελετάται επισταμένως και η επίδραση της έκθεσης των παρασκευασθέντων σκυροδεμάτων σε υψηλές θερμοκρασίες. Σκοπός της εργασίας αποτελεί η μελέτη της επίδρασης των λεπτών υλικών πλήρωσης στον μηχανισμό αποφλοίωσης του σκυροδέματος και στην απομείωση των μηχανικών αντοχών του μετά την έκθεσή του σε υψηλές θερμοκρασίες.

Industrial by-products for the production of self-compacting concretes and influence of elevated temperatures on their residual mechanical properties

N.S. Anagnostopoulos, A.S. Georgiadis, K.K Sideris
Laboratory of Building Materials, School of Civil Engineering, Democritus University of Thrace,
Xanthi, GR 67100 GREECE

Key words: self-compacting concrete, glass filler, elevated temperatures, ladle furnace slag

ABSTRACT Incorporation of ladle furnace slag and glass filler as filler materials for the production of medium strength self-compacting concretes is experimentally investigated in this paper. This research focus on the spalling tendency and residual mechanical characteristics of self-compacting concretes after their exposure at elevated temperatures. The influence of ladle furnace slag and glass filler on the rheological characteristics of fresh self-compacting concretes is also investigated.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα αποτελεί την τελευταία εξέλιξη στο χώρο της τεχνολογίας του σκυροδέματος. Πρόκειται για ένα σκυρόδεμα το οποίο, όπως λέει και η λέξη, μπορεί να συμπυκνωθεί μόνο του, χωρίς τη χρήση μηχανικών μέσων, αποκλειστικά και μόνο με το ίδιο βάρος του. Κατ' αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η χρήση των ενεργοβόρων και θορυβωδών μηχανισμών συμπύκνωσης ενώ ταυτόχρονα, λόγω του μειωμένου θορύβου, καθίσταται ευκολότερη η επικοινωνία μεταξύ του τεχνικού προσωπικού. Η ευκολία ροής και αυτοσυμπύκνωσης του νέου σκυροδέματος οδηγεί επίσης στη μείωση του απαιτούμενου χρόνου διάστρωσης και σκυροδέτησης των έργων. Τέλος, η πληρέστερη συμπύκνωση που επιτυγχάνεται στα μείγματα ΑΣΣ έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και κατ' επέκταση την καλύτερη ποιότητα των έργων οπλισμένου σκυροδέματος.

Η ικανότητα αυτοσυμπύκνωσης των μειγμάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση μειωμένης ποσότητας νερού, υψηλής ποσότητας λεπτών υλικών και αυξημένης ποσότητας ισχυρού υπερρρευστοποιητή, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή εργασιμότητα. Ο επιτυχής συνδιασμός των ανωτέρω υλικών οδηγεί στην παραγωγή επιτυχούς μείγματος αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (Γεωργιάδης κα, 2006). Πολλοί ερευνητές τονίζουν την ομοιότητα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ) με το σκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας (ΣΥΕ) το οποίο επίσης παράγεται με μειωμένους λόγους νερού προς τσιμέντο και υψηλές δοσολογίες κονιάς (Sideris 2007, Ye et al 2007). Και στις δύο περιπτώσεις αναπτύσσεται μία πυκνή εσωτερική δομή, η οποία όμως έχει ως αποτέλεσμα την ψαθυρή θραύση του σκυροδέματος όταν αυτό εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες.

Σε γενικές γραμμές το σκυρόδεμα ως υλικό παρουσιάζει ικανοποιητική αντίσταση έναντι υψηλών θερμοκρασιών. Στην περίπτωση όμως των ΣΥΕ και των ΑΣΣ παρουσιάζονται επιπλοκές, οι οποίες σχετίζονται με τις αλλαγές που δημιουργούνται στη μικροδομή των υλικών όσο αυξάνεται η θερμοκρασία έκθεσης (Kalifa et al, 2007). Σε υψηλές θερμοκρασίες αρχίζει η διάλυση των ασβεστοπυριτικών ενόδρων (C-S-H), η οποία προχωρά με ταχύ ρυθμό σε θερμοκρασίες άνω των 600 C, και οδηγεί τελικά στην πλήρη καταστροφή του ιστού της τσιμεντόπαστας σε θερμοκρασίες άνω των 900 °C. Στη χαμηλή θερμοκρασιακή περιοχή (20-400 °C) εξατμίζεται το ελεύθερο νερό των πόρων ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η πίεση των νεοσχηματιζόμενων υδρατμών. Κατ' αυτό τον τρόπο οι υδρατμοί ασκούν εφελκυστικές πιέσεις στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Οι πιέσεις αυτές είναι μικρές και δεν δημιουργούν ουσιαστικά προβλήματα, όταν εκτονωθούν μέσα από το δίκτυο των τριχοειδών πόρων του σκυροδέματος. Στις περιπτώσεις όμως των ΣΥΕ και των ΑΣΣ η λεπτότερη σε σχέση με τα συμβατικά σκυροδέματα κατανομή των πόρων καθώς και η ασυνέχεια του πορώδους έχουν ως αποτέλεσμα την αδυναμία εκτόνωσης της πίεσης των υδρατμών, με αποτέλεσμα αυτή να αυξάνεται συνεχώς (Sideris 2007, Ye et al 2007, Chan et al 1999). Όταν η πίεση υπερβεί την εφελκυστική αντοχή του ιστού του σκυροδέματος, τότε αυτό θραύεται και λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της αποφλοίωσης του σκυροδέματος.

Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η δυνατότητα παραγωγής μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ) κατηγοριών αντοχής C25/30 και C30/37, με χρήση σκωρίας κάδου και υαλοθραύσματος ως λεπτό υλικό πλήρωσης. Παράλληλα με την μελέτη της ικανότητας αυτοσυμπύκνωσης που παρουσιάζουν τα ΑΣΣ που παρασκευάζονται με τα υλικά αυτά, μελετάται και η επίδραση της έκθεσης των παρασκευασθέντων σκυροδεμάτων σε υψηλές θερμοκρασίες.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Συνολικά παρασκευάστηκαν έξι μείγματα αυτοσυμπυκνούμεων σκυροδεμάτων και δύο μείγματα συμβατικών σκυροδεμάτων (ΣΣ). Τα σκυροδέματα ανήκαν στις κατηγορίες αντοχής C25/30 και C30/37 και παρασκευάστηκαν με τσιμέντο CEM II/A-M 42.5N. Χρησιμοποιήθηκαν πυριτικά και

ασβεστολιθικά αδρανή με μέγιστο κόκκο 8 mm καθώς και ασβεστολιθική άμμος. Τέλος χρησιμοποιήθηκε τελευταίας γενιάς υπερρευστοποιητής σε διαφορετικές δοσολογίες προκειμένου να αποκτήσουν τα μείγματα ικανότητες αυτοσυμπύκνωσης. Η κάθιση των συμβατικών σκυροδεμάτων ήταν ίση με 19 cm. Ως υλικό πλήρωσης για την παρασκευή των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων χρησιμοποιήθηκε εναλλακτικά ασβεστολιθικό φύλλερ, σκωρία κάδου ή λεπτοαλεσμένο υαλόθραυσμα. Η χημική σύνθεση του τσιμέντου καθώς και των λεπτόκοκκων υλικών πλήρωσης παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Ο λόγος νερού /τσιμέντο καθώς και η ποσότητα του τσιμέντου παρέμειναν περίπου σταθερές για όλα τα μείγματα της ίδιας κατηγορίας αντοχής. Οι αναλογίες μείξεως όλων των σκυροδεμάτων παρουσιάζονται κατωτέρω στον Πίνακα 2.

Πίνακας 1. Χημική σύσταση τσιμέντου και λεπτόκοκκων υλικών πλήρωσης.

	CEMII- A/M 42,5N	Ασβεστολιθικό φύλλερ	Σκωρία κάδου	Υαλόθραυσμα
SiO₂^a	23,85	1,8	32,5	62,1
Al₂O₃	5,22	0,45	2,5	1,6
Fe₂O₃	4,13	0,08	-	0,1
FeO	-	-	1,72	-
CaO	58,2	54,8	54,1	18
MgO	3,2	0,68	5,55	2,4
SO₃	3,3	0,05	-	0,2
K₂O	0,68	-	0,04	0
Na₂O	0,32	-	0,34	12,4
TiO₂	0,24	0,17	-	-
P₂O₅	0,06	0,02	-	0,1
SrO	0,03	-	-	-
Cr₂O₃	0,02	-	-	-
ZnO	0,01	-	-	-
LoI^b	1,57	40,5	3,19	0,4
SG^c (gr/cm³)	3,1	2,65	2,59	2,51

Παρασκευάστηκαν κύβοι ακμής 150 mm, 100mm και κύλινδροι διαστάσεων 150x300mm. Αρχικά, τα δοκίμια συντηρήθηκαν για 28 ημέρες σε θάλαμο συντηρήσεως ($20 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} \geq 95\%$). Η θλιπτική αντοχή όλων των μειγμάτων μετρήθηκε στην ηλικία των 28 ημερών σε κυβικά δοκίμια ακμής 150mm. Μετά την ηλικία των 28 ημερών τα υπόλοιπα δοκίμια μεταφέρθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου ($20 \pm 20^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}=55 - 65\%$), όπου και παρέμειναν μέχρι την ηλικία των 180 ημερών. Στην ηλικία αυτή τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ηλεκτρικό φούρνο και αναπτύχθηκε υψηλή θερμοκρασία με ρυθμό $10^{\circ}\text{C}/\text{λεπτό}$, έως ότου έφθασε στα επιθυμητά επίπεδα. Η μέγιστη θερμοκρασία ήταν 300 ή 600°C κατά περίπτωση και αφότου αυτή επιτεύχθηκε, διατηρήθηκε για 1 ώρα. Στην συνέχεια, τα δοκίμια επανήλθαν στη θερμοκρασία περιβάλλοντος εντός του φούρνου. Κατόπιν, μετρήθηκαν οι μηχανικές τους αντοχές: η θλιπτική αντοχή (σε κυβικά δοκίμια) και η εφελκυστική αντοχή διαρρήξεως (σε κυλινδρικά δοκίμια). Οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν συμφωνούν με τους κανονισμούς ASTM C39 και C496, για την μέτρηση της θλιπτικής αντοχής

και της αντοχής εφελκυσμού διαρρήξεως, αντίστοιχα. Τα δοκίμια αναφοράς συντηρήθηκαν όπως προηγουμένως αναφέρθηκε και μετρήθηκαν οι μηχανικές τους ιδιότητες στη θερμοκρασία των $20\pm 2^{\circ}\text{C}$. Η εναπομείνουσα θλιπτική αντοχή υπολογίσθηκε ως η μέση τιμή των μετρήσεων τριών δοκιμίων. Η εφελκυστική αντοχή διαρρήξεως υπολογίσθηκε ως ο μέσος όρος των μετρήσεων δύο δοκιμίων.

Πίνακας 2: Αναλογίες μείξεως αυτοσυμπυκνούμενων και συμβατικών σκυροδεμάτων.

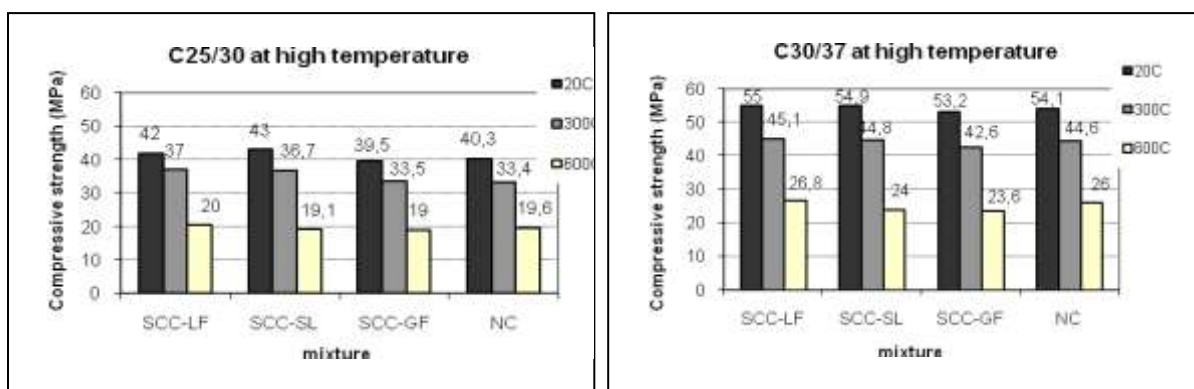
Αναλογίες μείξεως (kg/m^3)	ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ						ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	
	Ασβεστολιθικό φίλλερ		Σκωρία κάδου		Υαλόθραυσμα		NC C25/30 NC	NC C30/37 NC
	SCC C25/30 LF	SCC C30/37 LF	SCC C25/30 SL	SCC C30/37 SL	SCC C25/30 GF	SCC C30/37 GF		
CEMII-A/M 42,5N	335	375	340	375	340	380	330	375
Φίλλερ	135	100	0	0	0	0	0	0
Σκωρία	0	0	135	100	0	0	0	0
Υαλόθραυσμα	0	0	0	0	130	100	0	0
Άμμος	915	900	825	862	845	862	940	870
Γαρμπίλι	800	800	800	800	800	800	927	955
Νερό	185	186	188	189	190	194	183	186
Υπερ/τής	1,63%	1,88%	1,29%	1,74%	1,16%	1,17%	1,0%	1,0%
W/C	0,55	0,50	0,55	0,50	0,56	0,51	0,55	0,50
W/P	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40	0,40	0,55	0,50
Ποσοστό αέρα (%)	1,70%	1,60%	1,90%	1,70%	1,40%	1,20%	2,10%	1,80%
Κάθιση (cm)	-	-	-	-	-	-	19	20
ΕξάπλωσηD (cm)	75,5	75	75,5	75,5	74	73,5	-	-
t_{50} (sec)	2	1,72	4,72	4,25	1,66	1,25	-	-
V FUNNEL 1 (sec)	10,5	10	8,49	9,18	4,38	6,06	-	-
V FUNNEL 2 (sec)	28	15	14,4	11,25	5,16	13	-	-
J RING H (cm)	0,3	0,3	1	0,9	0,6	0,5	-	-
J RING D (cm)	68	68	67	68	66	68	-	-
LBOX (h_2/h_1)	0,88	0,88	0,83	0,85	0,82	0,84	-	-
t_{200} (sec)	1	1	2,5	3,41	1,2	1,35	-	-
t_{400} (sec)	2,01	3	5,5	5,1	1,4	2,25	-	-
f_{c28} (Mpa)	37,1	54	37,7	53,5	38,3	49	36	52,7

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η θλιπτική αντοχή όλων των παρασκευασθέντων μειγμάτων στην ηλικία των 28 ημερών παρουσιάζεται στον Πίνακα 2. Γίνεται κατ' αρχάς φανερό ότι η αντοχή των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή των συμβατικών της ίδιας κατηγορίας αντοχής, ανεξάρτητα από το είδος του λεπτόκοκκου υλικού. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην πυκνότερη διεπιφάνεια αδρανών-τσιμεντόπαστας, η οποία σχηματίζεται στην περίπτωση των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων (Zhu et al 2005).

Μεταξύ των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων της ίδιας κατηγορίας αντοχής υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις όσον αφορά την αντοχή. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται στη χρήση διαφορετικών λεπτόκοκκων υλικών με διαφορετική απορροφητικότητα και διαφορετική χημική σύσταση. Η χρήση σκωρίας κάδου, λόγω της αυξημένης απορροφητικότητάς της, οδήγησε στην παραγωγή ενός πιο συνεκτικού και «αργού» -εν συγκρίση με τα υπόλοιπα- μείγματος αυτοσυμπυκνόμενου σκυροδέματος, με σημαντικά λιγότερη απαιτούμενη ποσότητα υπερρευστοποιητή, ιδίως για τη χαμηλή κατηγορία αντοχής C25/30. Τα μείγματα που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικό φύλλερ παρουσίασαν καλύτερα ρεολογικά χαρακτηριστικά σε νωπή κατάσταση, χρειάστηκαν όμως για την παραγωγή τους μεγαλύτερες ποσότητες υπερρευστοποιητή. Τέλος, τα μείγματα που παρασκευάστηκαν με προσθήκη υαλοθραύσματος, παρουσίασαν την καλύτερη ρεολογική συμπεριφορά και αποδείχτηκαν οικονομικότερα, αναφορικά με την απαιτούμενη ποσότητα υπερρευστοποιητή, λόγω της γεωμετρίας των κόκκων του υλικού καθώς και της χαμηλής απορροφητικότητάς του

Η εναπομείνουσα αντοχή όλων των σκυροδεμάτων μετά από έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Σύμφωνα με άλλους ερευνητές (Sideris 2007, Chan et al 1999), διακρίνουμε τρεις θερμοκρασιακές περιοχές, αναφορικά με την απώλεια θλιπτικής αντοχής: 20°C-400°C, 400°C-800°C και 800°C-1200°C, Σύμφωνα με τους ίδιους ερευνητές, η εναπομείνουσα θλιπτική αντοχή μετά από έκθεση στην πρώτη περιοχή παρουσιάζει μικρή μόνο μείωση, ενώ αντίθετα, σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 400 °C, η εναπομείνουσα αντοχή μειώνεται υπερβολικά. Σε γενικές γραμμές η τάση αυτή παρατηρήθηκε και στα αυτοσυμπυκνόμενα σκυροδέματα που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.



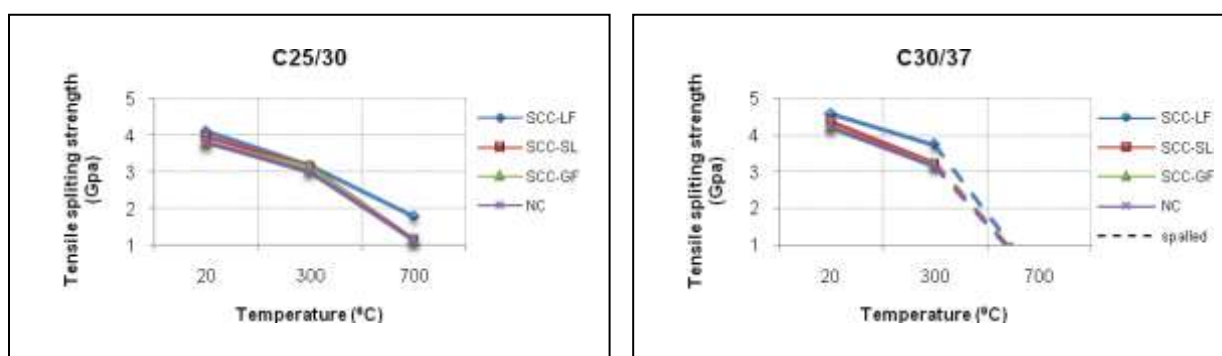
Σχήμα 1: Εναπομείνουσα θλιπτική αντοχή αυτοσυμπυκνόμενων και συμβατικών σκυροδεμάτων μετά από έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η απώλεια της θλιπτικής αντοχής των μειγμάτων SCC25/30 κυμάνθηκε μεταξύ 12 και 15% στη χαμηλή θερμοκρασιακή περιοχή 20°C -300°C. Στην περίπτωση των μειγμάτων SCC 30/37 η απώλεια της αντοχής αυξήθηκε κάπως φτάνοντας το 18%. Η αντίστοιχη απώλεια αντοχής για τα

συμβατικά σκυροδέματα C25/30 και C30/37 μετά από έκθεση στους 300 °C ήταν 18% και 17.6% αντίστοιχα.

Η απώλεια της θλιπτικής αντοχής των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων μετά από την έκθεσή τους στους 600 °C ήταν πολύ μεγαλύτερη και κυμάνθηκε μεταξύ 52% και 57%, ενώ παράλληλα σημειώθηκαν εκρήξεις στα κυλινδρικά δοκίμια όλων των μειγμάτων. Η εκρηκτική αποφλοιώση ήταν πολύ εντονότερη στα δοκίμια των μειγμάτων που παρασκευάστηκαν με σκωρία κάδου. Στην περίπτωση αυτή εκρήξεις σημειώθηκαν και στα κυβικά δοκίμια.

Η μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής διαρρήξεως όλων των μειγμάτων μετά από έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Από το Σχήμα αυτό γίνεται φανερό ότι, σε αντίθεση με όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω για την εναπομείνουσα θλιπτική αντοχή, η εφελκυστική αντοχή διαρρήξεως μειώνεται απότομα ήδη μετά από έκθεση στους 300 °C για όλα τα μείγματα. Σύμφωνα με τους Chan et al (Chan et al 1999), το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη δημιουργία πλήθους μικρορωγμών λόγω της διαφορετικής θερμικής διαστολής των υλικών. Όλα τα μείγματα, αυτοσυμπυκνούμενα και συμβατικά, παρουσιάζουν μεγάλη μείωση της εφελκυστικής αντοχής διαρρήξεως μετά από έκθεση στους 300 °C. Η μείωση είναι ακόμα μεγαλύτερη μετά από έκθεση στους 600 °C. Στην περίπτωση αυτή το σύνολο των δοκιμίων των μειγμάτων της υψηλότερης κατηγορίας αντοχής C30/37 καταστράφηκαν και δεν κατέστη δυνατόν να ληφθούν μετρήσεις.



Σχήμα 2: Εφελκυστική αντοχή διαρρήξεως αυτοσυμπυκνούμενων και συμβατικών σκυροδεμάτων μετά από έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Τα ακόλουθα συμπεράσματα προέκυψαν μετά την ολοκλήρωση της παρούσας έρευνας:

Το φαινόμενο της εκρηκτικής αποφλοιώσης έλαβε χώρα σε όλα τα μείγματα, αυτοσυμπυκνούμενα και συμβατικά, μετά την έκθεσή τους στους 600 °C.

Μεταξύ των μειγμάτων της ίδιας κατηγορίας αντοχής, τα αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα εμφάνισαν υψηλότερες τάσεις καταστροφής λόγω εκρηκτικής αποφλοιώσης, γεγονός που εξαρτήθηκε άμεσα από το είδος του λεπτόκοκκου υλικού που χρησιμοποιήθηκε.

Τα ΑΣΣ που παρασκευάστηκαν με σκωρία κάδου, εμφάνισαν τις υψηλότερες απώλειες μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, κυρίως λόγω εντονότερων εκρηκτικών αποφλοιώσεων. Τα μείγματα αυτά όμως ανέπτυξαν υψηλότερες αντοχές στην ηλικία των 28 ημερών, ενώ η χρήση της σκωρίας κάδου οδήγησε σε σημαντική μείωση της απαιτούμενης ποσότητας υπερρευστοποιητή.

Τα ΑΣΣ που παρασκευάστηκαν με υαλόθραυσμα, εμφάνισαν τις καλύτερες ρεολογικές ιδιότητες σε νωπή κατάσταση, αλλά παρουσίασαν ιδιαίτερα υψηλές απώλειες αντοχών μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες.

5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Γεωργιάδης Α., Σίδερης Κ.Κ., Αναγνωστόπουλος Ν.: «Μία βελτιωμένη μέθοδος σχεδιασμού και ποιοτικού ελέγχου μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ)», Πρακτικά 15ου Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου 2006, Τόμος Γ', σελ. 427-438.

Chan, Y.N., Peng, G.F. and Anson, M., 'Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures', *Cement and Concrete Composites* 21 (1999) 23-27.

Kallifa, P., Menneteau, F.D. and Quenard, D., 'Spalling and pore pressure in HPC at elevated temperatures' *Cement and Concrete Research* 30 (2000) 1915-1927.

Sideris, K.K., 'Mechanical characteristics of self consolidating concrete exposed to elevated temperatures', *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, (Aug 2007) 648-654.

Ye, G., Liu, X., De Schutter, D., Taerwe, L. and Vandvelde, P., 'Phase distribution and microstructural changes of self-compacting concrete paste at elevated temperature', *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 978-987.

Zhu W. and Bartos P.J.M., 'Microstructure and properties of interfacial transition zone in SCC', *Proceedings of the 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete*, 26-28 May 2005, Changsha, (China 2005). 319-327.