

Χρήση σκωρίας κάδου στο ΑΣΣ και εφαρμογή στο υβριδικό ενεργειακό έργο της Ικαρίας

Ι. Παπαγιάννη¹, Ε. Αναστασίου¹, Ε. Σιαφάκα²

¹Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

²ENET Κατασκευαστική Α.Ε.

Λέξεις κλειδιά: Σκωρία Κάδου, Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στα πλαίσια του υβριδικού ενεργειακού έργου της Ικαρίας απαιτήθηκε παραγωγή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ) κατηγορίας C20/25 για την κάλυψη παρειών μεγάλων κλίσεων. Με βάση προηγούμενη εργαστηριακή εμπειρία, έγιναν δοκιμαστικές εργαστηριακές συνθέσεις με τη χρήση σκωρίας κάδου σε αντικατάσταση της ασβεστολιθικής παιπάλης που αποτελεί το σύνηθες λεπτόκοκκο που απαιτείται για την επίτευξη συμπύκνωσης χωρίς δόνηση. Οι συνθέσεις αυτές προσαρμόστηκαν στα διαθέσιμα υλικά και τις απαιτήσεις του έργου και ελέγχθηκαν ως προς τη δυνατότητα ικανοποιητικής ρευστότητας και συνοχής και ως προς την ανάπτυξη αντοχών. Από τα αποτελέσματα των δοκιμαστικών εργαστηριακών συνθέσεων προέκυψαν υψηλά σχετικά επίπεδα αντοχών (θλιπτική αντοχή 28 ημερών >40 MPa), ενώ ως προς τις ιδιότητες του νωπού ΑΣΣ φαίνεται ότι η χρήση σκωρίας κάδου βοηθά στην επίτευξη ικανοποιητικής ρευστότητας χωρίς την προσθήκη τροποποιητή ιξώδους, που συνήθως προστίθεται στα αναμίγματα ΑΣΣ. Στη συνέχεια, η προτεινόμενη εργαστηριακή σύνθεση με σκωρία κάδου εφαρμόστηκε σε δοκιμαστικές συνθέσεις στο έργο, όπου παρατηρήθηκε ικανοποιητική ανάπτυξη αντοχών, αλλά δυσκολία στην επίτευξη ομαλής επιφάνειας. Μετά από τροποποιήσεις στην περιεκτικότητα νερού και προσμίκτου, καθώς και στη διαμόρφωση των ξυλότυπων και της ταχύτητας έγχυσης, επιλέχθηκε η κατάλληλη σύνθεση για την κατασκευή του έργου.

Utilization of ladle furnace slag for the production of SCC in the energy infrastructure project of Ikaria

I. Papayianni¹, E. Anastasiou¹, E. Sifaka²

¹Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki

²ENET Construction Works S.A.

Keywords: Ladle Furnace Slag, Self Compacting Concrete

ABSTRACT: Self Compacting Concrete (SCC), C20/25 category, was required for the coverage of high inclination areas of a basin in the energy infrastructure project of Ikaria. Based on previous experience, trial SCC mixtures were produced in the laboratory by using ladle furnace slag as filler, replacing limestone filler normally used for the achievement of robustness. The laboratory trial mixtures were adjusted to the requirements of the project and the available materials on site and were tested for robustness and strength development according to the relevant EFNARC methodologies. The results showed satisfactory strength development (28 day compressive strength > 40 MPa) and that with the use of ladle furnace it is possible to achieve robust SCC mixtures without the use of Viscosity Modifying Admixture (VMA). Then, the proposed SCC mixture was produced, applied in-situ and tested. High strength development was achieved, but the final surface was not satisfactory. By modifying admixtures, water content and formwork, the desired final surface was achieved and the final SCC mixture was selected.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ειδικά σκυροδέματα σχεδιάζονται για να ανταποκριθούν σε απαιτήσεις τεχνικών έργων όπου αδυνατεί να δώσει λύση το συμβατικό σκυρόδεμα. Έτσι και το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (ΑΣΣ) εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μεγάλη ρευστότητα του νωπού σκυροδέματος και ταυτόχρονα δεν υπάρχει δυνατότητα δόνησης για τη συμπύκνωσή του. Χαρακτηρίζεται από τη μεγάλη συνοχή που έχει το μίγμα, το οποίο δεν απομινύεται ακόμη και όταν αναγκάζεται να στραφεί κατά 90°, καθώς και από τη σταθερότητα και διάρκεια της ρευστότητας. Το ΑΣΣ αναπτύχθηκε τη δεκαετία του '90 στην Ιαπωνία (Okamura & Uchi, 1998) και έκτοτε αποτελεί αντικείμενο έρευνας και εξέλιξης τόσο όσον αφορά τα συστατικά όσο και τις ιδιότητές του (Khayat, 1999; Nunes et al, 2006). Το 2005 εκδόθηκε η προδιαγραφή της EFNARC (EFNARC, 2005) ενώ ακολούθησε η ελληνική ΠΕΤΕΠ (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2009). Στον ελληνικό χώρο έχει αναπτυχθεί η έρευνα (Sideris, 2007; Anagnostopoulos et al, 2009) και η εφαρμογή του, αν και γενικά παραμένει ακόμη σε χαμηλά επίπεδα (0,5% της συνολικής κατανάλωσης σκυροδέματος), κυρίως λόγω του υψηλότερου κόστους σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα.

Σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, το ΑΣΣ διαφέρει τόσο στα συστατικά όσο και στις αναλογίες τους. Για την εξασφάλιση της ρευστότητας, ο μέγιστος κόκκος αδρανών στο ΑΣΣ είναι σχετικά μικρότερος του συμβατικού σκυροδέματος (συνήθως μικρότερος από 20 mm), ο όγκος των χονδροκόκκων στο ανάμιγμα είναι μικρότερος αυτού των λεπτοκόκκων και προστίθεται η απαραίτητη ποσότητα ρευστοποιητή. Επίσης, απαιτείται μεγάλη ποσότητα λεπτόκοκκου υλικού (<125 μm), η οποία εξασφαλίζεται από την κονία και από την προσθήκη παιπάλης, έτσι ώστε ο συνολικός όγκος των λεπτόκοκκων να αντιστοιχεί σε 170-200 lt/m³ σκυροδέματος. Επειδή για τα υπέρρευστα μίγματα είναι μεγάλος ο κίνδυνος της απόμειξης, η συνοχή του νωπού μίγματος εξασφαλίζεται είτε με την επιλογή κατάλληλης κονίας, είτε με την προσθήκη χημικού πρόσμικτου (τροποποιητής ιξώδους). Προς την κατεύθυνση αυτή, της μελέτης συνδυασμού κονιών, εναλλακτικών λεπτόκοκκων υλικών και χημικών πρόσμικτων εστιάζεται σημαντικό μέρος της έρευνας για την παραγωγή ΑΣΣ (Su et al, 2001; Khatib, 2008).

Για τις ανάγκες του υβριδικού έργου ενέργειας της Ικαρίας, το οποίο εποπτεύεται από την Α.Π.Ε., Δ.Ε.Η., υπάρχει αντικείμενο κατασκευής δεξαμενής από σκυρόδεμα ποιότητας C20/25 με πρανή μεγάλων κλίσεων (2:1, 1:1) για τη σκυροδέτηση των οποίων επί τόπου απαιτείται πολύ ρευστό σκυρόδεμα της κατηγορίας αυτοσυμπυκνούμενου για το οποίο δεν θα απαιτείται συμπύκνωση και θα μπορεί να επικαλύψει επαρκώς και μεγάλης πυκνότητας οπλισμό. Αρχικά, επιλέχθηκαν εργαστηριακές συνθέσεις ΑΣΣ, για τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν υλικά διαθέσιμα στο χώρο του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του Α.Π.Θ. και ως λεπτόκοκκο υλικό χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία είτε ασβεστολιθική παιπάλη είτε σκωρία κάδου ή οποία επιλέχθηκε λόγω του σημαντικά χαμηλότερου κόστους. Η σκωρία κάδου είναι ένα βιομηχανικό παραπροϊόν από την παραγωγική διαδικασία του δομικού χάλυβα, που παράγεται σε λεπτόκοκκη μορφή και διαθέτει ασθενείς ποζολανικές και υδραυλικές ιδιότητες (Manso et al, 2005; Parayianni & Anastasiou, 2012). Προηγούμενη έρευνα έδειξε την καταλληλότητα του υλικού αυτού ως πρόσθετο τύπου II για σκυρόδεμα κατά EN 206-1 (Parayianni & Anastasiou, 2012). Με βάση τις πρώτες αυτές συνθέσεις, επανασχεδιάστηκαν νέες εργαστηριακές συνθέσεις με τα διαθέσιμα υλικά του έργου, από όπου, μετά από έλεγχο, προέκυψαν οι προτεινόμενες συνθέσεις. Τέλος, με βάση τις προτεινόμενες συνθέσεις πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές σκυροδετήσεις στο έργο, από όπου προέκυψε η τελική σύνθεση για την πραγματοποίηση του έργου.

2 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ

2.1 Αρχικές εργαστηριακές συνθέσεις

Στα πλαίσια έρευνας για τη δυνατότητα παραγωγής ΑΣΣ με εναλλακτικά υλικά πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών Α.Π.Θ. σειρά δοκιμαστικών συνθέσεων, οι οποίες περιλάμβαναν τη χρήση σκωρίας κάδου ως λεπτόκοκκο υλικό πλήρωσης (filler). Πέρα από τη σκωρία κάδου, στις συνθέσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Portland τύπου CEM I42.5 N και ασβεστολιθική παιπάλη. Τα χαρακτηριστικά των λεπτόκοκκων αυτών υλικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά των λεπτόκοκκων υλικών των δοκιμαστικών συνθέσεων

Συστατικά (%)	CEM I42.5N	CEM IV32.5N	Σκωρία κάδου	Ασβεστολιθική παιπάλη
SiO ₂	20,3	21,6	18,0	3,8
CaO	66,8	59,2	56,0	51,3
Al ₂ O ₃	2,40	6,54	1,28	1,0
Fe ₂ O ₃	8,11	1,01	1,60	0,4
SO ₃	2,55	-	-	-
MgO	3,91	3,30	-	1,2
K ₂ O	1,08	1,90	0,31	-
Na ₂ O	0,57	2,10	0,46	-
Απώλεια πύρωσης	1,91	4,32	15,6	41,0
Αδιάλυτο υπόλειμμα	0,80	9,04	3,93	-
Λεπτότητα (συγκρατούμενο στα 45μm)	1,5%	6,0%	28,0%	-
Φαινόμενη πυκνότητα kg/dm ³	3,14	2,96	2,56	2,71

Για τη σύνθεση σκυροδέματος και την εύρεση των αναλογιών των υλικών ακολουθήθηκαν οι σχετικές οδηγίες της EFNARC. Η συνολική περιεκτικότητα σε κονία του μίγματος ήταν 400 kg/m³, λόγος νερού προς κονία ίσος με 0,5 και μέγιστος κόκκος αδρανών 16 mm. Η επιθυμητή ρευστότητα επιτεύχθηκε με την προσθήκη υπερρρευστοποιητή και τροποποιητή ιξώδους, ενώ η αναλογία σύνθεσης των αδρανών επιλέχθηκε ώστε να μειωθεί η ποσότητα των χονδρόκοκκων αδρανών. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμαστικών αυτών συνθέσεων φαίνονται στον Πίνακα 2.

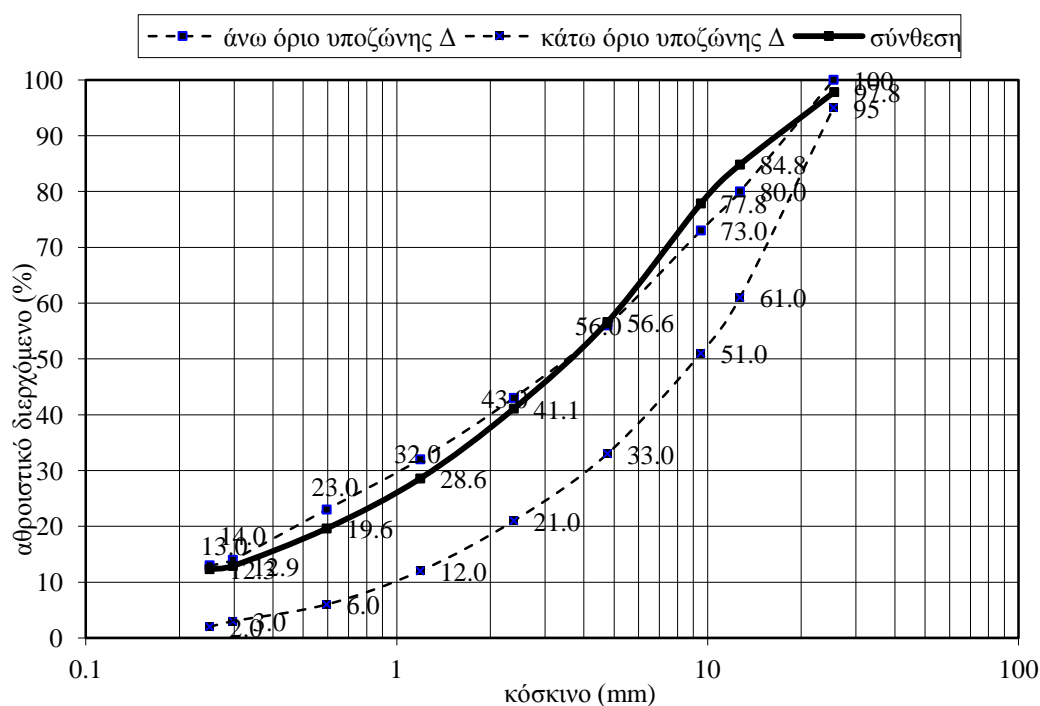
Από τα αποτελέσματα των αρχικών αυτών συνθέσεων φαίνεται ότι με την αντικατάσταση του 50% της παιπάλης με σκωρία κάδου επιτυγχάνεται αντίστοιχη κατηγορία αντοχής με το σκυρόδεμα αναφοράς. Η εργασιμότητα και η αυτοσυμπυκνωσιμότητα και των δύο μιγμάτων, όπως αυτή μετράται με την εξάπλωση και τη δοκιμή L-Box κρίνεται ικανοποιητική και για τα δύο μίγματα, αν και το μίγμα με σκωρία κάδου εμφανίζεται πιο συνεκτικό, ενώ σημαντικό φαίνεται να είναι το γεγονός ότι σε αυτό το μίγμα δεν απαιτείται τροποποιητής ιξώδους για την επίτευξη ικανοποιητικής συνοχής στο μίγμα. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, προσαρμόστηκαν οι αρχικές συνθέσεις στις ανάγκες του έργου.

2.2 Τροποποιημένες δοκιμαστικές εργαστηριακές συνθέσεις

Για την προσαρμογή των αρχικών συνθέσεων στα δεδομένα του έργου έγινε αρχικά κοκκομετρική σύνθεση των διαθέσιμων αδρανών του έργου. Έτσι, μετά από την κοκκομετρική ανάλυση των θραυστών ασβεστολιθικών αδρανών που είναι διαθέσιμα σε τοπικό λατομείο της Ικαρίας, χρησιμοποιήθηκε η κοκκομετρική καμπύλη του Διαγράμματος 1. Η κοκκομετρική καμπύλη επιλέχθηκε έτσι ώστε να είναι ομαλή και να βρίσκεται κοντά στο άνω όριο της υποζώνης Δ του ΚΤΣ-97, προκειμένου να περιέχει υψηλή αναλογία λεπτόκοκκων προς χονδρόκοκκα.

Πίνακας 2. Αναλογίες σύνθεσης και χαρακτηριστικά αρχικών συνθέσεων

Αναλογίες σύνθεσης (kg/m ³)	Σύνθεση με ασβεστολιθική παιπάλη	Σύνθεση με 50% ασβεστολιθική παιπάλη και 50% σκωρία κάδου
CEM I42.5 N	400	400
Νερό	200	200
Θραυστή ασβεστολιθική άμμος 0-4 mm	765	765
Θραυστό ασβεστολιθικό ρύζι 4-8 mm	397	397
Θραυστό ασβ/κό γαρμπίλι 8-16 mm	428	428
Ασβεστολιθική παιπάλη	160	80
Σκωρία κάδου	-	80
Υπερρευστοποιητής	6,8	8,0
Τροποποιητής ιξώδους	5,6	-
Χαρακτηριστικά νωπού μίγματος		
Λόγος νερού προς κονία	0,50	0,50
Υπερρευστοποιητής (%) κ.β. της κονίας	1,70	2,00
Τροποποιητής (%) κ.β. των λεπτόκοκκων	1,00	-
Εργασιμότητα (Εξάπλωση σε mm)	660	540
Χρόνος L-Box (s)	2	4
L-Box h2/h1	0,85	0,80
Χαρακτηριστικά σκληρυμένου σκυροδέματος		
Φαιν. πυκνότητα σκληρ. (kg/m ³)	2317	2335
Θλιπτική αντοχή κυλίνδρου 28 ημ (MPa)	28,3	29,4
Θλιπτική αντοχή κύβου 28 ημερών (MPa)	42,0	41,3
Αντοχή σε διάρρηξη 28 ημερών (MPa)	2,70	2,92
Αντοχή σε κάμψη 28 ημερών (MPa)	5,88	4,73
Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)	47,0	50,5
Στατικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)	29,6	33,8



Διάγραμμα 1. Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης αδρανών

Στη συνέχεια και προκειμένου να αντιμετωπιστεί η επικινδυνότητα εμφάνισης αλκαλιοπυριτικής αντίδρασης λόγω χαρακτηρισμού των αδρανών οριακά αποδεκτά ως προς την αλκαλιοπυριτική βλαπτικότητα, επιλέχθηκε η χρήση ποζολανικού τσιμέντο τύπου CEM IV32,5 και λόγου νερού προς κονία μικρότερου του 0,58. Λόγω της απαίτησης του έργου για σκυρόδεμα C20/25, η περιεκτικότητα σε τσιμέντο μειώθηκε σε 350 με 370 kg/m³, ενώ δεν χρησιμοποιήθηκε τροποποιητής ιξώδους. Η περιεχόμενη παιπάλη ήταν είτε ασβεστολιθική παιπάλη είτε σκωρία κάδου σε περιεκτικότητα τέτοια ώστε η συνολική περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα να είναι ίση με 550 kg/m³. Στο νωπό σκυρόδεμα μετρήθηκε η αυτοσυμπυκνωσιμότητα με τις δοκιμές εξάπλωσης και L-Box, ενώ στη συνέχεια λήφθηκαν κυβικά δοκίμια, τα οποία συντηρήθηκαν και ελέγχθηκαν σε ηλικίες 7, 14 και 28 ημερών. Οι αναλογίες σύνθεσης και τα χαρακτηριστικά των τροποποιημένων δοκιμαστικών συνθέσεων προσαρμογής φαίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Αναλογίες σύνθεσης και χαρακτηριστικά δοκιμαστικών συνθέσεων

Αναλογίες σύνθεσης (kg/m ³)	Σύνθεση με ασβ/θική παιπάλη	Σύνθεση με σκωρία κάδου
CEM IV 32.5 N	350	370
Νερό	203	214,6
Θραυστή ασβεστολιθική άμμος 0-4 mm	923,4	924,4
Θραυστό ασβ/κό γαρμπίλι 4-16 mm	610,9	599,6
Ασβεστολιθική παιπάλη	200	-
Σκωρία κάδου	-	180
Υπερρευστοποιητής	7,88	7,40
Τροποποιητής ιξώδους	-	-
Χαρακτηριστικά νωπού μίγματος		
Λόγος νερού προς κονία	0,58	0,58
Υπερρευστοποιητής (%) κ.β. της κονίας	2,2	2,0
Εργασιμότητα (Εξάπλωση σε mm)	500	500
Χρόνος L-Box (s)	2	2
L-Box h2/h1	0,80	0,80
Χαρακτηριστικά σκληρυμένου σκυροδέματος		
Φαιν.πυκνότητα σκληρ. (kg/m ³)	2295	2278
Θλιπτική αντοχή κύβου 7 ημερών (MPa)	18,5	26,5
Θλιπτική αντοχή κύβου 14 ημερών (MPa)	37,8	38,0
Θλιπτική αντοχή κύβου 28 ημερών (MPa)	40,2	44,0

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3 φαίνεται ότι επιτυγχάνεται ικανοποιητική ανάπτυξη αντοχών και στις δύο περιπτώσεις (η απαίτηση του C20/25 υπερκαλύπτεται από τις 14 ημέρες), ενώ με τη χρήση της σκωρίας κάδου επιτυγχάνονται όμοια χαρακτηριστικά νωπού σκυροδέματος σε σχέση με το ΑΣΣ αναφοράς με ασβεστολιθική παιπάλη, χωρίς προσθήκη τροποποιητή ιξώδους. Με βάση τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά και λόγω της οικονομίας που προκύπτει από τη μη προσθήκη ασβεστολιθικού φίλερ και την εξοικονόμηση VMA, προτιμήθηκε να εφαρμοστεί στο έργο η σύνθεση με σκωρία κάδου ως φίλερ.

2.3 Δοκιμαστικές συνθέσεις στο έργο

Κατά την εφαρμογή της δοκιμαστικής σύνθεσης στο έργο προστέθηκε ποσότητα νερού για την αύξηση της εργασιμότητας, η οποία μετρήθηκε με τη μέθοδο της κάθισης και βρέθηκε ίση με 28 εκ. Ο λόγος νερού προς τσιμέντο άλλαξε σε 0,61 και η θλιπτική αντοχή μετρήθηκε στις 7 και στις 28 ημέρες και βρέθηκε ίση με 27,4 MPa και 44,8 MPa, αντίστοιχα. Ενώ η

ανάπτυξη αντοχής ήταν ικανοποιητική, παρουσιάστηκε πρόβλημα στην τελική επιφάνεια του σκυροδέματος, λόγω του εγκλωβισμού αέρα (Εικόνα 1).



Εικόνα 1. Εμφάνιση κυμαλών στην τελική επιφάνεια του σκυροδέματος

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος έγιναν νέες δοκιμαστικές συνθέσεις στο έργο με μικρές τροποποιήσεις στην περιεκτικότητα του προσμίκτου και αλλαγή του τύπου του ξυλότυπου. Τελικά, ικανοποιητική τελική επιφάνεια με τη χρήση μπετοφόρμ σε μορφή τάβλας (Εικόνα 2) και με τη σύνθεση του Πίνακα 4.



Εικόνα 2. Ικανοποιητική τελική επιφάνεια με τη χρήση κατάλληλων ξυλότυπων

Πίνακας 4. Σύνθεση που θα εφαρμοστεί κατά την έναρξη σκυροδέτησης στα πρανή της δεξαμενής

Αναλογίες σύνθεσης (kg/m ³)	Επιλεγμένη σύνθεση
CEM IV 32.5 N	370
Νερό	220-225
Θραυστή ασβεστολιθική άμμος 0-4 mm	924
Θραυστό ασβ/κό γαρμπίλι 8-16 mm	600
Σκωρία κάδου	180
Υπερρευστοποιητής	5,5
Ενεργός λόγος N/T	0,59-0,61

3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τόσο από τις δοκιμαστικές εργαστηριακές όσο και από τις επί-τόπου συνθέσεις φαίνεται ότι η χρήση της σκωρίας κάδου για την παραγωγή ΑΣΣ είναι εφικτή. Φαίνεται, επίσης, ότι παρουσιάζει πλεονεκτήματα από την επίτευξη συνεκτικών μιγμάτων ΑΣΣ με εξοικονόμηση στη χρήση πρόσμικτων, ενώ η ανάπτυξη αντοχής κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική. Από τη μεταφορά των εργαστηριακών συνθέσεων στο έργο φαίνεται πόσο σημαντική είναι η προσαρμογή στις ιδιαιτερότητες και στα διαθέσιμα υλικά του έργου, ενώ με τις δοκιμαστικές εργοταξιακές συνθέσεις αντιμετωπίζονται κατασκευαστικά προβλήματα που δεν είναι ορατά κατά τη φάση της μελέτης.

Σχετικά με την ανθεκτικότητα του ΑΣΣ με σκωρία κάδου, υπάρχει εμπειρία από προηγούμενη πειραματική έρευνα για τη χρήση της σκωρίας στο σκυρόδεμα (Papayianni & Anastasiou, 2006) όπου φαίνεται ότι η παρουσία της σκωρίας επαυξάνει την ανθεκτικότητα καθώς μειώνεται το πορώδες και ενισχύεται η διεπιφανειακή ζώνη. Η εφαρμογή στο έργο του ΑΣΣ με σκωρία κάδου θα επιτρέψει τη μακροχρόνια παρακολούθηση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος και την απόκτηση περαιτέρω εμπειρίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anagnostopoulos N., Sideris K.K. & Georgiadis A. (2009). Mechanical characteristics of self-compacting concretes with different filler materials, exposed to elevated temperatures. *Materials and Structures*, Vol. 42, pp 1393-1405
- EFNARC (2005). Specification and guidelines for self-compacting concrete, UK
- Khatib J.M. (2008). Performance of self-compacting concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, Vol. 22, pp 1963-1971
- Khayat K.H. (1999). Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 96 (3), pp 346-353
- Manso J.M., Losáñez M., Polanco J.A. and González J.J.(2005). Ladle furnace slag in construction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 17, pp 513-518
- Nunes S., Figueiras H., Milheiro Oliveira P., Sousa Coutinho J & Figueiras J. (2006). A methodology to assess robustness of SCC mixtures. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp 2115-2122
- Okamura H. & Ouchi M. (1998). Self-compacting high performance concrete. *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 1 (4), pp 378-383
- Papayianni I. & Anastasiou E. (2006). Optimization of ladle furnace slag for use as a supplementary cementing material, in M.S. Konsta-Gdoutos (Ed.), *Measuring monitoring and modelling concrete properties*, Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 411–417
- Papayianni I. and Anastasiou E. (2012). Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, pp 400-407
- Sideris, K.K. (2007). Mechanical Characteristics of Self-Consolidating Concretes Exposed to Elevated Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19 (8), pp 648–654.
- Su N., Hsu K.C. and Chai H.W. (2001). A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp 1799-1807
- ΠΕΤΕΠ 01-01-06-00 (2009). Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. ΥΠΕΧΩΔΕ.