

ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΣΚΩΡΙΑΣ ΚΑΔΟΥ (LADLE FURNACE SLAG) ΣΑΝ ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΗ ΚΟΝΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ι. Παπαγιάννη, Ε. Αναστασίου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η σκωρία κάδου είναι ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας χάλυβα που προκύπτει κατά το δεύτερο στάδιο επεξεργασίας του ακατέργαστου υλικού και παρουσιάζει τσιμεντοειδείς ιδιότητες, κυρίως λόγω της υψηλής του περιεκτικότητας σε CaO. Για τη διερεύνηση της δυνατότητας να χρησιμοποιηθεί μαζί με το τσιμέντο σαν συμπληρωματική κονία για την παραγωγή σκυροδέματος έγινε μια σειρά από συνθέσεις κονιαμάτων με αντικατάσταση του τσιμέντου από σκωρία κάδου σε ποσοστό 20% κ.β. με βασική παράμετρο την λεπτότητα της σκωρίας. Μετά από κοσκίνισμα ελέγχθηκαν τέσσερις συνθέσεις με σκωρία μέγιστου κόκκου 105μm, 75μm, 60μm και 45μm και δύο συνθέσεις με σκωρία αλεσμένη ώστε να έχει 31% και 21% συγκρατούμενο στο κόσκινο των 45μm, οι οποίες συγκρίθηκαν με τη σύνθεση αναφοράς με κονία 100% τσιμέντο. Οι συνθέσεις με σκωρία κάδου έφτασαν μέχρι το 94% της αντοχής του κονιάματος μόνο με τσιμέντο, γεγονός που καταδεικνύει τη δυνατότητα χρησιμοποίησής της σαν συμπληρωματική κονία για την παραγωγή σκυροδέματος.

Λέξεις κλειδιά: σκωρία κάδου, σκυρόδεμα, συμπληρωματικές κονίες.

EVALUATION OF LADLE FURNACE SLAG AS A SUPPLEMENTARY CEMENTING MATERIAL

I. Papayianni, E. Anastasiou

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki.

ABSTRACT: Ladle furnace slag is a by-product of the steel industry, deriving from the second stage of the production process, which shows some cementitious properties, mainly due to its high CaO content. A series of test mortars with 20% by weight of the cement substituted with ladle furnace slag was produced in the laboratory, in order to investigate its potential as a supplementary cementing material, the varying parameter being the fineness of the slag. Thus, following some screening of the material, four mortars were produced with slag of maximum grain size 105 μm , 75 μm , 60 μm and 45 μm and also two more test mortars were produced with ground slag retaining 31% and 21% at the 45 μm sieve, all of which were compared to a test mortar with 100% cement as a binder. The test mortars developed compressive strength as high as 94% of the 100%-cement mortar, which shows that ladle furnace slag can be used as a supplementary cementing material.

Keywords: ladle furnace slag, concrete, supplementary cementing materials

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με βάση την παγκόσμια ανάγκη για περιορισμό της κατανάλωσης πρώτων υλών αλλά και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στην κατασκευαστική βιομηχανία [1] κρίνεται αναγκαίο για κάθε χώρα να εκμεταλλευθεί στο έπακρο όλα τα διαθέσιμα χρήσιμα παραπροϊόντα των βιομηχανιών της. Στην περίπτωση της βιομηχανίας σκυροδέματος ένα παραπροϊόν λεπτού διαμερισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν φίλλερ ή σαν λεπτόκοκκο αδρανές [2], αλλά μεγαλύτερο όφελος προκύπτει όταν αυτό είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί σαν συνδετική κονία [3], δηλαδή να αντικαταστήσει το τσιμέντο σε κάποιο ποσοστό. Έτσι, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό Σκυροδέματος EN-206 [4] τα πρόσθετα χωρίζονται σε τύπου I (πρακτικά αδρανή) και τύπου II (με ποζολανικές ή υδραυλικές ιδιότητες).

Οι σκωρίες χαλυβουργίας είναι παραπροϊόντα ευρέως γνωστά στην κατασκευαστική βιομηχανία, τα περισσότερα από τα οποία έχουν εισαχθεί επιτυχώς στην παραγωγή σκυροδέματος είτε ως αδρανή είτε ως κονίες [5]. Σε αυτό το πλαίσιο έχει αναπτυχθεί και έχει υιοθετηθεί σε άλλες χώρες η χρήση της αλεσμένης σκωρίας υψικαμίνων (ground granulated blast-furnace slag – ggbs) σαν εναλλακτική κονία για το σκυρόδεμα [6], ένα παραπροϊόν που δεν απαντάται στην Ελλάδα. Αντίθετα, στην Ελλάδα παράγεται σκωρία από τήξη φωτοβολταϊκού τόξου (electric-arc furnace slag) η οποία βρίσκει εφαρμογές στην κατασκευαστική βιομηχανία ως αδρανές [7] και, στο δεύτερο στάδιο επεξεργασίας, η σκωρία κάδου (ladle furnace slag). Στην παρούσα εργασία γίνεται μια διερεύνηση για τη δυνατότητα χρησιμοποίησης της σκωρίας κάδου της ΣΙΔΕΝΟΡ σαν εναλλακτική κονία για την παραγωγή σκυροδέματος.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των βιομηχανικών παραπροϊόντων και ειδικότερα των σκωριών χαλυβουργίας είναι ότι οι φυσικοχημικές ιδιότητές τους διαφέρουν πάρα πολύ ανάλογα με τις πρώτες ύλες, τη διαδικασία παραγωγής και την τελική επεξεργασία. Έτσι τελικά, μπορούν να προκύψουν είτε προϊόντα προϊόντα χαμηλού κόστους για εφαρμογές χαμηλών απαιτήσεων [8], είτε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας που προσδίδουν βελτιωμένες ιδιότητες στο τελικό προϊόν [9]. Με βάση τη χημική σύσταση (Πίνακας 1) και την κοκκομετρία της συγκεκριμένης σκωρίας κάδου κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί η ικανότητά της να αντικαταστήσει το τσιμέντο σε ένα ποσοστό 20% κ.β. και να αξιολογηθεί η επίπτωση που έχει στο ρυθμό ανάπτυξης της αντοχής και στην επίτευξη ικανοποιητικών μηχανικών αντοχών. Βασική παράμετρος των ελέγχων είναι ο έλεγχος της επιρροής της λεπτότητας του υλικού στην ανάπτυξη των τελικών αντοχών, καθώς και η προοπτική της επεξεργασίας του με άλεση ώστε να αυξηθεί η δραστηριότητά του. Πέρα από τη δυνατότητα χρήσης της σκωρίας κάδου σε αντικατάσταση του τσιμέντου, ελέγχεται και η ικανότητά της στην ανάπτυξη αντοχών μαζί με άσβεστο για την παραγωγή κονιαμάτων. Η παρούσα εργασία, δηλαδή, αποτελεί μια προκαταρκτική έρευνα που θα δώσει συμπεράσματα και κατευθυντήριες γραμμές για τις μελλοντικές δυνατότητες αξιοποίησης του υλικού, καθώς και μια πρώτη εκτίμηση για τη δυνατότητα περαιτέρω επεξεργασίας του υλικού ώστε να αποκτήσει βελτιωμένες ιδιότητες.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Η σκωρία κάδου που ελέγχθηκε προέρχεται από τη χαλυβουργία ΣΙΔΕΝΟΡ και διαχειρίζεται από την ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε. Προκύπτει από το δεύτερο στάδιο επεξεργασίας κατά την παραγωγή του δομικού χάλυβα, όπου μετά την απομάκρυνσή της από το σημείο παραγωγής ψύχεται αρχικά με καταιονισμό νερού. Στη συνέχεια το υλικό υφίσταται διαχωρισμό για τυχόν υπολείμματα μετάλλου, τα οποία επιστρέφονται στην παραγωγική διαδικασία του χάλυβα και τελικά προκύπτει ένα υλικό με ποικίλη διαβάθμιση. Από αυτό το υλικό με κοσκίνιση επιλέγεται το κλάσμα που θα

χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή. Η χημική του ανάλυση καθώς και κάποιες φυσικοχημικές του ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση σκωρίας κάδου

	Διαλυτά σε οξέα	Διαλυτά σε HCl 0.1 N	
Na ₂ O	0,34	0,03	
K ₂ O	0,04	0,01	
CaO	54,1	52,7	
MgO	5,55	5,12	
FeO	1,72	1,25	
Al ₂ O ₃	2,50	2,47	
SiO ₂	32,5	26,4	
Υδατοδιαλυτά άλατα (% κ.β.)	Cl ⁻ 0,03	NO ₃ ⁻ 0	SO ₄ ⁻ 0,21
Απώλεια Πύρωσης (950°C) (%)		3,19	
Απώλεια Πύρωσης (550°C) (%)		2,62	
Ειδικό βάρος (g/cm ³)		2,590	

Χρήση σκωρίας κάδου με τσιμέντο

Για τη δραστηριότητα μιας κονιάς σημαντικό ρόλο παίζει η ειδική επιφάνεια των κόκκων, άρα και η λεπτότητα. Επομένως, για τη διεξαγωγή των ελέγχων δραστηριότητας με τσιμέντο η σκωρία αποφασίστηκε να ελεγχθεί σε τέσσερις διαβαθμίσεις μετά από κοσκίνιση: 0-105μm, 0-75μm, 0-60μm, 0-45μm. Ένας ακόμη παράγοντας της δραστηριότητας μιας κονιάς είναι η κατανομή των κόκκων, αλλά και η δυνατότητα αντίδρασης της διαθέσιμης ειδικής επιφάνειας. Για ελεγχθούν καλύτερα αυτοί οι παράγοντες, ένα δείγμα σκωρίας αλέστηκε και προέκυψαν δύο ακόμη κλάσματα, ένα με 31% συγκρατούμενο στο κόσκινο 45μm και ένα με 21% συγκρατούμενο στο κόσκινο 45μm. Με τα έξι αυτά κλάσματα έγιναν έξι εργαστηριακές συνθέσεις κονιαμάτων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, και για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε και μία σύνθεση κονιάματος με 100% τσιμέντο σαν κονία.

Όλες οι συνθέσεις έγιναν με σταθερή εργασιμότητα 16±0,5cm και μετρήθηκε η απαίτηση του νερού ώστε να επιτευχθεί η συγκεκριμένη τιμή εξάπλωσης (Πίνακας 2). Οι συνθέσεις περιγράφονται αναλυτικά στον Πίνακα 3. Από τις συνθέσεις αυτές προέκυψαν κυβικά δοκίμια 7x7x7 cm, τα οποία συντηρήθηκαν σε νερό κορεσμένο σε Ca(OH)₂ μέχρι τη στιγμή διεξαγωγής των ελέγχων. Τα δοκίμια ελέγχθηκαν ως προς την αντοχή σε θλίψη σε ηλικία 7 και 28 ημερών, ώστε να ελεγχθεί και ο ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής.

Πίνακας 2. Χρήση σκωρίας διαφορετικής λεπτότητας στις δοκιμαστικές συνθέσεις

Σύνθεση	M	AΣ-105	AΣ-75	AΣ-60	AΣ-45	AΣ-31%	AΣ-21%
Κλάσμα σκωρίας	-	0-105μm	0-75μm	0-60μm	0-45μm	31% συγκρ. στο κόσκινο 45μm	21% συγκρ. στο κόσκινο 45μm
Αντικατάσταση τσιμέντου κ.β.	0%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Εξάπλωση (cm)	16,5	16,5	16,0	16,5	16,5	16,0	16,5
Απαίτηση νερού(% της M)	-	105%	100%	96%	96%	96%	98%

Πίνακας 3. Περιγραφή συνθέσεων με τσιμέντο

	Πρότυπη σύνθεση	Συνθέσεις αντικατάστασης
Τσιμέντο CEM I42,5 (g)	1000	800
Σκωρία κάδου (g)	0	200
Πρότυπη άμμος (g)	2700	2700
Νερό (g)	484	484*
Ειδικό βάρος σύνθεσης (g/cm ³)	2,312	2,143
Λόγος νερού προς κονία (N/K)	0,484	0,484*

* έγινε προσαρμογή του νερού ώστε να έχουμε εργασιμότητα 16±0,5 cm

Χρήση σκωρίας κάδου με υδράσβεστο

Μια εναλλακτική εφαρμογή της σκωρίας κάδου είναι μαζί με υδράσβεστο για την παραγωγή κονιαμάτων. Η δυνατότητα ανάπτυξης ικανών αντοχών είναι μια σαφής ένδειξη της ποζολανικότητας του υλικού. Για το σκοπό αυτό έγιναν δύο δοκιμαστικές συνθέσεις με τα κλάσματα 0-75μm (L-ΑΣ-75) και 21% (L-ΑΣ-21%) συγκρατούμενο στο κόσκινο 45μm, της διαθέσιμης σκωρίας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4. Από τις συνθέσεις προέκυψαν πρισματικά δοκίμια 4x4x16cm και κυλινδρικά διαμέτρου 5cm και ύψους 10cm, όπου ελέγχθηκαν οι αντοχές σε κάμψη και θλίψη αντίστοιχα, καθώς και ο ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής.

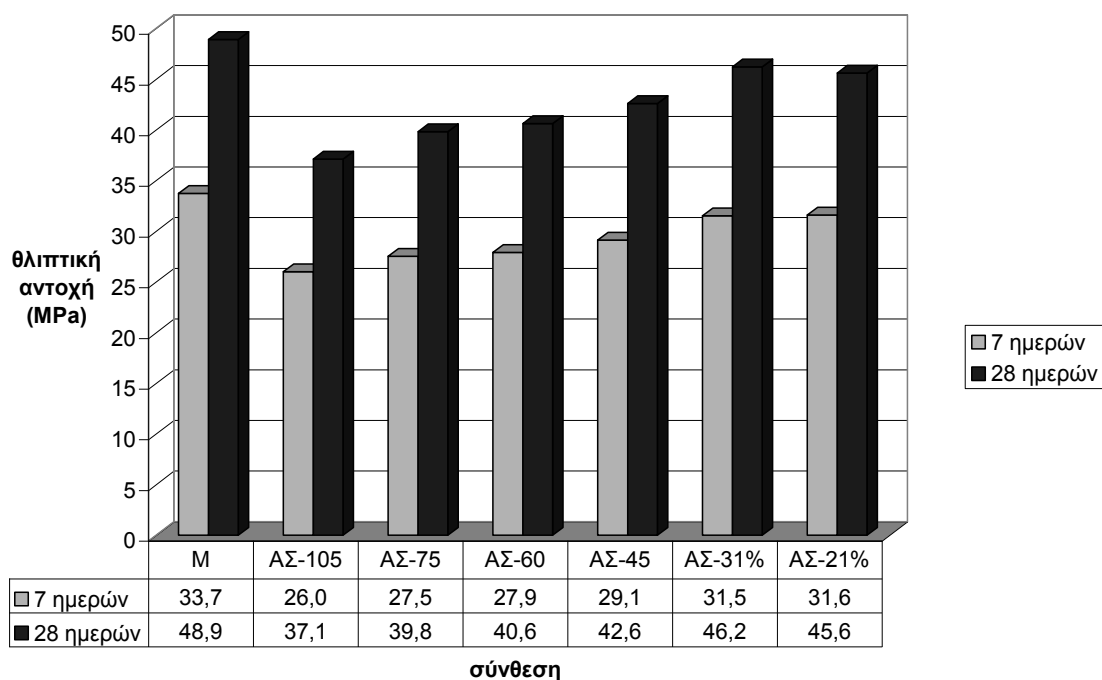
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Συνθέσεις σκωρίας με τσιμέντο

Από τα αποτελέσματα των ελέγχων αντοχών σε θλίψη (Εικόνα 1) φαίνεται ότι η λεπτότητα της σκωρίας κάδου επηρεάζει άμεσα την ανάπτυξη μηχανικών αντοχών και πιο συγκεκριμένα από θλιπτική αντοχή 28 ημερών 37,1 MPa για το κλάσμα 0-105μm φτάνουμε στα 42,6MPa για το κλάσμα των 0-45μm, δηλαδή όσο λεπτότερη η σκωρία τόσο μεγαλύτερη η προκύπτουσα αντοχή. Η άλεση προσδίδει ακόμα καλύτερες υδραυλικές ιδιότητες στο υλικό, γεγονός που αποδίδεται στη μεγαλύτερη ενεργή επιφάνεια των κόκκων μετά από την άλεση, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι τα δύο αλεσμένα δείγματα σκωρίας (31% και 21%) δε διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ως προς τις τελικές αντοχές.

Πίνακας 4. Περιγραφή συνθέσεων με υδράσβεστο

	L-ΑΣ
1 μέρος βάρους υδράσβεστος (g)	150
2,4 μέρη βάρους σκωρία κάδου (g)	360
9 μέρη πρότυπη άμμο (g)	1350
Απαιτούμενο νερό για εξάπλωση 11±0,5cm (g)	240
Ειδικό βάρος σύνθεσης (g/cm ³)	2,172
Λόγος νερού προς κονία (N/K)	0,47



Εικόνα 1. Ανάπτυξη αντοχών κονιαμάτων με σκωρία κάδου και τσιμέντο

Από τον Πίνακα 2 φαίνεται ότι η προσθήκη της σκωρίας κάδου στο μίγμα δεν αυξάνει την απαίτηση νερού, αντιθέτως τη μειώνει ελαφρώς στα πιο λεπτόκοκκα δείγματα κι επομένως δεν αυξάνεται ο λόγος νερού προς κονία, γεγονός που δρα θετικά τόσο ως προς την τελική αντοχή του μίγματος, αλλά και ως προς την ανθεκτικότητά του. Στον Πίνακα 5 φαίνεται το ποσοστό της αντοχής της σύνθεσης με 100% τσιμέντο που επιτυγχάνεται για κάθε μία από τις δοκιμαστικές συνθέσεις. Με το κλάσμα 0-45μm επιτυγχάνεται το 87% της αρχικής αντοχής, ενώ με τα αλεσμένα μίγματα το ποσοστό αυξάνεται στο 94%. Επίσης, από τη σύγκριση της αντοχής των 7 και των 28 ημερών φαίνεται ότι δεν επηρεάζεται ο ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής από την προσθήκη της σκωρίας, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό στις σύγχρονες κατασκευές. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο ότι –όπως φαίνεται στον Πίνακα 1– η σκωρία κάδου έχει υψηλό ποσοστό τόσο σε οξείδιο του ασβεστίου όσο και σε οξείδιο του πυριτίου και επομένως παρουσιάζει τόσο τσιμεντοειδείς όσο και ποζολανικές ιδιότητες.

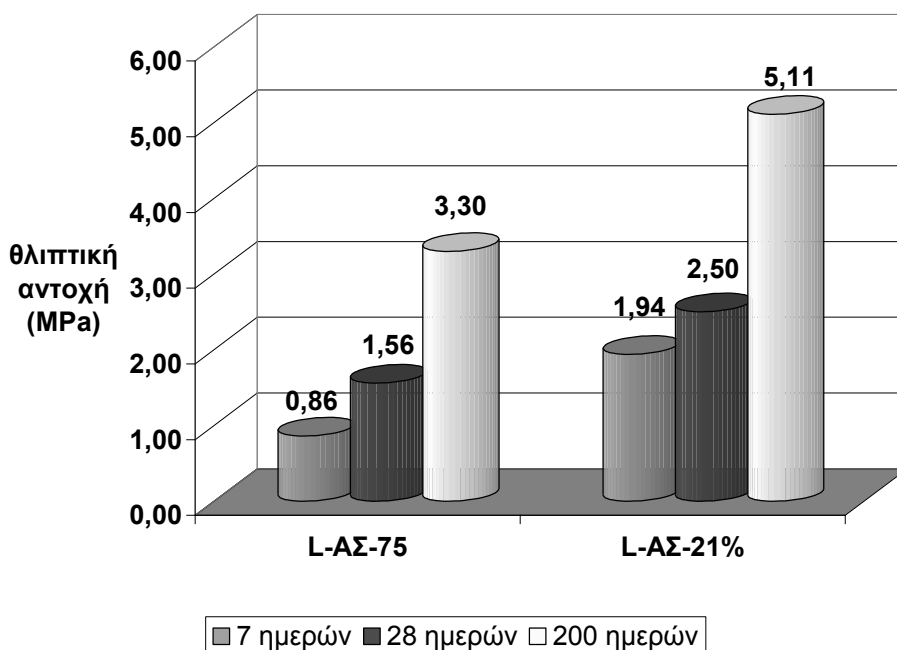
Πίνακας 5. Σύγκριση μηχανικών αντοχών δοκιμαστικών συνθέσεων με τη σύνθεση με 100% τσιμέντο

σύνθεση	Αντοχή 7 ημερών	Αντοχή 28 ημερών
	(Ποσοστό επί της πρότυπης) (%)	(Ποσοστό επί της πρότυπης) (%)
M	100%	100%
ΑΣ105	77%	76%
ΑΣ 75	82%	81%
ΑΣ 60	83%	83%
ΑΣ 45	86%	87%
ΑΣ 31%	94%	93%
ΑΣ 21%	93%	94%

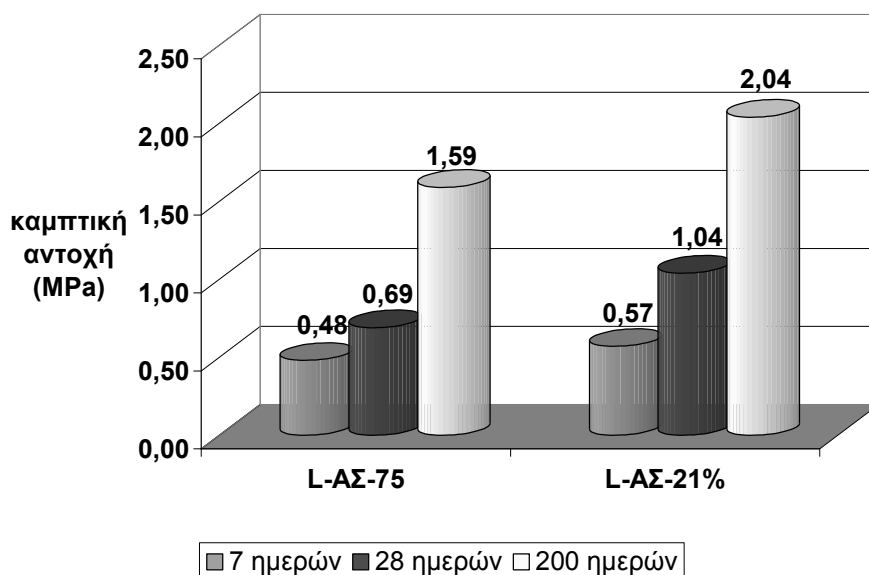
Συνθέσεις σκωρίας με υδράσβεστο

Σε συνέχεια των προηγούμενων συνθέσεων ελέγχθηκαν δύο συνθέσεις σκωρίας με υδράσβεστο, δοκιμή που καταδεικνύει κυρίως την ποζολανικότητα του υλικού. Η ανάπτυξη των θλιπτικών και των καμπτικών αντοχών των δοκιμαστικών κονιαμάτων παρουσιάζονται στις Εικόνες 2 και 3 αντίστοιχα. Για τον καλύτερο έλεγχο της ποζολανικής αντίδρασης, η οποία λαμβάνει χώρα αργά, μετρήθηκαν οι αντοχές στις 7, 28 και 200 ημέρες. Από τα αποτελέσματα είναι εμφανές ότι η σκωρία κάδου διαθέτει αξιόλογες ποζολανικές ιδιότητες, αφού ο ρυθμός ανάπτυξης αντοχών δεν ανακόπτεται στις 28 ημέρες αλλά διατηρείται με αποτέλεσμα στις 200 ημέρες να έχουμε μέγιστη αντοχή σε θλίψη 5,11 MPa και μέγιστη αντοχή σε κάμψη 2,04 MPa. Τόσο στη σύνθεση με το κλάσμα 0-75μm όσο και σε αυτή με το αλεσμένο κλάσμα 21% οι αντοχές διπλασιάζονται από τις 28 στις 100 ημέρες, γεγονός που καταδεικνύει ότι η αντίδραση της κονιάς συνεχίζεται.

Στην περίπτωση των συνθέσεων με υδράσβεστο, όπως και στις συνθέσεις με τσιμέντο, η αύξηση της λεπτότητας της σκωρίας με άλεση δίνει σημαντικά αυξημένες τελικές αντοχές. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των συνθέσεων σκωρίας με υδράσβεστο με αυτά των συνθέσεων σκωρίας με τσιμέντο διαπιστώνεται ότι η άλεση παίζει σημαντικό ρόλο στην ποζολανικότητα του υλικού. Επίσης, από τη βιβλιογραφία [10] φαίνεται ότι η σκωρία κάδου θα μπορούσε να ενεργοποιηθεί ακόμη περισσότερο με τη χρήση αλκαλικού καταλύτη, κάτι που θα προσέδιδε στο υλικό τα χαρακτηριστικά μιας ιδιαίτερα ισχυρής κονιάς.



Εικόνα 2. Ανάπτυξη θλιπτικής αντοχής κονιαμάτων με σκωρία κάδου και υδράσβεστο



Εικόνα 3. Ανάπτυξη καμπτικής αντοχής κονιαμάτων με σκωρία κάδου και υδράσβεστο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης της σκωρίας κάδου για την παραγωγή σκυροδέματος σε αντικατάσταση του τσιμέντου σε ποσοστό 20%, αλλά και η ποζολανικότητά του σε συνθέσεις με υδράσβεστο. Τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν είναι:

1. Η αύξηση της λεπτότητας της σκωρίας κάδου αυξάνει σημαντικά τη δραστηριότητά της ως συμπληρωματική κονία. Η αύξηση της λεπτότητας μπορεί να γίνει με κοσκίνιση ή με άλεση αν και με την τελευταία παρουσιάζονται υψηλότερες τελικές αντοχές.
2. Η σκωρία κάδου σε ποσοστό 20% αντικατάστασης του τσιμέντου στην κονία μπορεί να φτάσει το 87% της αντοχής του καθαρού τσιμέντου μετά από κοσκίνιση και το 94% της αντοχής του καθαρού τσιμέντου μετά από άλεση. Επομένως είναι μια κονία που δύναται να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή σκυροδέματος.
3. Η σκωρία κάδου δεν καθυστερεί την ενυδάτωση του τσιμέντου και δεν απαιτεί επιπλέον νερό για την επίτευξη της ίδιας εργασιμότητας με το καθαρό τσιμέντο.
4. Σαν κονία διαθέτει τόσο τσιμεντοειδείς όσο και ποζολανικές ιδιότητες γεγονός που αποδεικνύεται από το ότι η ανάπτυξη των αντοχών συνεχίζεται μέχρι και 200 ημέρες μετά την παραγωγή.
5. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα περαιτέρω ενεργοποίησης της κονίας με αλκάλια, αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Mehta P.K. ‘Concrete Technology for Sustainable Development – An Overview of Essential Principles’, in Mehta P.K. (ed.) *Proc. of the Int. Symposium on concrete for sustainable development in the twenty-first century*. Hyderabad, India (1999) 1-22.
- [2] Yamada K., Ishiyama S. ‘Maximum dosage of glass cullet as fine aggregate in mortar’, in R.K. Dhir et al (eds.) *Achieving Sustainability in Construction, Proc. of the Int. Congress Global construction: ultimate concrete opportunities*. Dundee, Scotland (2005) 185-192.

- [3] Malhotra V.M., Mehta P.K. *High-performance, high volume fly ash concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories*. Ottawa, Canada: Marquardt Printing (2002).
- [4] EN 206-1 'Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity' (2000).
- [5] Motz H., Geiseler J. 'Products of steel slags an opportunity to save natural resources', *Waste Management* **21**: (2001) 285-293.
- [6] Babu K.G., Kumar V.S.R. 'Efficiency of GGBS in concrete', *Cement and Concrete Research* **27**: (2000) 1031-1036.
- [7] Papayianni I., Anastasiou E. 'Heavyweight Concrete with Steel Slag Aggregates', in R.K. Dhir et al (eds.) *Role of Concrete in Nuclear Facilities, Proc. of the Int. Congress Global construction: ultimate concrete opportunities*. Dundee, Scotland (2005) 25-32.
- [8] Claisse P.A. et al. 'Recycled Materials in Concrete Barriers', in V.M. Malhotra (ed.) *Proc. of the Sixth CANMET/ACI Int. Conference on Durability of Concrete*. Thessaloniki, Greece (2003) 951-972.
- [9] Shi C., Qian J. 'High performance cementing materials from industrial slags – a review', *Resources, Conservation and Recycling* **29** (2000) 195-207.
- [10] Xu H., Lukey G.C., van Deventer J.S.J. 'The Activation of Class C-, Class F-Fly Ash and Blast Furnace Slag Using Geopolymerisation', in V.M. Malhotra (ed.) *Proc. of the Eighth CANMET/ACI Int. Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*. Las Vegas, USA (2004) 797-820.