

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΙΔΙΚΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΥΨΗΛΟΥ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Ε. Αναστασίου, Ι. Παπαγιάννη

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία γίνεται μια διερεύνηση της δυνατότητας ενσωμάτωσης μεγάλων ποσοτήτων βιομηχανικών παραπροϊόντων στο σκυρόδεμα με στόχο την οικονομία στην κατασκευή όσον αφορά το κόστος, την ενέργεια, την κατανάλωση φυσικών αποθεμάτων όπως είναι οι ασβεστόλιθοι. Τα παραπροϊόντα που ελέγχονται είναι η ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας και σκωρία κάδου χαλυβουργίας ως κονίες και σκωρίες χαλυβουργίας (EAF slags) ως αδρανή. Η ιπτάμενη τέφρα ελέγχεται σε ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου 50%, η σκωρία κάδου σε ποσοστό 30%, ενώ τα αδρανή σκωρίας σε αντικατάσταση του χονδρόκοκκου κλάσματος του μίγματος αδρανών και σε αντικατάσταση όλων των κλασμάτων του μίγματος αδρανών. Στα αναμίγματα με αντικατάσταση της κονίας και των αδρανών με βιομηχανικά παραπροϊόντα, προκύπτει σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (>70MPa) μόλις με 35% κ.β. του μίγματος φυσικές ύλες. Το προτεινόμενο σκυρόδεμα διαθέτει αυξημένη θλιπτική αντοχή κατά 21% και βελτιωμένη αντοχή σε απότριψη κατά 77% σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Λόγω των παραπάνω και του αυξημένου ειδικού του βάρους μπορεί να βρει εφαρμογή σε κατασκευές που απαιτείται σκυρόδεμα υψηλών αντοχών, βαρύ σκυρόδεμα ή σκυρόδεμα ανθεκτικό σε απότριψη.

Λέξεις κλειδιά: βιομηχανικά παραπροϊόντα, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία, σκυρόδεμα

PRODUCTION OF CONCRETE OF HIGH ENVIRONMENTAL STANDARDS WITH THE USE OF INDUSTRIAL BY-PRODUCTS

E. Anastasiou, I. Papayianni

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki.

ABSTRACT: The aim of this report is to incorporate large amounts of industrial by-products in concrete in an attempt to minimize the depletion of natural resources and, consequently, to diminish the environmental burden of concrete production. The by-products tested are high calcium fly ash and ladle furnace slag as binders and steel slags (EAF slags) as aggregates. Fly ash is tested in 50% replacement by weight of concrete, ladle furnace slag in 30% replacement by weight of concrete and steel slag aggregates in replacement of coarse aggregate, and also in replacement of both fine and coarse aggregate. In the mixtures where both the binder and the aggregates were substituted with industrial by-products the produced concrete is of high strength ($>70\text{MPa}$) using only 35% by weight natural products. The proposed concrete has increased compressive strength by 21% and improved abrasion resistance by 77%, compared to ordinary concrete. Due to the increased specific weight the proposed concrete can find uses in applications requiring high strength concrete, heavyweight concrete, or concrete with high abrasion resistance.

Keywords: industrial by-products, high-calcium fly ash, steel slag, concrete.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αυξανόμενη κατανάλωση των φυσικών πόρων από την κατασκευαστική βιομηχανία αποτελεί ένα μείζον πρόβλημα του πλανήτη με περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Στην προσπάθεια για μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος από την κατασκευαστική δραστηριότητα χρησιμοποιούνται –μετά από επιστημονική έρευνα για τη βέλτιστη εναλλακτική λύση– διάφορα βιομηχανικά παραπροϊόντα σε αντικατάσταση των φυσικών πρώτων υλών [1]. Το σκυρόδεμα, που αποτελεί το κυρίαρχο δομικό υλικό [2], είναι ένα πεδίο εφαρμογής καινοτομιών με στόχο όχι μόνο την εξοικονόμηση φυσικών πόρων αλλά και τη βελτίωση των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος [3]. Στην περίπτωση της χρήσης παραπροϊόντων στο σκυρόδεμα ο σκοπός δεν είναι μόνο η ασφαλής και μαζική διάθεση μεγάλων ποσοτήτων υλικών που διαφορετικά θα επιβάρυναν το περιβάλλον, αλλά και η αξιοποίηση των ειδικών χαρακτηριστικών που προσδίδουν στο σκυρόδεμα για ειδικές εφαρμογές, έτσι ώστε να προστεθεί αξία στο τελικό προϊόν. Θέματα συμβατότητας των βιομηχανικών παραπροϊόντων με τα συνήθη συστατικά του σκυροδέματος εξετάζονται επισταμένως και σε βάθος χρόνου, λόγω της αυξημένης ευαισθησίας του κοινωνικού συνόλου σε θέματα ασφάλειας των κατασκευών.

Στην παρούσα εργασία η έρευνα επικεντρώνεται στην χρήση της ιπτάμενης τέφρας που προκύπτει από την καύση του λιγνίτη στα εργοστάσια της ΔΕΗ Πτολεμαΐδας και στις σκωρίες, παραπροϊόντα της βιομηχανίας χάλυβα. Η ιπτάμενη τέφρα έχει υιοθετηθεί από τις ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες ως συστατικό blended type τσιμέντου για πάνω από 20 χρόνια και η χρήση της ως κονία έχει εφαρμογές παγκοσμίως [4], [5]. Χρησιμοποιείται στις συνθέσεις της εργασίας σε ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου 50%. Εναλλακτικά ελέγχεται ως κονία και η σκωρία κάδου της χαλυβουργίας ΣΙΑΔΕΝΟΡ, σε ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου 30%. Επίσης, στις δοκιμαστικές συνθέσεις χρησιμοποιούνται και αδρανή σκωρίας της χαλυβουργίας ΣΙΑΔΕΝΟΡ, αρχικά σε αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών μόνο στα χονδρόκοκκα κλάσματα και στη συνέχεια σε όλα τα αδρανή. Τα αδρανή σκωρίας (EAF steel slag) και η σκωρία κάδου (ladle furnace slag) προκύπτουν σε διαφορετικά στάδια της παραγωγής του χάλυβα και έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Τα πρώτα δίνουν κόκκους μεγάλου μεγέθους και σκληρότητας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνθέσεις σκυροδέματος ως αδρανή [6], ενώ η σκωρία κάδου προκύπτει σε λεπτή διαβάθμιση και λόγω του ότι διαθέτει ποζολανικές ιδιότητες μπορεί μετά από κοσκίνιση ή άλεση να αντικαταστήσει μικρό μέρος του τσιμέντου σε συνθέσεις σκυροδέματος [7] ή να ενσωματωθεί σε blended type τσιμέντα.

Με την ταυτόχρονη αντικατάσταση αδρανών και κονίας με παραπροϊόντα στη σύνθεση σκυροδέματος προκύπτει ένα μίγμα με μόλις 35% κ.β. φυσικές ύλες στη σύστασή του. Το σκυρόδεμα αυτό ελέγχεται ως προς την αντοχή σε θλίψη και την αντοχή σε απότριψη, ενώ εξετάζεται και η δομή και το πορώδες του. Η έρευνα εστιάζεται στην παραγωγή ενός σκυροδέματος υψηλών απαιτήσεων, με μεγάλες αντοχές και ανθεκτικότητα, αλλά ταυτόχρονα και με υψηλό οικολογικό προφίλ, λόγω της μεγάλης εξοικονόμησης φυσικών πόρων που επιτυγχάνεται.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Υλικά

Για τις δοκιμαστικές συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM I42.5, κατεργασμένη ιπτάμενη τέφρα με 19% συγκρατούμενο στο κόσκινο 45μm και σκωρία κάδου κοσκινισμένη σε κλάσμα 0-105μm. Για αδρανή χρησιμοποιήθηκαν άμμος ποταμού σε κλάσμα 0-4mm, θραυστά

ασβεστολιθικά αδρανή σε κλάσματα 0-4mm, 4-8mm και 8-12mm, και σκωρία σε κλάσματα 0-4mm και 4-12mm. Στον Πίνακα 1 φαίνεται η χημική ανάλυση και το ειδικό βάρος των τριών παραπροϊόντων των δοκιμαστικών συνθέσεων.

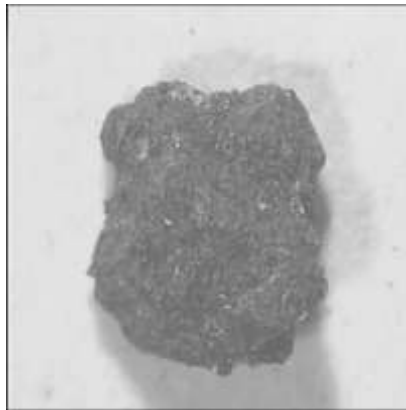
Στα αδρανή σκωρίας μετρήθηκε το ειδικό βάρος ίσο με 3,33 g/cm³, ενώ στα συμβατικά φυσικά και θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή κυμαίνεται στο 2,65-2,68g/cm³. Επίσης, μετρήθηκε η αντοχή των αδρανών σκωρίας σε κρούση και τριβή κατά Los Angeles σύμφωνα με την προδιαγραφή AASHTO T96 και βρέθηκε ίση με 15% για το κλάσμα 3/8", γεγονός που καταδεικνύει την ανθεκτικότητα του υλικού σε σχέση με τα συμβατικά ασβεστολιθικά αδρανή που δίνουν αντοχή Los Angeles 25%. Η αυξημένη ανθεκτικότητα σε θρυμματισμό των αδρανών σκωρίας οφείλεται στη σύστασή τους.

Μετρήθηκε επίσης η υδαταπορροφητικότητα των διαθέσιμων αδρανών, που βρέθηκε 1% για την άμμο ποταμού, 1,2% για τα ασβεστολιθικά αδρανή και 1,3% για τα αδρανή σκωρίας. Η αυξημένη υδαταπορροφητικότητα των αδρανών σκωρίας εν σχέσει με τα συμβατικά αδρανή αποδίδεται στον τρόπο παραγωγής τους (μεγάλη τραχύτητα επιφάνειας), αφού πρόκειται για λιωμένο υλικό που ψύχεται με καταιονισμό νερού και κοκκοποιείται, αποκτώντας ακανόνιστη επιφάνεια (Εικόνα 1). Το χαρακτηριστικό αυτό συνεισφέρει στην καλύτερη συνεκτικότητα και καλύτερη διεπιφάνεια αδρανών-τσιμεντοπήγματος στο παραγόμενο μίγμα σκυροδέματος.

Σε όλες τις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε υπερρευστοποιητής (Glenium) για να επιτευχθεί η απαιτούμενη εργασιμότητα διατηρώντας σταθερό το λόγο νερού προς κονία.

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση παραπροϊόντων

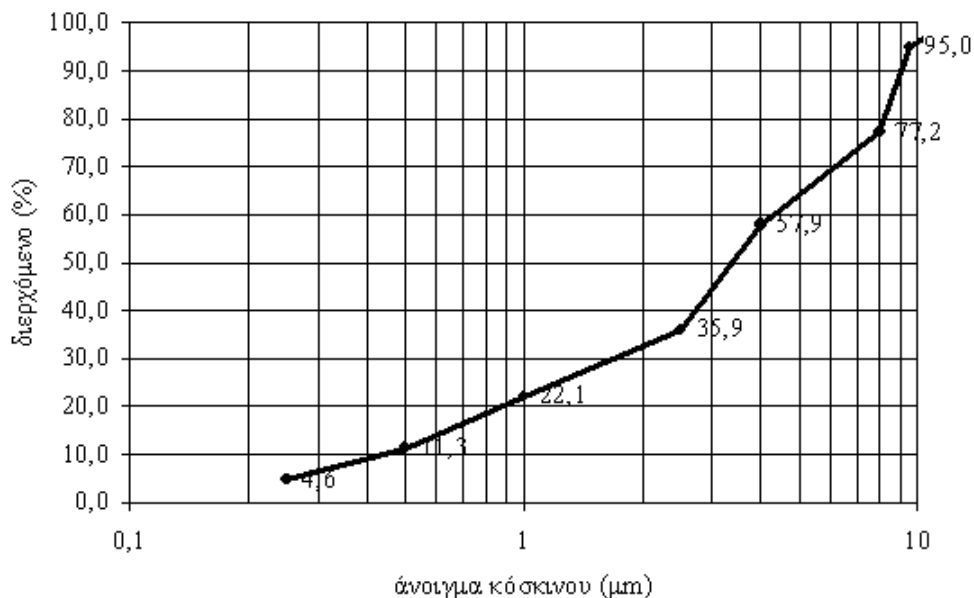
	Ιπτάμενη Τέφρα (%)	Σκωρία κάδου (%)	Αδρανή σκωρίας (%)
CaO	32,5	60,95	39
FeO	4,5	0,33	25
SiO ₂	30,8	23,15	16,5
Al ₂ O ₃	14,7	2,99	4,56
MgO	2,5	5,90	4,7
MnO	-	0,47	5,45
S	-	0,31	0,40
Na ₂ O	0,4	0,06	0,28
K ₂ O	1,5	0,01	0,07
CrO ₃	-	-	1,2
Ειδικό βάρος (g/cm ³)	2,40	2,59	3,33



Εικόνα 1. Κόκκος σκωρίας όπου διακρίνεται το ακανόνιστο σχήμα

Περιγραφή συνθέσεων

Ειδικότερα η έρευνα εστιάστηκε στην παραγωγή σκυροδέματος ανθεκτικού στην τριβή (για δάπεδα ή και δύσκαμπτα οδοστρώματα) και για αυτό το λόγο για τη σύνθεση των αδρανών έγινε κοκκομετρική ανάλυση όλων των διαθέσιμων κλασμάτων και στη συνέχεια υπολογισμός των ποσοστών του κάθε κλάσματος στο μίγμα. Σε όλες τις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε άμμος ποταμού για καλύτερη εξομάλυνση της κοκκομετρικής καμπύλης, ειδικά μαζί με τα αδρανή σκωρίας που έχουν ιδιαίτερα χαμηλή περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο υλικό. Ο υπολογισμός γίνεται έτσι ώστε να έχουμε ομαλή κοκκομετρική διαβάθμιση με μεγάλη σχετικά περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα – μόλις 22% κάτω του 1mm (Εικόνα 2)– κάτι πλεονεκτικό για την αντοχή σε απότριψη. Για όλες τις δοκιμαστικές συνθέσεις επιλέχθηκε μέγιστος κόκκος 12mm, λόγος νερού προς κονία 0,35 και περιεκτικότητα σε κονία 400 kg/m³. Πρόκειται δηλαδή για ένα σκυρόδεμα με χαμηλή εργασιμότητα και μεγάλο ειδικό βάρος, κάτι που αυξάνει περισσότερο όταν χρησιμοποιούνται τα αδρανή σκωρίας.



Εικόνα 2. Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος αδρανών

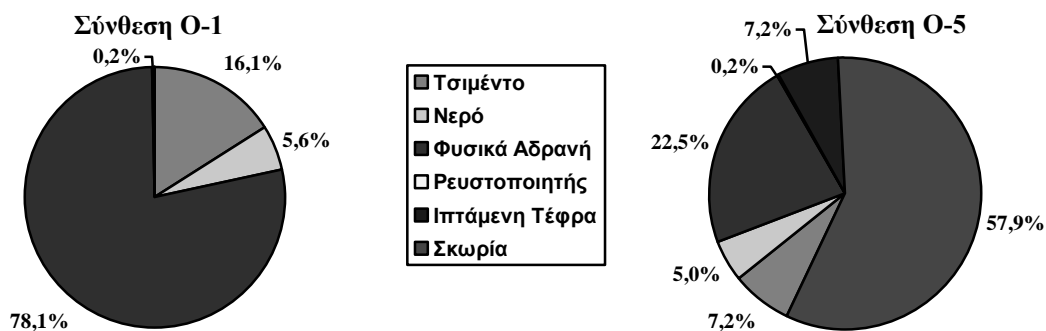
Πίνακας 2. Παράμετροι δοκιμαστικών συνθέσεων

Σύνθεση	Κονία	Λεπτόκοκκα αδρανή	Χονδρόκοκκα αδρανή	Μέγιστος κόκκος (mm)
O1	τσιμέντο	50% άμμος ποταμού 50% ασβεστολιθικά	ασβεστολιθικά	12
O2	τσιμέντο	50% άμμος ποταμού 50% ασβεστολιθικά	σκωρία	12
O3	50% τσιμέντο 50% ιπτάμενη τέφρα	50% άμμος ποταμού 50% ασβεστολιθικά	σκωρία	12
O4	70% τσιμέντο 30% σκωρία κάδου	50% άμμος ποταμού 50% ασβεστολιθικά	σκωρία	12
O5	50% τσιμέντο 50% ιπτάμενη τέφρα	50% άμμος ποταμού 50% σκωρία	σκωρία	12
O6	τσιμέντο	50% άμμος ποταμού 50% σκωρία	σκωρία	12

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2 έγιναν έξι συνολικά δοκιμαστικές συνθέσεις στο εργαστήριο. Η πρώτη σύνθεση έγινε με συμβατικά αδρανή (θραυστά ασβεστολιθικά και φυσικά) και στις υπόλοιπες πέντε το χονδρόκοκκο κλάσμα των αδρανών αντικαταστάθηκε με σκωρία. Στις δύο τελευταίες συνθέσεις δε, αντικαταστάθηκε και το 50% των λεπτόκοκκων αδρανών με σκωρία. Όσον αφορά την κονία, τρεις συνθέσεις έγιναν με 100% τσιμέντο, σε δύο αντικαταστάθηκε το 50% με ιπτάμενη τέφρα και σε μία αντικαταστάθηκε το 30% με σκωρία κάδου. Η χρήση του ρευστοποιητή κυμάνθηκε από 1% ως 2,25% κ.β. της κονίας, ανάλογα με τη σύσταση της κονίας και του μίγματος αδρανών, έτσι ώστε να έχουμε σταθερή εργασιμότητα. Η εργασιμότητα μετρήθηκε με τη μέθοδο Vebe και η απαίτηση ήταν να βρίσκεται μεταξύ 10'' και 20''. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3, μικρότερη απαίτηση ρευστοποιητή είχε η σύνθεση O-1 με 100% τσιμέντο και συμβατικά αδρανή, ενώ τη μεγαλύτερη απαίτηση είχε η σύνθεση O-5 με 50% τέφρα και μέγιστη χρήση αδρανών σκωρίας, δηλαδή αυτή με τη μεγαλύτερη χρήση παραπροϊόντων. Επίσης, μετρήθηκε το ειδικό βάρος των συνθέσεων όπου από 2,388 για τη σύνθεση O-1 έφτασε το 2,775 για τη σύνθεση O-6 με μέγιστη αντικατάσταση συμβατικών αδρανών με σκωρία και 100% τσιμέντο ως κονία. Από την παρασκευή των συνθέσεων παράχθηκαν κυβικά δοκίμια 15x15x15cm στα οποία ελέγχθηκαν η αντοχή σε κάμψη και πλάκες διαστάσεων 45x45x10cm όπου ελέγχθηκε η αντοχή σε απότριψη.

Πίνακας 3. Περιγραφή δοκιμαστικών συνθέσεων

α/α	O-1	O-2	O-3	O-4	O-5	O-6
Τσιμέντο CEM I42,5 (kg/m ³)	400	400	200	200	200	400
Ιπτάμενη Τέφρα (kg/m ³)	-	-	200	-	200	-
Σκωρία κάδου (kg/m ³)	-	-	-	200	-	-
Άμμος ποταμού (kg/m ³)	523,3	601,2	588,4	591	624,1	639,4
Ασβεστολιθική άμμος (kg/m ³)	523,3	601,2	588,4	591	-	-
4-12mm ασβεστολιθικά (kg/m ³)	891,6	-	-	-	-	-
Άμμος σκωρία (kg/m ³)	-	-	-	-	624,1	639,4
4-12mm σκωρία (kg/m ³)	-	944,8	924,6	928,7	980,7	1004,7
Νερό (kg/m ³)	140	140	140	140	140	140
Ρευστοποιητής (% κ.β. της κονίας)	1%	1,75%	2%	1,5%	2,25%	1,4%
Ειδικό βάρος σύνθεσης (g/cm ³)	2,388	2,635	2,609	2,628	2,700	2,775
Λόγος νερού προς κονία (N/K)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Εργασιμότητα κατά Vebe (s)	10	17	17	17	20	19



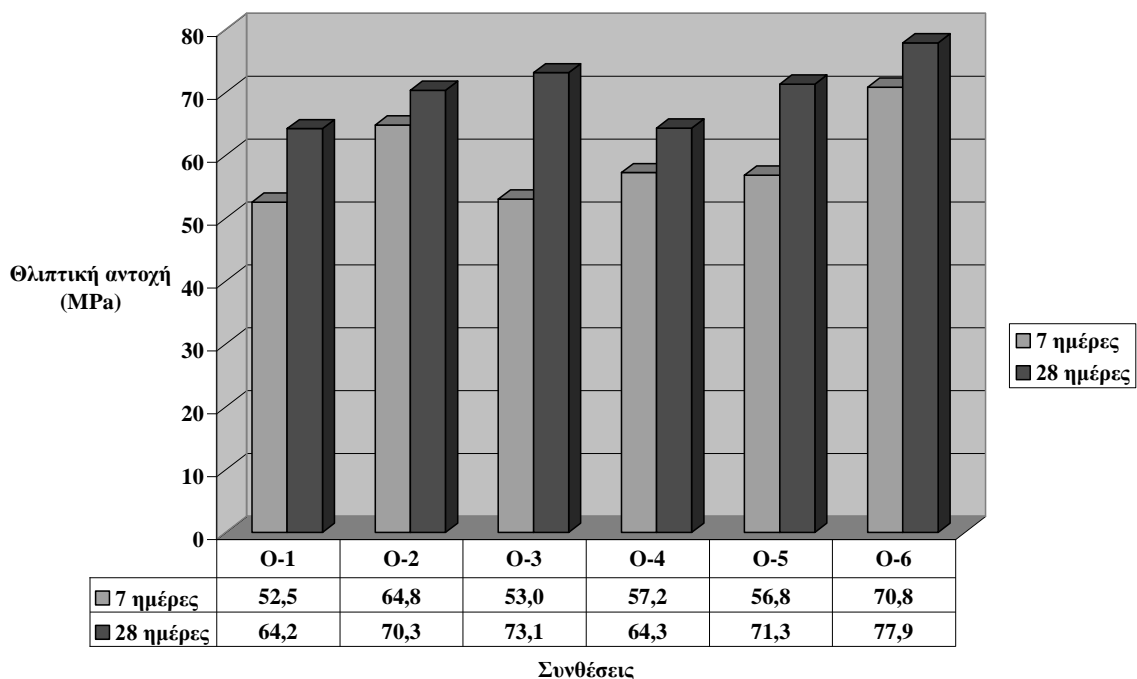
Εικόνα 3. Κατά βάρος αναλογίες σύστασης των συνθέσεων Ο-1 και Ο-5

Εξοικονόμηση πρώτων υλών

Στην Εικόνα 3 δίνεται μια εικόνα της κ.β. αναλογίας των συνθέσεων Ο-1 και Ο-5, όπου είναι εμφανής η μεγάλη εξοικονόμηση πρώτων υλών που επιτυγχάνεται. Από χρήση 100% φυσικών πρώτων υλών στη σύνθεση Ο-1 (όλα τα υλικά φτάνουμε στο 35,7% στη σύνθεση Ο-5 (ποσοστό τσιμέντου, νερού και φυσικών αδρανών). Η σύνθεση Ο-5, όπως και η σύνθεση Ο-3 περιέχουν μόνο ~7% κ.β. τσιμέντο.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Αντοχή σε θλίψη



Εικόνα 1. Ανάπτυξη αντοχών κονιαμάτων με σκωρία κάδου και τσιμέντο

Πίνακας 4. Επιρροή της αντικατάστασης ασβεστολιθικών αδρανών με αδρανή σκωρίας στη θλιπτική αντοχή 28 ημερών

σύνθεση	Αντικατάσταση ασβεστολιθικών αδρανών με σκωρία	Αντοχή 28 ημερών (MPa)	Μεταβολή (%)
O-1	-	64,2	-
O-2	Χονδρόκοκκα	70,3	+9,5%
O-6	Λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα	77,9	+21,3%

Στα κυβικά δοκίμια ελέγχθηκε η ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής στις 7 και στις 28 ημέρες (Εικόνα 4). Μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή δίνει η σύνθεση με 100% τσιμέντο και μέγιστη αντικατάσταση αδρανών με σκωρία (O-6), ενώ όλες οι δοκιμαστικές συνθέσεις δίνουν καλύτερη αντοχή από τη σύνθεση με συμβατικά υλικά (O-1). Οι συνθέσεις O-3 και O-5 που έχουν θλιπτική αντοχή 28 ημερών 73,1 MPa και 71,3 MPa αντίστοιχα, δίνουν σκυρόδεμα υψηλής αντοχής μόλις με 200 kg/m³ τσιμέντου στο μίγμα. Επίσης, οι συνθέσεις O-5 και O-6, με θλιπτική αντοχή 28 ημερών 71,3 MPa και 77,9 MPa αντίστοιχα, περιέχουν μόλις 35,7% και 42,9% κ.β. φυσικές πρώτες ύλες.

Η διαφοροποίηση που δίνει αυτές τις αυξημένες τελικές αντοχές στις συνθέσεις είναι στη χρήση των αδρανών σκωρίας. Στον Πίνακα 4 δίνεται η επιρροή της αντικατάστασης των ασβεστολιθικών αδρανών με αδρανή σκωρίας.

Οι συνθέσεις με αντικατάσταση κόνιας με ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζουν μια καθυστέρηση στην ανάπτυξη των τελικών αντοχών αν συγκριθεί η αντοχή η αντοχή των 7 και των 28 ημερών. Αυτό είναι φυσιολογικό μια και η ιπτάμενη τέφρα δρα ποζολανικά, αντίδραση που εξελίσσεται αργά αλλά τελικά δίνει ικανοποιητικές αντοχές. Πιο συγκεκριμένα, αν συγκριθούν οι συνθέσεις O-2 και O-3 που διαφέρουν μόνο ως προς την αντικατάσταση τσιμέντου με ποζολάνη, στις 7 ημέρες η θλιπτική αντοχή της σύνθεσης με 100% τσιμέντο είναι μεγαλύτερη (64,8 MPa έναντι 53,0 MPa), αλλά στις 28 ημέρες η σύνθεση με 50% αντικατάσταση του τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα είναι λίγο μεγαλύτερη (73,1 MPa έναντι 70,3 MPa). Το γεγονός αυτό, πέρα από τη σημαντική δραστηριότητα της ιπτάμενης τέφρας ως ποζολάνη, καταδεικνύει και ότι συνεργάζεται αρμονικά με τα αδρανή σκωρίας, δίνοντας αυξημένες τελικές αντοχές.

Πίνακας 5. Επιρροή της αντικατάστασης ασβεστολιθικών αδρανών με αδρανή σκωρίας στην αντοχή σε απότριψη

σύνθεση	Αντικατάσταση ασβεστολιθικών αδρανών με σκωρία	Βάθος αυλάκωσης (mm)	Μεταβολή (%)
O-1	-	3,10	-
O-2	Χονδρόκοκκα	0,81	-73,9%
O-6	Λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα	0,70	-77,4%

Αντοχή σε απότριψη

Ο έλεγχος αντοχής σε απότριψη έγινε σύμφωνα με την τροποποιημένο κανονισμό ASTM C779. Πιο συγκεκριμένα πλάκες διαστάσεων 45x45x10cm υποβλήθηκαν σε απότριψη για χρόνο 20 λεπτών και μετρήθηκε το βάθος της αυλάκωσης. Ελέγχθηκε η επιρροή της αντικατάστασης των ασβεστολιθικών αδρανών με τα ανθεκτικότερα αδρανή σκωρίας, αρχικά στο χονδρόκοκκο και στη συνέχεια σε όλα τα κλάσματα αδρανών, δηλαδή στις συνθέσεις O-1, O-2 και O-6. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 5, όπου φαίνεται η μεγάλη συμμετοχή των αδρανών σκωρίας στην αύξηση της αντοχής σε απότριψη του παραγόμενου σκυροδέματος, αφού βελτιώνει το βάθος αυλάκωσης μέχρι και 77,4% σε σχέση με το σκυρόδεμα με συμβατικά αδρανή. Πιο συγκεκριμένα, η αντικατάσταση των χονδρόκοκκων αδρανών παίζει το σημαντικότερο ρόλο στην επίτευξη αυτής της βελτίωσης, αφού το βάθος αυλάκωσης μειώνεται κατά 73,9% μόνο με την αντικατάσταση του χονδρόκοκκου κλάσματος.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η χρήση μεγάλων ποσοτήτων παραπροϊόντων στο σκυρόδεμα, τόσο σε αντικατάσταση του τσιμέντου στην κονία με ιπτάμενη τέφρα ή σκωρία κάδου, όσο και σε αντικατάσταση των αδρανών με σκωρία. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από τους ελέγχους των δοκιμαστικών συνθέσεων είναι:

1. Είναι δυνατόν να παραχθεί σκυρόδεμα αντοχής πάνω από 70MPa με 7% κ.β. τσιμέντο και 64% κ.β. βιομηχανικά παραπροϊόντα.
2. Η αντικατάσταση των χονδρόκοκκων ασβεστολιθικών αδρανών με αδρανή σκωρίας αυξάνει τη θλιπτική αντοχή κατά 9,5% και η αντικατάσταση όλων των κλασμάτων αυξάνει τη θλιπτική αντοχή κατά 21,1%.
3. Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας σε ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου κατά 50% αναπτύσσει αντοχές με χαμηλότερο ρυθμό από τη σύνθεση με 100% τσιμέντο, αλλά στις 28 ημέρες η θλιπτική αντοχή είναι του ίδιου και ανώτερου επιπέδου, κάτι αναμενόμενο για μια κονία με ποζολανικές ιδιότητες.
4. Η αντικατάσταση τσιμέντου με σκωρία κάδου κατά 30% μαζί με τη χρήση χονδρόκοκκων αδρανών σκωρίας μπορεί να δώσει σκυρόδεμα ίδιας αντοχής με το σκυρόδεμα με συμβατικά υλικά στις 28 ημέρες.
5. Η χρήση αδρανών σκωρίας δίνει σκυρόδεμα με μεγάλο ειδικό βάρος (>2,7g/cm³). Το σκυρόδεμα αυτό είναι πλεονεκτικό για ειδικά έργα και εφαρμογές οδοποιίας όπως τα δύσκαμπτα οδοστρώματα και οι κυβόλιθοι οδοστρωσίας.
6. Τα αδρανή σκωρίας δίνουν στο σκυρόδεμα αυξημένη αντοχή σε απότριψη, κυρίως χάρη στο χονδρόκοκκο κλάσμα αδρανών σκωρίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρόγραμμα «ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ Ι: Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων στο ΕΜΠ» (ΕΠΕΑΕΚ ΙΙ), το οποίο συγχρηματοδοτείται από το ΕΚΤ (75%) και από Εθνικούς Πόρους (25%).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Motz H., Geiseler J. 'Products of steel slags an opportunity to save natural resources', *Waste Management* **21**: (2001) 285-293.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Papayianni, I. High calcium fly ash applications in concrete construction presented at the 7th CANMET International Conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete, Chennai (Madras), India, July 22-27, 2001.
- [5] 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).
- [6] Maslehuddin, M. et al, Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes, *Construction and Building Materials*, Vol.17, 2003.
- [7] Little, A.D. *Sustainable Industrial Development: Sharing Responsibilities in a Competitive World*. Den Haag: Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, 1996.