

Παρασκευή σκυροδεμάτων με χρήση αδρανών σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου: συμβολή στην αύξηση της ανθεκτικότητας και της αιεφορίας των κατασκευών
Production of concretes using slag aggregates: increasing the durability and sustainability of concrete structures

Αλέξανδρος ΧΑΤΖΟΠΟΥΛΟΣ¹, Κοσμάς Κ. ΣΙΔΕΡΗΣ², Χρήστος ΤΑΣΣΟΣ³

Λέξεις κλειδιά: Αδρανή σκωρίας (slag aggregates), ανθεκτικότητα (durability), αιεφορία (sustainability)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Τα αδρανή σκωρίας είναι ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας παραγωγής χάλυβα. Σε αυτήν την εργασία εξετάζεται η χρήση λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου καθώς και άμμου σκωρίας κάδου για την παραγωγή μειγμάτων σκυροδέματος κατηγορίας αντοχής C25/30 και C30/37. Τα αδρανή σκωρίας αντικατέστησαν τα συμβατικά ασβεστολιθικά αδρανή σε ποσοστά 30% και 50% κατ' όγκο. Στα παραγόμενα σκυροδέματα ελέγχθηκαν η αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό, η ενανθράκωση, η αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων, η αντίσταση έναντι παγετού και η υδατοαπορροφητικότητα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα αδρανή σκωρίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή συμβατικών σκυροδεμάτων με ενισχυμένα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας καταλήγοντας, με αυτό τον τρόπο, σε μειωμένου κόστους, φιλικά προς το περιβάλλον, ανθεκτικά μείγματα σκυροδέματος. Κατ' αυτό τον τρόπο επιμηκύνεται ο χρόνος ζωής των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, γεγονός που συμβάλλει στην αιεφορία των κατασκευών.

ABSTRACT : Slag is a by-product of the steel industry. This paper examines the use of fine and coarse slag aggregates of electric furnace, as well as slag sand for the production of concrete mixes of strength classes C25/30 and C30/37. Slag aggregates replaces conventional limestone aggregates at 30% and 50% by volume. The concrete produced was tested for compressive and tensile strength, carbonation, resistance to chlorine penetration, frost resistance and water

¹Πολ. Μηχανικός, υπ. Διδάκτορας, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: achatzop@civil.duth.gr

²Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: kksider@civil.duth.gr

³Πολ. Μηχανικός, υπ. Διδάκτορας, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, email: ctassos@civil.duth.gr

absorption. The results have shown that slag can be used as an aggregate to produce conventional concrete with enhanced durability characteristics, thereby resulting in reduced cost, environmentally friendly, durable concrete mixtures.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκυρόδεμα αποτελεί εδώ και δεκαετίες το πλέον διαδεδομένο υλικό κατασκευής φέροντα οργανισμού παγκοσμίως. Καθόλα τα χρόνια χρήσης του έχει υποστεί πολλές αλλαγές και βελτιώσεις, όμως, ειδικότερα την τελευταία δεκαετία, γίνονται προσπάθειες να γίνει φιλικότερο προς το περιβάλλον (Manso et al, 2004). Αρκετοί ερευνητές τα τελευταία χρόνια έχουν στραφεί σε υλικά, που είτε έμεναν αχρησιμοποίητα, είτε ρύπαιναν το περιβάλλον με την εναπόθεσή τους σε αυτό (Anastasiou, 2009). Λόγω των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων αυτών των υλικών (Pellegrino et al, 2008) πολλά από αυτά τα σκυροδέματα βελτίωσαν την μηχανική τους συμπεριφορά (Polanco et al, 2011).

Προς αυτή την κατεύθυνση, στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η παρασκευή συμβατικών σκυροδεμάτων, στα οποία αντικαταστάθηκε μέρος της άμμου, είτε με άμμο σκωρίας κάδου, είτε με άμμο σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου και εναλλακτικά, μέρος των χονδρόκοκκων αδρανών με χονδρόκοκκα αδρανή σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου. Στη συνέχεια, μετρήθηκαν οι δοκιμές αντοχής και ανθεκτικότητας (Maslehuddin et al, 2003) και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες συμβατικών σκυροδεμάτων με συμβατικά αδρανή υλικά (Aribas et al, 2014).

Η σκωρία κάδου (ΣΚ) είναι ένα υποπροϊόν της βιομηχανίας χάλυβα που προκύπτει κατά το δεύτερο στάδιο επεξεργασίας του χάλυβα (μεταλλουργικός καθαρισμός) και παρουσιάζει τσιμεντοειδείς ιδιότητες, κυρίως λόγω της υψηλής του περιεκτικότητας σε CaO (Parayianni et al, 2003). Η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου (ΣΗΚ) είναι επίσης παραπροϊόν της ίδιας βιομηχανίας και σχηματίζεται στους κλιβάνους ηλεκτρικού τόξου, όπου παράγεται πάνω από το 40% της παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα. Μόνο στην Ευρώπη κάθε χρόνο απορρίπτονται στο περιβάλλον πάνω από 20 εκ. τόνοι της συγκεκριμένης σκωρίας.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Παρασκευάστηκαν δεκατέσσερα διαφορετικά μείγματα σκυροδέματος κατηγορίας αντοχής C25/30 και C30/37 (EN206-1, 2000). Τα τσιμέντα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου CEM II A-M/32.5N και CEM II A-M/42.5N. Χρησιμοποιήθηκαν χονδρόκοκκα αδρανή αποτελούμενα από θρυμματισμένο γρανίτη με μέγιστο κόκκο αδρανών 32mm και λεπτόκοκκα από θραυστή ασβεστολιθική άμμο. Η άμμος ΣΚ και η άμμος ΣΗΚ χρησιμοποιήθηκαν ως εναλλακτικά υλικά αντικατάστασης της θραυστής ασβεστολιθικής άμμου, σε δύο μείγματα η καθεμία, για κάθε κατηγορία αντοχής, σε ποσοστά 30% και 50% κατ' όγκο της άμμου. Ομοίως, το γαρμπίλι ΣΗΚ και το χαλίκι ΣΗΚ αντικατέστησαν τα αντίστοιχα αδρανή σε ποσοστό 50% κατ' όγκο. Υψηλού εύρους, μείωσης νερού, καρβοξυλικού αιθέρα, πολυμερές πρόσμικτο προστέθηκε σε διαφορετικές

δοσολογίες, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή εργασιμότητα. Η χημική ανάλυση των τσιμέντων και των σκωριών που χρησιμοποιήθηκαν φαίνεται στον “Πίνακα 1”.

Πίνακας 1: Χημική ανάλυση τσιμέντων και σκωριών.

	CEM II 32,5	CEM II 42,5	Άμμος ΣΚ	ΣΗΚ
SiO ₂	28	23,85	6,53	10,89
Al ₂ O ₃	9	5,22	2,33	7,71
Fe ₂ O ₃	5,5	4,13	8,69	29,19
CaO	48	58,2	30,85	33,52
MgO	2,2	3,2	4,52	4,03
SO ₃	3,2	3,3	-	-
K ₂ O	1,5	0,68	-	0,03
Na ₂ O	0,5	0,32	0,13	0,1
TiO ₂	-	0,24	0,14	0,43
P ₂ O ₅	-	0,06	-	-
SrO	-	0,03	-	-
Cr ₂ O ₃	-	0,02	0,13	0,34
ZnO	-	0,01	0,17	-
MnO	-	-	1,06	4,77
ειδικό βάρος	3,15	3,1	2,59	3,35

Το γαρμπίλι (2-16 mm) και τα σκύρα (8-32 mm) που χρησιμοποιήθηκαν, προήλθαν από θραύση φυσικού πετρώματος σε σπαστήρα.

Οι αναλογίες καθώς και οι ιδιότητες των νωπών μειγμάτων παρουσιάζονται για όλα τα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν στους “Πίνακες 2 και 3”.

Πίνακας 2: Μελέτη σύνθεσης και χαρακτηριστικά των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30.

Μελέτη Σύνθεσης	C		C		C		C	
	25/30	25/30 30% ΣΚ	25/30 50% ΣΚ	25/30 30% ΣΗΚ	25/30 50% ΣΗΚ	25/30 50% Γ	25/30 50% Χ	
kg/m ³	M1	M2-30	M3-50	M4-30	M5-50	M6-50	M7-50	
Τσιμέντο II 32,5	300	300	300	300	300	300	300	
Τσιμέντο II 42,5	50	50	50	50	50	50	50	
Γαρμπίλι	270	270	270	270	270	135	270	
Γαρμπίλι ΣΗΚ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	163	0,0	
Χαλίκι	630	630	630	630	630	630	315	

Χαλίκι ΣΗΚ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	380,4
Ασβ/κή άμμος	900	630	450	630	450	900	900
Άμμος ΣΚ	0,0	323,6	539,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Άμμος ΣΗΚ	0,0	0,0	0,0	323,6	539,3	0,0	0,0
Νερό	180	180	180	180	180	180	180
Υπερ/της	1,42	3,00	4,67	1,92	2,00	1,08	1,42
N/T	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Κάθιση (mm)	20	19	18,75	17,5	17,75	18	19,5
Αέρας (%)	2,5	2,4	2,5	2,4	2,4	2,4	2,5

Πίνακας 3: Μελέτη σύνθεσης και χαρακτηριστικά των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37.

Μελέτη Σύνθεσης	C 30/37	C 30/37 30% ΣΚ	C 30/37 50% ΣΚ	C 30/37 30% ΣΗΚ	C 30/37 50% ΣΗΚ	C 30/37 50% Γ	C 30/37 50% X
kg/m ³	M8	M9-30	M10- 50	M11-30	M12-50	M13-50	M14-50
Τσιμέντο II 32,5	150	150	150	150	150	150	150
Τσιμέντο II 42,5	200	200	200	200	200	200	200
Γαρμπίλι	270	270	270	270	270	135	270
Γαρμπίλι ΣΗΚ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	163	0,0
Χαλίκι	630	630	630	630	630	630	315
Χαλίκι ΣΗΚ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	380,4
Ασβ/κή άμμος	900	630	450	630	450	900	900
Άμμος ΣΚ	0,0	323,6	539,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Άμμος ΣΗΚ	0,0	0,0	0,0	323,6	539,3	0,0	0,0
Νερό	180	180	180	180	180	180	180
Υπερ/της	1,67	2,83	4,33	2,08	1,83	0,92	1,17
N/T	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Κάθιση (mm)	19	19,5	17	17,5	18	17	18,5
Αέρας (%)	2,2	2,1	2,0	2,2	2,2	2,0	2,1

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν για την πραγματοποίηση των δοκιμών ήταν, κύβοι ακμής 150mm και 100mm και κύλινδροι 60x100mm, 100x200mm και 150x300mm. Όλα τα δοκίμια, πλην των κυλίνδρων 60x100mm, συντηρήθηκαν στον θάλαμο συντήρησης (T=20°C, RH>98%) μέχρι την ηλικία των δοκιμών.

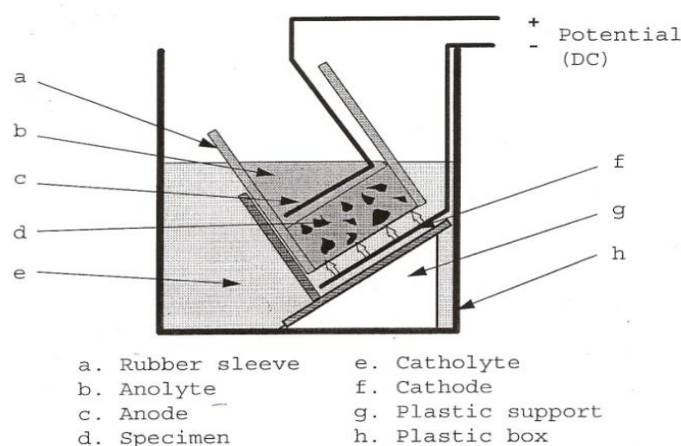
Συγκεκριμένα, οι κύβοι ακμής 150mm χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της κατηγορίας αντοχής των μειγμάτων (28 ημέρες), αλλά και την αντοχή ως την ηλικία των έξι μηνών. Ίδιων διαστάσεων κύβοι χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση του συντελεστή S index της υδατοαπορροφητικότητας.

Οι κύβοι ακμής 100mm χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή της ψύξης-απόψυξης. Αφού κόπηκαν στη μέση, μετατράπηκαν σε δοκίμια διαστάσεων 100x100x50mm, τοποθετήθηκαν σε διάλυμα 3% NaCl και υποβλήθηκαν σε 15 εικοσιτετράωρους κύκλους ψύξης-απόψυξης (από -14°C έως +20°C).

Η αντίσταση σε ενανθράκωση μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια 60x100mm. Αυτοί οι μικροί κύλινδροι αρχικά συντηρήθηκαν επί 3 ημέρες στο προαναφερόμενο θάλαμο συντήρησης. Από αυτή την ηλικία και μετά τοποθετήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου (σχετική υγρασία=50-60% και θερμοκρασία=20±2°C). Στην ηλικία των 28 ημερών μεταφέρθηκαν στο θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης (T=20°C, σχετική υγρασία=55% , CO₂=1%). Τα δοκίμια παρέμειναν σε αυτόν τον θάλαμο για 56 ημέρες.

Η αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων των σκυροδεμάτων μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο 100mm και ύψος 50mm που σχηματίστηκαν από τους κύλινδρους 100x200mm. Τα δοκίμια αυτά συντηρήθηκαν όπως παραπάνω μέχρι την ηλικία των 28 ημερών. Ακολούθως εκτιμήθηκε ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων De σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο NT Build 492 (1999) και φαίνεται στο **Σχήμα 1**.

Τέλος, οι κύλινδροι διαστάσεων 150x300mm χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή εφελκυσμού διάρρηξης.



Σχήμα 1. Συσκευή δοκιμής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων De (NT Build 492, 1999).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Αντοχή σε θλίψη

Η αντοχή σε θλίψη μετρήθηκε για όλα τα μείγματα στις ηλικίες των 2, 7, 28, 90 και 180 ημερών. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στους “Πίνακες 4 και 5”.

Πίνακας 4: Αντοχή σε θλίψη των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30 (MPa).

(MPa)	M1	M2-30	M3-50	M4-30	M5-50	M6-50	M7-50
fc ₂	25,2	24,5	24,4	22,8	22,8	28,5	25,1
fc ₇	30,1	34,5	34,4	30,9	32,5	34,6	33,1
fc ₂₈	39,1	52,1	51,8	45	43,9	41,3	44,6
fc ₉₀	44,6	57,2	57,5	51,3	50,5	48,4	48,3
fc ₁₈₀	54,1	63,6	64,4	57,3	55,6	54,4	55,0

Πίνακας 5: Αντοχή σε θλίψη των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37 (MPa).

(MPa)	M8	M9-30	M10-50	M11-30	M12-50	M13-50	M14-50
fc ₂	28,7	31,9	32,5	25,5	24,4	32,1	28,0
fc ₇	30,2	40,3	41,8	39,7	34,8	38,9	34,1
fc ₂₈	46,4	56,8	59,5	51,8	46,8	44,1	49,8
fc ₉₀	50,3	60,3	63,3	58,5	52,1	50,1	52,6
fc ₁₈₀	57,9	67,6	68,1	62,4	59,1	56,7	59,7

Παρατηρούμε πως πέραν της ηλικίας των 2 ημερών, όπου οι τιμές αντοχής είναι παραπλήσιες μεταξύ των μειγμάτων, σε όλες τις μεταγενέστερες ηλικίες οι αντοχές των μειγμάτων με αδρανή σκωρίας είναι μεγαλύτερες από την αντοχή των μειγμάτων με συμβατικά αδρανή. Συγκεκριμένα, στην ηλικία των 28 ημερών, τα μείγματα με χρήση άμμου ΣΚ φαίνεται να είναι τα πιο ανθεκτικά με αύξηση της αντοχής μέχρι και 33% σε σχέση με το μείγμα αναφοράς. Ομοίως, και στα μείγματα με χρήση αδρανών ΣΗΚ έχουμε, είτε παρόμοια αντοχή, είτε αύξηση που φτάνει ως και το 15%. Το συμπέρασμα αυτό εξάγεται και για τις δύο κατηγορίες αντοχών που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Ανάλογη εικόνα παρατηρείται και στις μεθύτερες ηλικίες των τριών και έξι μηνών.

Εφελκυσμός διάρρηξης

Η αντοχή σε εφελκυσμό διάρρηξης μετρήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C496M-11 (2004) για όλα τα μείγματα στις ηλικίες των 28 και 90 ημερών. Οι τιμές παρουσιάζονται στους “Πίνακες 6 και 7”.

Πίνακας 6: Αντοχή σε εφελκυσμό διάρρηξης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30 (MPa).

(MPa)	M1	M2-30	M3-50	M4-30	M5-50	M6-50	M7-50
f_{c28}	3,2	3,5	3,6	4,2	3,2	3,4	3,6
F_{c90}	3,3	3,7	3,7	4,3	3,3	3,5	3,6

Πίνακας 7: Αντοχή σε εφελκυσμό διάρρηξης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37 (MPa).

(MPa)	M8	M9-30	M10-50	M11-30	M12-50	M13-50	M14-50
f_{c28}	3,5	3,6	3,6	3,3	3,8	3,6	3,6
F_{c90}	3,6	3,7	3,8	3,6	3,8	3,6	3,8

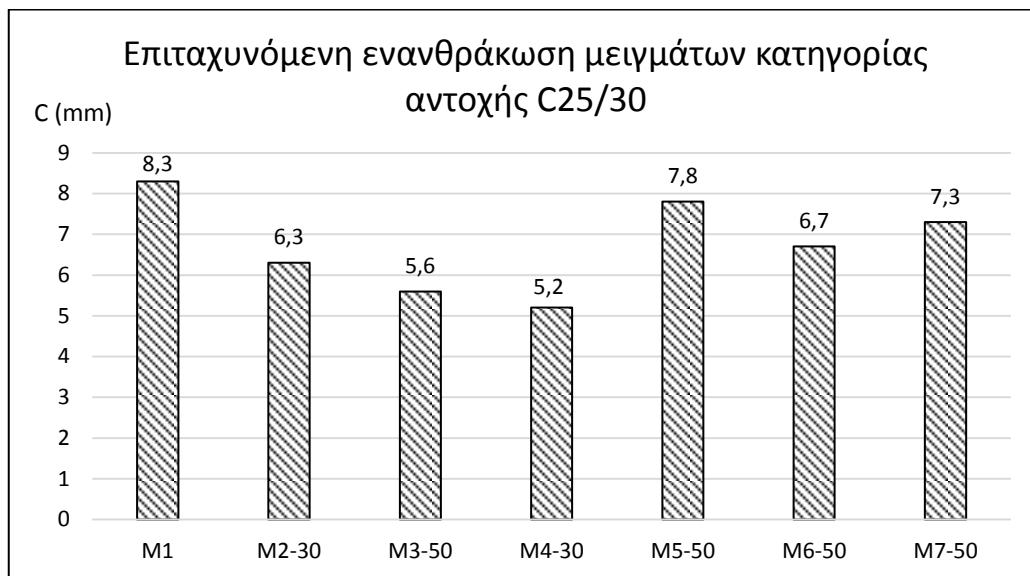
Είναι γνωστό ότι η αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό είναι περίπου δέκα φορές μικρότερη απ' ότι σε θλίψη. Αυτό επιβεβαιώνεται και στην παρούσα έρευνα. Οι διαφορές στις τιμές μεταξύ των μειγμάτων είναι τόσο μικρές που μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

Βάθος Ενανθράκωσης

Το βάθος ενανθράκωσης μετρήθηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Πρότυπο EN 14630. Τα δοκίμια, αφού βγήκαν απ' τον θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης, κατά την διαδικασία που περιγράφηκε ανωτέρω, θραύτηκαν στη μέση. Οι φρεσκοθραυσμένες επιφάνειες των δοκιμίων ψεκάστηκαν με δείκτη φαινολοφθαλείνης. Το βάθος ενανθράκωσης όλων των μειγμάτων παρουσιάζεται στους "Πίνακες 8 και 9" και παρίσταται γραφικώς στα **Σχήματα 2 και 3**.

Πίνακας 8: Βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30.

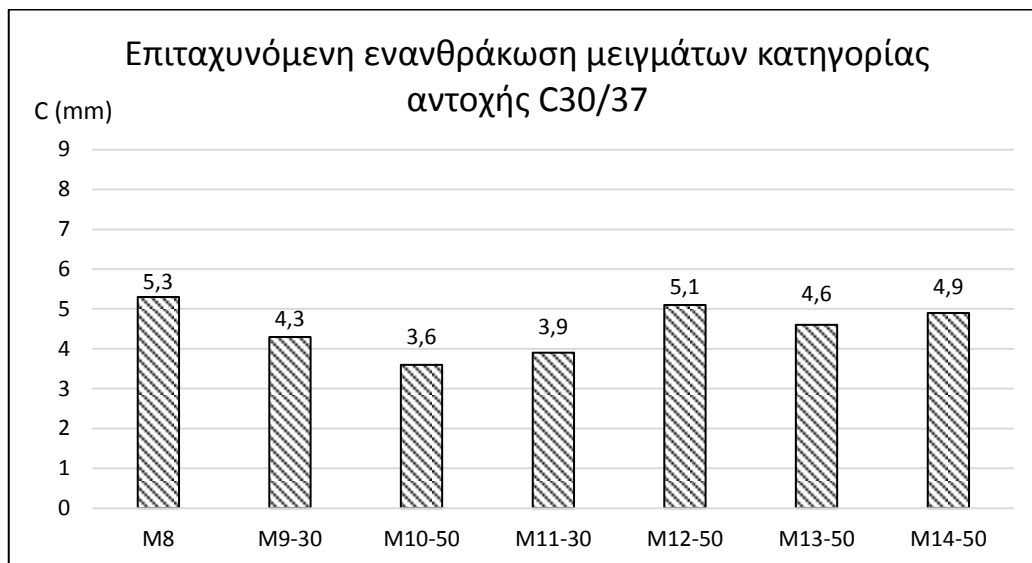
	M1	M2-30	M3-50	M4-30	M5-50	M6-50	M7-50
Βάθος (mm)	8,3	6,3	5,6	5,2	7,8	6,7	7,3



Σχήμα 2. Βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30.

Πίνακας 9: Βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37.

	M8	M9-30	M10-50	M11-30	M12-50	M13-50	M14-50
Βάθος (mm)	5,3	4,3	3,6	3,9	5,1	4,6	4,9



Σχήμα 3. Βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37.

Στα παραπάνω σχήματα αποτυπώνεται η θετική επίδραση της χρήσης αδρανών σκωρίας στο σκυρόδεμα όσον αφορά την ενανθράκωση. Πιο συγκεκριμένα όλα τα μείγματα και στις δύο κατηγορίες αντοχών έχουν μικρότερες τιμές από τα μείγματα αναφοράς. Η μείωση αυτή είναι μεγαλύτερη στα λεπτόκοκκα αδρανή και φτάνει μέχρι και το 37%. Αξιο αναφοράς είναι το ότι το μείγμα M4-30 είχε μικρότερο βάθος ενανθράκωσης από το σκυρόδεμα αναφοράς M8 που ανήκει στην αμέσως μεγαλύτερη κατηγορία αντοχής.

Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων

Οι τιμές του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων De , που μετρήθηκαν σύμφωνα με το Πρότυπο NT Build 492, παρουσιάζονται για όλα τα μείγματα στους "Πίνακες 10 και 11".

Πίνακας 10: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων De ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30.

	M1	M2-30	M3-50	M4-30	M5-50	M6-50	M7-50
De ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	14,3	10,9	11,2	11,9	12,9	5,5	11,3

Πίνακας 11: Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων De ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37.

	M8	M9-30	M10-50	M11-30	M12-50	M13-50	M14-50
--	----	-------	--------	--------	--------	--------	--------

D_e ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	12,5	8,9	7,3	9,8	11,9	4,6	9,8
--	------	-----	-----	-----	------	-----	-----

Η χρήση αδρανών σκωρίας φαίνεται να έχει τα πιο ευεργετικά αποτελέσματα στη δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων, από οποιαδήποτε άλλη δοκιμή. Ειδικά στα μείγματα με χρήση γαρμπιλιού ΣΗΚ έχουμε μια μείωση του συντελεστή πάνω από 60% σε σχέση με τα μείγματα αναφοράς. Όμως, και τα υπόλοιπα μείγματα, κυρίως αυτά με την άμμο ΣΚ, παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη αντίσταση έναντι της διείσδυσης των χλωριόντων, έτσι ώστε στα περισσότερα, αυτή η μείωση, να ξεπερνάει το 20%. Τέλος, παρατηρούμε ότι όλα τα μείγματα κατηγορίας αντοχής C25/30 με χρήση σκωρίας έχουν παρόμοια ή μικρότερη τιμή από το μείγμα αναφοράς κατηγορίας αντοχής C30/37.

Ψύξη-Απόψυξη

Η μέθοδος αυτή όπως περιγράφηκε στο πειραματικό πρόγραμμα αποτελεί μια παραλλαγή του προτύπου EN 12390-9 2006. Η απώλεια βάρους των δοκιμίων μετά από 15 ημερήσιους κύκλους ψύξης-απόψυξης για όλα τα μείγματα παρουσιάζεται στους “Πίνακες 12 και 13”.

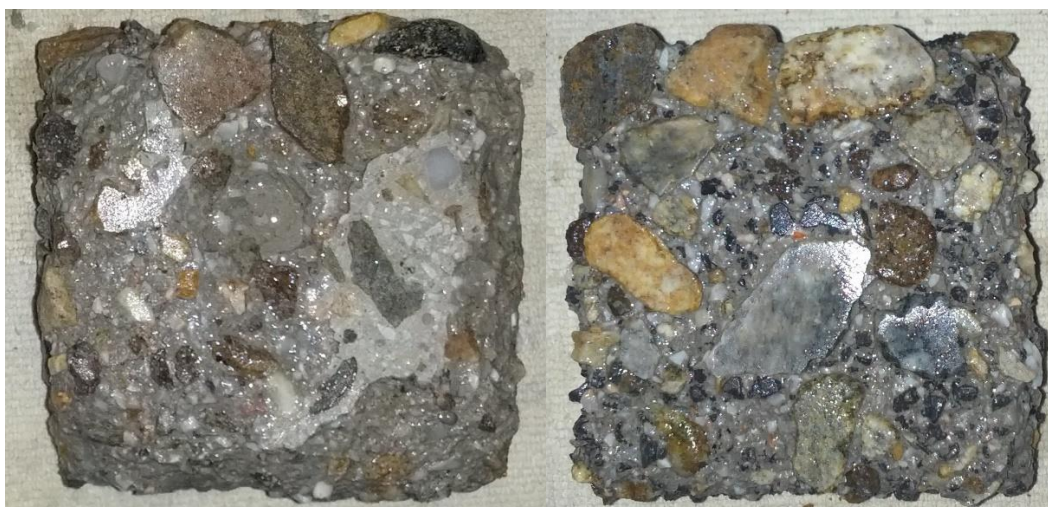
Πίνακας 12: Ποσοστιαία απώλεια βάρους των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C25/30.

%	M1	M2-30	M3-50	M4-30	M5-50	M6-50	M7-50
Απώλεια βάρους	27,2%	20,7%	18,6%	20,0%	21,8%	20,0%	21,1%

Πίνακας 13: Ποσοστιαία απώλεια βάρους των μειγμάτων κατηγορίας αντοχής C30/37.

%	M8	M9-30	M10-50	M11-30	M12-50	M13-50	M14-50
Απώλεια βάρους	18,0%	12,2%	11,4%	10,9%	15,7%	16,3%	14,7%

Η χρήση αδρανών σκωρίας επηρέασε κομβικά την αντίσταση των σκυροδεμάτων σε ψύξη-απόψυξη και στις δύο κατηγορίες αντοχών. Είναι ενδεικτικό ότι όλα τα μείγματα είχαν μείωση της απώλειας μάζας τους στο τέλος της δοκιμής από 10% έως 40% σε σχέση με την απώλεια μάζας των σκυροδεμάτων αναφοράς. Στο **Σχήμα 4** φαίνεται η διάβρωση των δοκιμίων M8 και M11-30 μετά από 15 κύκλους ψύξης-απόψυξης.



Σχήμα 4. Απώλεια μάζας δοκιμίου C30/37 (αριστερά) και C30/37 με 30% αντικατάσταση της άμμου με άμμο ΣΗΚ (δεξιά) μετά από 15 κύκλους ψύξης-απόψυξης.

Υδατοαπορροφητικότητα

Για την μέτρηση της υδατοαπορροφητικότητας χρησιμοποιήθηκαν τρεις κύβοι ακμής 150mm. Μετά την συντήρησή τους για 28 ημέρες στον θάλαμο συντήρησης, ξηράθηκαν στους 65°C μέχρι σταθεροποίησης του βάρους τους. Στη συνέχεια, μονώθηκαν όλες οι πλευρές τους, πλην της κάτω, και τοποθετήθηκαν στο νερό σύμφωνα με το πρότυπο RILEM TC 116 (1999).

Μετρήσεις μεταβολής του βάρους των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν στις χρονικές στιγμές των 10 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min, 180 min, 240 min, 480 min και 24hr. Τα βάρη αυτά διαιρέθηκαν με την εκτεθειμένη επιφάνεια του δοκιμίου στο νερό ($0,0225 \text{ m}^2$) για να υπολογιστεί η υδατοαπορροφητικότητα σε μονάδες gr/m^2 . Τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστεί ο συντελεστής S index, ο οποίος παρουσιάζεται στους “Πίνακες 14 και 15”.

Πίνακας 14: Υδατοαπορροφητικότητα μειγμάτων C25/30.

	M1	M2-30	M3-50	M4-30	M5-50	M6-50	M7-50
S index	0,126	0,119	0,123	0,117	0,141	0,117	0,125

Πίνακας 15: Υδατοαπορροφητικότητα μειγμάτων C30/37.

	M8	M9-30	M10-50	M11-30	M12-50	M13-50	M14-50
S index	0,100	0,098	0,091	0,102	0,108	0,096	0,098

Η χρήση αδρανών σκωρίας στα ποσοστά που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία σε μικρά ποσοστά δεν επηρέασε ουσιαστικά την αντίσταση των μειγμάτων έναντι υδατοαπορροφητικότητας. Τα μείγματα που παρουσίασαν μικρή βελτίωση, λιγότερο από 10%, M3-50 και M10-50 είναι αυτά με την αντικατάσταση άμμου από άμμο ΣΚ.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση αδρανών σκωρίας ως μερική αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών για την παραγωγή σκυροδεμάτων C25/30 και C30/37 όχι μόνο δεν επηρεάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας των μειγμάτων που μετρήθηκαν στην παρούσα έρευνα, αλλά αντιθέτως, όλοι οι δείκτες δείχνουν, είτε σταθεροί, είτε βελτιωμένοι σε σχέση με το σκυρόδεμα αναφοράς. Για παράδειγμα, η θλιπτική αντοχή των σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν με προσθήκη αδρανών σκωρίας παρουσίασε σημαντική αύξηση από την ηλικία των 7 ημερών, ενώ η αντίσταση έναντι ενανθράκωσης, διείσδυσης χλωριόντων και έναντι παγετού υπήρξε αξιοσημείωτη. Φαίνεται, λοιπόν, ότι η μερική αντικατάσταση συμβατικών αδρανών από αδρανή σκωρίας, λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα, οδηγεί στην παρασκευή ανθεκτικών σκυροδεμάτων. Με τον τρόπο αυτό το περιβαλλοντικό όφελος είναι διπλό, καθώς αυτά τα υλικά αποτελούν βιομηχανικά υποπροϊόντα, δηλαδή απόβλητα, και αντικαθιστούν φυσικά αδρανή, δηλαδή αδρανή που συλλέγονται διαταράσσοντας το φυσικό περιβάλλον. Αυτό συμβαδίζει με την έννοια της αειφορίας των κατασκευών.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η έρευνα συνεχίζεται για έλεγχο πιθανής διαστολή των αδρανών σκωρίας. Βρίσκονται σε εξέλιξη έλεγχοι αντοχής σταθερότητας όγκου σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D4792 (2013), αλλά και με δύο ακόμα παραλλαγές αυτού του προτύπου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ήταν προσφορά των εταιριών ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΑΕ και Sika Hellas ΑΕΒΕ στις οποίες εκφράζονται ευχαριστίες για την υποστήριξή τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

Αναστασίου, Ε. “Αξιοποίηση σκωριών χαλυβουργίας και ιπτάμενων λιγνιτικών τεφρών στην παραγωγή ειδικών σκυροδεμάτων”. Διδακτορική διατριβή (υπό την επίβλεψη της Καθ. Ι. Παπαγιάννη), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη (2009)

Arribas, I., Vegas, I., San-Jose, J.T. & Manso, J.M “Durability studies on steelmaking concretes”, *Materials and Design* 63 (2014) 168-176.

ASTM C496 / C496M-11, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA (2004)

ASTM D4792/D4792M-13, Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions, ASTM International, West Conshohocken, PA (2013)

EN 12390-9, Testing hardened concrete. Freeze-thaw resistance. Scaling, BSI, page 28 (2006)

EN 206-1, Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity, CEN/TC 104, (2000)

Manso, J.M., González, J.J.& Polanco, J.A., “Electric Arc Furnace in Concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16, No 6 (2004) 639-645

Maslehuddin, M., Sharif, A.M., Shameem, M., Ibrahim, M. & Barry, M.S., “Comparison of Properties of Steel Slag and Crushed Limestone Aggregate Concretes”, *Construction and Building Materials*, Vol. 17, No 2 (2003) 105-112

NT Build 492 - Concrete Mortar and Cement-based Repair Materials - Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments (1999)

Papayianni, I. & Anastasiou, E., “Concrete incorporating high volumes of industrial by-products”, in *Proceedings of the International Conference on Celebrating Concrete* (Dundee Scotland UK 3-4 September, 2003), People and Practice, Dundee, Scotland, UK (2003) 595-604

Pellegrino, C. & Gaddo, V., “Mechanical and Durability Characteristics of Concrete Containing EAF Slag as Aggregate”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, No 9 (2009) 663-667

Polanco, J., Manso, J.M., Setién, J. & González, J.J., “Strength and Durability of Concrete Made with Electric Steelmaking Slag” ACI Materials Journal, Vol. 108, No 2 (2011) 196-203

RILEM TC 116-PCD, Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability, International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (1999)