

Κονιάματα με υαλόθραυσμα: Μηχανική αντοχή και Ανθεκτικότητα έναντι περιβαλλοντικών προσβολών και υψηλών θερμοκρασιών

Mortars with glass cullet: Mechanical strength and Durability in environmental attack and high temperatures

Παναγιώτα ΜΑΝΙΤΑ¹, Χριστίνα-Αμαλία ΔΡΟΣΟΥ², Κωνσταντίνος ΓΕΩΡΓΟΥΣΑΚΗΣ³, Παναγιώτης ΚΕΧΑΓΙΑΣ³, Μιχαήλ ΚΩΣΤΙΚΑΣ³, Μαρία ΣΙΑΛΗ³, Κοσμάς Κ. ΣΙΔΕΡΗΣ⁴, Αγγελική ΜΟΥΤΣΑΤΣΟΥ⁵

Λέξεις κλειδιά: Κονίαμα, Υαλόθραυσμα, Ανθεκτικότητα, Υψηλές θερμοκρασίες.
Keywords: Mortars, Cullet, Mechanical strength, Durability, High temperatures

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα μελέτη ερευνάται η συμπεριφορά δύο σειρών κονιαμάτων με υαλόθραυσμα και ένα κονίαμα τσιμεντοκονιάματος. Η πρώτη σειρά παρασκευάστηκε με μερική αντικατάσταση της άμμου από υαλόθραυσμα κοκκομετρίας <90μm, ενώ κατ' αντιστοιχία, στη δεύτερη σειρά αντικαταστάθηκε μέρος του τσιμέντου. Επιπλέον παράμετροι σχεδιασμού ήταν το ποσοστό αντικατάστασης, δηλαδή 5, 7,5 και 10% κατά βάρος του τσιμέντου του κονιάματος αναφοράς, καθώς και η ποιότητα του υαλοθραύσματος, δηλαδή υαλόθραυσμα ανακύκλωσης αλλά και υαλόθραυσμα ανακύκλωσης διαβρωμένο. Μετρήθηκαν η θλιπτική αντοχή και χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας. Ακόμη τα δοκίμια εκτέθηκαν, σε θερμοκρασία 750° C και έπειτα, μελετήθηκε η θλιπτική αντοχή και η μικροδομή μέσω XRD, SEM και διαφορικής τεχνικής ανάλυσης.

Abstract: This research designs and studies two sets of mortar with glass cullet and a cement mortar. In the first set a part of sand was replaced with cullet

¹Δρ. Πολ. Μηχανικός, Επιστημονικός Συνεργάτης Δ.Π.Θ., peg.manita@gmail.com

²Δρ. Χημ. Μηχανικός Ε.Μ.Π.

³Πολ. Μηχανικός Δ.Π.Θ.

⁴Αναπληρωτής Καθηγητής Δ.Π.Θ., kksider@civil.duth.gr

⁵Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

$d < 90 \mu\text{m}$ and in the second set a part of cement was replaced with cullet. More design parameters were the replacement percentage, i.e. 5, 7,5 και 10% p.w. of the reference mortar cement and the cullet quality, i.e. the cullet was collected from recycling sites and further, a part was subjected to corrosion.. The compressive strength and durability characteristics were measured. Moreover, the specimens were exposed in a temperature of 750°C , and after the compressive strength and the microstructure (XRD, SEM and TG-DTA) were studied.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, γίνεται προσπάθεια αντιμετώπισης των βλαβερών συνεπειών που προκαλεί στο περιβάλλον η παραγωγή του σκυροδέματος, κυρίως με την ενσωμάτωση σ' αυτό βιομηχανικών παραπροϊόντων ή αποβλήτων. Τέτοιο υλικό είναι το υαλόθραυσμα, του οποίου μεγάλες ποσότητες δεν πληρούν τις προδιαγραφές της υαλουργίας για ανακύκλωση. Το υαλόθραυσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σκυρόδεμα αντικαθιστώντας μέρος της άμμου ή του κλίνκερ.

Η έλλειψη αποθεμάτων της φυσικής άμμου έχει οδηγήσει εδώ και αρκετά χρόνια στην έρευνα για την αντικατάσταση μέρους ή του συνόλου της φυσικής άμμου στο σκυρόδεμα είτε με τεχνητή άμμο είτε με παραπροϊόντα και απόβλητα της βιομηχανίας (Shao et al, 2000, Papadopoulos et al, 2003). Μεταξύ των απορριπτόμενων υλικών που χρησιμοποιούνται ως υποκατάστατο της φυσικής άμμου, το γυαλί ξεχωρίζει λόγω των ομοιοτήτων που παρουσιάζει με την άμμο, τόσο στις φυσικές του ιδιότητες όσο και στη χημική του σύσταση (Du et al, 2014). Όμως, ενώ το γυαλί πληροί τα χαρακτηριστικά ενός τυπικού ποζολανικού υλικού (υψηλό ποσοστό πυριτίου και δραστικού πυριτίου), η υψηλή περιεκτικότητά του σε νάτριο μπορεί να οδηγήσει σε αλκαλοπυριτικές δράσεις στο σκυρόδεμα (Shao et al, 2000, Karamperi et al, 2005). Εντούτοις, προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει τη θετική επίδραση της μερικής αντικατάστασης της φυσικής άμμου με υαλόθραυσμα (Karamperi et al, 2005, Karamperi et al, 2006, Limbachiya et al, 2009, Dhir et al, 2009). Όσον αφορά την αντικατάσταση μέρους του κλίνκερ με φίλερ υαλοθραύσματος, αυτή παρουσιάζει υπολογίσιμα οφέλη, πέραν της συνεισφοράς στο περιβάλλον. Τα σημαντικότερα είναι η μείωση του κόστους παρασκευής, η αύξηση της εργασιμότητας και η μείωση του κινδύνου απόμειξης (Γεωργουσάκης κ.α., 2014).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν η συστηματική μελέτη κονιαμάτων που προκύπτουν από μερική αντικατάσταση είτε του τσιμέντου είτε της πυριτικής άμμου από φίλερ υαλοθραύσματος ($d \leq 90 \mu\text{m}$). Επιλέχθηκε η παρασκευή κονιαμάτων ώστε να απομονωθεί η συμπεριφορά του υαλοθραύσματος από τα υπόλοιπα πρόσθετα του σκυροδέματος. Οι παράμετροι σχεδιασμού ήταν το υλικό

αντικατάστασης (τσιμέντο ή άμμος), το ποσοστό αντικατάστασης (5, 7,5 και 10% κατά βάρος του τσιμέντου του κονιάματος αναφοράς) και η ποιότητα του υαλοθραύσματος (ανακυκλωμένο ή ανακυκλωμένο διαβρωμένο).

Σχεδιάστηκαν και παρασκευάστηκαν 13 μείγματα κονιαμάτων. Το πρώτο ήταν μείγμα τσιμεντοκονιάματος που ονομάστηκε REF και χρησιμοποιήθηκε ως μείγμα αναφοράς. Οι αναλογίες μείξης αυτού ήταν Τσιμέντο: Άμμος: Νερό = 1:3:0,55. Τα υπόλοιπα 12 μείγματα περιείχαν υαλόθραυσμα. Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου CEM I 42,5 και η άμμος ήταν συλλεκτική πυριτική. Ο λόγος νερού / τσιμέντο διατηρήθηκε σταθερός σε όλα τα μείγματα και ίσος με 0,55. Το υαλόθραυσμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν πολυχρωματικό υαλόθραυσμα νατρίου ασβεστίου, που συλλέχθηκε από εγκαταστάσεις συλλογής για ανακύκλωση γυαλιού και στην συνέχεια υπέστη άλεση έως την επίτευξη διαμέτρου $d \leq 90 \mu\text{m}$. Μέρος του ανακυκλωμένου υαλοθραύσματος υπέστη επιταχυνόμενη διάβρωση σε έντονα αλκαλικό περιβάλλον με διάλυμα NaOH 2M στους 120°C, διάρκειας 3 ωρών. Στόχος ήταν να εξετασθεί η επιρροή του επιφανειακά αναπτυσσόμενου SiO₂ στην συνάφεια της διεπιφάνειας του κονιάματος και η πιθανή αντίδραση αυτού σε υψηλές θερμοκρασίες.

Πίνακας 1. Κωδικοποίηση των παρασκευασθέντων μειγμάτων

REF	SF 3/5	SF 4/5	CF 3/5	CF 4/5	S: αντικατάσταση άμμου
	SF 3/7.5	SF 4/7.5	CF 3/7.5	CF 4/7.5	C: αντικατάσταση τσιμέντου
	SF 3/10	SF 4/10	CF 3/10	CF 4/10	3 / 4: διαβρωμένο ανακυκλωμένο / ανακυκλωμένο υαλόθραυσμα
					5, 7,5, 10 %: αντικατάσταση

Κάθε ποιότητα υαλοθραύσματος (διαβρωμένο ή μη) αντικατέστησε την πυριτική άμμο σε τρία ποσοστά: 5%, 7.5% και 10% κατά βάρος του τσιμέντου του κονιάματος αναφοράς και προέκυψαν οι σειρές SF. Ομοίως συνέβη με την αντικατάσταση του τσιμέντου και προέκυψαν οι σειρές CF. Κάθε σειρά, στην οποία χρησιμοποιήθηκε ανακυκλωμένο διαβρωμένο υαλόθραυσμα χαρακτηρίστηκε ως 3 και κάθε σειρά, στην οποία χρησιμοποιήθηκε ανακυκλωμένο υαλόθραυσμα χαρακτηρίστηκε ως 4. Ο τελευταίος αριθμός που σημειώνεται σε κάθε μείγμα, δίνει το ποσοστό αντικατάστασης του υλικού, δηλαδή 5%, 7.5% ή 10% κατά βάρος του τσιμέντου του κονιάματος αναφοράς. Τα μείγματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Η ανάμειξη και η συμπύκνωση των μειγμάτων πραγματοποιήθηκε κατά EN 196-1. Τα δοκίμια συντηρήθηκαν μέχρι την στιγμή της δοκιμής τους σε θάλαμο

συντήρησης με συνθήκες κατά EN 196-1, εκτός των περιπτώσεων που ο σχεδιασμός της έρευνας απαιτούσε διαφορετικές συνθήκες.

Μελετήθηκε η θλιπτική αντοχή στις ηλικίες των 2, 28, 90 και 270 ημερών. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν κατά EN 196-1.

Τα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας που μελετήθηκαν ήταν η ενανθράκωση και η αντίσταση έναντι χλωριόντων. Η ενανθράκωση μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 40mm και ύψους 100mm κατά EN 14630. Τα δοκίμια παρέμειναν στο θάλαμο υγρασίας έως την ηλικία των 28 ημερών. Στην συνέχεια, τα μισά τοποθετήθηκαν στο θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης (με $T=21\pm 2^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}=60\pm 10\%$ και συγκέντρωση $\text{CO}_2=1\%$) και τα άλλα μισά σε εξωτερικό χώρο του εργαστηρίου (συνθήκες XC4), για έξι μήνες. Η δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων πραγματοποιήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100mm και ύψους 50mm κατά το πρότυπο NT Build 492, που προσδιορίζει τον συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων.

Προκειμένου να ελεγχθεί η επιρροή υψηλών θερμοκρασιών στο υαλόθραυσμα, χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια διαστάσεων 40x40x160mm, συντηρημένα στο θάλαμο υγρασίας μέχρι την ηλικία των 28 ημερών και στην συνέχεια στο περιβάλλον του εργαστηρίου (με συνθήκες $T= 21\pm 2^{\circ}\text{C}$ και $\text{RH}= 55\pm 5\%$) έως την ηλικία των 180 ημερών. Στην ηλικία των 180 ημερών, μετρήθηκε η θλιπτική αντοχή των μισών δοκιμίων κάθε μείγματος. Τα άλλα μισά δοκίμια τοποθετήθηκαν στον εργαστηριακό φούρνο και αναπτύχθηκε θερμοκρασία έως τους 750°C . Μετά την επίτευξη της θερμοκρασίας, αυτή διατηρήθηκε σταθερή για 1 ώρα. Έπειτα, τα δοκίμια παρέμειναν εντός του φούρνου, έως ότου επανέλθουν στη θερμοκρασία χώρου, οπότε και μετρήθηκε η θλιπτική αντοχή.

Κατόπιν, εξετάστηκε με Περίθλαση Ακτινών η ανάπτυξη των ενυδατωμένων φάσεων ενώ με Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης παρατηρήθηκε η μικροδομή τους και η κατανομή του υαλοθραύσματος στο υλικό. Τέλος, προκειμένου να διερευνηθούν ενδεχόμενες αλλαγές, συναρτήσει της θερμοκρασίας και της επιφάνειας του διαβρωμένου γυαλιού, επανελήφθησαν οι παραπάνω μετρήσεις μέσω θερμοβαρτομετρικής ανάλυσης (TG-DTA, Mettler TGA/SDTA851e).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στους πίνακες 2.1 και 2.2 παρουσιάζονται οι τιμές της θλιπτικής αντοχής (σε MPa) των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν.

Πίνακας 2.1. Θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων της σειράς SF

Θλ. αντοχή Αναφοράς	SF3/5	SF3/7,5	SF3/10	SF4/5	SF4/7,5	SF4/10
2ημερών	19,51	24,74	22,65	21,84	22,18	19,46
28 ημερών	39,48	38,04	40,18	37,81	45,47	42,04
90 ημερών	48,20	40,15	45,22	45,20	50,86	55,83
270ημερών	50,24	40,55	47,91	51,65	52,85	60,12

Πίνακας 2.2. Θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων της σειράς CF

Θλ. αντοχή Αναφοράς	CF3/5	CF3/7,5	CF3/10	CF4/5	CF4/7,5	CF4/10
2ημερών	19,51	20,29	16,38	17,19	18,47	14,59
28 ημερών	39,48	35,08	28,86	29,21	42,39	37,75
90 ημερών	48,20	44,09	40,59	41,07	55,91	41,72
270ημερών	50,24	47,39	40,30	43,32	53,72	51,68

Στους πίνακες 3.1 και 3.2 παρουσιάζονται οι τιμές των χαρακτηριστικών ανθεκτικότητας των παρασκευασθέντων κονιαμάτων. Δίδονται οι τιμές της ενανθράκωσης (σε mm) και οι τιμές του συντελεστή διείδυσης χλωριόντων (σε $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$). Για την ενανθράκωση, σημειώνεται ζεύγος τιμών που προέρχεται από τα δοκίμια που συντηρήθηκαν σε εξωτερικό περιβάλλον (Σ.Π.) και τα δοκίμια που διατηρήθηκαν στο θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης (Σ.Θ.).

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας των κονιαμάτων της σειράς SF

Μείγμα	Αναφοράς	SF3/5	SF3/7,5	SF3/10	SF4/5	SF4/7,5	SF4/10
Ενανθράκωση (Σ.Π.)	1,59	2,09	1,44	2,19	1,92	1,97	1,88
Ενανθράκωση (Σ.Θ.)	4,08	5,13	3,94	5,67	4,91	5,08	5,05
Συντ/στικής Χλωριόντων	32,37	32,31	29,74	31,47	32,64	29,78	31,87

Πίνακας 3.2. Χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας των κονιαμάτων της σειράς CF

Μείγμα	Αναφοράς	CF3/5	CF3/7,5	CF3/10	CF4/5	CF4/7,5	CF4/10
Ενανθράκωση (Σ.Π.)	1,59	2,44	2,44	2,59	2,02	2,17	2,41
Ενανθράκωση (Σ.Θ.)	4,08	6,86	6,41	6,53	5,30	5,83	7,86
Συντ/στης Χλωριό-ντων	32,37	34,62	34,98	39,49	40,19	41,36	46,49

Στον πίνακα 4 παρουσιάζονται οι τιμές της εναπομένουσας θλιπτικής αντοχής (σε MPa) των κονιαμάτων μετά την έκθεσή τους στους 750° C.

Πίνακας 4. Εναπομένουσα θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων

Μείγμα	Αναφοράς	SF3/5	SF3/7,5	SF3/10	SF4/5	SF4/7,5	SF4/10
Θλιπτική αντοχή(%)	36,21	28,78	27,90	28,00	36,27	23,83	23,40
Μείγμα	Αναφοράς	CF3/5	CF3/7,5	CF3/10	CF4/5	CF4/7,5	CF4/10
Θλιπτική αντοχή(%)	36,21	34,62	31,77	41,69	41,32	32,53	26,35

Κατόπιν, εξετάστηκε με Περίθλαση Ακτινών X η ανάπτυξη των ενυδατωμένων φάσεων και σημειώθηκαν τα ακτινοδιαγράμματα των σειρών SF και CF.

Η μελέτη θερμικής ανάλυσης πραγματοποιήθηκε σε θερμοζυγό με χρήση χωνευτηρίου πλατίνας σε ατμόσφαιρα αέρα από τους 25° C έως τους 800° C και ρυθμό ανάπτυξης θερμοκρασίας 10° C/min ώστε να προσομοιωθούν οι συνθήκες πύρωσης των δοκιμίων στον εργαστηριακό κλίβανο και να είναι δυνατή η σύγκριση και η εξαγωγή συμπερασμάτων. Σημαντική είναι η αιχμή που παρατηρείται από τους 550-650° C η οποία οφείλεται στην διάσπαση του CSH (Handoo, Agarwal & Agarwal, 2002).

Η παρατήρηση των δοκιμίων των κονιαμάτων και των δύο σειρών ώστε να μελετηθεί η μικροδομή τους καθώς και η κατανομή των κόκκων του υαλοθραύσματος έγινε με τη μέθοδο της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (JEOLJSM-5600 εξοπλισμένο με ανιχνευτή INCAx-sight EDX). Ελήφθησαν εικόνες μικροανάλυσης του δοκιμίου αναφοράς και των σειρών CF και SF.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

1. Θλιπτική αντοχή

Οι θλιπτικές αντοχές των δοκιμίων της σειράς SF μέχρι την ηλικία των 28 ημερών σημειώνουν τιμές παραπλήσιες ή ελαφρά υψηλότερες του αναφοράς. Από τις 90 ημέρες, οι αντοχές των μειγμάτων SF3 με διαβρωμένο υαλόθραυσμα αυξάνονται βραδύτερα. Έως την ηλικία των 270 ημερών δεν έχουν αγγίξει την τιμή αναφοράς, εκτός από το δείγμα SF3/10 που σημειώνει παραπλήσια τιμή. Αντίθετη συμπεριφορά, από τις 90 ημέρες, παρουσιάζουν οι τιμές των δοκιμίων SF4, των οποίων οι αντοχές αυξάνονται αισθητά και καταλήγουν να ξεπεράσουν το δοκίμιο αναφοράς. Παρατηρείται, στην ηλικία των 270 ημερών, μία αύξηση τιμών κατά 5% έως 20%, αυξανόμενου του ποσοστού αντικατάστασης.

Τα δοκίμια της σειράς CF3 δίδουν μειωμένες τιμές θλιπτικής αντοχής κατά 10% έως 20% συγκριτικά με αυτές του δοκιμίου αναφοράς, σε όλες τις ηλικίες. Το μείγμα CF3/5 σημειώνει τις πλησιέστερες τιμές προς το αναφοράς, ενώ τις χαμηλότερες τιμές παρουσιάζει το CF3/7,5. Ο μειωμένος ρυθμός αύξησης των θλιπτικών αντοχών μπορεί να αποδοθεί στην ποζολανική δράση του λεπτόκοκκου υαλοθραύσματος που λαμβάνει χώρα κατά την ενυδάτωση των κονιαμάτων. Στις θλιπτικές αντοχές των δοκιμίων της σειράς CF4, από την ηλικία των 28 ημερών, παρατηρήθηκε ανάπτυξη αντοχών παρόμοιων με του αναφοράς, στα δοκίμια με αντικαταστάσεις του τσιμέντου 5% και 7,5%. Ειδικότερα, το μείγμα CF4/5 σημειώνει αισθητή υπεροχή θλιπτικής αντοχής έναντι του αναφοράς. Το μείγμα CF4/10 υστερεί στις τιμές αντοχής, έως την ηλικία των 270 ημερών, οπότε παρουσιάζει τιμή ως του αναφοράς.

2. Χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας

Η αντίσταση έναντι χλωριόντων της σειράς SF3 με διαβρωμένο υαλόθραυσμα είναι ικανοποιητική. Τα κονιάματα SF3/5 και SF3/10 παρουσιάζουν τιμές παρόμοιες με εκείνη του δοκιμίου αναφοράς, ενώ το κονίαμα SF3/7,5 δίνει ευνοϊκότερη τιμή κατά 10%. Αναφορικά με τις τιμές έναντι ενανθράκωσης, και για τις δύο συνθήκες συντήρησης, αυτές σημειώνονται αισθητά υψηλότερες στα κονιάματα SF3/5 και SF3/10 κατά 30%. Όμως, το κονίαμα SF3/7,5 διατηρεί την βελτιωμένη συμπεριφορά και δίνει τιμή ελαφρώς χαμηλότερη του αναφοράς. Η σειρά SF4 με μη διαβρωμένο υαλόθραυσμα παρουσιάζει την ίδια τάση και παραπλήσιες τιμές του συντελεστή χλωριόντων με την σειρά SF3. Σχετικά με τις

τιμές αντίστασης έναντι ενανθράκωσης, και για τις δύο συνθήκες συντήρησης, είναι υψηλότερες κατά 20% περίπου από αυτή του δοκιμίου αναφοράς, χωρίς να παραμένει η διαφοροποίηση του SF4/7,5.

Τα κονιάματα της σειράς CF3 δίδουν αυξημένες τιμές συντελεστή γλωριόντων συγκριτικά με την αντίστοιχη του κονιάματος αναφοράς. Αναλυτικά, τα δοκίμια CF3/5 και CF3/7,5 σημείωσαν τιμές περίπου 9% υψηλότερες, ενώ τα δοκίμια CF3/10 περίπου 20% υψηλότερες. Σχετικά με την ενανθράκωση, οι τιμές της σειράς είναι παραπλήσιες μεταξύ τους ανά μέθοδο συντήρησης, ανεξάρτητα από το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου. Το ποσοστό αύξησης των τιμών είναι περίπου 60% και για τις δύο μεθόδους συντήρησης. Η σειρά CF4 παρουσιάζει την ίδια τάση αλλά με υψηλότερες τιμές του συντελεστή γλωριόντων. Τα δοκίμια CF4/5 και CF4/7,5 σημείωσαν τιμές περίπου 30% υψηλότερες, ενώ τα δοκίμια CF4/10 περίπου 48% υψηλότερες συγκρινόμενα με το δοκίμιο αναφοράς. Στην αντίσταση έναντι ενανθράκωσης, οι τιμές που σημειώνονται, για την συντήρηση στο περιβάλλον, αυξάνονται αυξανόμενου του ποσοστού αντικατάστασης και είναι υψηλότερες κατά 30% έως 50% από αυτή του δοκιμίου αναφοράς. Οι αντίστοιχες τιμές, για την συντήρηση στο θάλαμο ενανθράκωσης, επίσης αυξάνονται αυξανόμενου του ποσοστού αντικατάστασης και είναι υψηλότερες κατά 30% έως 95% από αυτή του δοκιμίου αναφοράς.

3. Εναπομένουσα θλιπτική αντοχή

Τα δοκίμια της σειράς SF3 με διαβρωμένο υαλόθραυσμα παρουσιάζουν παραπλήσια εναπομένουσα θλιπτική αντοχή, ανεξαρτήτως του ποσοστού αντικατάστασης. Η εναπομένουσα αντοχή του δοκιμίου αναφοράς είναι 37% ενώ η αντίστοιχη τιμή των δοκιμίων της σειράς είναι μειωμένη κατά 25% περίπου. Στα δοκίμια της σειράς SF4 του υαλοθραύσματος ανακύκλωσης, οι εναπομένουσες αντοχές των δοκιμίων SF4/7,5 και SF4/10 είναι χαμηλότερες κατά 30% συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή του δοκιμίου αναφοράς. Μόνο το μείγμα με το χαμηλό ποσοστό αντικατάστασης SF4/5 παρουσιάζει τιμές εναπομένουσας θλιπτικής αντοχής παραπλήσιες του μείγματος αναφοράς.

Αναφορικά με τα δοκίμια της σειράς CF παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια με υαλόθραυσμα τύπου 3 παρουσιάζουν μικρή διακύμανση στις τιμές της εναπομένουσας θλιπτικής αντοχής. Η εναπομένουσα αντοχή του κονιάματος CF3/5 σημειώνεται ισότιμη του κονιάματος αναφοράς, ενώ οι τιμές των CF3/7,5 και CF3/10 είναι ελαφρώς χαμηλότερη και αισθητά υψηλότερη αντίστοιχα. Διαφορετική συμπεριφορά παρατηρείται στην περίπτωση του υαλοθραύσματος τύπου 4, στην σειρά CF4. Η εναπομένουσα αντοχή του κονιάματος CF4/7,5 παρουσιάζεται παραπλήσια του κονιάματος αναφοράς, ενώ οι τιμές των CF3/10 και CF3/5 είναι ελαφρώς χαμηλότερη και αισθητά υψηλότερη αντίστοιχα.

4. Μελέτη μικροδομής

4. 1 Ορυκτολογική ανάλυση

Πριν την έκθεση στις υψηλές θερμοκρασίες στην ηλικία των 180 ημερών, η ορυκτολογική ανάλυση των σειρών SF και CF έδειξε ότι τα κονιάματα παρουσιάζουν ακριβώς τις ίδιες φάσεις, αυτές του χαλαζία (SiO_2), του πορτλαντίτη (Ca(OH)_2), του ασβεστίτη (CaCO_3), του αλίτη ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - \text{C}_3\text{S}$), του βελίτη ($2 \text{CaOSiO}_2 - \text{C}_2\text{S}$) και του [242] εττριγκίτη [$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$]. Η απουσία της κορυφής του C_2S στα ακτινοδιαγράμματα της σειράς SF4 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το C_2S έχει αντιδράσει. Έτσι, εξηγούνται οι αυξημένες αντοχές της σειράς αυτής, που είναι παραπλήσιες του δοκιμίου αναφοράς.

Στα ακτινοδιαγράμματα των δύο σειρών κονιαμάτων μετά την έκθεση τους στους 750°C , η ορυκτολογική ανάλυση έδειξε ότι τα κονιάματα παρουσιάζουν ακριβώς τις ίδιες φάσεις με μείωση των εντάσεων των κορυφών κυρίως για τον ασβεστίτη και τον πορτλαντίτη, λόγω διάσπασής τους κατά την πύρωση.

4. 2 Θερμική ανάλυση

Συνολικά παρατηρήθηκε διαφορετική συμπεριφορά του άμορφου SiO_2 σε μορφή γέλης λόγω της επιφανειακής διάβρωσης (υαλόθραυσμα τύπου 3) συγκριτικά με το εγγενές άμορφο C_2S του υαλοθραύσματος (υαλόθραυσμα τύπου 4) ως συστατικό των κονιαμάτων.

Στην περίπτωση που αντικαθίσταται άμμος, τα δοκίμια με υαλόθραυσμα τύπου 3 εμφάνισαν καλύτερη συμπεριφορά, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην ανάπτυξη του SiO_2 με τη μορφή γέλης στο υαλόθραυσμα. Αυτή ενισχύει το ρόλο του ως αδρανές στο κονίαμα αναπτύσσοντας υψηλότερες δυνάμεις συνάφειας και παράλληλα λειτουργεί ως ποζολανικό υλικό, με αποτέλεσμα την αύξηση των τελικών αντοχών.

Στην περίπτωση που αντικαθίσταται τσιμέντο, καλύτερη συμπεριφορά αποκτούν τα δοκίμια που περιέχουν το υαλόθραυσμα τύπου 4. Η λεπτή κοκκομετρία του υαλοθραύσματος μαζί με την υψηλή ποζολανική του δράση ενισχύουν σε βάθος χρόνου (180 ημέρες) τις αντοχές των δοκιμίων αυξάνοντας ουσιαστικά τα τσιμεντοειδή μέρη που συμβάλλουν στις αντοχές.

4.3 Μικροσκοπική αποτίμηση κονιαμάτων πριν και μετά τη πύρωση

Η παρατήρηση των δειγμάτων σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο δίδει την εικόνα του υαλοθραύσματος σε μορφή ινών, ενδεικτικό της ακανόνιστης μορφολογίας του γυαλιού κατά την άλεση του. Επιπλέον, επιβεβαιώθηκε από την ανάλυση με EDX ότι το γυαλί έχει αντιδράσει με την επιφάνεια του κονιάματος με αποτέλεσμα την παραγωγή CSH.

Πιο συγκεκριμένα, το δοκίμιο CF3/10 εμφανίζεται αρκετά συνεκτικό με μικρές ρωγμές μεταξύ πάστας και υαλοθραύσματος, ενώ το αντίστοιχό του CF4/10 εμφανίζει μία πιο συνεκτική και πυκνή δομή χωρίς τη δημιουργία ρωγμών. Η στοιχειακή ανάλυση πάνω στην ίνα γυαλιού έδειξε αναλογία Ca/Si ίση με 1, ενδεικτικό της δημιουργίας CSH στην διεπιφάνεια γυαλιού πάστας. Εξίσου συνεκτική και πυκνή δομή εμφανίζεται να έχει και το δείγμα CF4/7,5, για το οποίο από την στοιχειακή ανάλυση ανιχνεύθηκε αναλογία Ca/Si ίση με 2 και φάνηκε ότι μετά την πύρωση υπάρχει η φάση του βελίτη η οποία και δίνει αντοχές σε μεγάλες ηλικίες. Η στοιχειακή ανάλυση των δοκιμίων SF3/5, SF3/7,5 και SF3/10 και SF4/5 έδειξε αναλογία Ca/Si ίση με 1, το οποίο υποδηλώνει την ανάπτυξη CSH στην επιφάνεια του γυαλιού.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα βασικά συμπεράσματα που εξάγονται από την μελέτη κονιαμάτων όπου διαβρωμένο ανακυκλωμένο (τύπου 3) και ανακυκλωμένο υαλόθραυσμα (τύπου 4) μέγιστης διαμέτρου <90μm έχει αντικαταστήσει την άμμο (SF) ή το τσιμέντο (CF) σε ποσοστά 5, 7,5 και 10% κ.β. του περιεχόμενου τσιμέντου, συγκρινόμενα με το αντίστοιχο μείγμα τσιμεντοκονιάματος είναι τα ακόλουθα.

Η θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων SF παρουσιάζεται αρχικά παραπλήσια του αναφοράς. Στις μεθύτερες ηλικίες, η σειρά SF3 σημειώνει πιο αργή εξέλιξη από το αναφοράς, αντίθετα με την σειρά SF4 που δίνει υψηλότερες αντοχές από αυτό. Αναφορικά με την ανθεκτικότητα, η σειρά SF εμφανίζει τιμές ενανθράκωσης παραπλήσιες με αυτές του αναφοράς, ενώ οι τιμές του συντελεστή χλωριόντων είναι αυξημένες συγκριτικά με του αναφοράς. Βελτιωμένη συμπεριφορά σχετικά με το αναφοράς δείχνει το SF3/7,5. Μετά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, η εναπομένουσα θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων SF είναι μειωμένη συγκρινόμενη με αυτή του αναφοράς, εκτός του SF4/5. Πριν την έκθεση στις υψηλές θερμοκρασίες στην ηλικία των 180 ημερών, η ορυκτολογική ανάλυση της σειράς SF έδειξε ότι τα κονιάματα παρουσιάζουν ακριβώς τις ίδιες φάσεις, και μετά την έκθεση τους στους 750° C, έδειξε ότι, επίσης παρουσιάζουν ακριβώς τις ίδιες φάσεις με μείωση των εντάσεων των κορυφών κυρίως για τον ασβεστίτη και τον πορτλαντίτη. Η θερμική ανάλυση έδειξε ότι τα δοκίμια με υαλόθραυσμα τύπου 3 εμφάνισαν καλύτερη συμπεριφορά.

Σε όλες τις ηλικίες μέτρησης, τα κονιάματα CF3 εμφανίζουν χαμηλότερες αντοχές από το αναφοράς, ενώ στη σειρά CF4 το μείγμα με την χαμηλότερη αντικατάσταση ξεπερνά το αναφοράς, όταν τα υπόλοιπα μείγματα σημειώνουν παρόμοιες τιμές με το τελευταίο, στις 270 ημέρες. Σχετικά με την ανθεκτικότητα, η σειρά CF εμφανίζει τιμές ενανθράκωσης και τιμές του συντελεστή χλωριόντων αυξημένες συγκριτικά με αυτές του αναφοράς. Μετά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, η εναπομένουσα θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων CF3 είναι

συγκρινόμενη με αυτή του αναφοράς, εκτός του CF4/10. Η ορυκτολογική ανάλυση της σειράς CF έδειξε ότι τα κονιάματα παρουσιάζουν την ίδια εικόνα με την σειρά SF, πριν και μετά την έκθεση στις υψηλές θερμοκρασίες. Η θερμική ανάλυση έδειξε ότι καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζουν τα δοκίμια που περιέχουν το υαλόθραυσμα τύπου 4.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Γεωργουσάκης, Κ & Κωστίκας, Μ, 'Ιδιότητες τσιμεντοκονιαμάτων με χρήση υαλοθραύσματος ως αντικατάσταση του τσιμέντου', Διπλωμ. Εργασία (επιβλ. Αν. Καθ. Κ.Κ.Σίδερης), Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ., Ξάνθη, (2014).

Shao Y., Lefort T., Moras S., Rodriguez D, "Studies on concrete containing ground glass", Cement and Concrete Research, Vol.30, No 1, (2000), 91-100.

Papadopoulos N.S., Moutsatsou, A.K., "Influence of coloured cullet during production of amber glass. Part1. Obtaining the appropriate colour and physicochemical characteristics", Glass Technology, Vol.44, No3,(2003),121-127.

Du H., Tan K.H., "Concrete with recycled glass as fine aggregates", ACI Materials Journal, Vol. 111, No 1, (2014), 47-57.

Karamperi A., Moutsatsou A., "Participation of glass cullet in cementitious materials", Cement and Concrete Composites, Vol. 27, No 2, (2005), 319-327.

Karamperi A., Chaniotakis E., Papageorgiou D., Moutsatsou A., " Influence of glass cullet in cement pastes", China Particuology, Vol.4, No 5, (2006), 234-237.

Limbachiya M.C., "Bulk engineering and durability properties of washed glass and concrete", Construction and Building Mat., Vol.23, No2, (2009), 1078-1083
Dhir R.K., Dyer T.D., Tang M.C., "Alkali-silica reaction in concrete containing glass", Materials and Structures, Vol. 42, No 10, (2009), 383-394.

EN 14630: Comite Europeene de Normalisation EN14630: .Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Test methods — Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method, 2006.