

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΑΠΟΤΕΦΡΩΤΗΡΩΝ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Κ. Κ. Σίδερης¹, Γ. Μπατής², Ε. Δούδαλη¹, Σ. Μπουντζή¹.

¹Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ, Βασ. Σοφίας 12, 67 100, Ξάνθη

²Σχολή χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73 Ζωγράφου Αθήνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία μελετάται η δυνατότητα χρήσης τέφρας αποτεφρωτήρων για την παρασκευή τσιμεντοκονιαμάτων. Συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν τσιμεντοκονιάματα με τσιμέντο Ι42.5R και τέφρα αποτεφρωτήρων σε ποσοστά 5, 10,15 και 20% με αντικατάσταση του τσιμέντου ή των αδρανών υλικών (άμμος). Οι ιδιότητες που μετρήθηκαν ήταν η θλιπτική και η εφελκυστική αντοχή, χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας στο χρόνο (ενανθράκωση, διείδυση χλωριόντων και διάβρωση οπλισμού) και η μόλυνση που τυχόν προκαλείται λόγω έκλυσης βαρέων μετάλλων, σε διάφορες ηλικίες. Η προσθήκη της τέφρας οδηγεί σε μείωση των αντοχών των τσιμεντοκονιαμάτων, η οποία είναι μικρή για χαμηλό ποσοστό (5%) αντικατάστασης της άμμου. Γενικά η προσθήκη της τέφρας προκαλεί σημαντική αύξηση του βάθους ενανθράκωσης όλων των μειγμάτων, ενώ ακόμα μεγαλύτερη είναι η αύξηση της διαπερατότητας των χλωριόντων. Για το λόγο αυτό προτείνεται η χρήση της συγκεκριμένης τέφρας μόνο για την παρασκευή άοπλων τσιμεντοκονιαμάτων σε μικρό (5%) ποσοστό αντικατάστασης της άμμου. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι σε καμία περίπτωση δεν παρατηρήθηκε μόλυνση λόγω έκλυσης μετάλλων.

Λέξεις κλειδιά: τέφρα αποτεφρωτήρων, σύνθετα τσιμέντα, σκυρόδεμα, ανθεκτικότητα.

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY TO USE INCINERATOR ASH FOR CONSTRUCTIONS

K. K. Sideris¹, G. Batis², E. Dudali¹ and S. Buntzi¹,

¹*Lab. of Building Materials, Department of Civil Engineers, DUTH, 12 Vas. Sophias str, 671 00 Xanthi*

²*School of Chemical Engineers, NTUA, 9 Iroon Polytechniou str. 157 79 Athens.*

ABSTRACT: In this paper the possibility to use incinerator ash for the production of cement mortars is experimentally investigated. Incinerator ash was used for the production of normal cement mortars replacing cement or aggregates at different percentages per weight of cement (5, 10, 15 and 20%). Different mechanical and durability characteristics were measured at different ages: compressive strength, flexural tensile strength, carbonation, chloride penetration and steel corrosion. The results indicate that it is possible to produce cement mortars for non-reinforced concrete by using small quantities of incinerator ash. When the ash was used for replacing the sand at percentages of 5 and 10% per weight of cement the compressive and flexural tensile strength of mortars at the ages of 180 days were slightly reduced. However the carbonation depth and the chloride permeability of mortars were significantly increased when the ash was used at any percentage, either at replacing the cement or the aggregates.

Keywords: incinerator ash, blended cements, concrete, durability.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διάθεση των στερεών αποβλήτων είναι ένα σημαντικό παγκόσμιο πρόβλημα. Για την διάθεση των στερεών αποβλήτων σήμερα υπάρχουν τρεις μέθοδοι:

- Η υγειονομική ταφή (ΧΥΤΑ)
- Η θερμική κατεργασία (καύση, πυρόλυση)
- Η λιπασματοποίηση

Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Επίσης ανάλογα με τη φύση του αποβλήτου μπορεί να είναι κατάλληλη η χρήση μίας ή περισσότερων μεθόδων. Ειδικά για τα τοξικά απόβλητα η χρήση της καύσης ή πυρόλυσης είναι η πλέον κατάλληλη μέθοδος. Είναι γνωστό ότι έχει ήδη δρομολογηθεί η δημιουργία δύο αποτεφρωτήρων στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης. Παραπροϊόν της μεθόδου της καύσης ή της πυρόλυσης είναι η παραγόμενη τέφρα. Πολλές φορές η απόθεση της τέφρας των αποτεφρωτήρων σε ΧΥΤΑ δεν είναι δυνατή λόγω τοξικών μετάλλων. Μία λύση για την διάθεση της τέφρας αυτής είναι η χρησιμοποίηση της στο τσιμέντο (Soeda et Ichimura, 2003).

Η παρούσα εργασία εξετάζει την δυνατότητα χρησιμοποίησης της τέφρας μικρού αποτεφρωτήρα στο τσιμέντο.

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για την παρασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Πόρτλαντ Ι42.5R και τέφρα αποτεφρωτήρων. Η τέφρα προερχόταν από μικρό σχετικά αποτεφρωτήρα που χρησιμοποιείται για την καύση της συσκευασίας (στερεών ή υγρών) φυτοφαρμάκων. Γενικά τα υλικά συσκευασίας φυτοφαρμάκων δεν μπορούν να διατεθούν σε ΧΥΤΑ λόγω της τοξικότητάς τους. Τα υλικά τα οποία αποτεφρωνόταν στον συγκεκριμένο αποτεφρωτήρα χαρτί, ξύλο, διάφορα πολυμερή και φιάλες αλουμινίου. Η χημική σύσταση των υλικών αυτών παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Χημική σύσταση τσιμέντου και τέφρας αποτεφρωτήρων.

Τσιμέντο Ι42.5R		Τέφρα αποτεφρωτήρων	
Περιεκτικότητα (%)		Περιεκτικότητα (%)	
SiO ₂	19.64	C	1.40
Al ₂ O ₃	4.62	SiO ₂	30.22
Fe ₂ O ₃	3.27	CaO	26.00
CaO	63.59	Fe ₂ O ₃	12.19
MgO	1.91	Al ₂ O ₃	25.71
SO ₃	3.03	K ₂ O	2.76
K ₂ O	0.62	S	0.05
Na ₂ O	0.38	Cl ⁻	0.41
<i>Λεπτότητα</i> (cm ² /gr)	3519	<i>Υγρασία</i> (%)	1.26

Με τα υλικά αυτά παρασκευάστηκαν δοκίμια τσιμεντοκονιάματος με αναλογία τσιμέντου:άμμος:νερού ίση με 1:3:0.5. Για την παρασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε πυριτική άμμος με μέγιστο κόκκο 2 mm. Η τέφρα χρησιμοποιήθηκε σε ποσοστά 5, 10, 15 και 20% ως ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου ή της άμμου. Παρασκευάστηκαν συνολικά 9 μείγματα, οι αναλογίες των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Αναλογίες μείξεως παρασκευασθέντων κονιαμάτων

A/A	Τσιμέντο	Ποσοστό		Τέφρα	Άμμος	Νερό	Ρευστ/τής	Εξάπλωση
	142.5R	αντικατάστασης		αποτεφρ.				
	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(cm)
1ο	450.0	0%	-	0.0	1350.0	225.0	5.0	22.0
2ο	427.5	5%	-	22.5	1350.0	225.0	7.5	19.0
3ο	405.0	10%	-	45.0	1350.0	225.0	7.5	18.0
4ο	382.5	15%	-	67.5	1350.0	225.0	10.0	14.5
5ο	360.0	20%	-	90.0	1350.0	225.0	20.0	12.5
6ο	450.0	-	5%	22.5	1327.5	225.0	5.0	18.0
7ο	450.0	-	10%	45.0	1305.0	225.0	10.0	16.0
8ο	450.0	-	15%	67.5	1282.5	225.0	12.5	16.0
9ο	450.0	-	20%	90.0	1260.0	225.0	20.0	13.5

Στα κονιάματα προστέθηκαν διαφορετικές ποσότητες υπερρευστοποιητή προκειμένου να επιτευχθεί μία όσο το δυνατόν πλησιέστερη προς το μείγμα αναφοράς εξάπλωση. Κατ' αυτό τον τρόπο μελετήθηκε και η επίδραση της συγκεκριμένης τέφρας στην εργασιμότητα των μειγμάτων. Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν ήταν πρίσματα, διαστάσεων 40x40x160mm και κύλινδροι διαστάσεων 60x100 mm. Οι ιδιότητες που μελετήθηκαν ήταν η θλιπτική και εφελκυστική αντοχή, το βάθος ενανθράκωσης, η απώλεια βάρους οπλισμών λόγω διείδυσης χλωριόντων καθώς και η μόλυνση που τυχόν προκαλείται λόγω έκπλυσης βαρέων μετάλλων.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

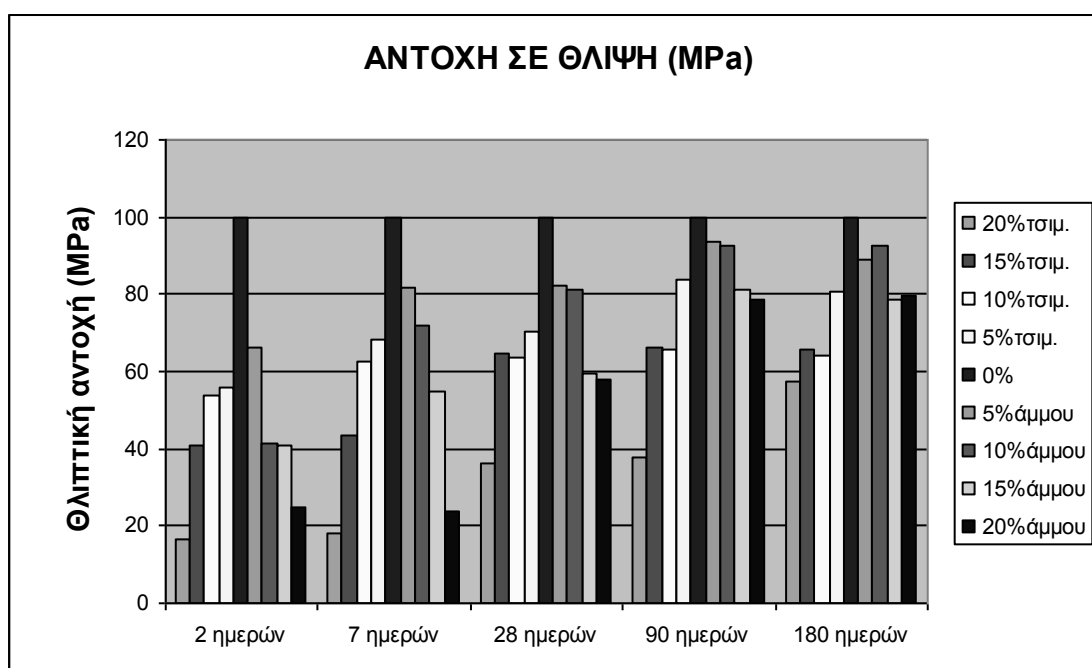
Θλιπτική αντοχή

Η θλιπτική αντοχή μετρήθηκε σε πρισματικά δοκίμια που προηγουμένως είχαν θραυσθεί σε κάμψη. Η αντοχή μετρήθηκε για όλα τα μείγματα στις ηλικίες των 2, 7, 28, 90 και 180 ημερών. Τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε θάλαμο υγρασίας μέχρι την ηλικία της μέτρησης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων (κατά EN 196-1) παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 και στο Σχήμα 1.

Πίνακας 3: Εξέλιξη θλιπτικής αντοχής μειγμάτων.

ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ (MPa)					
ΜΕΙΓΜΑΤΑ	2 ημερών	7 ημερών	28 ημερών	90 ημερών	180 ημερών
20% τσιμ.	3.33	6.15	13.96	15.94	25.73
15% τσιμ.	8.33	14.58	24.79	28.02	29.48
10% τσιμ.	10.94	21.04	24.48	27.81	28.85
5% τσιμ.	11.35	23.02	27.08	35.52	36.35
0%	20.42	33.65	38.44	42.29	45.00
5% άμμου	13.54	27.50	31.67	39.58	40.10
10% άμμου	8.44	24.17	31.15	39.17	41.77
15% άμμου	8.33	18.44	22.81	34.37	35.31
20% άμμου	5.10	8.02	22.29	33.23	35.73

Από το Σχήμα 1 φαίνεται ότι η τέφρα προκαλεί μείωση της θλιπτικής αντοχής σε όλα τα ποσοστά που εξετάστηκε. Η μείωση όπως θα ανέμενε κανείς είναι μεγαλύτερη όταν η τέφρα αντικαθιστά το τσιμέντο και μικρότερη όταν αντικαθιστά τα αδρανή. Επίσης το ποσοστό μείωσης εξαρτάται και



Σχήμα 1: Επίδραση της τέφρας στη μείωση της θλιπτικής αντοχής σε διαφορετικές ηλικίες.

από την ηλικία της μέτρησης. Η επίδραση της τέφρας στη μείωση της αντοχής είναι πολύ μεγάλη στις πρώιμες ηλικίες (2 και 7 ημέρες), ενώ μειώνεται όσο αυξάνεται η ηλικία όπως έντονα εμφανίζεται στην ηλικία των 6 μηνών. Η θλιπτική αντοχή του μείγματος αναφοράς στην ηλικία των 28 ημερών μειώνεται κατά 18 και 19% αντίστοιχα όταν η τέφρα χρησιμοποιείται σε ποσοστά 5 και 10% σε αντικατάσταση της άμμου. Η αντίστοιχη όμως μείωση στην ηλικία των 6 μηνών περιορίζεται σε 11 και 8%. Φαίνεται λοιπόν ότι η συγκεκριμένη τέφρα παρουσιάζει μία ασθενή ποζολανική δράση, η λειτουργία της οποίας έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό επιπλέον ενύδρων σε μεγάλες ηλικίες.

Εφελκυστική αντοχή

Η εφελκυστική αντοχή μετρήθηκε σε πρισματικά δοκίμια που συντηρήθηκαν σε θάλαμο υγρασίας μέχρι την ηλικία της μέτρησης. Η αντοχή μετρήθηκε για όλα τα μείγματα στις ηλικίες των 2, 7, 28, 90 και 180 ημερών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων (κατά EN 196-1) παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

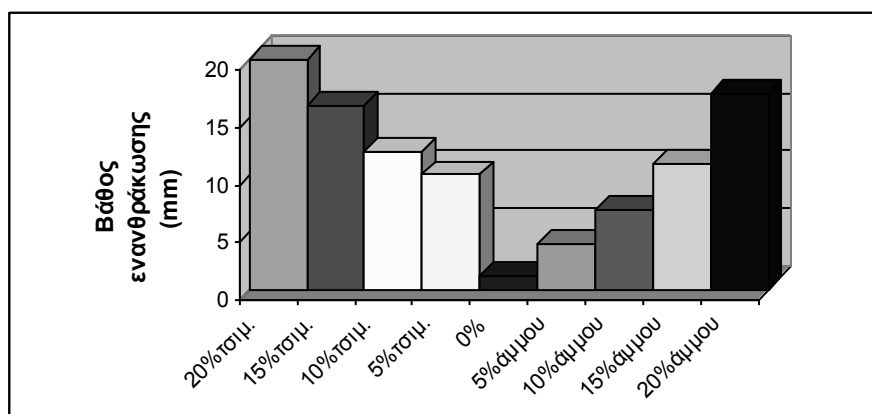
Πίνακας 4: Εξέλιξη εφελκυστικής αντοχής μειγμάτων.

ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΠΤΙΚΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ (MPa)					
ΜΕΙΓΜΑΤΑ	2 ημερών	7 ημερών	28 ημερών	90 ημερών	180 ημερών
20% τσιμ.	0.03	0.04	0.08	0.08	0.12
15% τσιμ.	0.05	0.08	0.13	0.14	0.15
10% τσιμ.	0.07	0.10	0.16	0.17	0.18
5% τσιμ.	0.07	0.12	0.15	0.16	0.17
0%	0.10	0.14	0.18	0.18	0.17
5% άμμου	0.09	0.12	0.16	0.19	0.18
10% άμμου	0.07	0.12	0.15	0.17	0.15
15% άμμου	0.05	0.09	0.13	0.14	0.17
20% άμμου	0.04	0.06	0.13	0.15	0.14

Η εξέλιξη της εφελκυστικής αντοχής ακολουθεί ανάλογη πορεία με αυτήν της θλιπτικής αντοχής. Και πάλι η μείωση των αντοχών είναι μεγαλύτερη όταν η τέφρα αντικαθιστά το τσιμέντο και μικρότερη όταν αντικαθιστά τα αδρανή. Η μεγάλη πτώση που παρατηρείται κατά τις πρώιμες ηλικίες μειώνεται μετά τις 28 ημέρες, ιδίως για τα μικρά ποσοστά (5 και 10%) αντικατάστασης των αδρανών.

Βάθος ενανθράκωσης

Το βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια 40x100mm. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στην ηλικία των 7 ημερών σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης με συγκέντρωση CO₂=10% και RH=70%. Στο θάλαμο αυτόν παρέμειναν για έξι εβδομάδες. Στη συνέχεια θραύστηκαν σε διάρρηξη και ψεκάστηκαν με διάλυμα φαινολοφθαλαϊνης, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της RILEM CPC18. Το βάθος ενανθράκωσης κάθε μείγματος αποτελεί το μέσο όρο των τιμών τριών δοκιμίων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.



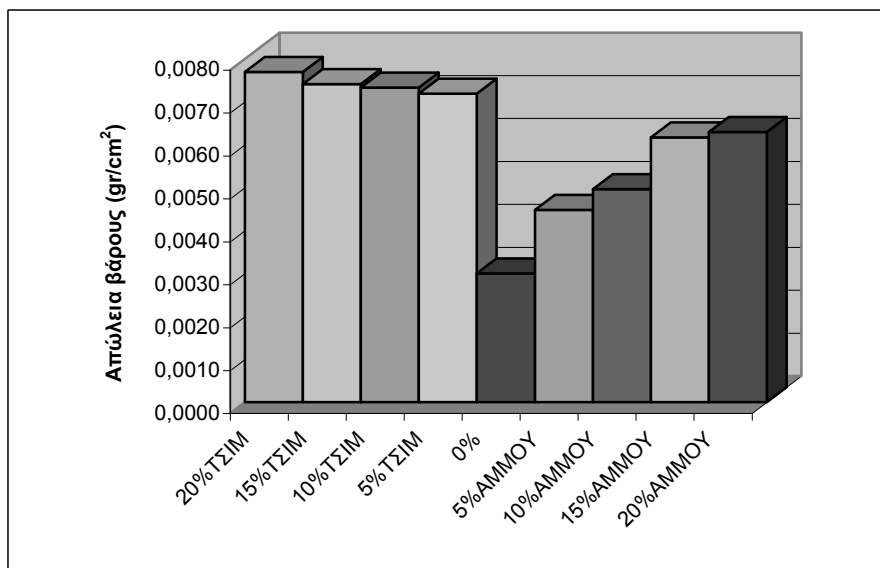
Σχήμα 2: Μεταβολή βάθους ενανθράκωσης μειγμάτων.

Το βάθος ενανθράκωσης του μείγματος αναφοράς παραμένει μετά από έξι εβδομάδες παραμονής στο θάλαμο, σχεδόν μηδενικό. Αντιθέτως, το αντίστοιχο βάθος των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με τέφρα αποτεφρωτήρων αυξάνεται. Η αύξηση αυτή είναι ανάλογη του ποσοστού προσθήκης της τέφρας και παρουσιάζεται μεγαλύτερη στα μείγματα στα οποία αυτή αντικαθιστά το τσιμέντο και μικρότερη σε αυτά στα οποία αντικαθιστά την άμμο. Είναι πάντως αξιοσημείωτο το γεγονός ότι ακόμη και σε μείγματα με μικρό ποσοστό (5%) αντικατάστασης της άμμου το βάθος ενανθράκωσης αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με το μείγμα που δεν περιέχει τέφρα.

Διάβρωση οπλισμού λόγω διείσδυσης χλωριόντων

Η απώλεια βάρους των οπλισμών λόγω διείσδυσης χλωριόντων μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια στο κέντρο των οποίων είχε τοποθετηθεί χαλύβδινη ράβδος οπλισμού S500s με διάμετρο 10 mm. Τα δοκίμια παρέμειναν για 14 ημέρες σε περιβάλλον εργαστηρίου (T=20 °C και RH=60%) και στη συνέχεια εμβαπτίστηκαν μέχρι το ήμισυ του ύψους τους σε διάλυμα 5% NaCl. Τα δοκίμια παρέμειναν στο διάλυμα έκθεσης για 6 μήνες. Στη συνέχεια θραύστηκαν και αφού καθαρίστηκε ο χαλύβδινος οπλισμός, μετρήθηκε η απώλεια του βάρους του. Η απώλεια βάρους κάθε μείγματος αποτελεί το μέσο όρο των τιμών τριών δοκιμίων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 3. Από το σχήμα αυτό εξάγεται το συμπέρασμα ότι η προσθήκη τέφρας αποτεφρωτήρων στο μείγμα αυξάνει την απώλεια βάρους των οπλισμών λόγω διείσδυσης χλωριόντων. Η απώλεια είναι ανάλογη του ποσοστού προσθήκης της τέφρας μόνο στα μείγματα στα οποία η τέφρα αντικαθιστά

την άμμο, ενώ στα μείγματα στα οποία αντικαθιστά το τσιμέντο η απώλεια οπλισμού είναι πολύ υψηλή, σχεδόν διπλάσια της τιμής του μείγματος αναφοράς, και σχεδόν σταθερή. Ακόμη όμως και για ποσοστό 5% αντικατάστασης της άμμου η απώλεια βάρους του οπλισμού είναι κατά 48% μεγαλύτερη αυτής του μείγματος αναφοράς,, καθιστώντας απαγορευτική τη χρήση της συγκεκριμένης τέφρας για οπλισμένα δομικά στοιχεία που έρχονται σε επαφή με διαλύματα χλωριόντων.



Σχήμα 3: Μεταβολή απώλειας βάρους οπλισμού μειγμάτων

Έκπλυση βαρέων μετάλλων

Οι μετρήσεις της έκπλυσης βαρέων μετάλλων πραγματοποιήθηκαν σε πρισματικά δοκίμια 40x40x160mm. Τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν στην ηλικία των 7 ημερών σε πλαστικό δοχείο με απιονισμένο νερό τετραπλάσιου όγκου. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα λαμβανόταν δείγμα από το νερό έκθεσης και πραγματοποιούνταν μετρήσεις περιεκτικότητας μετάλλων στην συσκευή ατομικής απορρόφησης του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για την ηλικία των 28 ημερών και 6 μηνών στον Πίνακα 5.

ΜΕΙΓΜΑ	Συγκέντρωση Cu		Συγκέντρωση Fe		Συγκέντρωση Zn	
	28 ημ	6 μήνες	28 ημ	6 μήνες	28 ημ	6 μήνες
0%	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01
5%ΤΣΙΜ	0.04	0.05	0.02	0.00	0.00	0.06
10%ΤΣΙΜ	0.08	0.05	0.02	0.00	0.03	0.14
15%ΤΣΙΜ	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.13
20%ΤΣΙΜ	0.04	0.04	0.01	0.00	0.00	0.08
5%ΑΜΜΟΥ	0.02	0.04	0.00	0.00	0.02	0.07
10%ΑΜΜΟΥ	0.02	0.03	0.00	0.01	0.01	0.04
15%ΑΜΜΟΥ	0.03	0.03	0.01	0.01	0.03	0.07
20%ΑΜΜΟΥ	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.04

Από τον Πίνακα αυτόν παρατηρούμε ότι δεν σημειώνεται σημαντική διαφοροποίηση της συγκέντρωσης μετάλλων που μετρήθηκαν στα διαλύματα των μειγμάτων που παρασκευάστηκαν με προσθήκη τέφρας σε σύγκριση με το μείγμα αναφοράς. Οι τιμές της συγκέντρωσης αυξάνονταν ανάλογα με το ποσοστό προσθήκης της τέφρας, σε κάθε περίπτωση όμως παρέμεναν σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα. Παράλληλα με τα ανωτέρω στο διάλυμα εμφάνισης έγιναν μετρήσεις ανίχνευσης μολύβδου. Σε κάθε περίπτωση η συγκέντρωση ήταν ιδιαίτερα χαμηλή, χαμηλότερη από την ελάχιστη τιμή που η συσκευή μπορούσε να μετρήσει.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας φαίνεται ότι η συγκεκριμένη τέφρα αποτεφρωτήρων είναι ένα βιομηχανικό παραπροϊόν με ασθενείς ποζολανικές ιδιότητες. Η προσθήκη της στο μείγμα τσιμεντοκονιάματος προκαλεί μείωση των μηχανικών αντοχών, ιδιαίτερα στις πρώιμες (2 και 7 ημέρες) ηλικίες. Σε μεγαλύτερες ηλικίες (180 ημέρες) η πτώση των αντοχών περιορίζεται σε ποσοστά κάτω του 10%, ιδίως για τα μείγματα με μικρό ποσοστό προσθήκης τέφρας σε αντικατάσταση του βάρους της άμμου. Η προσθήκη της συγκεκριμένης τέφρας όμως αυξάνει σε μεγάλο ποσοστό τόσο το βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων, όσο και την απώλεια του χαλύβδινου οπλισμού τους λόγω διείδυσης χλωριόντων από το εξωτερικό περιβάλλον.

Φαίνεται λοιπόν ότι η συγκεκριμένη τέφρα μπορεί να προστεθεί σε μικρά ποσοστά στα μείγματα αόπλου σκυροδέματος αντικαθιστώντας μέρος των αδρανών υλικών, χωρίς ουσιαστικά προβλήματα όσον αφορά την απώλεια των μηχανικών αντοχών σε ηλικίες μεθυσστερες των 28 ημερών. Αντίθετα, η επίδρασή της στην αύξηση του βάθους ενανθράκωσης και της διείδυσης χλωριόντων καθιστούν τη χρήση της στα μείγματα οπλισμένου σκυροδέματος απαγορευτική.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Comite Europeene de Normalisation 1995. Method of Testing Cement, Determination of Strength, EN 196-1.

RILEM TC 56, (1988). Measurement of hardened concrete carbonation depth CPC 18, *Materials and Structures*, Vol 21, (126), pp.453-455.

Soeda K., Ichimura T. 2003. Present state of corrosion Inhibitors in Japan, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, pp. 117-122.