

Επιλογή του βέλτιστου κλάσματος σωματιδίων της λιγνιτικής ιπτάμενης τέφρας στις εφαρμογές της βιομηχανίας τσιμέντου

Σ. Ίτσκος¹, Γ.Σ. Ίτσκος^{2,3}, Ν. Κούκουζας³

¹ ΔΕΗ, Τομέας Χημικής Τεχνολογίας και Περιβάλλοντος, ΑΗΣ Αμυνταίου-Φιλώτα, 53200, Αμύνταιο

² Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15773, Ζωγράφου, Αθήνα

³ Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης / Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων (ΕΚΕΤΑ/ΙΤΕΣΚ), 4ο χλμ Πτολεμαΐδας-Μποδοσακείου Νοσοκομείου, 50200, Πτολεμαΐδα

Λέξεις κλειδιά: ασβεστόχος ιπτάμενη τέφρα, λιγνίτης, κατανομή μεγέθους σωματιδίων, πρόσθετα τσιμέντου, βιώσιμη αξιοποίηση

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η χημική και ορυκτολογική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας (ΙΤ) ποικίλλει σε σχέση με τις επικρατούσες συνθήκες κατά τις διαδικασίες, τόσο της παραγωγής ενέργειας όσο και της εξόρυξης του λιγνίτη. Η διαφοροποίηση της ποιοτικής και ποσοτικής σύστασης της ασβεστόχου, λιγνιτικής ιπτάμενης τέφρας, ως συνάρτηση της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων της, εξακριβώνεται στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της διεξαχθείσας έρευνας, ένα, αρκετά μεγάλο, κλάσμα λεπτών σωματιδίων παρουσιάζει ιδιότητες οι οποίες εμποδίζουν την επωφελή αξιοποίηση της ιπτάμενης τέφρας στις εφαρμογές της τσιμεντοβιομηχανίας. Επίσης, τα σωματίδια μεγάλου μεγέθους, το σύνολο των οποίων αντιστοιχεί σε περιορισμένο ποσοστό επί της ποσότητας της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας, παρουσιάζουν τις ίδιες, μη-επιθυμητές, ιδιότητες. Το κλάσμα, όμως, των σωματιδίων μεσαίου μεγέθους (75-150μm), εμφανίζει, εντόνως, συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία το καθιστούν βέλτιστη επιλογή, προκειμένου για χρήση του ως ποζολανικό πρόσθετο κατά την παραγωγή του τσιμέντου, καθώς, εκτός των άλλων, εμποδίζουν και τους παράγοντες που προκαλούν την έντονη διακύμανση της ποιότητας της ιπτάμενης τέφρας.

Selection of the optimum part of lignite fly ash in cement industry applications

Itskos S.¹, Itskos G.S.^{2,3}, Koukouzas N.³

¹Public Power Corporation of Greece, Department of Chemical Technology and the Environment, SES of Amynteon-Filotas, GR-53200, Amynteon, Greece

²Laboratory of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineers NTUA, 9 Iroon Polytechniou str. GR-157 73 Athens

³Centre for Research and Technology Hellas / Institute for Solid Fuels Technology and Applications (CERTH/ISFTA), 4th klm of Ptolemais-Bodosakion Hospital Road, GR-50200, Ptolemais, Greece

ABSTRACT: The chemical and mineralogical composition of lignite fly ash varies as a function of the prevalent conditions in both the processes of power production and lignite mining. The differentiation of the qualitative and quantitative composition of the Greek calcareous lignite fly ash, as a function of its particle size distribution, is verified in this paper. According to the results

of the conducted research, a fine-grained fraction of considerable amount presents properties that obstruct the sustainable exploitation of lignite fly ash in cement industry applications. On the other hand, the same grain fraction (because of its hydraulic properties) can be utilized in other sort of applications, based on different criteria. The coarse-grained fraction (which reflects a low proportion to the total fly ash output) presents the same undesired characteristics as well. However, the intermediate grain fraction (75-150 μ m) indicates the highly desirable properties regarding the utilization of fly ash as pozzolanic additive in the production process of cement. In addition, the mechanism of the formation of the intermediate grain fraction strongly prevents the factors that cause the variation of its quality. It is therefore the optimum part of the whole amount of lignite fly ash, to be utilized as additive in cement manufacturing

Key words: calcareous fly ash, lignite, particle size distribution, cement additives, sustainable utilization

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σύσταση της ιπτάμενης τέφρας (IT) διακυμαίνεται σε συνάρτηση με τις συνθήκες τόσο κατά την παραγωγική διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγής όσο και κατά τη λιγνιτική εξόρυξη. Η χημική και ορυκτολογική σύσταση του ανόργανου κλάσματος που περιλαμβάνεται στο οργανικό μέρος του λιγνίτη (επιγενετική τέφρα) είναι σημαντικά διαφορετική από αυτή του ανόργανου κλάσματος το οποίο συνοδεύει το καύσιμο κατά την εξόρυξή του (εμπεριεχομένη τέφρα) (Mason 1982, Rao 1985). Η κύρια μάζα των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας αποτελείται από μη-πητικά συστατικά. Για την ακρίβεια, τα πητικά μπορεί είτε να εμπλουτίζονται σε αυτά, είτε να σχηματίζουν λεπτότερα σωματίδια τα οποία δεν παγιδούνται από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Τα χαλκόφιλα (Goldschmidt) ιχνοστοιχεία εμπλουτίζονται στα λεπτόκοκκα σωματίδια. Αντιθέτως τα λιθόφιλα (Goldschmidt) παρευρίσκονται εντόνως στα χονδρόκοκκα σωματίδια (Bogdanovic 1995, Ίτσκος 2007). Η διαφοροποίηση της χημικής και ορυκτολογικής σύστασης σε συνάρτηση με την κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων των ιπτάμενων τεφρών εξηγεί τα διάφορα φαινόμενα που παρατηρούνται καθημερινά κατά την παραγωγική διαδικασία του ηλεκτρικού ρεύματος καθώς επίσης μπορεί να προσφέρει αποτελεσματικές λύσεις όσον αφορά την επέκταση της αξιοποίησης των ιπτάμενων τεφρών στην Ελλάδα. Στην Ελλάδα κάθε χρόνο παράγονται περίπου 13 τόννοι ιπτάμενων τεφρών, ενώ αξιοποιείται περίπου το 15% του συνόλου της ποσότητας αυτής. Η διακύμανση της ποιότητάς της, καθώς επίσης και το κόστος μεταφοράς της είναι οι κύριοι παράγοντες περιορισμού της αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας στην παραγωγική διαδικασία της βιομηχανίας τσιμέντου (Τσίμας 2005, Ίτσκος 2006, Κούκουζας 2006).

2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Τα δείγματα των ιπτάμενων τεφρών συλλέχτηκαν από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα του ΑΗΣ Αμύνταιου-Φιλότα. Η χημική και ορυκτολογική σύσταση των διαφόρων κλασμάτων της ιπτάμενης τέφρας προσδιορίστηκε με την εφαρμογή των μεθόδων του φθορισμού και περίθλασης ακτινών-X αντίστοιχα (XRF και XRD). Ο προσδιορισμός της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων έγινε με τις μεθόδους STIM και RBS. Η μέτρηση της απώλειας πύρωσης έγινε με τη μέθοδο της θερμοβαρυτικής ανάλυσης και της ειδικής επιφάνειας με τη μέθοδο BET. Οι θερμοκρασίες φυσικοχημικών μεταβολών προσδιορίστηκαν με μετρήσεις οξειδωτικής ατμόσφαιρας και το ειδικό βάρος των κλασμάτων με την εφαρμογή της μεθοδολογίας του πρωτοκόλλου SG-ASTM C642.

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Χημική σύσταση και απώλεια πύρωσης των διαφόρων κλασμάτων IT

Η Εικόνα 1 περιγράφει τη διαφοροποίηση της παρουσίας των χημικών ενώσεων στα διάφορα κλάσματα της IT. Είναι εμφανές ότι η μη-συμμετοχή του κλάσματος των σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη των 50μm στην παραγωγική διαδικασία της βιομηχανίας τσιμέντου μειώνει αποτελεσματικά τη συγκέντρωση των μη-επιθυμητών ενώσεων : SO₃ και CaO. Συνεπώς, η απόρριψη του κλάσματος αυτού: α) βελτιώνει τις προδιαγραφές για την αξιοποίηση της IT β) έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων των τελικών προϊόντων τσιμέντου και γ) κάνει οικονομικότερη την παραγωγική διαδικασία με την αποφυγή της μεταφοράς λιγότερο χρήσιμου υλικού. Ο Πίνακας 1 περιλαμβάνει τις τιμές της ποσοστιαίας Απώλειας Πύρωσης (ΑΠ) κατά τη θέρμανση των διαφόρων κλασμάτων IT στις αντίστοιχες θερμοκρασίες.

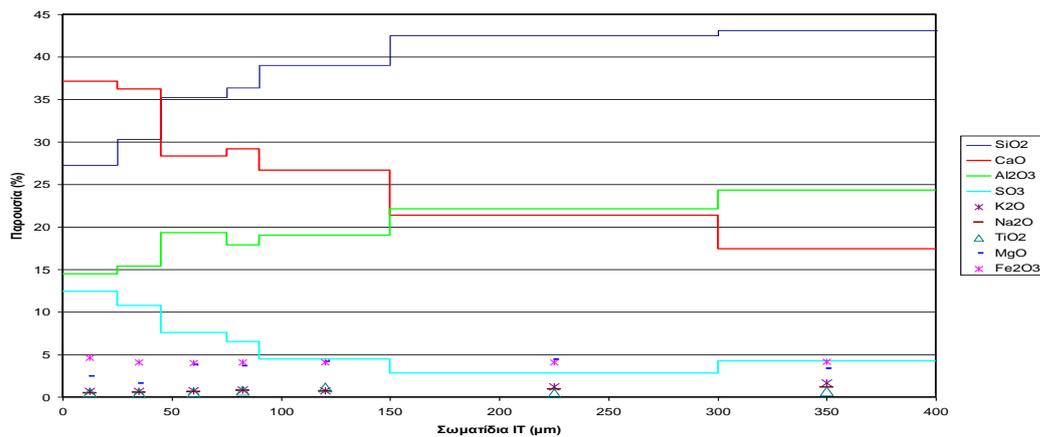
Πίνακας 1. ΑΠ (%) των διαφόρων κλασμάτων IT

Κλάσμα IT	800°C	950°C	1050°C	1150°C	1250°C	δ 950/1250°C
< 25	1.5	1.1	1.5	9.3	9.7	8.6
25-45	1.4	0.9	1.0	2.7	7.6	6.7
45-75	1.3	0.8	-	2.2	4.4	3.6
75-90	1.2	0.8	0.8	1.3	3.6	1.8
90-150	1.5	1.4	1.6	2.6	3.0	1.6
150-300	4.62	3.7	3.8	4.6	4.6	0.9
> 300	12.9	10.9	11.2	12.0	12.4	1.5

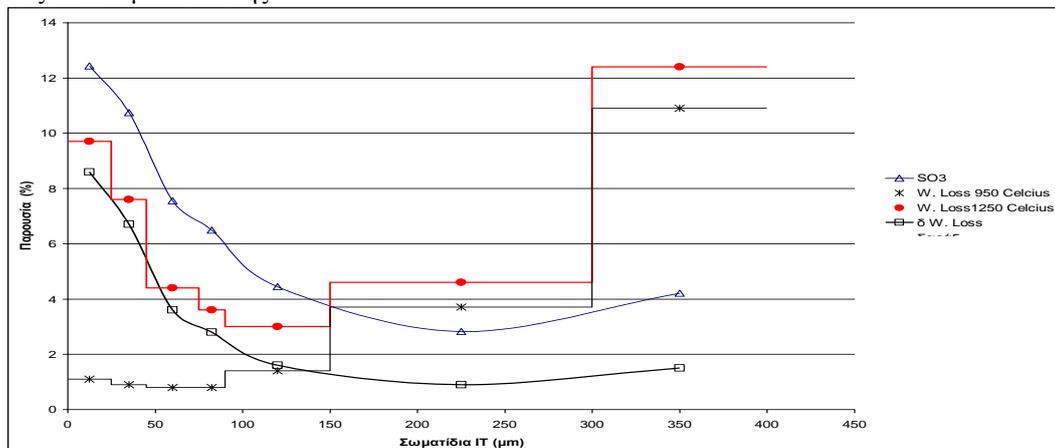
Οι τιμές της απώλειας πύρωσης μειώνονται σταθερά για το κλάσμα των σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη των 25μm έως το κλάσμα (75-90)μm. Τα κοκκομετρικά κλάσματα των σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη των 90μm είναι τελείως αποτεφρωμένα. Σε αυτά τα κλάσματα η μετρούμενη απώλεια πύρωσης αποδίδεται στη θερμική διάσπαση των συστατικών τους, κυρίως του ανθρακικού ασβεστίου. Η παρουσία του άκαυστου λιγνίτη αυξάνεται σταδιακά για κλάσματα διαμέτρου μεγαλύτερης των 90μm και κορυφώνεται στα σωματίδια μεγάλου μεγέθους.

Η έντονη παρουσία του CaO στα λεπτόκοκκα κλάσματα, καθώς και η μεγάλη ειδική επιφάνειά τους, οδηγούν στην υψηλή τους ικανότητα αποθείωσης και συνεπώς σε υψηλές συγκεντρώσεις SO₃. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τον περιορισμένο χρόνο έκθεσής τους σε υψηλές θερμοκρασίες, οδηγεί στη μεγαλύτερη απώλεια βάρους των προαναφερθέντων σωματιδίων IT σε υψηλές θερμοκρασίες, όπου οι ενδόθερμες διαδικασίες είναι πιο πιθανό να λάβουν χώρα υπό την απελευθέρωση των SO_x. Η Εικόνα 2 περιγράφει τη διαφοροποίηση της απώλειας βάρους στα διάφορα κοκκομετρικά κλάσματα IT κατά το θερμικό έλεγχο τους στις θερμοκρασίες [950-1250] °C, σε συνάρτηση με το μέσο μέγεθος των σωματιδίων IT και την αρχική ποσοστιαία παρουσία SO₃. Στο εύρος των θερμοκρασιών από 900°C -1200°C η εξέλιξη της ακόλουθης αλληλουχίας αντιδράσεων είναι πολύ πιθανή: σχηματισμός 5CaO·3Al₂O₃, 2CaO·3Al₂O₃ – διάσπαση του προϊόντος – ολοκλήρωση του σχηματισμού του XCaO·SiO₂, CaO·2SiO₂ με τη συμμετοχή του CaSO₄ – διαμόρφωση των 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃, 3CaO·Al₂O₃ με τη συμμετοχή του CaSO₄ και αργιλοπυριτικών συστατικών. Η εξέλιξη των αντιδράσεων αυτών απαιτεί τη μετατροπή της κρυσταλλικής φάσης σε άμορφη. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες λαμβάνει χώρα η διάσπαση του CaSO₄. Η απόρριψη του κλάσματος με διάμετρο σωματιδίων IT μικρότερη των 100μm οδηγεί α)

στη μείωση της ποσοστιαίας ΑΠ των πρόσθετων (ΙΤ) (υψηλά ποσοστά ΑΠ στα πρόσθετα πρέπει ασφαλώς να αποφεύγονται στη παραγωγική διαδικασία της τσιμεντοβιομηχανίας καθώς αυξάνει δραματικά τις ανάγκες σε νερό β) στην ενίσχυση του ενεργειακού περιεχομένου των πρόσθετων καθώς επωφελούνται από την παρουσία του άκαυστου λιγνίτη που υπάρχει στα μεγαλύτερα κλάσματα και γ) στην ενίσχυση των ποζολανικών τους ιδιοτήτων. Η απώλεια βάρους στις υψηλές θερμοκρασίες (>1150°C) είναι μεγαλύτερη για τα λεπτόκοκκα κλάσματα και μειώνεται αναλόγως με την αύξηση της μέσης διαμέτρου των σωματιδίων. Στις χαμηλότερες θερμοκρασίες τα σωματίδια ΙΤ επιδεικνύουν παρόμοια συμπεριφορά. Κατά τη θέρμανση στο εύρος των θερμοκρασιών [950-1250]°C (ισχυρά ενδόθερμη διαδικασία) η επιπλέον απώλεια βάρους ποικίλει ανάλογα με την παρουσία του SO₃ και μειώνεται με την αύξηση της μέσης διαμέτρου των αποτεφρωμένων σωματιδίων.



Εικόνα 1. Διαφοροποίηση της χημικής σύστασης της ιτάμενης τέφρας σε συνάρτηση με τη κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων της



Εικόνα 2. Απώλεια βάρους (στους 950°C και 1250°C) και SO₃ (%) στα διάφορα κλάσματα ΙΤ

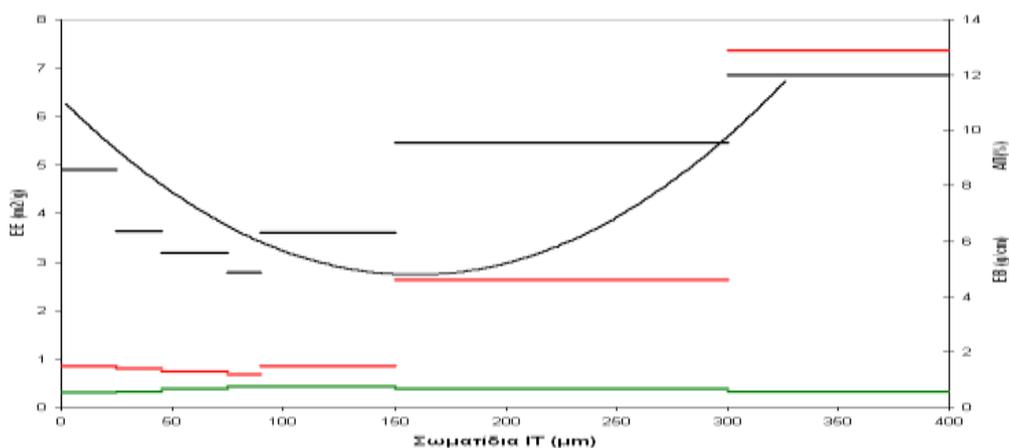
Πίνακας 2. ΕΕ και ΕΒ των κλασμάτων ΙΤ

Κλάσμα IT	Ειδική Επιφάνεια (g/cm)	Ειδικό Βάρος (m ² /g)
< 25	1.5	1.1
25-45	1.4	0.9
45-75	1.3	0.8
75-90	1.2	0.8
90-150	1.5	1.4
150-300	4.62	3.7
> 300	12.9	10.9

3.2 Ειδική Επιφάνεια (SSA) και Ειδικό Βάρος (SG) των κλασμάτων IT

Ο Πίνακας 2 δείχνει τις τιμές της ειδικής επιφάνειας και του ειδικού βάρους των διαφόρων κλασμάτων IT. Όπως αναμένονταν, στα αποτεφρωμένα κλάσματα (<90μm) η ειδική επιφάνεια μειώνεται με την αύξηση της μέσης διαμέτρου των σωματιδίων. Στα κλάσματα IT με σωματίδια μεγαλύτερα από 90μm, η ειδική επιφάνεια αυξάνεται αναλόγως με την αύξηση της μέσης διαμέτρου των σωματιδίων IT και της απώλειας πύρωσής τους. Η αύξηση των τιμών της ειδικής επιφάνειας αποδίδεται στο πορώδες των σωματιδίων του άκαυστου λιγνίτη το οποίο σχηματίζεται κατά την απελευθέρωση των πτητικών στον καυστήρα, κατά την παραγωγική διαδικασία του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι τιμές του ειδικού βάρους στα

τελείως αποτεφρωμένα σωματίδια δεν έρχονται σε αντίθεση με τις αντίστοιχες μετρήσεις της ειδικής επιφάνειας, καθώς η μικρότερη τιμή ειδικού βάρους αντιστοιχεί στο πιο λεπτόκοκκο κλάσμα, ενώ οι η υψηλότερη στο κλάσμα (75-90)μm. Οι καλύτερες ποζολανικές ιδιότητες, η σημαντική παρουσία άμορφης φάσης και η οικονομικότερη μεταφορά του υλικού «προτείνουν» την επιλεκτική αξιοποίηση του κλάσματος (50-100)μm (το μεγάλο ειδικό βάρος μειώνει το κόστος μεταφοράς της υπτάμενης τέφρας). Η Εικόνα 3 περιγράφει τη διαφοροποίηση ειδικού βάρους, ειδικής επιφάνειας και απώλειας πύρωσης σε συνάρτηση με το μέσο μέγεθος των σωματιδίων IT.



Εικόνα 3. Ειδική επιφάνεια (μαύρη καμπύλη), Απώλεια Βάρους (κόκκινη καμπύλη) και Ειδικό Βάρος (πράσινη καμπύλη) στα διάφορα κλάσματα IT

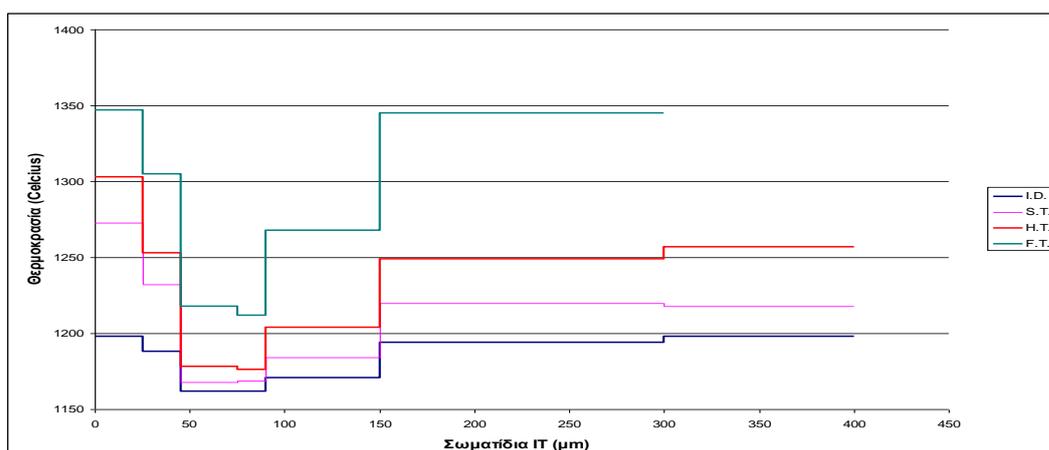
3.3 Θερμοκρασίες φυσικοχημικών μεταβολών στα διάφορα κλάσματα IT

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τις τιμές των θερμοκρασιών: Αρχικής παραμόρφωσης (ID), Ημισφαιρικής Παραμόρφωσης (HT), Σφαιρικής Παραμόρφωσης (ST) και Τήξης (FT) στα διάφορα κλάσματα IT. Η Εικόνα 4 περιγράφει τη διαφοροποίηση των τιμών των θερμοκρασιών σε συνάρτηση με το μέγεθος των σωματιδίων, η οποία, σε μεγάλο βαθμό, οφείλεται στους διαφορετικούς χρόνους παραμονής των κλασμάτων στην εστία της καύσης. Οι καμπύλες που περιγράφουν τη διαφοροποίηση των τιμών των κρίσιμων θερμοκρασιών ταυτίζονται στους 1140

°C και στη διάμετρο των 90μm. Η προαναφερθείσα τιμή της θερμοκρασίας είναι η θερμοκρασία αρχικής παραμόρφωσης της ιπτάμενης τέφρας.

Πίνακας 3. Θερμοκρασίες φυσικοχημικών μεταβολών των διαφόρων κλασμάτων ΙΤ

Κοκκομετρικό Κλάσμα	(I.D.) (°C)	(S.T.) (°C)	(H.T.) (°C)	(F.T.) (°C)
< 25	1198	1273	1303	1347
25-45	1188	1232	1253	1305
45-75	1162	1168	1178	1218
75-90	1162	1169	1176	1212
90-150	1171	1184	1204	1268
150-300	1194	1220	1249	1345
> 300	1198	1218	1257	-



Εικόνα 4. Θερμοκρασίες φυσικοχημικών μεταβολών σε συνάρτηση με το μέγεθος των σωματιδίων της ΙΤ

3.4 Συνολική αποτίμηση των ιδιοτήτων των διαφόρων κλασμάτων της ΙΤ

Κλάσμα σωματιδίων (0-75)μm: Η χαμηλή πυκνότητα αυτού του κλάσματος ΙΤ περιορίζει το χρόνο παραμονής των σωματιδίων του στην εστία της καύσης και οδηγεί στην περιορισμένη έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες και στη συνεπακόλουθη παρεμπόδιση των ενδόθερμων αντιδράσεων. Παρόλα αυτά, η ταυτόχρονη μεταφορά σωματιδίων ΙΤ και καυσαερίων, σε συνδυασμό με τις μεγάλες τιμές ειδικής επιφάνειας αυτού του κλάσματος, ευνοεί την εξέλιξη των αντιδράσεων μεταξύ των συστατικών του. Η πολύ σημαντική ποσοστιαία παρουσία CaO στα λεπτόκοκκα κλάσματα είναι αναμενόμενη λόγω των εύθρυπτων ορυκτών του ασβεστολίθου του τροφοδοτούμενου καυσίμου. Παράλληλα η θερμική διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου εξηγεί την έντονη παρουσία του ελευθέρου οξειδίου του ασβεστίου. Η μετρούμενη απώλεια πύρωσης στο κλάσμα αυτό αποδίδεται σε μέρος του ασβεστολίθου που δεν έχει διασπαστεί λόγω έλλειψης χρόνου. Η σημαντική ποσοστιαία παρουσία του SO₃ εξηγείται από α) την αρχική παρουσία γύψου

στο ανόργανο μέρος του λιγνίτη β) το σχηματισμό CaSO_4 εξαιτίας της αποθεωτικής δράσης των CaCO_3 και CaO κατά τη από κοινού μεταφορά σωματιδίων IT και καυσαερίων. Η μικρή περίοδος θερμικής έκθεση αυτού του κλάσματος γίνεται επίσης προφανής από την έντονη κρυσταλλική φάση και τις υψηλές τιμές των θερμοκρασιών φυσικοχημικών μεταβολών. Όπως αναμένονταν, το ενεργό πυρίτιο εμφανίζει λιγότερο έντονη παρουσία σε σχέση με τα σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους.

Η παρουσία ασβεστούχων συστατικών σε αυτό το κλάσμα οδηγεί στην ανάπτυξη των υδραυλικών ιδιοτήτων του. Συνεπώς προτείνεται η μη-αξιοποίηση του κλάσματος (<75 μm) «ως παρελήφθη» στις εφαρμογές της βιομηχανίας τσιμέντου. Για την ακρίβεια, η απόρριψη του κλάσματος αυτού εξοικονομεί σημαντική ποσότητα ενέργειας, με αποτέλεσμα τη μείωση τόσο του οικονομικού κόστους της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου όσο και του περιβαλλοντικού αντίκτυπου των δραστηριοτήτων της. Αντοθέτως, η χαμηλή πυκνότητα και η μεγάλη ειδική επιφάνειά του το καθιστούν υλικό κατάλληλο για την οδοποιία και την αποκατάσταση εδαφών.

Κλάσμα σωματιδίων (75-150) μm : Το κλάσμα αυτό, εξαιτίας της μεγάλης του πυκνότητας, παραμένει για περισσότερο χρόνο στη εστία καύσης όχι μόνο στις περιοχές των υψηλών θερμοκρασιών αλλά συνολικά στις εγκαταστάσεις του καυστήρα. Τα χημικά συστατικά του κλάσματος υπόκεινται σε ενδοθερμικές μετατροπές ως αποτέλεσμα της έκθεσής τους στις υψηλές θερμοκρασίες. Σαν αποτέλεσμα α) αυτό το κλάσμα παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές απώλειας βάρους και β) τα συστατικά του αντιδρούν και σχηματίζουν ενώσεις που τήκονται εύκολα. Στη συνέχεια το CaSO_4 διασπάται υπό τον ταυτόχρονο σχηματισμό ασβεστοπυριτικών ενώσεων, αντίδραση η οποία οδηγεί στην απελευθέρωση SO_3 . Καθώς δεν υπάρχει ο διαθέσιμος χρόνος για να εξελιχθεί επαρκώς η κρυστάλλωση των συστατικών του κλάσματος, δημιουργείται έντονα υαλώδης φάση, διαδικασία στην οποία αποδίδονται και οι χαμηλές τιμές της ειδικής επιφάνειας των σωματιδίων του κλάσματος. Το κλάσμα σωματιδίων με μέγεθος (75-150) μm παρουσιάζει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο με συγκεντρωμένα αργίλο-πυριτικά και ασβεστο-πυριτικά συστατικά στην υαλώδη φάση, περιορισμένη παρουσία κρυσταλλικής φάσης και την υψηλότερη ποσοστιαία παρουσία SiO_2 και ενεργού πυριτίου. Τα κλάσμα, λοιπόν, αυτό έχει αποκτήσει τις καλύτερες ποζολανικές ιδιότητες. Επιπλέον, η μηδενική παρουσία ελεύθερου οξειδίου του ασβεστίου σε συνδυασμό με τα χαμηλά ποσοστά τριοξειδίου του θείου και απώλειας πύρωσης καθιστούν το συγκεκριμένο κλάσμα σωματιδίων IT κατάλληλο για χρήση στη φάση της άλεσης του κλίνκερ στην παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου. Παρόλα αυτά, η χαμηλές τιμές ειδικής επιφάνειάς και η απαίτηση θραύσης του επιφανειακού υαλώματος για την εκδήλωση της ποζολανικότητας, «εισηγούνται» την περαιτέρω κονιοποίηση του υλικού. Η μεγαλύτερη πυκνότητα του κλάσματος κάνει οικονομικότερη τη μεταφορά του ενώ ταυτόχρονα η αποφυγή μεταφοράς του μικρόκοκκου κλάσματος περιορίζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξαιτίας αυτού.

Κλάσμα σωματιδίων (>150) μm : Η αυξημένη τιμή ΑΠ του κλάσματος αυτού οφείλεται στην εργαστηριακή ολοκλήρωση της καύσης των σωματιδίων του λιγνίτη τα οποία δεν είχαν τον απαιτούμενο χρόνο κατά την παραγωγική διαδικασία. Κατά την έκθεση του κλάσματος (>150) μm στις υψηλές θερμοκρασίες τα πτητικά απελευθερώνονται με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πορώδους στη μάζα των σωματιδίων που εκδηλώνεται με την αύξηση της ειδικής επιφάνειας και τη μείωση της πυκνότητάς τους. Η ποσοστιαία παρουσία των συστατικών του ασβεστίου, όπως και του ελεύθερου οξειδίου του ασβεστίου και του τριοξειδίου του θείου είναι μικρότερες. Συστατικά δύσθρυπτων υλικών (SiO_2 , Al_2O_3) έχουν εντονότερη παρουσία. Το κλάσμα (>150) μm είναι υπεύθυνο για την αύξηση της ΑΠ στο συνολικό, ενιαίο υλικό της ιπτάμενης τέφρας με επίπτωση στα κριτήρια αποτελεσματικότητας για τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας στη βιομηχανία τσιμέντου. Η κρυσταλλική φάση του κλάσματος (το οποίο δεν απέδωσε ολόκληρο το ενεργειακό του περιεχόμενο κατά την παραγωγική διαδικασία του ηλεκτρικού ρεύματος) σε συνδυασμό με το μεγάλο μέγεθος των σωματιδίων τους και τη δυσθρυπτότητά τους, κατά την απαιτούμενη

κονιοποίηση του στην παραγωγική διαδικασία της τσιμεντοβιομηχανίας, προϋπολογίζει ενεργοβόρο διαδικασία, μη-συγκρίσιμου μεγέθους με το υπόλειμμα του ενεργειακού περιεχομένου και την τελική συνεισφορά στο παραγόμενο προϊόν.

Η μη-συμμετοχή του κλάσματος αυτού στην παραγωγική διαδικασία της τσιμεντοβιομηχανίας μπορεί να οδηγήσει στην εξοικονόμηση ενέργειας με ευνοϊκά αποτελέσματα, τόσο στην ποιότητα των τελικών υλικών, όσο και στην μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το κλάσμα (75-150) μm , το οποίο παρουσιάζει την εντονότερη υαλώδη φάση, αποκτά τις καλύτερες ποζολανικές ιδιότητες. Προκειμένου οι ιδιότητες του κλάσματος να αξιοποιηθούν, προτείνεται η περαιτέρω άλεση των σωματιδίων του (υπό τη συνεπακόλουθη απελευθέρωση πυριτικών συστατικών) έτσι ώστε να θραυτεί το επιφανειακό υάλωμα και να αυξηθεί σημαντικά η ειδική επιφάνειά τους. Το συγκεκριμένο αυτό κλάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξεχωριστά για την παρασκευή του τσιμέντου, εξοικονομώντας ενέργεια κατά την παραγωγική διαδικασία και συμβάλλοντας έτσι στη μείωση οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους. Σίγουρα, πάντως, απαιτείται η διεξαγωγή περαιτέρω έρευνας, προσανατολισμένης κυρίως στις αντοχές των τελικών προϊόντων. Προτείνεται, επίσης, η απόρριψη του κλάσματος (>50) μm όσον αφορά την παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου εξαιτίας της εντονότατης παρουσίας SO_3 και CaO στα σωματίδιά του. Το ίδιο αυτό κλάσμα μπορεί να είναι περισσότερο χρήσιμο σε εφαρμογές οδοποιίας και αποκατάστασης εδαφών. Όσον αφορά το κλάσμα (>150) μm , παρότι η χρήση του προφανώς θα εξοικονομούσε ενέργεια κατά τη διαδικασία της παρασκευής του κλίνκερ, εντούτοις, για μια σειρά από λόγους, προτείνεται η απόρριψή του.

5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Annual Book of ASTM Standards, C618-03

Bogdanovic, I., Fazinic, S., Itskos, S., Jaksic, M., Karydas, E., Katselis, V., Paradellis, T., Tadic, T., Valkovic, O., Valkovic, V. 1995. Trace element characterization of coal fly ash particles, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 99, 1-4: 402-405

Itskos, S.G. and Itskos, G.S. 2006. Saving energy and mineral resources through the rationalization of the supply of lignite and the utilization of lignite fly ash. *Energy Saving Workshop, Athens Academy of Sciences*, Athens, Greece, Proceedings: 167-175

Itskos, S., Itskos, G.S., Kakaras, E., Koukouzas, N. 2007. Differentiation of chemical composition and behaviour of lignite fly ash as a function of its particle size distribution *3rd International Conference on Environmental Science and Technology*, American Academy of Sciences, 6-9 August 2007, Houston, TX, USA.

Koukouzas, N. K., Zeng, R., Perdikatsis, V., Xu, W., Kakaras, E. K. 2006. Mineralogy and geochemistry of Greek and Chinese coal fly ash, *Fuel*, 85: 2301-2309

Mason, B. and Moore, C.B. 1982. *Principles of Geochemistry*, New York, John Wiley

Rao, P.V. and Buckley, D.H. 1985. *Characterization of solid particle erosion resistance of ductile metals based on their properties*, Cleveland, NASA

Tsimas, S., Moutsatsou-Tsima, A. 2005. High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives, *Cement & Concrete Composites*, 27: 231-237

Μελέτη της συμπεριφοράς και της εργασιμότητας πηγμάτων με ελληνικές ιπτάμενες τέφρες

Ι. Παπαγιάννη, Φ. Καρκαντελίδου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη

Λέξεις κλειδιά: αντοχή, ιπτάμενη τέφρα, λόγος νερό/κονία, πήγμα, πολυκαρβοξυλικός αιθέρας, πορώδες, ρευστοποιητής, σουλφονική ναφθαλίνη φορμαλδεΰδη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ο συνδυασμός υλικών με τσιμεντοειδείς ιδιότητες, όπως η ιπτάμενη τέφρα, με το τσιμέντο Portland παρέχει υψηλή πλαστικότητα στο σχεδιασμό μιγμάτων σκυροδέματος με τεχνικά πλεονεκτήματα και χαμηλό κόστος. Ωστόσο, η προσθήκη τέτοιων υλικών επηρεάζει τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος και προκαλεί προβλήματα συμβατότητας στα συστήματα μικτών κονιών, τα οποία περιέχουν επιπλέον ρευστοποιητές, είτε για την μείωση της απαίτησης σε νερό, είτε για την αύξηση της εργασιμότητας.

Στην παρούσα μελέτη, εξετάστηκαν δύο τύποι ρευστοποιητών, ο πρώτος τύπος είναι ένα πολυμερές με βάση τη σουλφονική ναφθαλίνη φορμαλδεΰδη (SNF), και ο δεύτερος ένα πολυμερές με βάση τον πολυκαρβοξυλικό αιθέρα (PC), σε συστήματα που περιείχαν 20, 30, 50 και 80% αντικατάσταση του τσιμέντου Portland από ελληνικές ιπτάμενες τέφρες (Πτολεμαΐδας και Μεγαλόπολης).

Η δράση των ρευστοποιητών στις τσιμεντόπαστες εκτιμήθηκε ελέγχοντας την ανάπτυξη των μηχανικών χαρακτηριστικών (αντοχή σε κάμψη και θλίψη) και το πορώδες σε διάφορες ηλικίες. Σκοπός της παρούσας ερευνητικής εργασίας ήταν να προσδιοριστεί ποιος τύπος ρευστοποιητή είναι καταλληλότερος για καθένα σύστημα κονιών που χρησιμοποιήθηκε. Η μεγαλύτερη μείωση σε απαίτηση νερού επιτεύχθηκε με τον PC ρευστοποιητή.

Study of the effectiveness and the workability in pastes containing Greek Fly Ashes

I. Papayianni, F. Karkantelidou

Lab. of Building Materials, Civil Engineering Department AUTH, 54124 Thessaloniki

Keywords: fly ash, polycarboxylate, paste, porosity, strength, superplasticizer, sulfonated naphthalene formaldehyde, water/binder

ABSTRACT: The combination of cementitious materials, such as fly ash, with portland cement provides high flexibility in designing concrete mixtures with several technical advantages and low cost. However, their addition influences the properties of fresh concrete and causes problems of compatibility in blended cement systems containing superplasticizers that are usually used either for reduction of water demand or for increase of workability.

In this study, two of the widely used type of superplasticizers, one based on sulphonated naphthalene formaldehyde condensate (SNF) and another based on polycarboxylate polymers (PC), were tested with mixtures containing 20, 30, 50 or 80% portland cement replacement with Greek fly ashes (from Ptolemaida and Megalopolis regions).

The action of superplasticizer on cement pastes was estimated by monitoring strength development and porosity at different ages. The aim of the research work was to find which type of superplasticizer was more suitable for each type of binder system.

The highest reduction of water demand was achieved with polycarboxylate polymer superplasticizer.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ: Η χρήση αναμεμιγμένων τσιμέντων στα μίγματα σκυροδέματος, είτε χρησιμοποιώντας ένα αναμεμιγμένο τσιμέντο Portland, είτε προσθέτοντας κατάλληλα υλικά απευθείας στο μίγμα του σκυροδέματος, φαίνεται να είναι η απάντηση στην πρόκληση της βιομηχανίας του σκυροδέματος του 21^{ου} αιώνα για περαιτέρω ανάπτυξη. Τα τελευταία χρόνια η σκέψη αυτή έχει επαρκώς τεκμηριωθεί, τόσο μέσω της έρευνας, όσο και μέσω διαφόρων εφαρμογών [1], [2], [3]. Ανάμεσα στις δύο μεθόδους χρήσης υλικών με τσιμεντοειδείς ιδιότητες, η πρώτη μέθοδος είναι ευκολότερη και παράγει σκυρόδεμα σταθερής ποιότητας, ενώ η δεύτερη είναι περισσότερο ευέλικτη, όμως απαιτεί ικανοποιητικό έλεγχο της ποιότητας του συστήματος. Για την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης πρέπει να διερευνηθούν η μικροδομή και οι ιδιότητες των πουζολανικών υλικών, καθώς και τα προϊόντα ενυδάτωσής τους. Η ορυκτολογική σύσταση των άμορφων φάσεων, η λεπτότητα άλεσης και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας των σωματιδίων επηρεάζουν τα προϊόντα της ενυδάτωσης και συνεπώς και τις ιδιότητες του σκυροδέματος [4].

Στην περίπτωση των συστημάτων τσιμέντου, που περιέχουν ιπτάμενη τέφρα υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο, η απαίτηση σε νερό, για σύστημα δεδομένης συνεκτικότητας, αυξάνεται, με αποτέλεσμα την μικρότερη ανάπτυξη αντοχών σε σχέση με το καθαρό τσιμέντο. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε εμπόδιο για την περαιτέρω εκμετάλλευση του βιομηχανικού αυτού παραπροϊόντος, παρόλο που ο αργός ρυθμός ενυδάτωσής του παράγει μια ισχυρότερη διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη στο σκυρόδεμα [4].

Εκτεταμένη έρευνα απέδειξε ότι η χρήση ρευστοποιητών είναι δυνατό να ξεπεράσει το παραπάνω εμπόδιο [1]. Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τύποι ρευστοποιητών, με διαφορετικό μηχανισμό διασποράς στην ενυδατωμένη τσιμεντόπαστα. Στην περίπτωση του ρευστοποιητή με βάση τη σουλφονική ναφθαλίνη φορμαλδεΰδη (SNF), ο μηχανισμός διασποράς είναι ηλεκτροστατικός. Οι σουλφονικές ομάδες των πολυμερικών αλυσίδων, αυξάνουν το αρνητικό φορτίο στην επιφάνεια των σωματιδίων του τσιμέντου και προκαλούν τη διασπορά τους, λόγω απώθησης. Στην περίπτωση του ρευστοποιητή με βάση τον πολυκαρβοξυλικό αιθέρα (PC), λαμβάνουν χώρα δύο μηχανισμοί. Στο αρχικό στάδιο της ανάμιξης, λειτουργεί με τον ηλεκτροστατικό μηχανισμό, όμως οι παράπλευρες αλυσίδες, οι οποίες είναι συνδεδεμένες με την κύρια πολυμερική αλυσίδα, προκαλούν στερική τροχοπέδη, η οποία σταθεροποιεί σε μεγάλο βαθμό την ικανότητα των σωματιδίων του τσιμέντου να διασπείρονται [5].

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ:

Υλικά

Για τη μελέτη της αποτελεσματικότητας των ρευστοποιητών χρησιμοποιήθηκαν έξι συνδυασμοί κονιών, που αποτελούνταν από τσιμέντο Portland υψηλής αντοχής (CEM I 42.5) και ιπτάμενη τέφρα από δύο διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας, Πτολεμαΐδα και Μεγαλόπολη. Παρασκευάστηκαν πάστες κανονικής συνεκτικότητας σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 196-3, τόσο χωρίς, όσο και με ρευστοποιητή 1% κ.β. κονίας. Τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στον Πίνακα 1, ενώ στον Πίνακα 2 φαίνονται οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν και τα ποσοστά των ιπτάμενων τερφών που αντικατέστησαν το τσιμέντο.

Οι ρευστοποιητές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των Ευρωπαϊκών και Αμερικάνικων Προτύπων, EN 934-2:2001 και ASTM C-494, και είναι απαλλαγμένοι από χλώριο (Πίνακας 3). Ο πρώτος τύπος ρευστοποιητή, πολυμερές με βάση τη σουλφονική ναφθαλίνη φορμαλδεΰδη (SNF), χρησιμοποιείται για την παραγωγή υψηλής αντοχής ρεοπλαστικού σκυροδέματος με χαμηλό λόγο N/T, ενώ ο δεύτερος τύπος, πολυμερές με βάση τον

πολυκαρβοξυλικό αιθέρα (PC), συνίσταται για την παραγωγή ρεοπλαστικού σκυροδέματος υψηλών μηχανικών αντοχών, αρχικών και τελικών.

Έλεγχοι

Δεκαοκτώ συστήματα πηγμάτων κανονικής συνεκτικότητας παρασκευάστηκαν σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 196-3. Η προσθήκη ρευστοποιητή σε ποσότητα 1% κ.β. κονιάς πραγματοποιήθηκε μαζί με το νερό της ανάμιξης. Μετά την ολοκλήρωση της ανάμιξης μετρήθηκαν οι τιμές του pH και της θερμοκρασίας στο πήγμα. Στη συνέχεια, το ανάμιγμα τοποθετήθηκε σε μήτρες διαστάσεων 25x25x300 mm, απ' όπου διαμορφώθηκαν δοκίμια διαστάσεων 25x25x100 mm και 25x25x25 mm για τον έλεγχο της καμπτικής και της θλιπτικής αντοχής, αντίστοιχα. Οι μετρήσεις του ανοιχτού πορώδους έγιναν σύμφωνα με την μέθοδο RILEM CPC 11.3. Όλα τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε θάλαμο γήρανσης, σχετικής υγρασίας 99±1 % και θερμοκρασίας 20±1 °C, μέχρι την ηλικία ελέγχου. Οι αντοχές και το πορώδες προσδιορίστηκαν κατά την 1^η, 3^η, 7^η, 28^η, 90^η, 180^η και 360^η ημέρα.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Πρώτων Υλών που χρησιμοποιήθηκαν

Χαρακτηριστικά	CEM I 42.5	Ιπτάμενη Τέφρα Πτολεμαΐδας	Ιπτάμενη Τέφρα Μεγαλόπολης
Χημική Σύσταση (% κ.β.)			
Na ₂ O	0.57	0.38	0.54
K ₂ O	1.08	0.80	3.29
CaO	66.84	41.70	18.75
MgO	3.91	7.30	1.90
Fe ₂ O ₃	8.11	5.26	8.20
Al ₂ O ₃	2.40	6.69	16.00
SiO ₂	19.55	29.42	48.32
SO ₃		3.85	2.48
Απώλεια πύρωσης	1.91	8.46	3.00
Αδιάλυτο υπόλειμμα	0.8	9.93	14.64
Λεπτότητα Άλεσης Συγκρατούμενο στο κόσκιο 45 μm	1.5	38%	25%
Ποζολανικότητα με τσιμέντο 28-ημέρες (EN 450-1)	-	85%	60%
Ποζολανικότητα με άσβεστο 28-ημέρες (ASTM C593)	-	4.64 MPa	7.26 MPa
Φαινόμενο ειδικό βάρος	3.141	2.556	1.950

Πίνακας 2. Σύσταση των πηγμάτων στα συστήματα μικτών κονιών

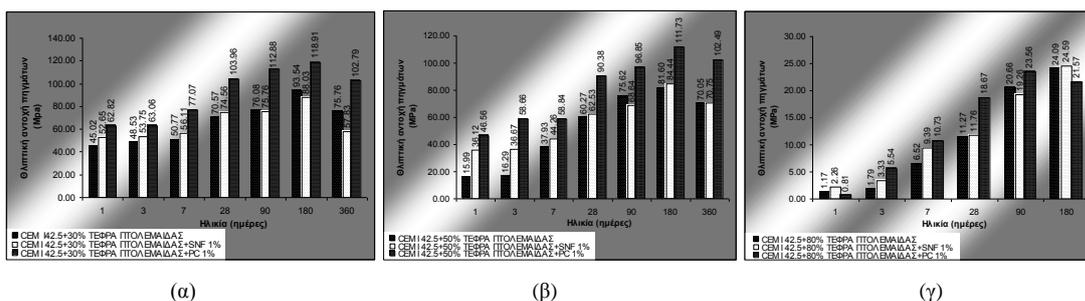
Σύσταση	Τσιμέντο Portland	Ιπτάμενη Τέφρα Πτολεμαΐδας	Ιπτάμενη Τέφρα Μεγαλόπολης	Λόγος N/K	Κανονική Συνεκτικότητα κατά EN 196-3 Διείσδυση εμβόλου Vicat (mm)	Θερμοκρασία του πηγματος μετά την ολοκλήρωση της ανάμιξης (°C)	Τιμή pH του πηγματος μετά την ολοκλήρωση της ανάμιξης
CEM I 42.5+30% Τέφρα Πτολεμαΐδας	+	+	-	0.31	7	27.9	13.20
CEM I 42.5+30% Τέφρα Πτολεμαΐδας+SNF 1%	+	+	-	0.30	7	27.0	13.15
CEM I 42.5+30% Τέφρα Πτολεμαΐδας+PC 1%	+	+	-	0.25	5	26.3	13.10
CEM I 42.5+50% Τέφρα Πτολεμαΐδας	+	+	-	0.34	7	25.3	13.02
CEM I 42.5+50% Τέφρα Πτολεμαΐδας+SNF 1%	+	+	-	0.29	5	24.8	13.00
CEM I 42.5+50% Τέφρα Πτολεμαΐδας+PC 1%	+	+	-	0.28	5	24.7	12.84
CEM I 42.5+80% Τέφρα Πτολεμαΐδας	+	+	-	0.47	5	33.4	12.23
CEM I 42.5+80% Τέφρα Πτολεμαΐδας+SNF 1%	+	+	-	0.48	5	29.9	12.21
CEM I 42.5+80% Τέφρα Πτολεμαΐδας+PC 1%	+	+	-	0.50	5	30.6	12.31
CEM I 42.5+20% Τέφρα Μεγαλόπολης	+	-	+	0.29	7	24.4	12.83
CEM I 42.5+20% Τέφρα Μεγαλόπολης+SNF 1%	+	-	+	0.26	7	23.7	12.40
CEM I 42.5+20% Τέφρα Μεγαλόπολης+PC 1%	+	-	+	0.23	5	23.5	12.40
CEM I 42.5+30% Τέφρα Μεγαλόπολης	+	-	+	0.31	6	24.6	12.25
CEM I 42.5+30% Τέφρα Μεγαλόπολης+SNF 1%	+	-	+	0.29	7	26.5	12.34
CEM I 42.5+30% Τέφρα Μεγαλόπολης+PC 1%	+	-	+	0.26	5	25.1	12.23
CEM I 42.5+40% Τέφρα Μεγαλόπολης	+	-	+	0.34	5	24.2	12.37
CEM I 42.5+40% Τέφρα Μεγαλόπολης+SNF 1%	+	-	+	0.31	5	23.4	12.14
CEM I 42.5+40% Τέφρα Μεγαλόπολης+PC 1%	+	-	+	0.29	5	24.3	12.26

Πίνακας 3. Τεχνικά χαρακτηριστικά ρευστοποιητών

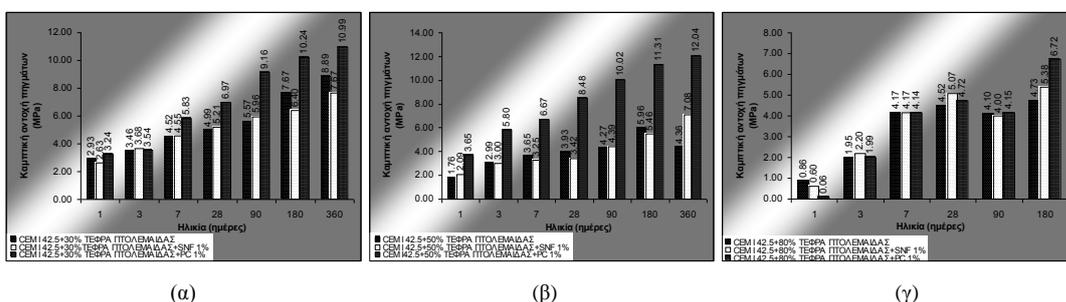
Ρευστοποιητής	Εμφάνιση	Ειδικό βάρος στους 20 °C (gr/ml)	Τιμή pH στους 20 °C	Περιεχόμενο χλώριο (%)
SNF	Καφέ υγρό	1.185 – 1.205	8.5 – 9.8	≤ 0.01
PC	Καφέ υγρό	1.080 – 1.150	~ 6.6	≤ 0.01

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ: Η προσθήκη των δύο τύπων ρευστοποιητών στα περισσότερα μικτά συστήματα κονιών κανονικής συνεκτικότητας είχε σαν αποτέλεσμα την μείωση του λόγου νερού/κονία, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2. Μόνο στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε 80% αντικατάσταση του τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα ο λόγος νερού/κονία αυξήθηκε, γεγονός που συνεπάγεται ότι η ποσότητα του εκάστοτε ρευστοποιητή (1% κ.β. κονιάς) δεν ήταν επαρκής, ώστε να λειτουργήσει ως μειωτής νερού. Οι μετρήσεις της τιμής του pH μετά την ολοκλήρωση της ανάμιξης έδειξαν ότι υπάρχει μια σχετική μείωση στα συστήματα που περιέχουν ρευστοποιητή. Εξάιρεση παρατηρείται σε δύο μόνο περιπτώσεις. Η πρώτη είναι στο σύστημα CEM I 42.5+80% Ιπτάμενη Τέφρα Πτολεμαΐδας+1% κ.β. SNF, και η δεύτερη στο σύστημα CEM I 42.5+30% Ιπτάμενη Τέφρα Μεγαλόπολης+1% κ.β. SNF. Η αύξηση της τιμής του pH είναι μικρότερη του 0.01% και στα δύο συστήματα.

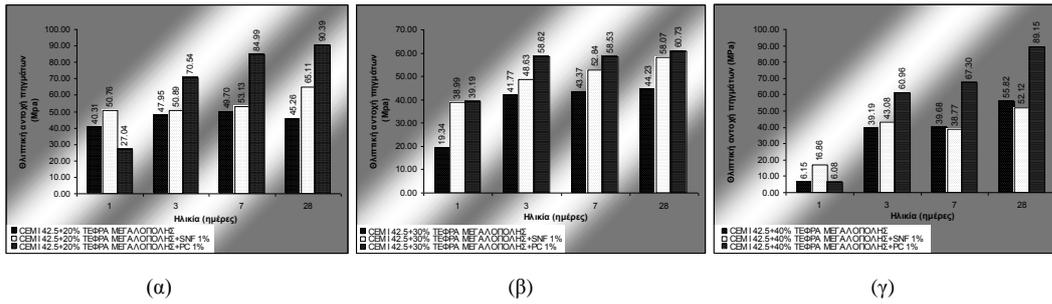
Η ανάπτυξη των αντοχών, σε θλίψη και σε κάμψη, των πηγμάτων που περιέχουν 30, 50 και 80% Τέφρα Πτολεμαΐδας φαίνεται στα διαγράμματα 1 και 2, ενώ τα αντίστοιχα διαγράμματα για τα συστήματα που περιέχουν 20, 30 και 40% Τέφρα Μεγαλόπολης είναι τα 3 και 4. Όσον αφορά στον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη λήφθηκε ο μέσος όρος τεσσάρων κυβικών δοκιμίων διαστάσεων 25x25x25 mm, ενώ για τον προσδιορισμό της αντοχής σε κάμψη ο μέσος όρος δύο πρισματικών δοκιμίων διαστάσεων 25x25x100 mm.



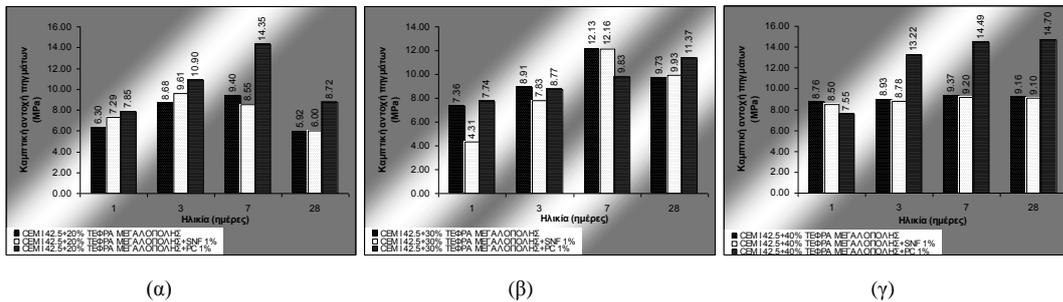
Διάγραμμα 1: Ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής σε πάστες κανονικής συνεκτικότητας σε διάφορες ηλικίες. (α) Σύστημα κονιών με 30% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας, (β) Σύστημα κονιών με 50% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας και (γ) Σύστημα κονιών με 80% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας.



Διάγραμμα 2: Ανάπτυξη της καμπτικής αντοχής σε πάστες κανονικής συνεκτικότητας σε διάφορες ηλικίες. (α) Σύστημα κονιών με 30% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας, (β) Σύστημα κονιών με 50% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας και (γ) Σύστημα κονιών με 80% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας.

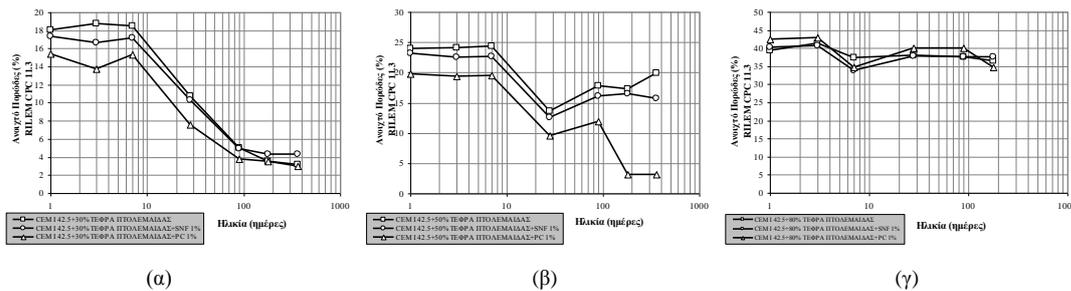


Διάγραμμα 3: Ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής σε πάστες κανονικής συνεκτικότητας σε διάφορες ηλικίες. (α) Σύστημα κονιών με 20% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης, (β) Σύστημα κονιών με 30% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης και (γ) Σύστημα κονιών με 40% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης.

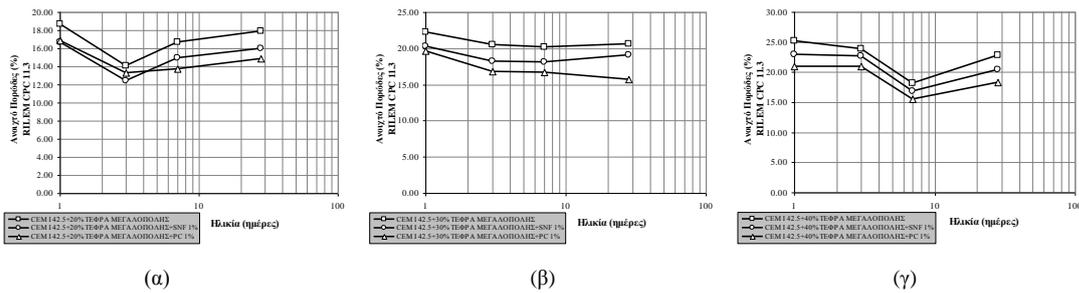


Διάγραμμα 4: Ανάπτυξη της καμπτικής αντοχής σε πάστες κανονικής συνεκτικότητας σε διάφορες ηλικίες. (α) Σύστημα κονιών με 20% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης, (β) Σύστημα κονιών με 30% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης και (γ) Σύστημα κονιών με 40% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα η προσθήκη των ρευστοποιητών, και ειδικά του PC τύπου, συμβάλλει στην ανάπτυξη της πρώιμης αντοχής όλων των συστημάτων που εξετάστηκαν. Επιπρόσθετα, προσδιορίστηκε το ανοιχτό πορώδες, που συνδέεται άμεσα με την αντοχή σε κάμψη, και οι τιμές του οποίου παρατίθενται στα διαγράμματα 5 και 6.



Διάγραμμα 5: Εξέλιξη του ανοιχτού πορώδους σε συνάρτηση με τον χρόνο σε πάστες κανονικής συνεκτικότητας. (α) Πήγμα με 30% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας, (β) Πήγμα με 50% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας και (γ) Πήγμα με 80% κ.β. Τέφρα Πτολεμαΐδας.



Διάγραμμα 6: Εξέλιξη του ανοιχτού πορώδους σε συνάρτηση με τον χρόνο σε πάστες κανονικής συνεκτικότητας. (α) Πήγμα με 20% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης, (β) Πήγμα με 30% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης και (γ) Πήγμα με 40% κ.β. Τέφρα Μεγαλόπολης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ: Η προσθήκη των ρευστοποιητών στα συστήματα που περιείχαν 30 και 50% αντικατάσταση του τσιμέντου Portland από την Τέφρα Πτολεμαΐδας είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση του λόγου νερού/κονία και την ανάλογη αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Επιπλέον παρατηρήθηκε μείωση του πορώδους ακόμα και σε πρώιμες ηλικίες, το οποίο συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη της αντοχής σε κάμψη. Στην περίπτωση του συστήματος που περιείχε 80% Τέφρα Πτολεμαΐδας η ποσότητα των ρευστοποιητών ήταν ξεκάθαρα πως υπήρξε ανεπαρκής.

Όσον αφορά στα συστήματα που περιείχαν 20, 30 και 40% αντικατάσταση του τσιμέντου Portland από την Τέφρα Μεγαλόπολης, η αποτελεσματικότητα των ρευστοποιητών μειωνόταν όσο αυξανόταν το ποσοστό του πουζολανικού υλικού στο σύστημα.

Συμπερασματικά, είναι φανερό ότι οι ρευστοποιητές, και ειδικά οι πολυκαρβοξυλικού τύπου, έχουν κάνει εφικτή την αντικατάσταση σημαντικών ποσοτήτων τσιμέντου Portland με πουζολανικά βιομηχανικά παραπροϊόντα, όπως η ιπτάμενη τέφρα, μειώνοντας μ' αυτό τον τρόπο το κόστος και ενισχύοντας την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ: Ευχαριστούμε θερμά την εταιρεία BASF-CC HELLAS και ιδιαίτερα την Κυρία και τον Κύριο Δηλαβέρη για την οικονομική ενίσχυση που παρέχουν για την ολοκλήρωση της παρούσας ερευνητικής μελέτης, καθώς και για το ενδιαφέρον που δείχνουν στο συγκεκριμένο πεδίο της έρευνας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ:

1. Malhotra, V.M., "Superplasticized Fly Ash Concrete for Structural Applications", *Concr. Int.* Vol 8, No. 12, pp 28 – 31, 1986.
2. Mehta, P.K., Langley, W.S., "Monolith Foundation; Built to last 1000 years", *Concr. Int.* Vol 22, No. 7, pp 27 – 32, 2000.
3. Naik, Tarun et al, "Mechanical Properties and Durability of Concrete Pavements Containing High Volumes of Fly Ash", *ACI SP-212*, June 2003 V. M. Malhotra ed., pp 319 – 340.
4. Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., "Concrete Microstructure, Properties and Materials", McGraw Hill Third edition, pp 302 – 305, pp 35 – 44, 2007.
5. Collepardi, Mario, "The New Concrete", Tintoretto editions, pp 197 – 218, 2006.

Χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων ως λεπτό υλικό πλήρωσης για την παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος και η επίδραση υψηλών θερμοκρασιών στα μηχανικά χαρακτηριστικά του

Νικόλαος Σ. Αναγνωστόπουλος, Κοσμάς Κ. Σίδερης, Άγγελος Σ. Γεωργιάδης,
Εργαστήριο Δομικών Υλικών Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Δημοκριτείου Πανεπιστημίου
Θράκης, Βας. Σοφίας 12, Ξάνθη 671 00,

Λέξεις-κλειδιά: Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, σκωρία κάδου, υαλόθραυσμα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η δυνατότητα παραγωγής μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ) κατηγοριών αντοχής C25/30 και C30/37, με χρήση σκωρίας κάδου και υαλοθραύσματος ως λεπτό υλικό πλήρωσης. Παράλληλα με την μελέτη της ικανότητας αυτοσυμπύκνωσης που παρουσιάζουν τα ΑΣΣ που παρασκευάζονται με τα υλικά αυτά, μελετάται επισταμένως και η επίδραση της έκθεσης των παρασκευασθέντων σκυροδεμάτων σε υψηλές θερμοκρασίες. Σκοπός της εργασίας αποτελεί η μελέτη της επίδρασης των λεπτών υλικών πλήρωσης στον μηχανισμό αποφλοίωσης του σκυροδέματος και στην απομείωση των μηχανικών αντοχών του μετά την έκθεσή του σε υψηλές θερμοκρασίες.

Industrial by-products for the production of self-compacting concretes and influence of elevated temperatures on their residual mechanical properties

N.S. Anagnostopoulos, A.S. Georgiadis, K.K Sideris
Laboratory of Building Materials, School of Civil Engineering, Democritus University of Thrace,
Xanthi, GR 67100 GREECE

Key words: self-compacting concrete, glass filler, elevated temperatures, ladle furnace slag

ABSTRACT Incorporation of ladle furnace slag and glass filler as filler materials for the production of medium strength self-compacting concretes is experimentally investigated in this paper. This research focus on the spalling tendency and residual mechanical characteristics of self-compacting concretes after their exposure at elevated temperatures. The influence of ladle furnace slag and glass filler on the rheological characteristics of fresh self-compacting concretes is also investigated.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα αποτελεί την τελευταία εξέλιξη στο χώρο της τεχνολογίας του σκυροδέματος. Πρόκειται για ένα σκυρόδεμα το οποίο, όπως λέει και η λέξη, μπορεί να συμπυκνωθεί μόνο του, χωρίς τη χρήση μηχανικών μέσων, αποκλειστικά και μόνο με το ίδιο βάρος του. Κατ' αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η χρήση των ενεργοβόρων και θορυβωδών μηχανισμών συμπύκνωσης ενώ ταυτόχρονα, λόγω του μειωμένου θορύβου, καθίσταται ευκολότερη η επικοινωνία μεταξύ του τεχνικού προσωπικού. Η ευκολία ροής και αυτοσυμπύκνωσης του νέου σκυροδέματος οδηγεί επίσης στη μείωση του απαιτούμενου χρόνου διάστρωσης και σκυροδέτησης των έργων. Τέλος, η πληρέστερη συμπύκνωση που επιτυγχάνεται στα μείγματα ΑΣΣ έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και κατ' επέκταση την καλύτερη ποιότητα των έργων οπλισμένου σκυροδέματος.

Η ικανότητα αυτοσυμπύκνωσης των μειγμάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση μειωμένης ποσότητας νερού, υψηλής ποσότητας λεπτών υλικών και αυξημένης ποσότητας ισχυρού υπερρρευστοποιητή, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή εργασιμότητα. Ο επιτυχής συνδιασμός των ανωτέρω υλικών οδηγεί στην παραγωγή επιτυχούς μείγματος αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (Γεωργιάδης κα, 2006). Πολλοί ερευνητές τονίζουν την ομοιότητα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ) με το σκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας (ΣΥΕ) το οποίο επίσης παράγεται με μειωμένους λόγους νερού προς τσιμέντο και υψηλές δοσολογίες κονιάς (Sideris 2007, Ye et al 2007). Και στις δύο περιπτώσεις αναπτύσσεται μία πυκνή εσωτερική δομή, η οποία όμως έχει ως αποτέλεσμα την ψαθυρή θραύση του σκυροδέματος όταν αυτό εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες.

Σε γενικές γραμμές το σκυρόδεμα ως υλικό παρουσιάζει ικανοποιητική αντίσταση έναντι υψηλών θερμοκρασιών. Στην περίπτωση όμως των ΣΥΕ και των ΑΣΣ παρουσιάζονται επιπλοκές, οι οποίες σχετίζονται με τις αλλαγές που δημιουργούνται στη μικροδομή των υλικών όσο αυξάνεται η θερμοκρασία έκθεσης (Kalifa et al, 2007). Σε υψηλές θερμοκρασίες αρχίζει η διάλυση των ασβεστοπυριτικών ενόδρων (C-S-H), η οποία προχωρά με ταχύ ρυθμό σε θερμοκρασίες άνω των 600 C, και οδηγεί τελικά στην πλήρη καταστροφή του ιστού της τσιμεντόπαστας σε θερμοκρασίες άνω των 900 °C. Στη χαμηλή θερμοκρασιακή περιοχή (20-400 °C) εξατμίζεται το ελεύθερο νερό των πόρων ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η πίεση των νεοσχηματιζόμενων υδρατμών. Κατ' αυτό τον τρόπο οι υδρατμοί ασκούν εφελκυστικές πιέσεις στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Οι πιέσεις αυτές είναι μικρές και δεν δημιουργούν ουσιαστικά προβλήματα, όταν εκτονωθούν μέσα από το δίκτυο των τριχοειδών πόρων του σκυροδέματος. Στις περιπτώσεις όμως των ΣΥΕ και των ΑΣΣ η λεπτότερη σε σχέση με τα συμβατικά σκυροδέματα κατανομή των πόρων καθώς και η ασυνέχεια του πορώδους έχουν ως αποτέλεσμα την αδυναμία εκτόνωσης της πίεσης των υδρατμών, με αποτέλεσμα αυτή να αυξάνεται συνεχώς (Sideris 2007, Ye et al 2007, Chan et al 1999). Όταν η πίεση υπερβεί την εφελκυστική αντοχή του ιστού του σκυροδέματος, τότε αυτό θραύεται και λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της αποφλοίωσης του σκυροδέματος.

Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η δυνατότητα παραγωγής μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ) κατηγοριών αντοχής C25/30 και C30/37, με χρήση σκωρίας κάδου και υαλοθραύσματος ως λεπτό υλικό πλήρωσης. Παράλληλα με την μελέτη της ικανότητας αυτοσυμπύκνωσης που παρουσιάζουν τα ΑΣΣ που παρασκευάζονται με τα υλικά αυτά, μελετάται και η επίδραση της έκθεσης των παρασκευασθέντων σκυροδεμάτων σε υψηλές θερμοκρασίες.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Συνολικά παρασκευάστηκαν έξι μείγματα αυτοσυμπυκνόμενων σκυροδεμάτων και δύο μείγματα συμβατικών σκυροδεμάτων (ΣΣ). Τα σκυροδέματα ανήκαν στις κατηγορίες αντοχής C25/30 και C30/37 και παρασκευάστηκαν με τσιμέντο CEM II/A-M 42.5N. Χρησιμοποιήθηκαν πυριτικά και

ασβεστολιθικά αδρανή με μέγιστο κόκκο 8 mm καθώς και ασβεστολιθική άμμος. Τέλος χρησιμοποιήθηκε τελευταίας γενιάς υπερρευστοποιητής σε διαφορετικές δοσολογίες προκειμένου να αποκτήσουν τα μείγματα ικανότητες αυτοσυμπύκνωσης. Η κάθιση των συμβατικών σκυροδεμάτων ήταν ίση με 19 cm. Ως υλικό πλήρωσης για την παρασκευή των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων χρησιμοποιήθηκε εναλλακτικά ασβεστολιθικό φύλλερ, σκωρία κάδου ή λεπτοαλεσμένο υαλόθραυσμα. Η χημική σύνθεση του τσιμέντου καθώς και των λεπτόκοκκων υλικών πλήρωσης παρουσιάζεται στον Πίνακα 1. Ο λόγος νερού /τσιμέντο καθώς και η ποσότητα του τσιμέντου παρέμειναν περίπου σταθερές για όλα τα μείγματα της ίδιας κατηγορίας αντοχής. Οι αναλογίες μείξεως όλων των σκυροδεμάτων παρουσιάζονται κατωτέρω στον Πίνακα 2.

Πίνακας 1. Χημική σύσταση τσιμέντου και λεπτόκοκκων υλικών πλήρωσης.

	CEMII- A/M 42,5N	Ασβεστολιθικό φύλλερ	Σκωρία κάδου	Υαλόθραυσμα
SiO₂^a	23,85	1,8	32,5	62,1
Al₂O₃	5,22	0,45	2,5	1,6
Fe₂O₃	4,13	0,08	-	0,1
FeO	-	-	1,72	-
CaO	58,2	54,8	54,1	18
MgO	3,2	0,68	5,55	2,4
SO₃	3,3	0,05	-	0,2
K₂O	0,68	-	0,04	0
Na₂O	0,32	-	0,34	12,4
TiO₂	0,24	0,17	-	-
P₂O₅	0,06	0,02	-	0,1
SrO	0,03	-	-	-
Cr₂O₃	0,02	-	-	-
ZnO	0,01	-	-	-
LoI^b	1,57	40,5	3,19	0,4
SG^c (gr/cm³)	3,1	2,65	2,59	2,51

Παρασκευάστηκαν κύβοι ακμής 150 mm, 100mm και κύλινδροι διαστάσεων 150x300mm. Αρχικά, τα δοκίμια συντηρήθηκαν για 28 ημέρες σε θάλαμο συντηρήσεως ($20 \pm 2^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} \geq 95\%$). Η θλιπτική αντοχή όλων των μειγμάτων μετρήθηκε στην ηλικία των 28 ημερών σε κυβικά δοκίμια ακμής 150mm. Μετά την ηλικία των 28 ημερών τα υπόλοιπα δοκίμια μεταφέρθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου ($20 \pm 20\text{C}$, $\text{RH}=55 - 65\%$), όπου και παρέμειναν μέχρι την ηλικία των 180 ημερών. Στην ηλικία αυτή τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ηλεκτρικό φούρνο και αναπτύχθηκε υψηλή θερμοκρασία με ρυθμό $10^{\circ}\text{C}/\text{λεπτό}$, έως ότου έφθασε στα επιθυμητά επίπεδα. Η μέγιστη θερμοκρασία ήταν 300 ή 600°C κατά περίπτωση και αφότου αυτή επιτεύχθηκε, διατηρήθηκε για 1 ώρα. Στην συνέχεια, τα δοκίμια επανήλθαν στη θερμοκρασία περιβάλλοντος εντός του φούρνου. Κατόπιν, μετρήθηκαν οι μηχανικές τους αντοχές: η θλιπτική αντοχή (σε κυβικά δοκίμια) και η εφελκυστική αντοχή διαρρήξεως (σε κυλινδρικά δοκίμια). Οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν συμφωνούν με τους κανονισμούς ASTM C39 και C496, για την μέτρηση της θλιπτικής αντοχής

και της αντοχής εφελκυσμού διαρρήξεως, αντίστοιχα. Τα δοκίμια αναφοράς συντηρήθηκαν όπως προηγουμένως αναφέρθηκε και μετρήθηκαν οι μηχανικές τους ιδιότητες στη θερμοκρασία των $20\pm 2^{\circ}\text{C}$. Η εναπομείνουσα θλιπτική αντοχή υπολογίσθηκε ως η μέση τιμή των μετρήσεων τριών δοκιμίων. Η εφελκυστική αντοχή διαρρήξεως υπολογίσθηκε ως ο μέσος όρος των μετρήσεων δύο δοκιμίων.

Πίνακας 2: Αναλογίες μείξεως αυτοσυμπυκνούμενων και συμβατικών σκυροδεμάτων.

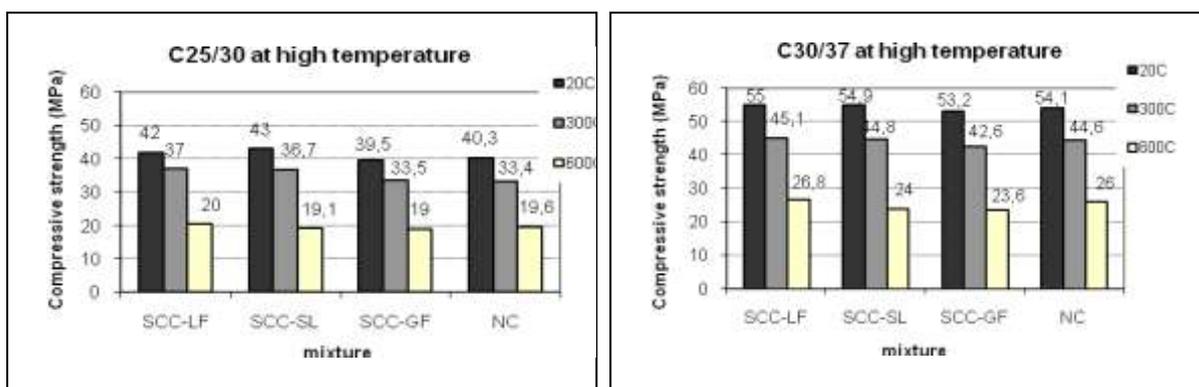
Αναλογίες μείξεως (kg/m^3)	ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ						ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	
	Ασβεστολιθικό φίλλερ		Σκωρία κάδου		Υαλόθραυσμα		NC C25/30 NC	NC C30/37 NC
	SCC C25/30 LF	SCC C30/37 LF	SCC C25/30 SL	SCC C30/37 SL	SCC C25/30 GF	SCC C30/37 GF		
CEMII-A/M 42,5N	335	375	340	375	340	380	330	375
Φίλλερ	135	100	0	0	0	0	0	0
Σκωρία	0	0	135	100	0	0	0	0
Υαλόθραυσμα	0	0	0	0	130	100	0	0
Άμμος	915	900	825	862	845	862	940	870
Γαρμπίλι	800	800	800	800	800	800	927	955
Νερό	185	186	188	189	190	194	183	186
Υπερ/τής	1,63%	1,88%	1,29%	1,74%	1,16%	1,17%	1,0%	1,0%
W/C	0,55	0,50	0,55	0,50	0,56	0,51	0,55	0,50
W/P	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40	0,40	0,55	0,50
Ποσοστό αέρα (%)	1,70%	1,60%	1,90%	1,70%	1,40%	1,20%	2,10%	1,80%
Κάθιση (cm)	-	-	-	-	-	-	19	20
ΕξάπλωσηD (cm)	75,5	75	75,5	75,5	74	73,5	-	-
t ₅₀ (sec)	2	1,72	4,72	4,25	1,66	1,25	-	-
V FUNNEL 1 (sec)	10,5	10	8,49	9,18	4,38	6,06	-	-
V FUNNEL 2 (sec)	28	15	14,4	11,25	5,16	13	-	-
J RING H (cm)	0,3	0,3	1	0,9	0,6	0,5	-	-
J RING D (cm)	68	68	67	68	66	68	-	-
LBOX (h ₂ /h ₁)	0,88	0,88	0,83	0,85	0,82	0,84	-	-
t ₂₀₀ (sec)	1	1	2,5	3,41	1,2	1,35	-	-
t ₄₀₀ (sec)	2,01	3	5,5	5,1	1,4	2,25	-	-
f _{c28} (Mpa)	37,1	54	37,7	53,5	38,3	49	36	52,7

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η θλιπτική αντοχή όλων των παρασκευασθέντων μειγμάτων στην ηλικία των 28 ημερών παρουσιάζεται στον Πίνακα 2. Γίνεται κατ' αρχάς φανερό ότι η αντοχή των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή των συμβατικών της ίδιας κατηγορίας αντοχής, ανεξάρτητα από το είδος του λεπτόκοκκου υλικού. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην πυκνότερη διεπιφάνεια αδρανών-τσιμεντόπαστας, η οποία σχηματίζεται στην περίπτωση των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων (Zhu et al 2005).

Μεταξύ των αυτοσυμπυκνούμενων μειγμάτων της ίδιας κατηγορίας αντοχής υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις όσον αφορά την αντοχή. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται στη χρήση διαφορετικών λεπτόκοκκων υλικών με διαφορετική απορροφητικότητα και διαφορετική χημική σύσταση. Η χρήση σκωρίας κάδου, λόγω της αυξημένης απορροφητικότητάς της, οδήγησε στην παραγωγή ενός πιο συνεκτικού και «αργού» -εν συγκρίση με τα υπόλοιπα- μείγματος αυτοσυμπυκνόμενου σκυροδέματος, με σημαντικά λιγότερη απαιτούμενη ποσότητα υπερρευστοποιητή, ιδίως για τη χαμηλή κατηγορία αντοχής C25/30. Τα μείγματα που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικό φύλλερ παρουσίασαν καλύτερα ρεολογικά χαρακτηριστικά σε νωπή κατάσταση, χρειάστηκαν όμως για την παραγωγή τους μεγαλύτερες ποσότητες υπερρευστοποιητή. Τέλος, τα μείγματα που παρασκευάστηκαν με προσθήκη υαλοθραύσματος, παρουσίασαν την καλύτερη ρεολογική συμπεριφορά και αποδείχτηκαν οικονομικότερα, αναφορικά με την απαιτούμενη ποσότητα υπερρευστοποιητή, λόγω της γεωμετρίας των κόκκων του υλικού καθώς και της χαμηλής απορροφητικότητάς του

Η εναπομείνουσα αντοχή όλων των σκυροδεμάτων μετά από έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Σύμφωνα με άλλους ερευνητές (Sideris 2007, Chan et al 1999), διακρίνουμε τρεις θερμοκρασιακές περιοχές, αναφορικά με την απώλεια θλιπτικής αντοχής: 20°C-400°C, 400°C-800°C και 800°C-1200°C, Σύμφωνα με τους ίδιους ερευνητές, η εναπομείνουσα θλιπτική αντοχή μετά από έκθεση στην πρώτη περιοχή παρουσιάζει μικρή μόνο μείωση, ενώ αντίθετα, σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 400 °C, η εναπομείνουσα αντοχή μειώνεται υπερβολικά. Σε γενικές γραμμές η τάση αυτή παρατηρήθηκε και στα αυτοσυμπυκνόμενα σκυροδέματα που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.



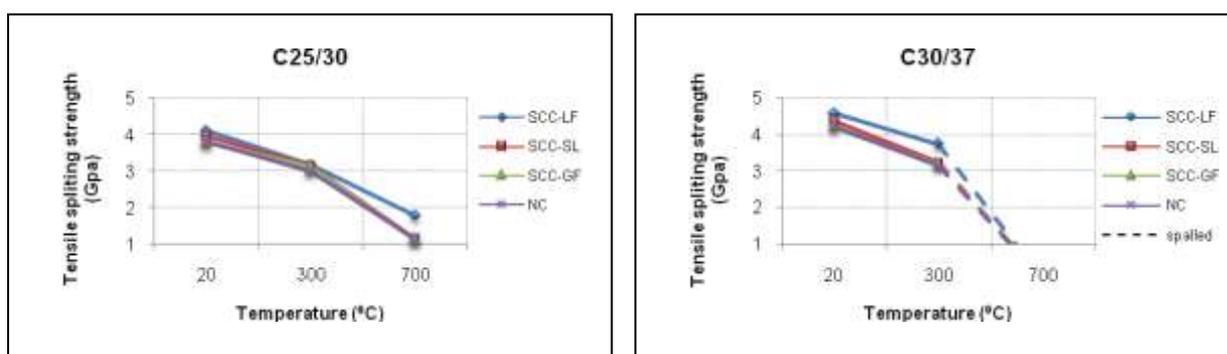
Σχήμα 1: Εναπομείνουσα θλιπτική αντοχή αυτοσυμπυκνόμενων και συμβατικών σκυροδεμάτων μετά από έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η απώλεια της θλιπτικής αντοχής των μειγμάτων SCC25/30 κυμάνθηκε μεταξύ 12 και 15% στη χαμηλή θερμοκρασιακή περιοχή 20°C -300°C. Στην περίπτωση των μειγμάτων SCC 30/37 η απώλεια της αντοχής αυξήθηκε κάπως φτάνοντας το 18%. Η αντίστοιχη απώλεια αντοχής για τα

συμβατικά σκυροδέματα C25/30 και C30/37 μετά από έκθεση στους 300 °C ήταν 18% και 17.6% αντίστοιχα.

Η απώλεια της θλιπτικής αντοχής των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων μετά από την έκθεσή τους στους 600 °C ήταν πολύ μεγαλύτερη και κυμάνθηκε μεταξύ 52% και 57%, ενώ παράλληλα σημειώθηκαν εκρήξεις στα κυλινδρικά δοκίμια όλων των μειγμάτων. Η εκρηκτική αποφλοιώση ήταν πολύ εντονότερη στα δοκίμια των μειγμάτων που παρασκευάστηκαν με σκωρία κάδου. Στην περίπτωση αυτή εκρήξεις σημειώθηκαν και στα κυβικά δοκίμια.

Η μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής διαρρήξεως όλων των μειγμάτων μετά από έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Από το Σχήμα αυτό γίνεται φανερό ότι, σε αντίθεση με όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω για την εναπομείνουσα θλιπτική αντοχή, η εφελκυστική αντοχή διαρρήξεως μειώνεται απότομα ήδη μετά από έκθεση στους 300 °C για όλα τα μείγματα. Σύμφωνα με τους Chan et al (Chan et al 1999), το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη δημιουργία πλήθους μικρορωγμών λόγω της διαφορετικής θερμικής διαστολής των υλικών. Όλα τα μείγματα, αυτοσυμπυκνούμενα και συμβατικά, παρουσιάζουν μεγάλη μείωση της εφελκυστικής αντοχής διαρρήξεως μετά από έκθεση στους 300 °C. Η μείωση είναι ακόμα μεγαλύτερη μετά από έκθεση στους 600 °C. Στην περίπτωση αυτή το σύνολο των δοκιμίων των μειγμάτων της υψηλότερης κατηγορίας αντοχής C30/37 καταστράφηκαν και δεν κατέστη δυνατόν να ληφθούν μετρήσεις.



Σχήμα 2: Εφελκυστική αντοχή διαρρήξεως αυτοσυμπυκνούμενων και συμβατικών σκυροδεμάτων μετά από έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Τα ακόλουθα συμπεράσματα προέκυψαν μετά την ολοκλήρωση της παρούσας έρευνας:

Το φαινόμενο της εκρηκτικής αποφλοιώσης έλαβε χώρα σε όλα τα μείγματα, αυτοσυμπυκνούμενα και συμβατικά, μετά την έκθεσή τους στους 600 °C.

Μεταξύ των μειγμάτων της ίδιας κατηγορίας αντοχής, τα αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα εμφάνισαν υψηλότερες τάσεις καταστροφής λόγω εκρηκτικής αποφλοιώσης, γεγονός που εξαρτήθηκε άμεσα από το είδος του λεπτόκοκκου υλικού που χρησιμοποιήθηκε.

Τα ΑΣΣ που παρασκευάστηκαν με σκωρία κάδου, εμφάνισαν τις υψηλότερες απώλειες μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, κυρίως λόγω εντονότερων εκρηκτικών αποφλοιώσεων. Τα μείγματα αυτά όμως ανέπτυξαν υψηλότερες αντοχές στην ηλικία των 28 ημερών, ενώ η χρήση της σκωρίας κάδου οδήγησε σε σημαντική μείωση της απαιτούμενης ποσότητας υπερρρευστοποιητή.

Τα ΑΣΣ που παρασκευάστηκαν με υαλόθραυσμα, εμφάνισαν τις καλύτερες ρεολογικές ιδιότητες σε νωπή κατάσταση, αλλά παρουσίασαν ιδιαίτερα υψηλές απώλειες αντοχών μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες.

5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Γεωργιάδης Α., Σίδερης Κ.Κ., Αναγνωστόπουλος Ν.: «Μία βελτιωμένη μέθοδος σχεδιασμού και ποιοτικού ελέγχου μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (ΑΣΣ)», Πρακτικά 15ου Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου 2006, Τόμος Γ', σελ. 427-438.

Chan, Y.N., Peng, G.F. and Anson, M., 'Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures', *Cement and Concrete Composites* 21 (1999) 23-27.

Kallifa, P., Menneteau, F.D. and Quenard, D., 'Spalling and pore pressure in HPC at elevated temperatures' *Cement and Concrete Research* 30 (2000) 1915-1927.

Sideris, K.K., 'Mechanical characteristics of self consolidating concrete exposed to elevated temperatures', *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, (Aug 2007) 648-654.

Ye, G., Liu, X., De Schutter, D., Taerwe, L. and Vandvelde, P., 'Phase distribution and microstructural changes of self-compacting concrete paste at elevated temperature', *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 978-987.

Zhu W. and Bartos P.J.M., 'Microstructure and properties of interfacial transition zone in SCC', *Proceedings of the 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete*, 26-28 May 2005, Changsha, (China 2005). 319-327.

Αξιοποίηση των οικοδομικών απορριμμάτων στον δομικό τομέα

Χ.-Τ. Γκαλμπένης και Σ. Τσίμας

Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Τ.Κ. 15773

Λέξεις Κλειδιά: Οικοδομικά Απορρίμματα, Ανακυκλωμένα Αδρανή Σκυροδέματος, Ανακυκλωμένα Αδρανή Τοιχοποιίας, Κλίνκερ, Τσιμέντο Portland

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η αξιοποίηση επιλεγμένων οικοδομικών απορριμμάτων (ΟΑ), που προέρχονται από εργασίες κατασκευής και κατεδάφισης κτιρίων, ως υποκατάστατων των συμβατικών πρώτων υλών της βιομηχανίας τσιμέντου για την παραγωγή του κλίνκερ. Ειδικότερα, περιλαμβάνει την συλλογή και τον χαρακτηρισμό των Ο.Α., τον έλεγχο της συμβατότητάς τους με τις πρώτες ύλες της βιομηχανίας τσιμέντου, τον προσδιορισμό του ποσοστού εισαγωγής τους στο μίγμα των πρώτων υλών, την μελέτη της διαδικασίας της έψησης για τις προκύπτουσες συνθέσεις φαρίνας και τον έλεγχο των ποιοτικών χαρακτηριστικών τόσο των παραγόμενων κλίνκερ όσο και των προκυπτόντων τσιμέντων Portland. Από τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας προκύπτει ότι τα εξεταζόμενα Ο.Α. μπορούν να αποτελέσουν αξιόπιστοι φορείς ασβεστίου και πυριτίου στο μίγμα των πρώτων υλών του τσιμέντου. Η εισαγωγή τους στη φαρίνα καταδεικνύει την θετική επίδρασή τους στη διαδικασία της έψησης βελτιώνοντας πολλαπλά την λειτουργία της συγκεκριμένης διεργασίας. Επιπρόσθετα, από την αξιολόγηση των παραγόμενων κλίνκερ και των προκυπτόντων τσιμέντων Portland, προκύπτει ότι η παρουσία των Ο.Α. δεν επηρεάζει αρνητικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους.

Exploitation of construction and demolition waste in structural sector

C.-T. Galbenis and S.Tsimas

Laboratory of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Heroon Polytechniou 9, Zografou Campus, GR-15773

Key Words: Construction and Demolition Waste, Recycled Concrete Aggregates, Recycled Masonry Aggregates, Clinker, Portland Cement

ABSTRACT: The scope of the present paper is the exploitation of selected Construction and Demolition (C&D) waste, obtained from buildings C&D works, as substitutes of the cement industry conventional raw materials for the production of clinker cement. Particularly, contains the collection and characterization of C&D waste, their composition compatibility examination with the composition of the cement raw meal of industrial origin, their introduction percentage determination into the cement raw meal mixtures, the burnability study of the produced cement raw meal mixtures and the quality characteristics examination of the resulted clinkers and Portland cements. From the results of this paper is concluded that examined C&D waste could be credible carriers of calcium and silica into the cement raw materials mixture. Their introduction into the cement raw meal indicates their positive effect in terms of burning process, improving significantly the operation of this procedure. Moreover, from the analysis of the produced clinkers and the arise Portland cements is resulted that the presence of C&D waste does not affect negatively their quality characteristics.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα Οικοδομικά Απορρίμματα (ΟΑ) αποτελούν μεγάλο μέρος του συνόλου των στερεών απορριμμάτων στις περισσότερες αστικές περιοχές. Σημαντικές ποσότητες προκύπτουν καθημερινά από οικοδομικές εργασίες κάθε είδους, έργα τεχνικών υποδομών, εκσκαφές και φυσικές ή τεχνολογικές καταστροφές. Τα απορρίμματα που παράγονται από τις ανωτέρω δραστηριότητες είναι σχεδόν στο σύνολό τους αδρανή υλικά, δηλαδή υλικά τα οποία δεν υφίστανται καμία σημαντική χημική, φυσική ή βιολογική μετατροπή και για αυτόν τον λόγο μπορούν να θεωρηθούν ιδιαίτερα φιλικά προς το περιβάλλον. Ο κύριος όγκος των ΟΑ αποτελείται από σκυρόδεμα, υλικά τοιχοποιίας (τούβλα, κονιάματα), άσφαλτο, γυαλί, ξύλο, πλαστικό, χάλυβα, αλουμίνιο κλπ. Τα υλικά αυτά είναι ανακυκλώσιμα και επομένως μπορούν να οδηγηθούν σε μονάδες ανακύκλωσης παρέχοντας νέα εκμεταλλεύσιμα δομικά υλικά [1].

Από την άλλη πλευρά, το ενδιαφέρον των τσιμεντοβιομηχανιών στη χρήση εναλλακτικών υλικών για αντικατάσταση μέρους των συμβατικών πρώτων υλών για την παραγωγή του κλίνκερ ολοένα και αυξάνεται. Διάφορες εναλλακτικές πρώτες ύλες, κυρίως παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών, έχουν προταθεί για τον ανωτέρω σκοπό. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι η ερυθρά ιλύς, η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία υψικαμίνων, η τέφρα φλοιού ρυζιού κ.α. Η αξιοποίηση των προαναφερθέντων παραπροϊόντων επιτρέπει στις βιομηχανίες τσιμέντου να διαδραματίσουν κυρίαρχο ρόλο στην ανακύκλωσή τους ενώ παράλληλα συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση των εξορυσσόμενων φυσικών πρώτων υλών [2].

Σημείο προβληματισμού της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η δυνατότητα αξιοποίησης των οικοδομικών απορριμμάτων, ως υποκατάστατων των φυσικών πρώτων υλών, στη βιομηχανία τσιμέντου για την παραγωγή του κλίνκερ. Ειδικότερα, η εν λόγω ερευνητική προσπάθεια στράφηκε στους ακόλουθους άξονες, α) χαρακτηρισμός ΟΑ, έλεγχος συμβατότητας της σύστασης τους με τη σύσταση βιομηχανικής φαρίνας και προσδιορισμός – παρασκευή συνθέσεων φαρίνας, β) μελέτη εψησιμότητας συνθέσεων φαρίνας, και γ) παρασκευή κλίνκερ και τσιμέντου Portland και έλεγχος των ποιοτικών τους χαρακτηριστικών [3].

2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

2.1 Συλλογή, χαρακτηρισμός και προσδιορισμός αναλογιών ανάμιξης των πρώτων υλών

Τα ΟΑ που συλλέχθηκαν ήταν τα Ανακυκλωμένα Αδρανή Σκυροδέματος (ΑΑΣ) και τα Ανακυκλωμένα Αδρανή Τοιχοποιίας (ΑΑΤ). Επίσης, συλλέχθηκε και Βιομηχανική Φαρίνα. Ως προς το κοκκομετρικό κλάσμα συλλογής, τα ΑΑΣ και ΑΑΤ παρελήφθησαν στα κλάσματα 0-8mm και >32mm αντίστοιχα, ενώ η ΒΦ παρουσίασε υπόλειμμα στο κόσκινο των 90μm περίπου 12%. Στον πίνακα 1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι χημικές αναλύσεις των εξεταζόμενων πρώτων υλών.

Πίνακας 1. Χημική σύσταση (%κ.β.) ΑΑΣ, ΑΑΤ και ΒΦ

Πρώτη ύλη	Συστατικό (% κ.β.)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI
ΑΑΣ	4,78	1,32	0,67	46,19	1,29	0,11	0,07	0,2	40,36
ΑΑΤ	44,59	9,70	4,58	26,77	2,31	1,49	0,83	0,14	9,14
ΒΦ	13,55	3,31	2,55	41,95	1,98	0,41	0,13	0,20	35,12

Ο χαρακτηρισμός των ΑΑΣ και ΑΑΤ από χημικής, ορυκτολογικής και θερμικής απόψεως κατέδειξε την ασβεστούχα και πυριτική προέλευση τους αντίστοιχα, ενώ επιπρόσθετα διαφάνηκε η συμβατότητα της σύστασης τους με την σύσταση της ΒΦ [3,4]. Το γεγονός αυτό επέτρεψε τον προσδιορισμό και την παρασκευή συνθέσεων φαρίνας που να περιέχουν στο μίγμα των πρώτων υλών τους τα ΟΑ. Ο υπολογιστικός προσδιορισμός των συνθέσεων φαρίνας σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρείται η τιμή του δείκτη LSF στα επίπεδα της ΒΦ, ενώ οι υπόλοιποι δείκτες (Sm, Am, Hm) να βρίσκονται εντός των επιθυμητών ή συνήθων ορίων και κατά το δυνατόν πλησιέστερα στις αντίστοιχες τιμές της ΒΦ. Από την προαναφερθείσα διαδικασία κατέστη δυνατό η εισαγωγή των ΑΑΣ και ΑΑΤ στη ΒΦ να γίνει σε αξιοσημείωτα ποσοστά (ακόμα και 100%), ενώ αντικείμενο διερεύνησης αποτέλεσαν οι φαρίνες που περιείχαν ΟΑ σε ποσοστό 20, 40, 60, 80 και 100% (η ΒΦ αποτέλεσε την φαρίνα αναφοράς). Σε ότι αφορά την εργαστηριακή παρασκευή των εξεταζόμενων φαρινών πιστοποιήθηκε η επάρκεια της ομοιογένειας τους από τον προσδιορισμό της απώλειας πύρωσης, ενώ το υπόλειμμα στο κόσκινο των 90μm προσδιορίστηκε για το σύνολο των φαρινών 10±1% [5]. Στον πίνακα 2 που ακολουθεί παρουσιάζεται ο προσδιορισμός των αναλογιών ανάμιξης και οι τιμές των κύριων δεικτών των πρώτων υλών για κάθε εξεταζόμενη φαρίνα.

Πίνακας 2. Προσδιορισμός αναλογιών ανάμιξης και τιμών κύριων δεικτών πρώτων υλών εξεταζόμενων φαρινών

Συνθέσεις φαρίνας	Αναλογία ανάμιξης πρώτων υλών (% κ.β.)			Κύριοι δείκτες πρώτων υλών*			
	ΒΦ	ΑΑΣ	ΑΑΤ	LSF	Sm	Am	Hm
ΒΦ	100	0	0	0,96	2,31	1,3	2,16
Φ1	80	15	5	0,95	2,41	1,41	2,15
Φ2	60	31	9	0,96	2,51	1,52	2,2
Φ3	40	46	14	0,95	2,64	1,67	2,18
Φ4	20	62	18	0,97	2,75	1,84	2,24
Φ5	0	77	23	0,95	2,89	2,07	2,22

*LSF=C/(2.8S+1.18A+0.65F), Sm=S/(A+F), Am=A/F, Hm=C/(S+A+F), όπου C,S,A,F οι % περιεκτικότητες των CaO, SiO₂, Al₂O₃ και Fe₂O₃ αντίστοιχα στο μίγμα πρώτων υλών (φαρίνα)

2.2 Μελέτη εψησιμότητας συνθέσεων φαρίνας

Αντικείμενο αυτής της ενότητας αποτέλεσε η μελέτη ως προς την ικανότητα έψησης των εξεταζόμενων φαρινών. Για την επίτευξη αυτού του σταδίου της εργασίας, αντιπροσωπευτικό δείγμα των εξεταζόμενων φαρινών υποβλήθηκε σε θερμική κατεργασία στους 1000, 1100, 1200, 1300, 1350, 1400 και 1450 °C. Η επιλογή των συγκεκριμένων θερμοκρασιών έγινε προκειμένου να αξιολογηθεί η πορεία της έψησης σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών που καταλήγει στη συνήθη θερμοκρασία κλινκεροποίησης (1450 °C). Η αποτίμηση της εψησιμότητας των φαρινών έγινε με τον προσδιορισμό του ποσοστού της ελευθέρως ασβέστου (fCaO) που δεν έχει αντιδράσει με κάποια από τα ορυκτολογικά συστατικά των παραγόμενων προϊόντων στις ανωτέρω θερμοκρασίες έψησης [3,6,7]. Τα αποτελέσματα προσδιορισμού της fCaO στις προβλεπόμενες θερμοκρασίες έψησης παρουσιάζονται στον πίνακα 3 που ακολουθεί.

Πίνακας 3. Προσδιορισμός τιμών fCaO (% κ.β.) στις εξεταζόμενες θερμοκρασίες έψησης

Συνθέσεις φαρίνας	fCaO (% κ.β.)						
	Θερμοκρασία (°C)						
	1450	1400	1350	1300	1200	1100	1000
BΦ	1,469	2,845	7,905	13,302	25,375	39,42	45,57
Φ1	0,986	1,637	6,206	10,428	22,56	35,478	42,38
Φ2	0,817	1,324	5,475	12,341	22,036	36,266	41,469
Φ3	0,677	1,073	4,004	9,421	23,387	33,901	40,557
Φ4	0,733	1,072	4,792	9,882	15,881	29,96	37,367
Φ5	0,705	0,875	4,058	9,05	20,557	30,747	38,734

Η μελέτη της εψησιμότητας των φαρινών πραγματοποιήθηκε και με τις τεχνικές της θερμικής βαρυτομετρικής ανάλυσης (TG) και της διαφορικής θερμικής ανάλυσης (DTA) [3]. Τα σημαντικότερα αποτελέσματα από την εφαρμογή αυτών των τεχνικών δείχνονται στον πίνακα 4.

Πίνακας 4. Αξιολόγηση δεδομένων TG και DTA εξεταζόμενων φαρινών

Συνθέσεις φαρίνας	TG		DTA		
	Απώλεια μάζας (% κ.β.)		Θερμοκρασία διάσπασης CaCO ₃ (°C)		
	600 - 950 °C	25-1450 °C	Μέγιστη απόδοση αντίδρασης διάσπασης CaCO ₃	Έναρξη	Λήξη
BΦ	34,87	38,84	863	671	911
Φ1	33,22	35,68	856	670	897
Φ2	32,39	35,01	854	665	892
Φ3	31,08	34,69	847	657	888
Φ4	30,16	33,88	844	656	882
Φ5	28,99	32,94	837	649	868

2.3 Μελέτη της παραγωγής κλίνκερ και τσιμέντου Portland σε μεγαλύτερη κλίμακα και έλεγχος των ιδιοτήτων τους.

Με βάση την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της μελέτης εψησιμότητας, πραγματοποιήθηκε μαζικότερη παραγωγή κλίνκερ για το σύνολο των φαρινών. Η εργαστηριακή παρασκευή κλίνκερ έγινε στις θερμοκρασίες έψησης των 1400°C και 1450°C. Οι θερμοκρασίες έψησης των 1400°C και 1450°C επιλέχθηκαν με κριτήριο το γεγονός ότι το σύνολο των εξεταζόμενων φαρινών επέδειξε θετικά αποτελέσματα ως προς τον προσδιορισμό των τιμών της fCaO στις συγκεκριμένες θερμοκρασίες ενώ και η δομή των παραγόμενων προϊόντων έψησης στους 1400°C και 1450°C (XRD) φάνηκε να ανταποκρίνεται σε δομή τυπικών κλίνκερ. Και σε αυτήν την περίπτωση η διασφάλιση της ολοκλήρωσης της διαδικασίας της έψησης έγινε με τον προσδιορισμό των τιμών της fCaO ενώ παράλληλα έλαβε χώρα ο ποσοτικός προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης των παραγόμενων κλίνκερ με εφαρμογή της μεθόδου Rietveld [3,8,9]. Η αποδοχή των ποιοτικών χαρακτηριστικών των παραγόμενων κλίνκερ επέτρεψε, εν συνεχεία, να λάβει χώρα η εργαστηριακή παρασκευή τσιμέντων Portland για το σύνολο των εξεταζόμενων φαρινών ενώ επιπρόσθετα πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος των φυσικών και μηχανικών τους ιδιοτήτων [3,8,9]. Για την παρασκευή των τσιμέντων Portland, το σύνολο των κλίνκερ που προέκυψαν κατά τη θερμική κατεργασία των φαρινών στις θερμοκρασίες των 1450°C και 1400°C συναλέστηκε με ορυκτή γύψο. Στόχος αυτής της διαδικασίας ήταν η παραγωγή τσιμέντων Portland τύπου I κατηγορίας αντοχών 42,5N. Το σύνολο των παραγόμενων τσιμέντων ελέγχθηκε

ως προς τη λεπτότητά τους με τη βοήθεια της συσκευής Blaine. Προκειμένου να αξιολογηθούν ως προς τα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά, τα τσιμέντα Portland που παρήχθησαν υποβλήθηκαν σε όλες τις δοκιμές που προβλέπονται από το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 σε σχέση με τις φυσικομηχανικές τους ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκαν οι θλιπτικές αντοχές στις ηλικίες των 2, 7, 28 και 90 ημερών από την ημερομηνία παραγωγής τους. Για τον προσδιορισμό των θλιπτικών αντοχών ακολουθήθηκαν όλα τα στάδια που προβλέπονται από το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 196-1. Η μέτρηση του χρόνου αρχής και τέλους πήξης έγινε με τη βοήθεια της συσκευής Vicat σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-3. Παράλληλα με τον προσδιορισμό των χρόνων πήξης, υπολογίστηκε για το σύνολο των παραγόμενων τσιμέντων η απαίτηση τους σε νερό. Αναφορικά με την μέτρηση της σταθερότητας όγκου, αυτή πραγματοποιήθηκε με τη δοκιμή Le Chatelier όπως ορίζει το πρότυπο EN 196-3.

3 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Αποτίμηση εψησιμότητας συνθέσεων φαρίνας

Ο προσδιορισμός των τιμών της ελευθέρως ασβέστου (fCaO) κατέδειξε, για το σύνολο των φαρινών που περιέχουν τα ΑΑΣ και ΑΑΤ, ότι ευνοείται η διαδικασία της έψησης σε σχέση με την έψηση της φαρίνας αναφοράς. Είναι μάλιστα χαρακτηριστικό ότι σε όλες τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες έψησης, η τιμή της fCaO εμφανίζεται μειωμένη στις φαρίνες που περιέχουν τα ΟΑ σε σχέση με την ΒΦ (βλέπε πίνακα 3). Σαφής συσχέτιση ανάμεσα στην τιμή της fCaO και στο ποσοστό συμμετοχής των ΑΑΣ και ΑΑΤ στο μίγμα των πρώτων υλών δεν μπορεί να υπάρξει για τη θερμοκρασιακή περιοχή 1000°C - 1300°C. Ωστόσο, με εξαίρεση τη θερμοκρασία των 1300°C διαμορφώνεται η τάση οι συνθέσεις Φ4 και Φ5 να παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές fCaO σε σχέση με τις υπόλοιπες συνθέσεις. Στην θερμοκρασιακή περιοχή 1350-1450°C διαφαίνεται, σε γενικές γραμμές, η τάση να μειώνεται η τιμή της fCaO με την αύξηση του ποσοστού υποκατάστασης της ΒΦ από τα εξεταζόμενα ΟΑ. Στην περιοχή των υψηλών θερμοκρασιών (1350-1450°C) διαπιστώνεται ότι η υποκατάσταση της ΒΦ από τα ΑΑΣ και ΑΑΤ σε ποσοστό μεγαλύτερο του 60% δεν επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς την έψηση. Επίσης διαπιστώθηκε ότι οι τιμές της fCaO στους 1400°C για το σύνολο των φαρινών που περιέχουν ΟΑ εμφανίζονται μικρότερες του 2, γεγονός που πιθανόν να υποδηλώνει ότι έχουν σχηματιστεί πλήρως οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις του κλίνκερ σε θερμοκρασία σημαντικά μικρότερη από τη συνήθη θερμοκρασία κλινκεροποίησης (1450°C).

Από την μελέτη της έψησης που πραγματοποιήθηκε με την αξιοποίηση των δεδομένων της θερμοβαρυτομετρικής (TG) ανάλυσης, προέκυψε ότι η συνολική απώλεια μάζας στη θερμοκρασιακή περιοχή 25-1450 °C μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ΑΑΣ και ΑΑΤ στο μίγμα των πρώτων υλών. Η εικόνα των καμπυλών της θερμοβαρυτομετρικής ανάλυσης (TG) έδειξε ότι για το σύνολο των εξεταζόμενων φαρινών το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής απώλειας μάζας αποδίδεται στη διάσπαση των ανθρακικών (CaCO₃, MgCO₃) η οποία λαμβάνει χώρα στη περιοχή 600-950 °C. Σε σχέση με τις υπόλοιπες διεργασίες που πραγματοποιούνται στη εξεταζόμενη θερμοκρασιακή περιοχή (απομάκρυνση χημικώς ενωμένων νερών, αφυδροξυλίωση αργιλικών ορυκτών και πορτλαντίτη, σχηματισμός κύριων φάσεων του κλίνκερ, αντιδράσεις κλινκεροποίησης), διαπιστώθηκε ότι συνοδεύονται από μικρές μεταβολές της μάζας για όλες τις εξεταζόμενες φαρίνες. Η απώλεια μάζας που αντιστοιχεί στη θερμοκρασιακή περιοχή διάσπασης των ανθρακικών παρατηρήθηκε ότι μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού υποκατάστασης της ΒΦ από τα ΑΑΣ και ΑΑΤ. Το γεγονός αυτό θα πρέπει να αποδοθεί στη παρουσία λιγότερων ανθρακικών στην περίπτωση των φαρινών που περιέχουν ΟΑ, καθώς τα ΑΑΣ και ΑΑΤ συνδράμουν ως φορείς ασβεστίου στο μίγμα των πρώτων όχι μόνο με τη μορφή του CaCO₃ αλλά και με την μορφή τόσο του πορτλαντίτη – Ca(OH)₂ όσο και των ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων – CSH. Στις φυσικές πρώτες ύλες και ειδικότερα στον ασβεστόλιθο ο φορέας ασβεστίου περιέχεται, κατά κύριο λόγο, με τη μορφή του CaCO₃.

Από την αξιοποίηση των δεδομένων της διαφορικής θερμικής ανάλυσης (DTA) στην ερμηνεία της μελέτης της έψησης των εξεταζόμενων φαρινών προέκυψε ότι το σύνολο των εξεταζόμενων φαρινών επέδειξε μία ισχυρά ενδόθερμη δράση η οποία αποδίδεται στη διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου – CaCO_3 . Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό υποκατάστασης της ΒΦ από τα ΑΑΣ και ΑΑΤ τόσο περισσότερο μετατοπισμένη προς χαμηλότερη θερμοκρασία είναι η αντίδραση διάσπασης του CaCO_3 (βλέπε πίνακα 4). Η συγκεκριμένη συμπεριφορά θα πρέπει να αποδοθεί στη φύση του CaCO_3 , καθώς στην περίπτωση των φαρινών που περιέχουν τα ΟΑ, το περιεχόμενο σε αυτές CaCO_3 δεν προέρχεται μόνο από τις φυσικές πρώτες ύλες (ασβεστόλιθος που περιέχεται στη ΒΦ, ασβεστολιθικά αδρανή που υπάρχουν στα ΑΑΣ και ΑΑΤ) αλλά ένα μέρος του έχει προκύψει από την ενανθράκωση του πορτλαντίτη – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ και πιθανόν από την ενανθράκωση των ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων – CSH. Το CaCO_3 που έχει προκύψει από την ενανθράκωση των $\text{Ca}(\text{OH})_2$ και CSH έχει την ιδιότητα να διασπάται σε χαμηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με το CaCO_3 που προέρχεται από τις φυσικές πρώτες ύλες. Η προγενέστερη διάσπαση του CaCO_3 στην περίπτωση των φαρινών που περιέχουν τα ΟΑ έχει ως αποτέλεσμα την αρχή σχηματισμού των κύριων φάσεων του κλίνκερ (C_2S , C_3A και C_4AF) σε χαμηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με τη θερμοκρασία σχηματισμού των αντίστοιχων φάσεων της ΒΦ.

3.2 Παραγωγή κλίνκερ σε μεγαλύτερη κλίμακα στους 1450°C και 1400°C

Η διασφάλιση της διαδικασίας της έψησης, για το σύνολο των παραγόμενων κλίνκερ, στις θερμοκρασίες έψησης των 1400°C και 1450°C, πραγματοποιήθηκε με τον προσδιορισμό των τιμών της fCaO (πίνακας 5).

Πίνακας 5. Τιμές fCaO (%κ.β.) παραγόμενων κλίνκερ στους 1400°C και 1450°C

Συνθέσεις φαρίνας	fCaO (% κ.β.)	
	Θερμοκρασία έψησης	
	1450°C	1400°C
ΒΦ	1,859	2,44
Φ1	1,183	1,366
Φ2	1,045	1,196
Φ3	0,705	1,074
Φ4	0,875	0,927
Φ5	0,536	0,854

Ο προσδιορισμός των τιμών της fCaO των παραγόμενων κλίνκερ κατέδειξε την θετική συνεισφορά των ΑΑΣ και ΑΑΤ στην εψησιμότητα των εξεταζόμενων φαρινών. Η μείωση των τιμών της fCaO ήταν χαρακτηριστική για το σύνολο των κλίνκερ που προκύπτουν από τις φαρίνες που περιέχουν τα ΟΑ σε σχέση με το κλίνκερ που προέρχεται από τη ΒΦ. Η διαπίστωση αυτή αφορά τόσο τη θερμοκρασία έψησης των 1450°C όσο και τη θερμοκρασία έψησης των 1400°C. Η αύξηση του ποσοστού εισαγωγής των ΑΑΣ και ΑΑΤ στο μίγμα των πρώτων υλών, επιφέρει, σε γενικές γραμμές, αντίστοιχη μείωση στη τιμή της fCaO για το σύνολο των κλίνκερ που έχουν παραχθεί στις θερμοκρασίες των 1450°C και 1400°C. Η τιμή της fCaO για το κλίνκερ που προκύπτει από τη ΒΦ στους 1400°C εμφανίζεται ελαφρώς μεγαλύτερη (2,44%) από τα αποδεκτά επίπεδα, ωστόσο πραγματοποιήθηκε και σε αυτήν την περίπτωση μαζικότερη παραγωγή κλίνκερ για συγκριτικούς λόγους. Τα αποτελέσματα προσδιορισμού της fCaO για το σύνολο των παραγόμενων κλίνκερ βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προϊόντων έψησης στους 1450°C και 1400°C που έλαβε χώρα κατά την μελέτη εψησιμότητας των φαρινών (βλέπε πίνακα 3), επαληθεύοντας τη διαδικασία της έψησης που ακολουθήθηκε σε κάθε περίπτωση.

Σε ότι αφορά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων κλίνκερ, από την μελέτη των ακτινοδιαγραμμάτων στις θερμοκρασίες έψησης των 1450°C και 1400°C, παρατηρήθηκε σε κάθε περίπτωση ο πλήρης σχηματισμός των κύριων ορυκτολογικών φάσεων του κλίνκερ. Η ορυκτολογική ανάλυση πιστοποίησε την ολοκλήρωση της διαδικασίας της έψησης ενώ παράλληλα επιβεβαίωσε τα αποτελέσματα προσδιορισμού της fCaO για το σύνολο των εξεταζόμενων κλίνκερ. Ο προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης με τη μέθοδο Rietveld, έδειξε ότι το σύνολο των εξεταζόμενων φαρινών παράγει κλίνκερ με αποδεκτή ορυκτολογική σύσταση στις θερμοκρασίες έψησης των 1450°C και 1400°C (πίνακας 6). Από τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης προκύπτει ότι τα ποσοστά σε C₃S και C₄AF μειώνονται με την αύξηση του ποσοστού υποκατάστασης της ΒΦ από τα ΑΑΣ και ΑΑΤ. Αντίστροφη εικόνα παρατηρείται στη περίπτωση των ορυκτολογικών φάσεων C₂S και C₃A. Η παρατήρηση αυτή αφορά το σύνολο των κλίνκερ και στις δύο εξεταζόμενες θερμοκρασίες έψησης.

Πίνακας 6. Ορυκτολογική σύσταση (%κ.β.) κλίνκερ προσδιοριζόμενη με τη μέθοδο Rietveld

Ορυκτολογικά συστατικά	Ορυκτολογική σύσταση (%κ.β.) – Rietveld_1450°C					
	ΒΦ	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	Φ5
C ₃ S	66,21	64,73	63,47	62,76	61,78	60,12
C ₂ S	12,32	14,03	15,63	16,78	17,36	19,77
C ₃ A	6,95	7,14	7,33	8,51	9,56	10,42
C ₄ AF	12,38	11,77	10,66	9,28	8,33	7,57
	Ορυκτολογική σύσταση (%κ.β.) – Rietveld_1400°C					
	ΒΦ	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	Φ5
C ₃ S	63,71	62,98	62,52	60,77	59,81	59,96
C ₂ S	15,5	16,67	17,35	18,37	19,22	19,94
C ₃ A	7,06	7,37	7,52	8,59	9,44	10,21
C ₄ AF	11,78	10,86	9,98	9,62	8,77	8,14

3.3 Αξιολόγηση φυσικομηχανικών ιδιοτήτων τσιμέντων Portland

Τα αποτελέσματα των κυριότερων ιδιοτήτων των τσιμέντων Portland που προέρχονται από την έψηση των φαρινών τους στους 1450°C και 1400°C δείχνονται στον πίνακα 7. Κατά την εργαστηριακή παρασκευή των τσιμέντων Portland ιδιαίτερα μέριμνα δόθηκε στην ενιαία λεπτότητα τους γεγονός που ελέγχθηκε από την μέτρηση της ειδικής τους επιφάνειας με τη συσκευή Blaine (βρέθηκε στη περιοχή 3950-4050cm²/g).

Σε σχέση με τις υπόλοιπες ιδιότητες, ως προς τις θλιπτικές αντοχές των κονιαμάτων τσιμέντου που έχουν προκύψει από την έψηση των φαρινών τους στους 1450°C, παρατηρήθηκε υστέρηση των τιμών τους στις ηλικίες των 2,7 και 28 ημερών για τα κονιάματα που περιέχουν τα ΑΑΣ και ΑΑΤ έναντι του κονιάματος αναφοράς. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου, στις προαναφερθείσες ηλικίες, οι τιμές των αντοχών θλίψης συγκλίνουν σημαντικά για το σύνολο των κονιαμάτων που περιέχουν τα ΟΑ σε σχέση με το κονίαμα αναφοράς. Στην ηλικία των 90 ημερών όλα τα κονιάματα επιδεικνύουν παραπλήσιες τιμές. Επίσης, αύξηση του ποσοστού υποκατάστασης της ΒΦ από τα ΟΑ επιφέρει, σε γενικές γραμμές, μείωση των θλιπτικών αντοχών στις ηλικίες των 2,7 και 28 ημερών. Ίδια συσχέτιση δεν μπορεί να υπάρξει για την ηλικία των 90 ημερών. Αναφορικά με την εξέλιξη των θλιπτικών αντοχών των κονιαμάτων που έχουν προκύψει από την έψηση των φαρινών τους στους 1400°C, διαπιστώθηκε η ίδια τάση που περιγράφηκε για τα κονιάματα των οποίων το μίγμα των πρώτων υλών έχει υποστεί θερμική κατεργασία στους 1450°C. Εξάιρεση αποτελεί η περίπτωση του κονιάματος που προκύπτει από τη φαρίνα Φ5, όπου παρατηρείται βελτίωση των θλιπτικών του αντοχών έναντι των κονιαμάτων που προκύπτουν από τις φαρίνες Φ3 και Φ4 στις ηλικίες των 2 και 7 ημερών. Στην ηλικία δε των 28 ημερών το

κονίαμα της φαρίνας Φ5 επιδεικνύει βελτιωμένη τιμή αντοχής σε θλίψη συγκριτικά με όλα τα εξεταζόμενα κονιάματα. Η ερμηνεία της εξέλιξης των θλιπτικών αντοχών των κονιαμάτων που έχουν προκύψει από την έψηση των φαρινών τους στους 1450°C και 1400°C συνδέεται άμεσα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ορυκτολογικής σύστασης των κλίνκερ από τα οποία έχουν προκύψει. Σε κάθε περίπτωση οι τιμές των θλιπτικών αντοχών επιβεβαιώνουν την επίτευξη του επιθυμητού στόχου αναφορικά με την παρασκευή τσιμέντων Portland τύπου Ι – κατηγορίας αντοχών 42,5N, σύμφωνα με τις απαιτήσεις που θέτει το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1.

Πίνακας 7. Τιμές φυσικομηχανικών ιδιοτήτων τσιμέντων Portland των οποίων το μίγμα των πρώτων υλών έχει υποστεί θερμική κατεργασία στους 1450°C και 1400°C.

Φυσικομηχανικές ιδιότητες τσιμέντων Portland - 1450°C									
Συνθέσεις φαρίνας	Λεπτότητα κατά Blaine (cm ² /g)	Αντοχή σε θλίψη (N/mm ²)				Χρόνος πήξης (min)		Απαίτηση σε νερό (%κ.β.)	Διόγκωση (mm)
		2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες	90 ημέρες	Αρχή	Τέλος		
ΒΦ	4025	22,0	40,2	55,1	58,4	70	110	22,6	0
Φ1	3965	19,5	35,2	52,7	56,5	85	130	21,8	0
Φ2	3990	17,8	34,0	52,6	56	90	140	21,6	1
Φ3	4010	15,7	31,9	52,6	59,8	90	130	21,6	2
Φ4	4025	16,1	31,0	52,2	59,1	95	145	22,0	1
Φ5	4010	14,8	29,7	52,0	59,7	100	150	21,8	1

Φυσικομηχανικές ιδιότητες τσιμέντων Portland - 1400°C									
Συνθέσεις φαρίνας	Λεπτότητα κατά Blaine (cm ² /g)	Αντοχή σε θλίψη (N/mm ²)				Χρόνος πήξης (min)		Απαίτηση σε νερό (%)	Διόγκωση (mm)
		2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες	90 ημέρες	Αρχή	Τέλος		
ΒΦ	3980	20,5	36,8	55,0	60,3	130	180	22,2	2
Φ1	3950	17,8	33,7	54,7	60,1	150	190	22	1
Φ2	4000	17,5	33,3	54,2	59,8	160	200	21,8	1
Φ3	4015	14,6	29,1	53,6	59,5	160	200	21,7	1
Φ4	3955	13,6	24,2	52,7	55,7	165	205	21,8	2
Φ5	4025	15,6	33,0	56,3	56,7	170	210	21,6	2

Ως προς τους χρόνους αρχής και τέλους της πήξης παρατηρήθηκε, σε γενικές γραμμές, αύξηση τους με την αύξηση του ποσοστού υποκατάστασης της ΒΦ από τα ΑΑΣ και ΑΑΤ. Η παρατήρηση αυτή ισχύει τόσο για τις πάστες τσιμέντου που προέρχονται από την έψηση των φαρινών τους στους 1450°C όσο και για τις τσιμεντόπαστες που προκύπτουν από την έψηση των φαρινών τους στους 1400°C. Η διαμόρφωση των χρόνων πήξης αποδίδεται και σε αυτήν την περίπτωση στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ορυκτολογικής σύστασης των κλίνκερ από τα οποία έχουν προκύψει οι εξεταζόμενες πάστες τσιμέντου. Η απαίτηση που θέτει το πρότυπο EN 197-1 για τους χρόνους αρχής πήξης των τσιμέντων, ικανοποιείται σε κάθε περίπτωση. Ως προς την ποσότητα σε νερό που απαιτείται για την δημιουργία πάστας κανονικής συνεκτικότητας, τόσο τα τσιμέντα που έχουν προκύψει από την έψηση των φαρινών τους στους 1450°C όσο και τα τσιμέντα που προέρχονται από την έψηση των φαρινών τους στους 1400°C επιδεικνύουν χαρακτηριστικές ομοιότητες. Ωστόσο δεν μπορεί να υπάρξει σαφής συσχέτιση μεταξύ των τιμών της συγκεκριμένης ιδιότητας και του βαθμού υποκατάστασης της ΒΦ από τα ΟΑ. Τα επίπεδα τιμών της απαιτούμενης ποσότητας σε νερό κρίνονται αποδεκτά σε κάθε περίπτωση. Τέλος, η σταθερότητα όγκου για τις πάστες τσιμέντου που έχουν προέλθει από την έψηση του μίγματος των πρώτων υλών τους στους 1450°C και 1400°C κρίνεται ικανοποιητική καθώς πληρείται σε κάθε περίπτωση η απαίτηση που θέτει το σχετικό πρότυπο EN 197-1 (<10mm). Σαφής συσχέτιση

μεταξύ του ποσοστού υποκατάστασης της ΒΦ από τα ΑΑΣ και ΑΑΤ και της τιμής της συγκεκριμένης ιδιότητας δεν μπορεί να υπάρξει. Οι τιμές της διόγκωσης των εξεταζόμενων παστών τσιμέντου κυμαίνονται στη περιοχή 0-2mm. Το γεγονός αυτό διασφαλίζει την απουσία ανεπιθύμητων ορυκτολογικών φάσεων όπως είναι το fCaO και το MgO που συντελούν στη διόγκωση του τσιμέντου.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την αξιολόγηση των υπό εξέταση ΟΑ ως πρώτων υλών στη βιομηχανία τσιμέντου για την παραγωγή του κλίνκερ, προέκυψε ότι τα ΑΑΣ και ΑΑΤ μπορούν να αποτελέσουν αξιόπιστοι φορείς ασβεστίου και πυριτίου, αντίστοιχα, στο μίγμα των πρώτων υλών του τσιμέντου. Η εισαγωγή τους στη φαρίνα κατέδειξε την συμβατότητα της σύστασής τους με τη σύσταση μιας τυπικής βιομηχανικής φαρίνας, ενώ επιπρόσθετα επετράπη η εισαγωγή τους σε αξιοσημείωτα ποσοστά (ακόμα και 100%) δίχως να επηρεάζονται σημαντικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των προκυπτουσών συνθέσεων φαρίνας. Η παρουσία των ΑΑΣ και ΑΑΤ έδειξε, επίσης, ότι ευνοείται η διαδικασία της έψησης, σε κάθε περίπτωση, σε σχέση με την έψηση της ΒΦ καθώς και ότι είναι εφικτός ο πλήρης σχηματισμός των κύριων ορυκτολογικών φάσεων του κλίνκερ από τη θερμοκρασία των 1400°C. Η παρατήρηση αυτή καθίσταται σημαντική εάν αναλογιστούμε ότι επιτυγχάνεται μείωση της θερμοκρασίας κλινκεροποίησης κατά 50°C σε σχέση με τη συνήθη θερμοκρασία κλινκεροποίησης (1450°C).

Αναφορικά με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων κλίνκερ στους 1450°C και 1400°C (μαζική παραγωγή) προέκυψε ότι το σύνολο των εξεταζόμενων φαρινών παράγει κλίνκερ αποδεκτής ορυκτολογικής σύστασης ενώ ο πλήρης σχηματισμός των φάσεων του κλίνκερ διασφαλίζεται σε κάθε περίπτωση. Σε ότι αφορά στα παραγόμενα τσιμέντα Portland παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη των ΑΑΣ και ΑΑΤ στο μίγμα των πρώτων υλών δεν επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά τους. Η εξέταση των κυριότερων ιδιοτήτων τους (λεπτότητα, αντοχή σε θλίψη, χρόνος πήξης, απαίτηση σε νερό, σταθερότητα όγκου) κατέδειξε ότι πληρούνται, σε κάθε περίπτωση, οι προδιαγραφές που θέτει το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 αναφορικά με τα τσιμέντα Portland τύπου Ι της κατηγορίας αντοχών 42,5N. Η παρατήρηση αυτή αφορά στα τσιμέντα που προέρχονται από την έψηση του μίγματος των πρώτων υλών τόσο στους 1450°C όσο και στους 1400°C.

5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Symonds Group Ltd (1999) "Construction and Demolition management practices and their economic impacts", Brussels.
2. J.I. Bhatti, F. MacGrecor Miller, S.H. Kosmatka (2005), "Innovations in Portland Cement Manufacturing", Portland Cement Association, USA.
3. Γκαλμπένης Ν. Χρίστος - Τριαντάφυλλος (2008), "Διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης οικοδομικών απορριμμάτων στην παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου", Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ.
4. C.-T. Galbenis and S. Tsimas (2004), "Characterization of recycled aggregates obtained from demolished buildings in Greece", Sustainable Waste Management and Recycling: Challenges and Opportunities, Proceedings of International Conference, Kingston University, London.
5. Χ.-Τ. Γκαλμπένης, Κ. Τσακαλάκης και Σ. Τσίμας (2005), "Υποκατάσταση φαρίνας τσιμέντου από ανακυκλωμένα αδρανή κατεδάφισης κτιρίων", Πρακτικά συνεδρίου HELECO '05, Αθήνα.

6. C.-T. Galbenis and S. Tsimas (2006), "Use of Construction and Demolition Wastes as Raw Materials in Cement Clinker Production", *China Particuology – Science and Technology of Particles*, Volume 4, No. 2, pp. 83-85.
7. Χ.-Τ. Γκαλμπένης, Α. Μιχαλίτση και Σ. Τσίμας (2005), "Μελέτη εηησιμότητας φαρίνας τσιμέντου που περιέχει οικοδομικά απορρίμματα", 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο για την Αξιοποίηση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση (ΕΒΙΠΑΡ), Δημοσιεύτηκε στα πρακτικά του συνεδρίου, Θεσσαλονίκη.
8. Χ.-Τ. Γκαλμπένης και Σ. Τσίμας (2006), "Αξιοποίηση οικοδομικών απορριμμάτων στη βιομηχανία τσιμέντου", *Μεταλλειολογικά-Μεταλλουργικά Χρονικά*, Τόμος 16, σελ. 31-46.
9. Χ.-Τ. Γκαλμπένης, Δ. Φραγκούλης, Δ. Παπαγεωργίου και Σ. Τσίμας (2006), "Μελέτη φυσικομηχανικών χαρακτηριστικών τσιμέντων που προέρχονται από υποκατάσταση των πρώτων υλών τους με οικοδομικά απορρίμματα", 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος (Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας), Δημοσιεύτηκε στα πρακτικά του συνεδρίου, Αλεξανδρούπολη.

Χρήση της απορριφθείσας παιπάλης ασφαλτικού συγκροτήματος ως πληρωτική κονία για αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα – Εφαρμογή στην Εγνατία οδό

Σπυράγγελος Λυκούδης
Προϊστάμενος Εργαστηρίου Π.Υ.Θ. Εγνατίας Οδού Α.Ε.

Λέξεις κλειδιά: Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα, Πρόσθετα, Πληρωτικές κονίες, Σακόφιλτρα, Ασφαλτικό Σκυρόδεμα, Οικολογικό Σκυρόδεμα, Self Compacting Concrete, Filler, Asphalt Concrete, Baghouse Fines, Green Concrete

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα θεωρείται η μεγαλύτερη πρόοδος στην επιστήμη της τεχνολογίας του Σκυροδέματος, τις 3 τελευταίες δεκαετίες. Αυτοσυμπυκνούμενο είναι το Σκυρόδεμα εκείνο που μπορεί να πληρώσει οποιοδήποτε ξυλότυπο-μεταλλότυπο και να αποκτήσει ικανή συμπύκνωση αποκλειστικά και μόνο μέσω της βαρύτητας και της ρεολογικής του συμπεριφοράς.

Ένα από τα απαραίτητα συστατικά για την παραγωγή Αυτοσυμπυκνόμενου Σκυροδέματος, είναι ο μεγάλος αριθμός λεπτών συστατικών, σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Τα λεπτά συστατικά μπορεί να μην είναι κατ' ανάγκη τσιμέντο. Πολλές πληρωτικές κονίες είναι διαθέσιμες (παιπάλη πετρωμάτων, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνων, μαρμαρόσκονη κ.τ.λ.), οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή Αυτοσυμπυκνόμενου Σκυροδέματος.

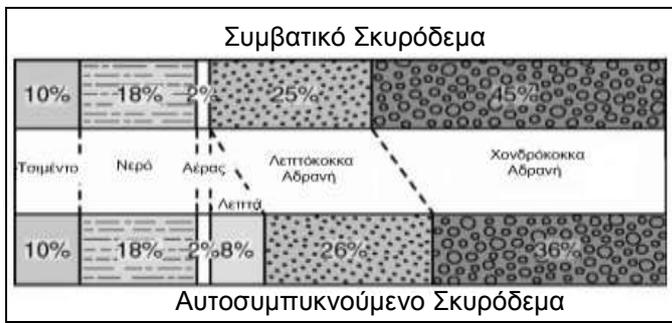
Στην παρούσα εργασία, διερευνάται η χρήση παιπάλης η οποία απορρίπτεται από τα σακόφιλτρα του Ασφαλτικού Παρασκευαστηρίου. Ταυτόχρονα το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα αποκτά Οικολογική διάσταση, δεδομένου ότι χρησιμοποιεί σαν συστατικό του ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας, που κάτω από άλλες συνθήκες δεν θα είχε χρήση.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, η παραγωγή του Οικολογικού Σκυροδέματος (Green Concrete), θεωρείται η αιχμή στην έρευνα της τεχνολογίας σκυροδέματος. Σαν γενικός ορισμός μπορεί να τεθεί «κάθε τύπος σκυροδέματος που συνάδει με την ορθή περιβαλλοντική διαχείριση», ήτοι με πρακτικές που οδηγούν στην εξοικονόμηση ενέργειας, στην παραγωγή λιγότερων ρύπων, στην χρησιμοποίηση ανακυκλωμένων αδρανών και στην χρησιμοποίηση παραπροϊόντων της βιομηχανίας. Ως οικολογικά σκυροδέματα μπορούν να χαρακτηρισθούν οι ακόλουθες κατηγορίες σκυροδεμάτων:

- Διαπερατό Σκυρόδεμα: Επιτρέπει την απορροή των όμβριων υδάτων στο οδόστρωμα και παράγει λιγότερο θόρυβο από το συμβατικό οδόστρωμα, στην κίνηση των οχημάτων.
- Διαφανές Σκυρόδεμα: Συμβάλλει στη μικρότερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.
- Σκυροδέματα που χρησιμοποιούν ανακυκλωμένα αδρανή.
- Σκυροδέματα που χρησιμοποιούν «κρύο» τσιμέντο (τσιμέντο που παράγεται με μικρό ποσοστό κlinker αλεσμένου με σκωρία υψικαμίνου).
- Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα που χρησιμοποιεί σαν πληρωτική κονία, παραπροϊόντα της βιομηχανίας.

Στην τελευταία κατηγορία ανήκει και το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιήσει την παιπάλη που απορρίπτεται από τα σακόφιλτρα του ασφαλτικού συγκροτήματος. Όπως είναι γνωστό το Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα, σε σχέση με το συμβατικό, χρειάζεται μεγαλύτερο ποσό λεπτόκοκκων (Σχ. 1).



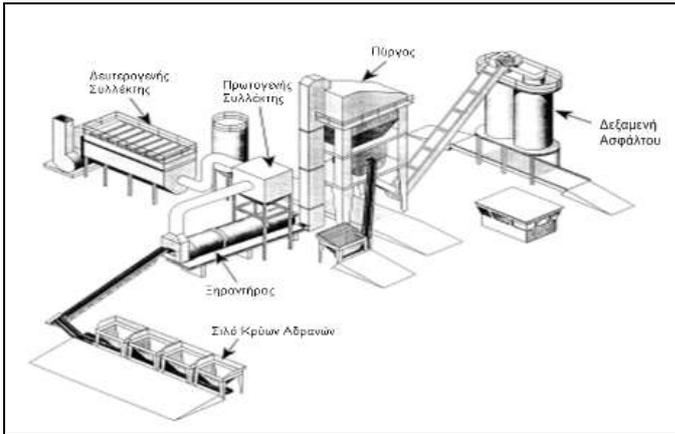
Σχήμα 1. Σύγκριση αναλογιών, συστατικών Συμβατικού - Αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος.

κού -

Δεδομένου ότι η πηγές εξεύρεσης των πληρωτικών κονιών δεν είναι ιδιαίτερα εύκολες, η απορριφθείσα παιπάλη του Ασφαλτικού Συγκροτήματος, μπορεί να είναι μία οικονομική πηγή.

2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΑΙΠΑΛΗΣ ΣΤΟ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΤΗΡΙΟ ΑΣΦΑΛΤΙΚΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Στο ακόλουθο Σχήμα 2 φαίνεται σχηματικά η διαδικασία Παραγωγής Ασφαλτοσκυροδέματος (Σχ. 2), σε συγκρότημα παραγωγής ανά παρτίδες.

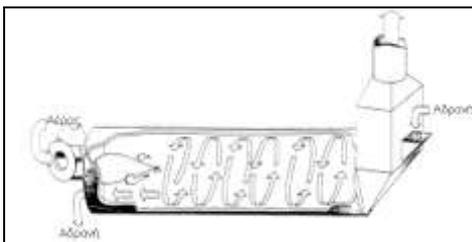


Σχήμα 2. Παρασκευαστήριο Ασφαλτοσκυροδέματος.

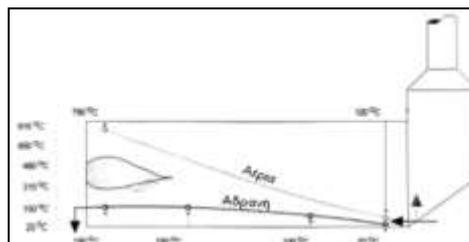
Τα ψυχρά και υγρά αδρανή εκρέουν από τους κάδους τροφοδοσίας και με τη βοήθεια μεταφορικής ταινίας τροφοδοτούν περιστρεφόμενο μεταλλικό κύλινδρο (τύμπανο), ο οποίος φέρει καυστήρα μαζούτ ή αερίου. Στο χώρο αυτό, τα αδρανή ξηραίνονται και αποκτούν την επιθυμητή θερμοκρασία.

Τα θερμά αδρανή μεταφέρονται στη μονάδα διαχωρισμού με κατακόρυφο σύστημα κάδων, όπου διαχωρίζονται σε κλάσματα και αποθηκεύονται προσωρινά σε θαλάμους (διαμερίσματα). Ο διαχωρισμός πραγματοποιείται με μία σειρά από κόσκινα, τα οποία είναι τοποθετημένα ακριβώς επάνω από τους θαλάμους αποθήκευσης. Από τους θαλάμους προσωρινής αποθήκευσης λαμβάνονται διαδοχικά ποσότητες αδρανών, οι οποίες αφού ζυγιστούν ανακατεύονται για καθορισμένο χρόνο στο mixer με ήδη προζυγισθείσα άσφαλτο.

Σημαντικό ρόλο στην δημιουργία της παιπάλης παίζει ο ξηραντήρας. Ο ξηραντήρας αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο μεταλλικό κύλινδρο και έναν καυστήρα ελαίου ή αερίου. Ο καυστήρας στο Συγκρότημα Παραγωγής ανά παρτίδες, είναι τοποθετημένος στο κατώτατο άκρο του τυμπάνου, δηλαδή στο άκρο της εξόδου (Σχ. 3, 4).



Σχήμα 3. Ξηραντήρας Αδρανών στον Ξηραντήρα.

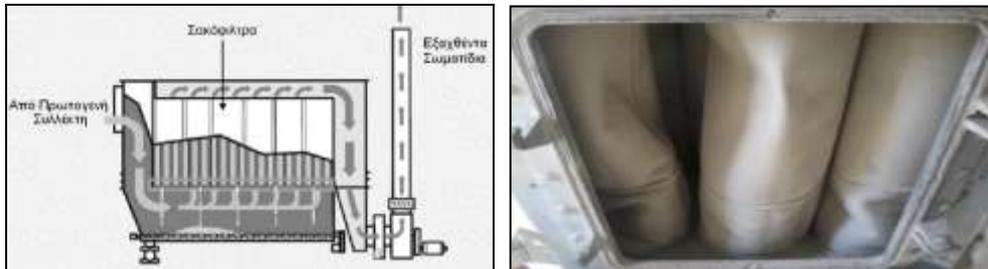


Σχήμα 4. Θερμοκρασιακή κατανομή

Στο αντίθετο άκρο του τυμπάνου από αυτό που βρίσκεται ο καυστήρας, είναι προσαρτημένο το σύστημα απαγωγής σκόνης (κονιοσυλλέκτης), για την μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιούνται σε σειρά ειδικά φίλτρα, τα οποία κατακρατούν το μεγαλύτερο μέρος της σκόνης. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται είναι βασικά τριών ειδών:

- Φυγοκεντρικά.
- Υφασμάτινα.
- Ψεκασμού.

Τα πλέον διαδεδομένα είναι τα υφασμάτινα φίλτρα (Σχ. 5, Φωτ. 1).



Σχήμα 5. Κίνηση των λεπτόκοκκων συστατικών στα σακόφιλτρα. Φωτογραφία 1. Σακόφιλτρα.

Αποτέλεσμα της κίνησης της σκόνης από τον Ξηραντήρα στον Πρωτογενή Συλλέκτη και από εκεί στον δευτερογενή συλλέκτη, είναι η παραγωγή Παιπάλης.

Σημειώνεται εδώ ότι η συνήθης ασβεστολιθική άμμος που χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα και χρησιμοποιείται επίσης για την παραγωγή ασφαλτοσκυροδέματος, έχει ποσοστό παιπάλης 15-16%, που υπερκαλύπτει τις ανάγκες των ασφαλτικών στρώσεων. Στον ακόλουθο Πίνακα, φαίνονται τα όρια παιπάλης των πιο διαδεδομένων ασφαλτικών στρώσεων.

Πίνακας 1. Όρια ασφαλτικών στρώσεων.

Τύπος Ασφαλτικής Στρώσης	Όρια Επιτρεπόμενων filler	
Βάση	A-260B	0 – 4 %
	A-260Δ	0 – 4 %
Ισοπεδωτική	A-265B	4 – 8%
Κυκλοφορίας	A-265B	5 – 12%

Από τον ανωτέρω Πίνακα γίνεται κατανοητό ότι σε μία μεγάλη ημερήσια παραγωγή ασφαλτοσκυροδέματος, μεγάλη ποσότητα filler απορρίπτεται. Η ποσότητα αυτή, αποτελεί προϊόν μίας δαπανηρής και ενεργοβόρας διαδικασίας. Στις ακόλουθες φωτογραφίες, φαίνεται το απορριφθέν προϊόν σε δύο διαφορετικά παρασκευαστήρια (Φωτ. 2,3).



Φωτογραφίες 2, 3. Παραδείγματα Απόρριψης filler στα Ασφαλτικά Παρασκευαστήρια 1,2.

3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΟ ΣΥΛΛΕΧΘΕΝ FILLER

Από 4 διαφορετικά Ασφαλτοπαρασκευαστήρια, συλλέχθηκε filler. Στον ακόλουθο Πίνακα, φαίνονται τα χαρακτηριστικά της «Μητρικής Άμμου» και τα χαρακτηριστικά του filler.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά Μητρικής Άμμου – Filler.

Παραγωγός	Μητρική Άμμος				Filler							
	No 200	I.A.	MB	MB _f	Ειδ.Β. Blaine	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	
1	15,50%	73	0,50	1,10	2,70	2972	1,90	1,10	1,92	50,22	0,52	0,07
2	16,04 %	73	0,50	1,00	2,70	3079	1,97	1,20	2,00	52,17	0,65	0,13
3	14,30%	77	1,67	1,67	2,70	2921	0,12	0,24	0,02	54,79	0,80	0,10
4*	0,94%	50	0,50	-	2,72	2995	1,97	0,28	1,82	49,19	0,70	0,15
5**	11,02%	77	1,00	0	3,20	2372	65,22	16,65	2,00	5,38	0,58	0,12

*Ασβεστολιθικό filler. ** Filler Σκωρίας.

Σημειώνεται εδώ ότι στις χημικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν και στους δύο τύπους filler (Ασβεστολιθικό, Σκωρία), δεν παρατηρήθηκε καμία χημική αλλοίωση, από την παραμονή των αδρανών στον ξηραντήρα.

Προκειμένου να υπολογισθεί η απορροφητικότητα του filler, (στοιχείο απαραίτητο για τον σχεδιασμό της μελέτης σύνθεσης), χρησιμοποιήθηκε η κάτωθι εργαστηριακή διαδικασία [10], δεδομένου ότι δεν υπάρχει τυποποιημένη διαδικασία.

Κυλινδρική μήτρα διαμέτρου 100mm, πληρώνεται με filler, μέχρι βάθους 10mm. Η μήτρα στερεώνεται σε δονητική τράπεζα και παρατηρείται η επιφάνεια του δείγματος, έως ότου αυτή αρχίζει να «γυαλίζει». Αυτό επαναλαμβάνεται για διαφορετικά ποσοστά υγρασίας. Η απορροφητικότητα (σε κατάσταση κορεσμένη και επιφανειακά ξηρή), θεωρείται ότι επιτυγχάνεται όταν η επιφάνεια αρχίζει να «γυαλίζει» μετά από 4 λεπτά δόνησης (Φωτ. 4).



Φωτογραφία 4.
 Άπορροφητικότητα filler.

4. ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΑ ΑΝΑΜΕΙΓΜΑΤΑ

Τα αδρανή τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα δοκιμαστικά αναμείγματα ήταν θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή. Χρησιμοποιήθηκαν τα κλάσματα 4/10, 0/4. Τα χαρακτηριστικά των αδρανών, φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα:

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά αδρανών.

Χαρακτηριστικά	Άμμος	Γαρμπίλι
No 200	14,84%	-
I. A.	72	-
MB/MB _f	0,4/1,33	-
Ειδικό Βάρος	2,683	2,654
Απορροφητικότητα	2,7	0,4
L. A.	-	26

Χρησιμοποιήθηκε επίσης τσιμέντο CEM II 42,5, τροποποιητής ιξώδους (VMA) και υπερευστοποιητής. Πραγματοποιήθηκαν 2 σειρές από Δοκιμαστικά Αναμείγματα. Η πρώτη σειρά χρησιμοποίησε παιπάλη από τον Παραγωγό 2 και η δεύτερη από τον Παραγωγό 4 (παιπάλη σκωρίας).

Σε κάθε δοκιμαστικό ανάμειγμα στο φρέσκο σκυρόδεμα, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές Slump/Flow, L-Box, V-Funnel (Φωτ. 5-7) και σε σκληρημένη μορφή, έλεγχοι αντοχών σε 1, 7 και 28 ημέρες.



5. Slump/Flow



6. L-Box



7. V-Funnel

Φωτογραφίες 5-7. Εργαστηριακές δοκιμές.

Τα πιο επιτυχημένα δοκιμαστικά αναμείγματα (ανά τύπο filler), καθώς και τα αποτελέσματα των δοκιμών, φαίνονται στον Πίνακα 4:

Πίνακας 4. Δοκιμαστικά Αναμείγματα.

Σύνθεση	Ασβεστολιθικά Αδρανή- Ασβεστολιθικό filler	Ασβεστολιθικά Αδρανή- Filler Σκωρίας
Τσιμέντο ΙΙ 42,5	380 kg/m ³	400 kg/m ³
Ασβεστολιθικό filler	120 kg/m ³	-
Filler Σκωρίας	-	80 kg/m ³
Άμμος	890 kg/m ³	890 kg/m ³
Γαρμπίλι 4/10	680 kg/m ³	680 kg/m ³
Ολικό Νερό	238 kg/m ³	250 kg/m ³
Viscosity Modifying Admixture (VMA)	0,2 kg/m ³	0,2 kg/m ³
Admixture HWRA	4,6 kg/m ³	5,5 kg/m ³
Admixture Stabiliser	0,8 kg/m ³	0,9 kg/m ³
	t0/t30/t60	t0/t30/t60/t90
Slump/Flow	70-71/64-66/60-62	71-72/70-71/68-64/58-60
L-Box	0,9/0,8/0,7	1,0/1,0/0,8/0,75
V-Funnel	4,8/6,0/11,0	5,0/6,5/7,0/12,0
Αντοχές 1 ημέρας	16,1 MPa	11,7 MPa
Αντοχές 7 ημερών	36,2 MPa	34,0 MPa
Αντοχές 28 ημερών	40,4 MPa	42,5 MPa

Στο Παρασκευαστήριο Σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκε παραγωγή 6m³ για δοκιμαστική διάστρωση σκυροδέματος (Φωτ. 8, 9). Αν και η ενδεδειγμένη λύση είναι η φόρτωση του filler να πραγματοποιείται όπως αυτή του τσιμέντου (σύστημα σιλό-κοχλία), η φόρτωσή του έγινε από την τροφοδοσία των βασικών αδρανών. Η εκφόρτωση του σκυροδέματος έγινε κατευθείαν από την βαρέλα, σε χρόνο μικρότερο από δύο λεπτά.



Εικόνες 8, 9. Δοκιμαστική διάστρωση σκυροδέματος.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η απορριφθείσα παιπάλη του ασφαλτικού συγκροτήματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως filler για αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, αφού έχει διπλό όφελος, δεδομένου ότι: οι πηγές εξεύρεσης filler είναι δύσκολες και το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα αποκτά οικολογική διάσταση.

6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Λυκούδης, Σ. «Η απορριφθείσα παιπάλη του ασφαλτικού Σκυροδέματος ως πληρωτική κονία για SCC», Ημερίδα ΤΕΕ-Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα, Μάιος 2008. [1]
- Νικολαΐδης, Αθ. Φ. «Οδοποιία Οδοστρώματα-Υλικά Έλεγχος Ποιότητας, 1996. [2]
- EN 12620, Aggregates for concrete, 2002. [3]
- Anderson, David A. and Joseph P. Tarris. “Characterization and Specification of Baghouse Fines”. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 52, 1983, pp 88-120. [4]
- HANDBOOK 2000, “Hot-Mix Asphalt Paving”. [5]
- Kandahl, Prithvi, S. “Evaluation of Baghouse fines in Bituminous Paving Mixtures”. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 50, 1981, pp 150-210. [6]
- Moosberg–Bustnes, H. “Steel-slag as filler material in concrete”, 2004. [7]
- Moosberg–Bustnes, H., Lagerblad, B. and Forssberg, E. “The function of fillers in concrete”, 2002. [8]
- NAPA, “Evaluation of Baghouse Fines for Hot Mix Asphalt”, 1999. [9]
- Roderick Jones, M. “Concret 2000: Economic and Durable Construction Through Excellence, Volume Two”, 2000. [10]
- Ward, R. G. and J. J. McDougal. Bituminous Concrete Plant Dust Collection system – Effects of Using Recovered Dust in Paving Mix. West Virginia Department of Highways, research report No FHWA/WV-79-003, Charleston, West Virginia, 1979. [11]

Επίδραση της ιπτάμενης τέφρας στην ανθεκτικότητα σκυροδεμάτων από τεταρτομερή σύνθετα τσιμέντα

Π. Πιπλικάκη

A.E Τσιμέντων TITAN., Διεύθυνση Έρευνας και Ποιότητας, Τ.Θ. 18-19200, Ελευσίνα

Μ.Χανιωτάκης

A.E Τσιμέντων TITAN., Διεύθυνση Έρευνας και Ποιότητας, Τ.Θ. 18-19200, Ελευσίνα

Μ. Κατσιώτη

Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Σχολής Χημικών Μηχανικών, Χημείας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9 Ζωγράφου, Αθήνα, 15773

Λέξεις κλειδιά: ιπτάμενη τέφρα, τεταρτομερή σύνθετα τσιμέντα, ανθεκτικότητα σκυροδέματος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αποτίμηση της επίδρασης της ιπτάμενης τέφρας στην ανθεκτικότητα σκυροδεμάτων από τεταρτομερή σύνθετα τσιμέντα. Έτσι, παράχθηκαν τσιμέντα με διαφορετικά ποσοστά ιπτάμενης τέφρας, μηλαϊκής γης και ασβεστόλιθου καθώς και τσιμέντο με 35% ιπτάμενη τέφρα της ίδιας κατηγορίας αντοχής. Επιπλέον, παρήχθησαν σκυροδέματα στα οποία μετρήθηκε το βάθος ενανθράκωσης και η διείδυση χλωριόντων καθώς και κονιάματα στα οποία μετρήθηκε η διόγκωση λόγω προσβολής από θειικά ιόντα. Συμπερασματικά, η καλύτερη ανθεκτικότητα των σκυροδεμάτων επιτυγχάνεται με συνέργια των συστατικών. Συνεπώς η βέλτιστη χρήση της ιπτάμενης τέφρας όσον αφορά την ανθεκτικότητα είναι ως συστατικό τεταρτομερών παρά διμερών σύνθετων τσιμέντων.

Influence of fly ash in durability of concrete made from quaternary blended cements

P. Pipilikaki

TITAN S.A, RD&Q Department, PO Box 18-19200, Elefsina

M. Chaniotakis

TITAN S.A, RD&Q Department, PO Box 18-19200, Elefsina

M. Katsioti

Laboratory of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineers NTUA, 9, Heroon Polytechniou str. 157 73 Athens

Key words: fly ash, quaternary blended cements, concrete durability

ABSTRACT: This study aims at evaluating the influence of fly ash on durability of concrete made from quaternary blended cements. Thus cements of the same class having different proportions of fly ash, pozzolana and limestone and also cement having 35% fly ash were produced. Furthermore concretes were produced in which carbonation depth and chlorides penetration was measured while the expansion due to sulfates attack was measured in mortars. Conclusively, the best concrete durability is achieved by synergy of the constituents of cements. Therefore, the optimum use of fly ash is in quaternary rather than in binary blended cement.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ανθεκτικό θεωρείται το σκυρόδεμα το οποίο αντιστέκεται στην φθορά στην οποία μπορεί να εκτεθεί. Η φθορά αυτή μπορεί να προέρχεται, είτε από εξωτερικούς είτε από εσωτερικούς παράγοντες. Συγκεκριμένα, τρία είναι τα ρευστά που συνδέονται με την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος: το νερό το οποίο μπορεί να μεταφέρει επιθετικά ιόντα (Cl^- , SO_4^{2-}), το διοξείδιο του άνθρακα και το οξυγόνο. [Neville 1995]

Η διαδικασία της ενανθράκωσης είναι θεωρητικά πολύ απλή αλλά στην πραγματικότητα είναι πολύπλοκη. Βασικά το υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)_2) σε επαφή με το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) δημιουργεί ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3). Το νερό δεν καταναλώνεται αλλά χρειάζεται για το αντίδραση. Όταν το Ca(OH)_2 καταναλώνεται, το pH της πάστας τσιμέντου/διαλύματος πόρων θα μειωθεί και όλες οι άλλες ενυδατωμένες φάσεις θα καταστραφούν. Το τελικό προϊόν θα αποτελείται από μίγμα ανθρακικών ιόντων μαζί με υδροξείδια του σιδήρου, πυριτίου και αργιλίου. Η μεγαλύτερη πρόκληση είναι η κινητική και η ταχύτητα της διαδικασίας της ενανθράκωσης.

Η διαδικασία της ενανθράκωσης περιγράφεται από τους νόμους του Fick, ο 1ος νόμος του Fick δίνει τη μεταφορά μάζας λόγω διάχυσης ενώ ο 2ος νόμος του Fick δίνει το βάθος ενανθράκωσης. Μια λεπτομερειακή γνώση όλων των παραμέτρων που ελέγχουν τον ρυθμό της ενανθράκωσης είναι δύσκολη και για αυτό πρέπει να γίνουν απλοποιήσεις. Μια απλή εξίσωση που αναφέρεται στη βιβλιογραφία [Neville 1995] για τον υπολογισμό του βάθους ενανθράκωσης είναι η ακόλουθη:

$$D=Kt^{0.5} \quad (1)$$

όπου: D=το βάθος ενανθράκωσης, (mm), K=συντελεστής ενανθράκωσης ($\text{mm/ημέρα}^{0.5}$), t=χρόνος έκθεσης (ημέρες).

Η προσβολή από χλωριόντα ξεχωρίζει ως η κύρια αιτία διάβρωσης του σιδηροπλισμού και από το γεγονός ότι μόνο λόγω των επιδράσεων της διάβρωσης αυτής προκύπτει καταστροφή του σκυροδέματος που τον περιβάλλει. Η διάβρωση του σιδηροπλισμού είναι μια από τις κύριες αιτίες καταστροφής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Ο ρυθμός της διείδυσης χλωριόντων στο σκυρόδεμα επηρεάζεται από την δεσμευτική ικανότητα του σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα δεν είναι αδρανές όσον αφορά τα χλωριόντα στο διάλυμα των πόρων του. Μέρος των χλωριόντων αντιδρά με το σκυρόδεμα και δεσμεύεται είτε φυσικά είτε χημικά και αυτή η δέσμευση μειώνει το ρυθμό διάχυσης. Η δεσμευτική ως προς τα χλωριόντα ικανότητα ελέγχεται από τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα. Η ύπαρξη συμπληρωματικών συστατικών στο τσιμέντο επηρεάζει την δεσμευτική ικανότητα, παρόλο που η ακριβής επιρροή δεν είναι σαφής. [Kouloumbi et al. 1992, Batis et al. 2005, Mira et al. 2002, Rasheeduzzafar 1992] Επίσης το περιεχόμενο C_3A επηρεάζει την δεσμευτική ικανότητα του τσιμέντου αφού αυξημένο C_3A οδηγεί σε αυξημένη δέσμευση των χλωριόντων. [Neville 1995]

Ο όρος προσβολή από θειικά ιόντα χρησιμοποιείται για να εκφράσει μια σειρά χημικών αντιδράσεων μεταξύ των θεικών ιόντων και των συστατικών της σκληρυμένης πάστας τσιμέντου που υπάρχει στο σκυρόδεμα, η οποία προκαλείται από την έκθεση του σκυροδέματος σε θειικά ιόντα και υγρασία. Όπως και στην περίπτωση άλλων επιθετικών ιόντων, τα θειικά ιόντα έχουν μεγαλύτερες αρνητικές επιπτώσεις για το σκυρόδεμα όταν βρίσκονται σε αέρια ή υγρή μορφή- η τελευταία μορφή είναι η πιο συνήθης- ενώ προσβολή από στερεά χημικά που περιέχουν θειικά ιόντα είναι σπάνια. [Scalny et al. 2002, Neville 2004]

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Παρήχθησαν με χρήση εργαστηριακού σφαιρόμυλου τσιμέντα με 35% ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας (35% FA), 12% ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας, 11% Μηλαϊκή γη, 8%

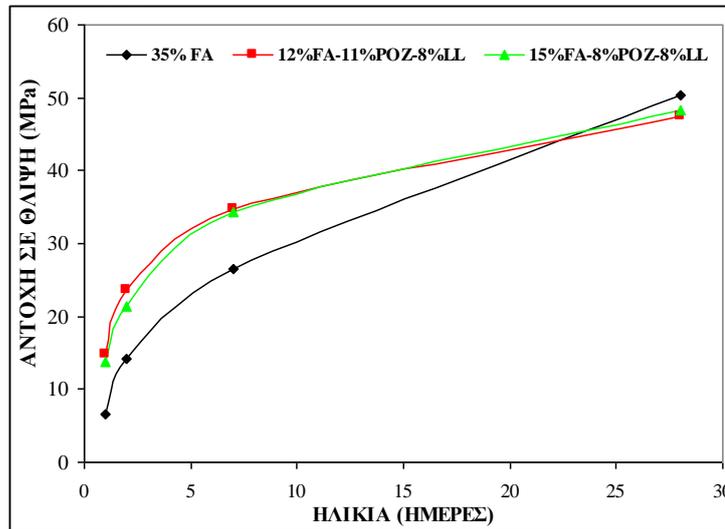
ασβεστόλιθο(12% FA-11% POZ-8% LL) και 15% ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας, 8% Μηλαϊκή γη, 8% ασβεστόλιθο(15% FA- 8% POZ-8% LL) τα οποία εμπίπτουν στην ίδια κατηγορία αντοχής (42.5).

Με χρήση των παραπάνω σύνθετων τσιμέντων παρασκευάστηκαν σκυροδέματα στα οποία μετρήθηκε το βάθος ενανθράκωσης σύμφωνα με την οδηγία Rilem CPC-18 σε ηλικίες 28,56,90,120 και 180 ημερών και της διείσδυσης χλωριόντων σύμφωνα με το ASTM C 1202 σε ηλικίες 28, 90 και 180 ημερών καθώς και τσιμεντοκονιάματα στα οποία προσδιορίστηκε η διόγκωση λόγω προσβολής από θειικά ιόντα με μέτρηση της μεταβολής μήκους με συσκευή μικρομέτρου σε ηλικίες 28,56,90,120,150 και 180 ημερών.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

1. Αντοχή σε θλίψη

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αντοχής σε θλίψη παρουσιάζονται στην Εικόνα 1. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα τεταρτομερή σύνθετα τσιμέντα έχουν υψηλότερες πρώιμες αντοχές από το διμερές τεφροτσιμέντο γεγονός που οφείλεται στην πληρωτική ικανότητα των προσθέτων που περιέχει και ειδικότερα του ασβεστολίθου.[Katsioti et al. 2008, Κατσιώτη κ.α. 2008] Αντίθετα η αντοχή στις 28 ημέρες είναι περίπου ίδια και για τα τρία τσιμέντα και φυσικά εντάσσονται στην ίδια κατηγορία αντοχής 42.5 σύμφωνα το ΕΛΟΤ-EN 197-1.

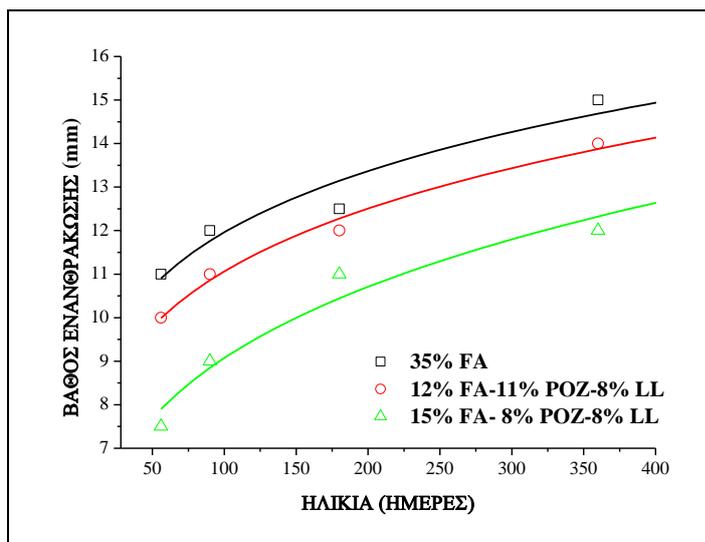


Εικόνα 1: Διάγραμμα αντοχής σε θλίψη

2. Βάθος ενανθράκωσης

Τα αποτελέσματα της δοκιμής ενανθράκωσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 2. Από το διάγραμμα είναι εμφανές ότι τη μεγαλύτερη ενανθράκωση παρουσιάζει το σκυροδέμα που παρασκευάστηκε από τσιμέντο με 35% ιπτάμενη τέφρα. Η μικρότερη ενανθράκωση εμφανίζεται στο τσιμέντο με 15% ιπτάμενη τέφρα, 8% ποζολάνη και 8% ασβεστόλιθο.

Προκειμένου να εκτιμηθεί καλύτερα ο ρυθμός ενανθράκωσης των σκυροδεμάτων έγινε προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων σε εξίσωση της $D=K \cdot t^\alpha$, όπου D =βάθος ενανθράκωσης σε mm, K = συντελεστής ενανθράκωσης, t =χρόνος έκθεσης και α = συντελεστής βαρύτητας του χρόνου. Τα αποτελέσματα της προσαρμογής παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.



Εικόνα 2: Διάγραμμα εξέλιξης ενανθράκωσης

Το πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει από την προσαρμογή είναι ότι ο συντελεστής βαρύτητας για όλα τα τσιμέντα είναι μικρότερος από το 0,5 που εμφανίζεται στην εξίσωση (1) της βιβλιογραφίας. Αυτό σημαίνει ότι η επίδραση του χρόνου έχει μικρότερη βαρύτητα στην εξέλιξη της ενανθράκωσης στα σύνθετα τσιμέντα.

Όσον αφορά τον συντελεστή ενανθράκωσης η μεγαλύτερη τιμή, όπως ήταν αναμενόμενο, παρουσιάζεται στο διμερές τειροτσιμέντο. Είναι λοιπόν σαφές ότι τα τεταρτομερή σύνθετα τσιμέντα παρουσιάζουν καλύτερη ανθεκτικότητα έναντι ενανθράκωσης από το διμερές τειροτσιμέντο.

Πίνακας 1: Υπολογισμοί συντελεστών ενανθράκωσης

	K	α	R ²
35% FA	5,72	0,16	0,93
12% FA-11% POZ-8% LL	4,90	0,18	0,99
15% FA- 8% POZ-8% LL	3,01	0,23	0,95

3. Διεΐσδυση χλωριόντων

Τα αποτελέσματα της ταχείας δοκιμής διεΐσδυσης χλωριόντων παρουσιάζονται στην Εικόνα 3. Με κατάλληλους μαθηματικούς υπολογισμούς είναι εφικτό να προσδιοριστεί ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων. Ο τρόπος υπολογισμού και τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Η κίνηση ιόντων σε ένα διάλυμα κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου περιγράφεται από την εξίσωση Nernst-Planck [16]:

$$-J_i = D_i \frac{\partial C_i(x)}{\partial x} + \frac{z_i F}{RT} D C_i \frac{\partial E(x)}{\partial x} + C_i v_i(x) \quad (1)$$

Όπου:

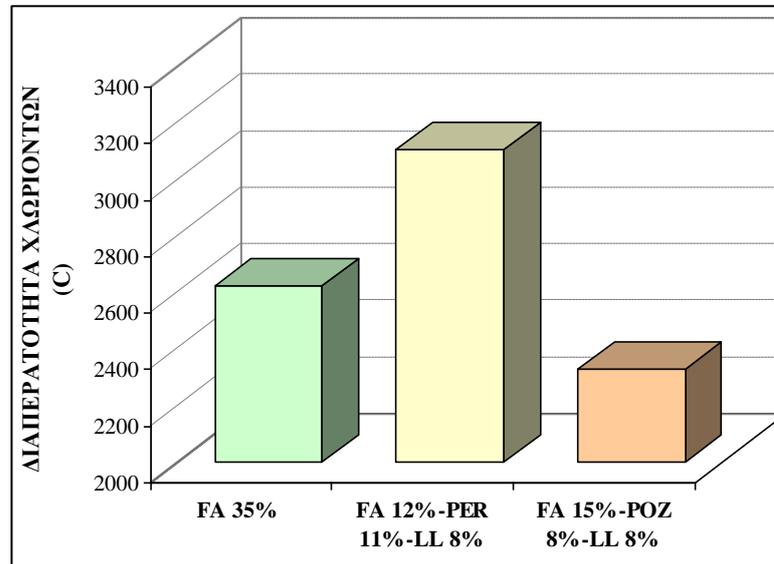
J_i είναι η ροή των ιοντικών ειδών i ,

D_i είναι ο συντελεστής διάχυσης των ιοντικών ειδών i ,

$C_i(x)$ είναι η συγκέντρωση των ιοντικών ειδών i ως συνάρτηση της απόστασης x ,

z_i είναι το σθένος των ιοντικών ειδών i ,

F είναι η σταθερά του Faraday,
R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων,
T είναι η θερμοκρασία K,
E(x) είναι το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό δυναμικό ως συνάρτηση του x και
 v_i είναι η ταχύτητα μεταφοράς των ιοντικών ειδών i.



Εικόνα 3: Συγκριτικό διάγραμμα διαπερατότητας χλωριόντων

Θεωρώντας την περίπτωση όπου δεν υπάρχει μεταφορά (δηλαδή δεν υπάρχει βαθμίδα πίεσης ή υγρασίας) και υποθέτοντας ότι το ποσοστό της καθαρής διάχυσης είναι αμελητέο σε σύγκριση με την επίδραση της κίνησης λόγω ηλεκτρικού ρεύματος, κάτι που είναι λογικό για ένα επαρκώς δυνατό ηλεκτρικό πεδίο, τουλάχιστον 10-15 V (Andrade,1993), έτσι εξίσωση (1) γίνεται:

$$J = \frac{z_i F D C_i}{RT} \frac{\partial E(x)}{\partial x} \quad (2)$$

Αυτή η εξίσωση είναι δυνατό να επιλυθεί ως προς D όταν εξακριβωθεί η ιοντική ροή των χλωριόντων και κάνοντας τις παρακάτω υποθέσεις: α)ότι υπάρχει γραμμική πτώση του δυναμικού κατά μήκος του κελιού, β) ότι η συγκέντρωση των χλωριόντων είναι σταθερή στην άνοδο του κελιού, γ) ότι το σύστημα έχει φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας και δ) ότι η θερμοκρασία του κελιού και του σκυροδέματος είναι σταθερή. (Andrade,1993)

Στην περίπτωση των συγκεκριμένων πειραμάτων η ιοντική ροή των χλωριόντων υπολογίζεται από την τιμή του ρεύματος που διέρχεται από το κελί ή από την αντίστοιχη συνολική ποσότητα φορτίου (Coulombs). Η συγκέντρωση των χλωριόντων στην άνοδο διατηρείται σταθερή λόγω της πειραματικής μεθόδου, το σύστημα ισορροπεί ενώ η θερμοκρασία μετριέται με θερμοστοιχεία και είναι σε μεγάλο βαθμό σταθερή. Έτσι για τον υπολογισμό του συντελεστή διάχυσης προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$D_{\text{eff}} = \frac{RT I_n L}{n F^2 E A C Z} \quad (2)$$

Όπου:

I είναι το διερχόμενο ρεύμα σε A,
 L είναι το μήκος του δοκιμίου σε m,
 A είναι η κάθετη επιφάνεια του δοκιμίου σε m²,
 E είναι το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο σε V,
 T είναι η απόλυτη θερμοκρασία σε °K,
 t_n είναι ο αριθμός μεταφοράς των χλωριόντων που είναι 0,65,
 Z είναι το ηλεκτρικό φορτίο των χλωριόντων,
 n είναι το σθένος των χλωριόντων,
 F είναι η σταθερά Faraday,
 C είναι η συγκέντρωση χλωριόντων στο διάλυμα NaCl και
 R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων.

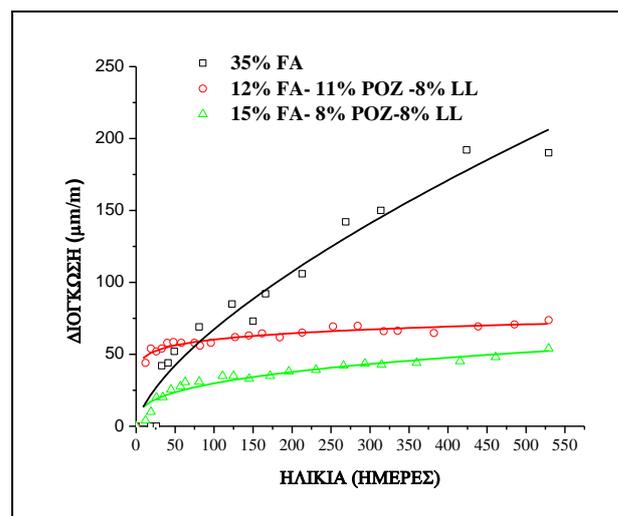
Πίνακας 2: Υπολογισμοί συντελεστών διείσδυσης χλωριόντων

	Coulomb	Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων
35% FA	2622	26,8
12% FA-11% POZ-8% LL	3108	31,7
15% FA- 8% POZ-8% LL	2330	24,0

Όσον αφορά την διείσδυση χλωριόντων φαίνεται ότι το διμερές τεφροτσιμέντο εμφανίζει καλή ανθεκτικότητα αλλά την καλύτερη ανθεκτικότητα παρουσιάζει το τεταρτομερές σύνθετο τσιμέντο με το μεγαλύτερο ποσοστό ιπτάμενης τέφρας. Η συμπεριφορά αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι η ιπτάμενη τέφρα έχει ικανότητα δέσμευσης των χλωριόντων. [Dhir et al. 1997] Από την άλλη πλευρά τα τεταρτομερή σύνθετα τσιμέντα έχουν μειωμένο πορώδες λόγω της πληρωτικής ικανότητας του ασβεστολίθου και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την συνολικά καλύτερη ανθεκτικότητά τους έναντι διείσδυσης χλωριόντων. [Katsioti et al. 2008]

4. Ανθεκτικότητα έναντι προσβολής από θειικά ιόντα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων διόγκωσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 4. Στα δεδομένα προσαρμόστηκε εξίσωση της μορφής $E=K_e \cdot t^a$, όπου E=βάθος εναθράκωσης σε mm, K_e = συντελεστής διείσδυσης θεικών ιόντων, t=χρόνος έκθεσης και a= συντελεστής βαρύτητας του χρόνου. Τα αποτελέσματα της προσαρμογής παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 .



Εικόνα 4: Διάγραμμα διόγκωσης σε περιβάλλον θεικών ιόντων

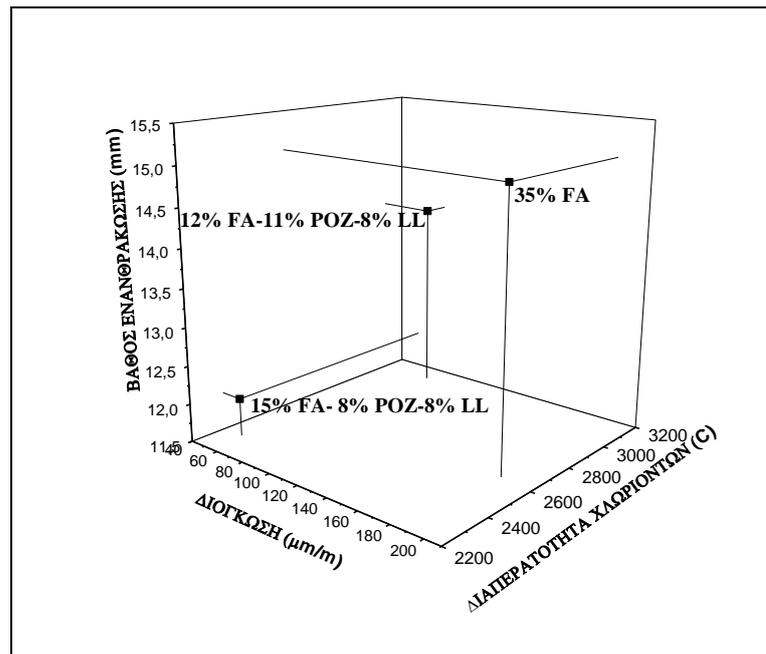
Πίνακας 3: Υπολογισμοί συντελεστών διείσδυσης θεικών ιόντων

	K	α	R ²
35% FA	3,05	0,67	0,9
12% FA-11% POZ-8% LL	37,9	0,10	0,9
15% FA- 8% POZ-8% LL	6,3	0,34	0,9

Τα παραπάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι το κονίαμα που παρασκευάστηκε με χρήση διμερούς τεφροτσιμέντου έχει μικρή αρχική διόγκωση σε περιβάλλον θεικών ιόντων η οποία όμως συνεχίστηκε με γρήγορο ρυθμό (συντελεστής βαρύτητας του χρόνου υψηλός). Από την άλλη πλευρά τα τετραμερή σύνθετα τσιμέντα παρουσίασαν πολύ μικρότερη συνολικά διόγκωση σε περιβάλλον θεικών ιόντων, της οποίας η εξέλιξη ήταν βραδύτερη.

5. Συσχέτιση συνιστωσών ανθεκτικότητας

Οι συνιστώσες της ανθεκτικότητας συσχετίστηκαν όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 5 με σκοπό να βρεθεί η βέλτιστη σύσταση.



Εικόνα 5: Συσχέτιση συνιστωσών ανθεκτικότητας

Από το παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανές ότι το τετραμερές σύνθετο τσιμέντο με το μεγαλύτερο ποσοστό ιπτάμενης τέφρας (15%) εμφάνισε την καλύτερη ανθεκτικότητα έναντι όλων των βλαπτικών παραγόντων. Είναι λοιπόν σαφές ότι με συνέργια διαφορετικών υλικών επιτυγχάνεται το καλύτερο αποτέλεσμα όσον αφορά την ανθεκτικότητα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παραπάνω πειραματική διερεύνηση προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα:

- Τα τεταρτομερή σύνθετα τσιμέντα έχουν υψηλότερες πρώιμες θλιπτικές αντοχές από τα αντίστοιχα διμερή τεφροτσιμέντα ίδιας κατηγορίας αντοχής.
- Τα τεταρτομερή σύνθετα τσιμέντα παρουσιάζουν καλύτερη ανθεκτικότητα έναντι ενανθράκωσης από το διμερές τεφροτσιμέντο.
- Η καλύτερη ανθεκτικότητα έναντι διείσδυσης χλωριόντων επιτυγχάνεται με χρήση υψηλού ποσοστού ιπτάμενης τέφρας και άλλων κύριων συστατικών.
- Τα τετραμερή σύνθετα τσιμέντα παρουσιάζουν μικρότερη συνολικά διόγκωση σε περιβάλλον θεικών ιόντων, της οποίας η εξέλιξη ήταν βραδύτερη.
- Τέλος, είναι εμφανές ότι η ιπτάμενη τέφρα συμβάλλει σημαντικά στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος όταν χρησιμοποιείται σε μεγάλο ποσοστό (~15%) σε τετραμερή σύνθετα τσιμέντα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Andrade C., 1993. Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements”, Cem. Con. Res.,23,(3), 724-742

Batis G., Pantazopoulou P., Tsvivilis S. and Badogiannis E., 2005. The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars., Cem. Conc. Comp.27, 125-130

Dhir R.K., El-Mor M.A. K., Dyer T.D. 1997. Developing chloride resisting concrete using PFA., Cem. Concr. Res., 27,[11], 1633-1639

Μ.Κατσιώτη, Π.Πιπλικάκη, Μ.Φαρδής, Γ.Παπαβασιλείου, Δ.Παπαγεωργίου, Ε.Χανιωτάκης, 2008. Μελέτη της επίδρασης της προσθήκης διαφορετικών ποσοστών ασβεστόλιθου σε παστές συνθέτων τσιμέντων στη διαμόρφωση του πορώδους τους, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων

Katsioti M., Pipilikaki P., Pavlou C., Chaniotakis E., Fardis M.,Karakosta E.,Papavasileiou G. 2008. Study of the Hydration Process of Quaternary Blended Cements and Durability of the Produced Mortars and Concretes. 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures (CONCREEP8), September 30th - October 2nd, 2008, Ise-Shima, Japan

Kouloumbi, N., Batis, G, 1992. Chloride corrosion of steel rebars in mortars with fly ash admixtures, Cem. Conc. Comp.14, [3], 199-207

Midgley H.G., Illston J.M, 1984. The penetration of chlorides into hardened cement pastes, Cem. Concr. Res., 14,[4] 546-558

Mira P., V. G. Papadakis and S. Tsimas, 2002. Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete, Cem. Con. Res., 32,[5] 683-689

Neville A., The confused world of sulfate attack on concrete, 2004,Cem. Concr. Res. 34, 1275-1296

Neville, A.M, 1995. Properties of concrete, 4rth edition, Prentice Hall, Edinburgh Gate, Harlow,England, p.490-495

Rasheeduzzafar, Dakhil F.D., Bader M.A., Khan M.M, 1992. Performance of corrosion resisting steels in chloride bearing concrete, ACI Mat.J., 89,[5]

Scalny J., Marchand J. Odler I., 2002,Sulfate attack on concrete, Spon press

ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΤΟΥΒΛΩΝ ΩΣ ΑΔΡΑΝΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Σπυράγγελος Λυκούδης
Προϊστάμενος Εργαστηρίου ΠΥΘ, Εγνατία Οδός Α.Ε.

Θωμάς Κοτρώτσιος
Αναπληρωτής Προϊστάμενος Εργαστηρίου ΠΥΘ, Εγνατία Οδός Α.Ε.

Λέξεις κλειδιά: Ανακυκλωμένα τούβλα, ανακύκλωση αδρανών, αδρανή σκυροδέματος, απορροφητικότητα, συρρίκνωση, οικολογικό σκυρόδεμα, clay bricks, green concrete, recycled clay bricks..

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Τις τελευταίες δεκαετίες, είναι γενικά παραδεκτό ότι τα απόβλητα των εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων αυξάνονται, γεγονός που καθιστά επιβεβλημένη την ορθολογιστική διαχείρισή τους. Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο αναθεώρησε την οδηγία για την ανακύκλωση εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων, προκειμένου να πραγματοποιείται σε ποσοστό έως 70%, μέχρι το 2020.

Η παρούσα εργασία, διερευνά τη χρήση τούβλων τα οποία προέρχονται από κατεδαφίσεις οικοδομών, σαν αδρανή υλικά για την παραγωγή σκυροδέματος. Τα θραυσμένα τούβλα σαν αδρανή έχουν ξεχωριστό ενδιαφέρον, δεδομένου ότι μπορούν να συνεισφέρουν αποφασιστικά στη μείωση των οικοδομικών αποβλήτων και ταυτόχρονα να εξοικονομήσουν υλικά από φυσικές πηγές. Υπάρχουν βέβαια κάποια εμπόδια για τη χρήση των ανακυκλωμένων τούβλων σαν αδρανή, όπως οι υψηλές απορροφητικότητες, η συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος και η έλλειψη γνώσης από τη χρήση τους.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αντιστοιχούν περίπου 480 κιλά οικοδομικών αποβλήτων ανά κάτοικο. Στην Ελλάδα, μεγάλο μέρος οικοδομικών αποβλήτων οδηγείται ανεξέλεγκτα σε ρέματα και δασικές εκτάσεις, ενώ σύμφωνα με εκτιμήσεις ένα ποσοστό της τάξης του 0,5%, ανακυκλώνεται.

Η πρώτη χρήση σπασμένων τούβλων σαν αδρανή σκυροδέματος αναφέρεται στην Γερμανία το 1860, αλλά η πρώτη σημαντική χρήση

σπασμένων τούβλων σαν αδρανή σκυροδέματος, καταγράφεται κατά την ανοικοδόμηση μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο.

Ο στόχος της παρούσας εργασίας, είναι η αντικατάσταση σε διάφορα ποσοστά των ασβεστολιθικών αδρανών από ανακυκλωμένα τούβλα και η μελέτη των χαρακτηριστικών του σκυροδέματος σε φρέσκια και σκληρυμένη μορφή.

3. ΤΟΥΒΛΑ-ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΑ ΤΟΥΒΛΑ

Κατά τη διάρκεια της έρευνας, δεν κατέστη δυνατή η εύρεση τούβλων από κατεδαφισθείσα οικοδομή, οπότε η προμήθειά τους έγινε από παραγωγό. Τα τούβλα είναι Οικοδομικά, Γλώσσα Νο 75, Διαστάσεων 35×15×7,8cm, σύμφωνα με το EN 771-1 “Specification for Masonry Units – Part 1 Clay Masonry Units” (Φωτ. 1).



Φωτογραφία 1. Οικοδομικό Τούβλο, Γλώσσα Νο 75.

Σύμφωνα με το EN 772, τα χαρακτηριστικά των τούβλων, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε βρασμό, Υγεία, φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά τούβλων.

Αντοχή σε θλίψη (EN 772-16)	Βρασμός (EN 772-00)	Υγεία (EN 772-00)
3,2MPa	2,7MPa	9,7%

Τα τούβλα θραύστηκαν με μηχανικό τρόπο (σφυρί σε μεταλλική πλάκα) και κοσκινίστηκαν προκειμένου να παρασκευασθούν κλάσματα εφάμιλλης κοκκομετρίας με τα ασβεστολιθικά (Φωτ. 2, 3)



Φωτογραφία 2. Θραύση τούβλων.

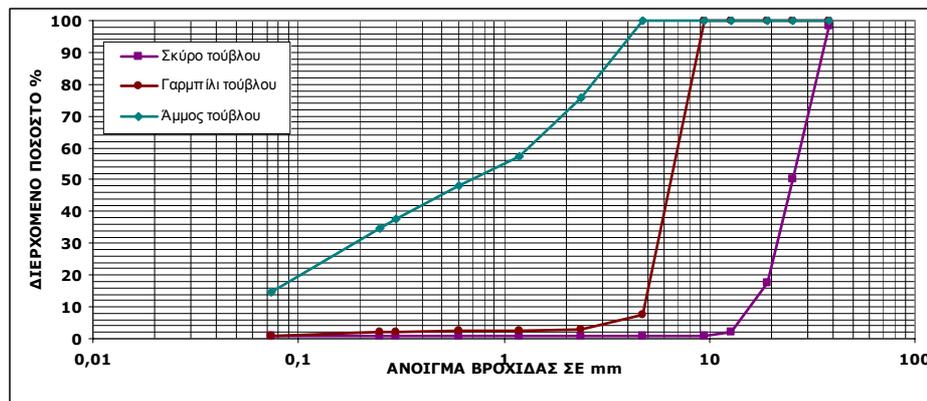


Φωτογραφία 3. Κοσκίνισμα τούβλων.

Τα χαρακτηριστικά των αδρανών που παράχθηκαν από τα τούβλα, φαίνονται στον Πίνακα 2 και οι κοκκομετρικές καμπύλες τους, στο Σχήμα 1.

Πίνακας 2. Ασβεστολιθικά αδρανή υλικά, προερχόμενα από τούβλα.

Αδρανές	Άμμος τούβλου	Γαρμπίλι τούβλου	Σκύρα τούβλου
Ισοδύναμο άμμου	68	---	---
Μπλε του μεθυλενίου	0,3 (MB)/1,33(MB _f)	---	---
Ειδικό βάρος	2,533	---	2,452
Απορροφητικότητα Los Angeles	3,036	---	10,359
Δείκτης Πλακοειδούς	---	43	80



Σχήμα 1. Κοκκομετρικές καμπύλες αδρανών, προερχόμενων από τούβλα.

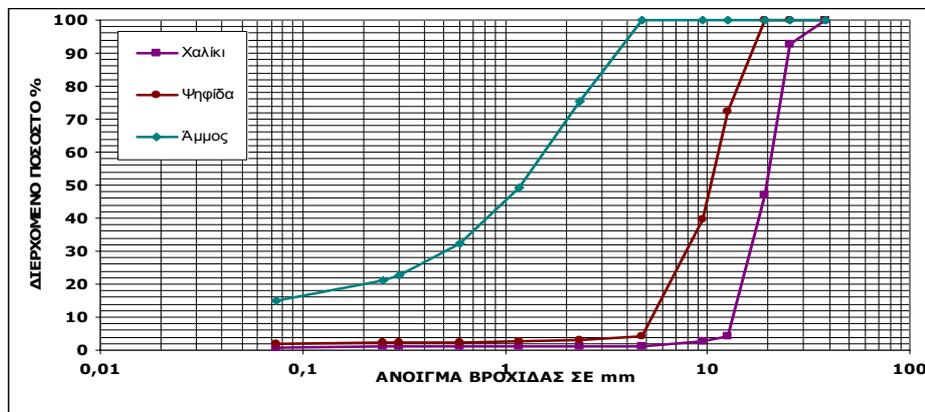
Σημειώνεται εδώ ότι η απότριψη σε τριβή και κρούση (Los Angeles), είναι απαγορευτική, σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ.-97. Πλην όμως η έρευνα προχώρησε, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα.

3. ΥΛΙΚΑ

Τα αδρανή υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα είναι θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή κοκκομετρίας 10/25,4/10,0/4mm, τα οποία καλύπτονται από το EN 12620. Τα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον Πίνακα 3, ενώ οι κοκκομετρικές τους καμπύλες φαίνονται στο Σχήμα 2.

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά ασβεστολιθικών αδρανών υλικών.

Αδρανές	Ασβεστολιθική άμμος	Γαρμπίλι	Σκύρα
Ισοδύναμο άμμου	72	---	---
Μπλε του μεθυλενίου	0,4 (MB), 1,33(MB _f)	---	---
Ειδικό βάρος	2,712	2,683	2,682
Απορροφητικότητα Los Angeles	2,2	0,4	0,4
	---	---	23



Σχήμα 2. Κοκκομετρικές καμπύλες ασβεστολιθικών αδρανών.

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα, είναι τύπου Π 32,5.

Το νερό που χρησιμοποιήθηκε είναι του δικτύου ύδρευσης.
Το πρόσμεικτο που χρησιμοποιήθηκε, είναι ρευστοποιητής νέας γενιάς (πολυκαρβοξυλικού αιθέρα), σύμφωνα με το EN 934-2:2001.

4. ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΑ ΑΝΑΜΕΙΓΜΑΤΑ

Επί της αρχικής σύνθεσης σκυροδέματος κατηγορίας C16/20 και κάθισης S4, η οποία ήταν όλη φτιαγμένη με ασβεστολιθικά αδρανή, πραγματοποιήθηκαν αντικαταστάσεις με αδρανή παραγόμενα από θραυστά τούβλα, σε ποσοστό 0-20-40-50-60-80-100% σε σκύρο και γαρμπίλι αντίστοιχα, ενώ όσον αφορά την άμμο έγινε αντικατάσταση σε ποσοστό 15 και 30%.

Οι αναλογίες, η κάθιση και οι θλιπτικές αντοχές της Σύνθεσης Μάρτυρα (μείξη χωρίς ανακυκλωμένα τούβλα), κατηγορίας C 16/20 και κάθισης S4, φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα:

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά Σύνθεσης Μάρτυρα.

	Αναλογίες (kg/m ³)	Κάθιση (cm)	Αντοχές (MPa)
Τσιμέντο Π 32,5	330	t ₀ : 19	16h: 7,3
Άμμος θραυστή	1020	t ₃₀ : 17	24h: 9,7
Γαρμπίλι	260	t ₆₀ : 15	7d: 22
Σκύρο	550	t ₉₀ : 12,5	28d: 28,5
Νερό	215		
Ενεργός λόγος W/C	0,591		
Ρευστοποιητής	2		

Επί της σύνθεσης του Μάρτυρα πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες αντικαταστάσεις:

Αντικατάσταση στο Σκύρο σε ποσοστά 20, 40, 50, 60, 80, 100 επί του ασβεστολιθικού αδρανούς, αντικατάσταση στο Γαρμπίλι σε ποσοστά 20, 40, 50, 60, 80, 100 επί του ασβεστολιθικού αδρανούς, αντικατάσταση στην Άμμο σε ποσοστά 15, 30 % επί της ασβεστολιθικής άμμου. Τα αποτελέσματα των θλιπτικών αντοχών είναι αποτέλεσμα μέσου όρου τριών δοκιμών. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμαστικών αναμειγμάτων σε φρέσκια και σκληρυμένη μορφή φαίνονται στον Πίνακα 5 και στα Σχήματα 3, 4.

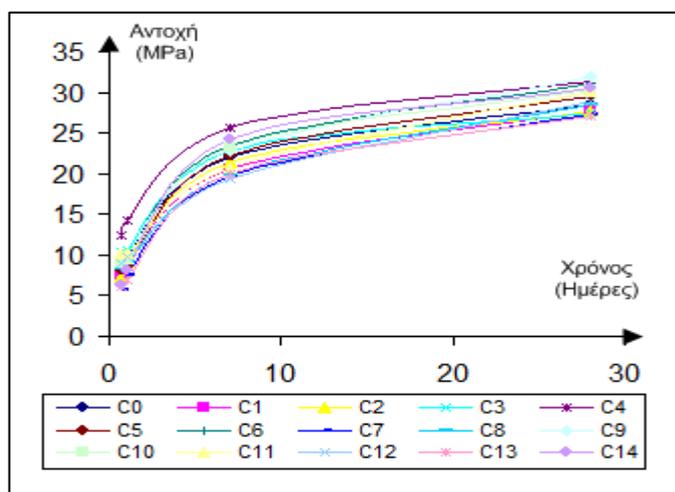
Χρησιμοποιήθηκαν ακριβώς οι ίδιες αναλογίες με τον μάρτυρα, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την θλιπτική αντοχή και την μεταβολή της κάθισης.

Σημειώνεται εδώ ότι όσο αυξάνεται το χρησιμοποιηθέν ποσοστό των τούβλων που χρησιμοποιείται, το χρώμα του φρέσκου σκυροδέματος μετατρέπεται από ανοικτό γκρι σε κοκκινωπό.

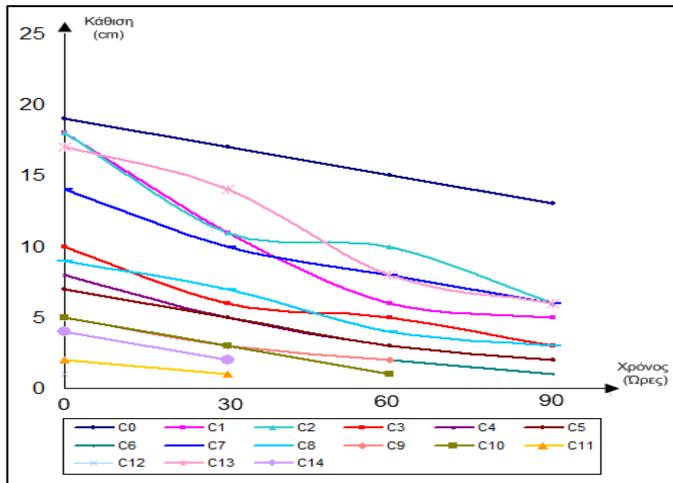
Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά σκυροδέματος.

	Ποσοστά Αδρανών (%)						Κάθιση (cm) t ₀ /t ₃₀ /t ₆₀ /t ₉₀	Θλιπτική αντοχή (MPa) 16h/24h/7d/28d
	*Σ _{ΑΣΒ}	Σ _{ΤΟΥ}	Γ _{ΑΣΒ}	Γ _{ΤΟΥ}	Α _{ΑΣΒ}	Α _{ΤΟΥ}		
C ₀	100	0	100	0	100	0	19/17/15/13	7,3/9,7/22/28,5
C ₁	100	0	80	20	100	0	18/11/6/5	7,4/9/20,5/25,7
C ₂	100	0	40	60	100	0	18/11/10/6	7,4/9,1/21,3/27,7
C ₃	100	0	50	50	100	0	10/6/5/3	10,3/10,5/22,8/27,5
C ₄	100	0	40	60	100	0	8/5/3/2	12,4/14,3/25,6/31,3
C ₅	100	0	20	80	100	0	7/5/3/2	8,2/8,5/22,1/29,5
C ₆	100	0	0	100	100	0	5/3/2/1	8,4/9,9/23,4/31,2
C ₇	80	20	100	0	100	0	14/10/8/6	5,7/7,5/19,8/27,2
C ₈	60	40	100	0	100	0	9/7/4/3	8,4/9,1/20/28,4
C ₉	50	50	100	0	100	0	5/3/2	9,7/10,1/22,8/31,9
C ₁₀	40	60	100	0	100	0	5/3/1	9/9,3/23,1/30,4
C ₁₁	20	80	100	0	100	0	2/1	10,1/10,2/20,7/30,1
C ₁₂	0	100	100	0	100	0	1	9/9,7/19,3/28,9
C ₁₃	100	0	100	0	85	15	17/14/8/6	6,2/6,9/20/27,1
C ₁₄	100	0	100	0	70	30	4/2	6,3/8,2/24,2/30,6

*Σ_{ΑΣΒ}: Σκύρο ασβεστολιθικό, Σ_{ΤΟΥ}: Σκύρο τούβλου
 Γ_{ΑΣΒ}: Γαρμπίλι ασβεστολιθικό, Γ_{ΤΟΥ}: Γαρμπίλι τούβλου
 Α_{ΑΣΒ}: Άμμος ασβεστολιθική, Α_{ΤΟΥ}: Άμμος τούβλου



Σχήμα 3. Ανάπτυξη θλιπτικής αντοχής αναμιγμάτων.



Σχήμα 4. Εξέλιξη της κάθισης σε συνάρτηση με το χρόνο.

4. ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ.-97, ο Δείκτης σε Τριβή και Απότριψη (L.A.=69), είναι απαγορευτικός για την παραγωγή σκυροδέματος. Επίσης ο τρόπος παραγωγής αδρανών που ακολουθήθηκε στην έρευνα, παρήγαγε αδρανή με υψηλό Δείκτη Πλακοειδούς. Παρόλα αυτά και δεδομένης της υψηλής απορροφητικότητας των Αδρανών των τούβλων, υπάρχει μεγάλη απώλεια της κάθισης σε μικρό χρονικό διάστημα.

Αντίστοιχα, προκειμένου να παραχθεί σκυρόδεμα ισοδύναμης κάθισης είναι απαραίτητη η προσθήκη ρευστοποιητή, γεγονός που ανεβάζει το κόστος. Δεδομένου ότι η απορροφητικότητα των τούβλων είναι μεγαλύτερη από των συμβατικών αδρανών, είναι απαραίτητη η ύπαρξη μέτρησης της συρρίκνωσης του σκυροδέματος. Επίσης, πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις Ανθεκτικότητας στο χρόνο (Durability).

Σε γενικές γραμμές, η εργασία επιβεβαιώνει τις βιβλιογραφικές παραπομπές όπου τα θραυστά τούβλα μπορούν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά αδρανή σε ένα σημαντικό ποσοστό.

5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Bektas F., Wang K., Ceylan H., “Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability”, *Construction and Building Materials* (2008)
- Cultrone G, Sebastián E, Ortega Huertas M., “Durability of masonry systems: A laboratory study”, *Construction and Building Materials*, Department of Mineralogy and Petrology, University of Granada, 2005
- Debieb F., Kenai S., “The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete”, *Construction and building materials* 22 (2008) 866-893
- Dondi M., Principi P., Raimondo M., Zanarini G., “Water vapour permeability of clay bricks”, *Construction and building materials* 17 (2003) 253-258
- Khalaf F.M., “Recycling of clay as aggregate in asphalt concrete”, School of the build environment, Napier University, Edinburgh, Scotland, UK.
- Khalaf F.M and Devenny A.S., “Properties of New and Recycled Brick Aggregates for Use in Concrete”, *Journal of Materials In Civil Engineering* © ASCE, DOI: 10.1061/(ASCE) 0899-1561 (2005) 17:4 (456), 2005
- Levy S.M, Helene P, “Durability of recycle aggregates concrete: a safe way to sustainable development”, *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 1975-1980
- Poon C.S., Chan D., “Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base”, *Construction and building materials* 20 (2006) 578-585
- Turanli L., Bektas F., Monteiro P.J.M. Monteiro, “ Use of ground clay brick as a pozzolanic material to reduce the alkali – silica reaction”, *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 1539-1542
- EN 771, “Specification for masonry units - Part 1: clay masonry units”, BS EN 771-1:2003, Incorporating Amedment No.1
- Δ – 100, Πρότυπη Τεχνική Διαγραφή Τούβλων Τοιχοποιίας
- Εναλλακτική Διαχείριση Συσκευασιών και Άλλων Προϊόντων, Σεπτέμβριος 2008.
- Κιούκης Δ. “Ρυθμοί χελώνας στη διαχείριση μπάζων», *Εργοταξιακά Θέματα*, 2008

Αξιοποίηση απορριπτόμενων υλικών από μονάδες έτοιμου σκυροδέματος και κονιαμάτων: Πρώτη προσέγγιση

Μόνικα Ζερβάκη

*Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Ηρώων
Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Τ.Κ. 157 73, Αθήνα*

Λέξεις κλειδιά: Απορριπτόμενο έτοιμο σκυρόδεμα, Νερό έκπλυσης, Επικίνδυνα υλικά, Αξιοποίηση στα δομικά υλικά

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η παρούσα εργασία αποτελεί την πρώτη προσέγγιση σε σχετική διδακτορική διατριβή. Στόχος της είναι: ι) η, μέσα από τρέχουσες μελέτες και εργασίες, θεωρητική ανασκόπηση των προσπαθειών για την αξιοποίηση τόσο του απορριπτόμενου νωπού σκυροδέματος που προέρχεται από τις μονάδες έτοιμου σκυροδέματος, όσο και του νερού έκπλυσης των οχημάτων διακίνησης στον τομέα των δομικών υλικών και ιι) η υποβολή εναλλακτικών προτάσεων για μελλοντική έρευνα στον τομέα αυτό. Τα υλικά αυτά (απορριπτόμενο έτοιμο σκυρόδεμα και νερό έκπλυσης) έχουν χαρακτηριστεί ως επικίνδυνα απόβλητα από τις διεθνείς περιβαλλοντικές νομοθεσίες και ως εκ τούτου οι εγκεκριμένοι χώροι απόθεσής τους αναμένεται να μειωθούν, γεγονός που καθιστά την ανάγκη αξιοποίησής τους ακόμα μεγαλύτερη.

Utilization of wastes from ready-mix concrete and mortar plants: first approach

Monika Zervaki

*Laboratory of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineers NTUA, 9 Iroon
Polytechniou str, Zografou Campus, 157 73, Athens*

Keywords: Waste ready-mix concrete, wash water, Hazardous wastes, Utilization in the construction materials field

ABSTRACT: The target of this study, which consist the first step of a relative PhD, is: i) a theoretical approach to the utilization of ready-mix concrete waste as well as mixing trucks wash water in the field of construction materials through current studies and ii) suggestion of alternative proposals for future research in this area of application. Both ready-mix concrete waste and wash water are classified as hazardous waste by world environmental legislation and as a consequence the disposal of these materials is highly regulated. The availability of landfills authorized for the disposal of waste ready-mix concrete and wash water will be significantly reduced in the future, making the need of their utilization even greater.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μονάδες έτοιμου σκυροδέματος και κονιαμάτων προκύπτει καθημερινά μία μεγάλη ποσότητα παραπροϊόντων τα οποία είτε απορρίπτονται είτε συγκεντρώνονται σε ειδικούς χώρους αποθήκευσης. Τα παραπροϊόντα αυτά είναι κυρίως το επιστρεφόμενο νώπο σκυρόδεμα και το νερό έκπλυσης των ειδικών σιλοφόρων οχημάτων μεταφοράς έτοιμου σκυροδέματος.

Το επιστρεφόμενο νώπο σκυρόδεμα προκύπτει όταν ένα σημαντικό ποσοστό του νωπού διακινούμενου σκυροδέματος που προέρχεται και διακινείται από τις μονάδες έτοιμου σκυροδέματος απορρίπτεται στο τέλος του ημερήσιου προγράμματος των ειδικών οχημάτων μεταφοράς γεγονός που αποδίδεται κυρίως στη σημαντική απώλεια κάθισης κατά την μεταφορά καθώς και στη περιττή παραγγελία σκυροδέματος που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Επιπροσθέτως σπαταλώνονται μεγάλες ποσότητες νερού για την έκπλυση του σταθερού και κινητού εξοπλισμού παραγωγής, μεταφοράς και άντλησης σκυροδέματος, το οποίο αποτίθεται σε δεξαμενές ή λάκους. Υπολογίζεται ότι η ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται καθημερινά για να ξεπλένεται το εσωτερικό των οχημάτων μεταφοράς σκυροδέματος είναι περίπου 1500 L νερού ανά φορτηγό, ενώ η αναξιποίητη (και συνεπώς απορριπτόμενη) ποσότητα κονιάματος μπορεί να φθάσει και τα 300 kg (Paolini & Khurana, 1998).

Το γεγονός αυτό επιφέρει μεγάλα περιβαλλοντικά προβλήματα αφού το απορριπτόμενο έτοιμο σκυρόδεμα καθώς και το νερό έκπλυσης των φορτηγών έχει χαρακτηριστεί ως επικίνδυνο απόβλητο στις ΗΠΑ από την EPA (Environmental Protection Agency) και στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες. Ο κυριότερος λόγος είναι ότι τα απορριπτόμενα αυτά υλικά έχουν pH 11,5 ή και μεγαλύτερο, γεγονός που τα χαρακτηρίζει επικίνδυνα από τους διεθνείς κανονισμούς (Sealy, Phillips & Hill, 2001), καθώς και από σχετικές Ευρωπαϊκές Οδηγίες. (Environment Agency, 1999).

Εξαιτίας του γεγονότος τούτου, η απόθεση παρόμοιας φύσης υλικών είναι αυστηρά τυποποιημένη από διαφορετικές περιβαλλοντικές νομοθεσίες, με αποτέλεσμα να αναμένεται στο μέλλον αισθητή μείωση της διαθεσιμότητας εγκεκριμένων χώρων απόθεσης απορριπτόμενου έτοιμου σκυροδέματος και νερού έκπλυσης. Απόρροια των προηγούμενων είναι η αναμενόμενη αύξηση του κόστους απόρριψης των υλικών αυτών

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η θεωρητική προσέγγιση για την αξιοποίηση τόσο του απορριπτόμενου έτοιμου σκυροδέματος, όσο και του νερού έκπλυσης στον τομέα των δομικών υλικών μέσα από τρέχουσες μελέτες και εργασίες, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα στον τομέα αυτό.

2. ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ

Στο πλαίσιο της αιφόρου ανάπτυξης αλλά και της εξοικονόμησης χώρων διαχείρισης με μείωση του όγκου των απορρίψεων, μερικές μονάδες παρασκευής έτοιμου νωπού σκυροδέματος παγκοσμίως αλλά και στην Ελλάδα, επαναχρησιμοποιούν τα επιστρεφόμενα υλικά τους και το νερό έκπλυσης σε διάφορες εφαρμογές στον ίδιο τον χώρο της μονάδας.

Συγκεκριμένα, συνηθισμένη είναι η πρακτική ανακύκλωσης του επιστρεφόμενου έτοιμου σκυροδέματος, ύστερα από αποθήκευση, ξήρανση και θραύση (crushed returned concrete) ως αδρανές για παρασκευή νέου σκυροδέματος. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή το θραυσμένο επιστρεφόμενο σκυρόδεμα χωρίζεται σε κλάσματα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λεπτόκοκκο και χονδρόκοκκο αδρανές και η χρήση του επιφέρει μικρή μείωση των αντοχών του σκυροδέματος (Obla, Kim & Lobo, 2007).

Σε ελάχιστες περιπτώσεις έχει αναφερθεί η συγκέντρωση του επιστρεφόμενου σκυροδέματος στα κοντινότερα συνεργαζόμενα εργοστάσια τσιμέντου, όπου μετά από κατάλληλη επεξεργασία επαναχρησιμοποιείται (www.csrhellas.org).

Όσον αφορά το νερό έκπλυσης, αυτό συχνά φυλάσσεται σε δεξαμενές από όπου, μετά από σχετική επεξεργασία, χρησιμοποιείται για το πλύσιμο του εξωτερικού των οχημάτων και για άρδευση των δένδρων και άλλων φυτών που συμβάλλουν στη βελτιωμένη αισθητική των μονάδων (www.csrhellas.org). Η πρακτική αυτή μπορεί να επιφέρει τοπικά περιβαλλοντικά προβλήματα αφού, όπως αναφέρεται παραπάνω, το νερό αυτό έχει πού υψηλό pH και μπορεί να προσβάλει τον υδροφόρο ορίζοντα.

3. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

3.1. Χημικός καθαρισμός οχημάτων

Κατόπιν βιβλιογραφικής μελέτης (Paolini & Khurana, 1998) έχει βρεθεί ότι, με κατάλληλα πρόσμικτα, μπορεί να επιτευχθεί σε συνδυασμό η προσωρινή διακοπή της πήξης του σκυροδέματος, λίγες ώρες μετά την προσθήκη του νερού και η επανεργοποίηση της αρκετές ώρες, ή και λίγες μέρες, μετά. Στην βιομηχανική πρακτική, το πρόσμικτο που σταματάει την ενυδάτωση, ο σταθεροποιητής, προστίθεται κατά την παρασκευή του σκυροδέματος όταν αυτό αναμένεται να χρειαστεί να παραμείνει ρευστό για μεγαλύτερο, από το συνηθισμένο, χρονικό διάστημα.

Η λειτουργία του σταθεροποιητή βασίζεται στην παρεμπόδιση του σχηματισμού των φάσεων του CSH και του πορτλαντίτη και δρα σε όλα τα συστατικά του τσιμέντου (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF). Βασικό πλεονέκτημα του σταθεροποιητή είναι ότι δεν υπάρχει κίνδυνος υπερδοσολογίας που μπορεί να οδηγήσει σε αχρηστοποίηση του σκυροδέματος. Θεωρητικά, λοιπόν, μπορεί να προστεθεί και μετά την έναρξη της ενυδάτωσης και να διατηρήσει το σκυρόδεμα σε μία σταθερή ρευστή κατάσταση.

Έτσι, με σωστή χρήση αυτού του ζεύγους προσμίκτων (σταθεροποιητή και ενεργοποιητή) μπορεί να σταματήσει η πήξη του επιστρεφόμενου σκυροδέματος, ακόμα και πέντε ώρες μετά την έναρξη της ενυδάτωσής του (προσεγγιστικά ο χρόνος που χρειάζεται το όχημα για να φτάσει στον τόπο του έργου και να αντλήσει την αναγκαία ποσότητα σκυροδέματος) και να επανενεργοποιηθεί την επόμενη μέρα. Ο ενεργοποιητής θα προστίθεται με μία ποσότητα νερού στο εσωτερικό των οχημάτων την επόμενη μέρα και στη συνέχεια θα τοποθετείται στο όχημα νέα ποσότητα σκυροδέματος που θα αναμειγνύεται με την παλιά.

Στο πλαίσιο αυτής της σειράς των πειραμάτων θα μελετηθούν οι ιδιότητες του νέου σκυροδέματος που προκύπτει από αυτήν την ανάμειξη. Ακόμη για τον έλεγχο της σωστής δράσης των προσμίκτων θα γίνει διερεύνηση της μεταβολής της θερμότητας ενυδάτωσης του σκυροδέματος, (μέσα από λεπτομερή καταγραφή των θερμοκρασιακών διαφορών στις πρώτες ώρες της ενυδάτωσης) του οποίου η πήξη έχει διακοπεί με σταθεροποιητή και η επανεκκίνησή του έχει λάβει χώρα με βοήθεια ενεργοποιητή. Στον αρχικό σχεδιασμό ως παράμετροι προβλέπεται να εξετασθούν διάφορα ζεύγη προσμίκτων, διάφορες αναλογίες, σε διάφορους χρόνους επανεργοποίησης κλπ.

3.2. Αξιοποίηση νερού έκπλυσης

Το νερό έκπλυσης των οχημάτων μπορεί να αξιοποιηθεί απευθείας στις μονάδες έτοιμου σκυροδέματος ως νερό ανάμειξης, όπως έχει καταδειχθεί με βάση πρόσφατες μελέτες στο εξωτερικό (Su, Miao & Liu, 2002; Chatveera, Lertwattanakul & Makul, 2006; Chatveera & Lertwattanakul, 2009). Για να χρησιμοποιηθεί το νερό αυτό ως νερό ανάμειξης στο σκυρόδεμα θα πρέπει να τηρούνται οι προδιαγραφές του αντίστοιχου προτύπου (ASTM C1602), δηλαδή θα πρέπει να εξεταστούν, η συγκέντρωση του νερού σε Cl^- , SO_4^{2-} και αλκάλια ($Na_2O + K_2O$), το περιεχόμενό του σε συνολικά στερεά, καθώς και να μελετηθούν οι ιδιότητες του σκληρωμένου προκύπτοντος σκυροδέματος. Σε περίπτωση που το νερό είναι εκτός προδιαγραφών μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες αναλογίες ανάμειξης με πόσιμο νερό.

Σε κάθε περίπτωση, ανεξαρτήτως των ιδιοτήτων του νερού έκπλυσης ή του ανάμεικτου νερού (νερό έκπλυσης σε συνδυασμό με πόσιμο νερό), θα μελετηθούν οι ιδιότητες νερού και σκληρωμένου σκυροδέματος ώστε να πιστοποιηθεί πρακτικά η δυνατότητα χρήσης του συγκεκριμένου νερού ως νερό ανάμειξης.

4. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ASTM C 1602/C 1602M, 2006, "Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete", American Society for Testing and Materials
- Chatveera B., Lertwattanakul P. & Makul N., 2006, "Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete", *Cement & Concrete Composites* 28, pp.441-450
- Chatveera B. & Lertwattanakul P., 2009, "Use of ready-mixed concrete plant sludge water in concrete containing an additive or admixture", *Journal of Environmental Management* 90, pp.1901-1908
- Environment Agency, 1999, "Special wastes: a technical guidance note on their definition and classification", London, UK
- Obla K., Kim H. & Lobo C., 2007, "Crushed Returned Concrete as Aggregates for New Concrete", RMC Research & Education Foundation Final Report
- Paolini M. & Khurana R., 1998, "Admixtures for Recycling of Waste Concrete", *Cement and Concrete Composites* 20, pp.221-229
- Sealy B.J., Phillips P.S. & Hill G.J., 2001, "Waste management issues for the UK ready-mixed concrete industry", *Resources, Conservation and Recycling* 32, pp.321-331

Su N., Miao B. & Liu F.-S., 2002, “Effect of wash water and underground water on properties of concrete”, *Cement and Concrete Research* 32, pp.777–782
www.csrhellas.org, 2008, Διαχείριση και Ανακύκλωση Επιστροφών Ετοιμού Σκυροδέματος

Χρήση πούδρας ανακυκλωμένων ελαστικών σε επισκευαστικά τσιμεντοκονιάματα

Σ. Μαυρίδου, Ι. Παπαγιάννη

Εργαστήριο Δομικών Υλικών,, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ, 54124, Θεσσαλονίκη,
e-mails: smavrido@civil.auth.gr; papayian@civil.auth.gr

Λέξεις κλειδιά: τσιμεντοκονιάματα, ανακυκλωμένα ελαστικά, μηχανικές αντοχές, πορώδες, διείσδυση χλώριο-ιόντων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα τσιμεντοκονιαμάτων με ανακυκλωμένο ελαστικό ως πρόσθετο αδρανές υλικό. Το ανακυκλωμένο ελαστικό, σε μορφή πούδρας, προήλθε από μηχανική επεξεργασία -τεμαχισμό- ελαστικών οχημάτων μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους. Στην εργασία παρουσιάζονται φυσικά χαρακτηριστικά του ανακυκλωμένου ελαστικού, ενώ παράλληλα εξετάζονται ιδιότητες των παραγόμενων τσιμεντοκονιαμάτων- συμβατικών και με ελαστικό- τόσο σε νωπή όσο και σε σκληρυμένη κατάσταση. Επιπρόσθετα μετριέται η αντίσταση τους στη διείσδυση χλώριο-ιόντων μέσω τριχοειδούς ανύψωσης. Με βάση τα αποτελέσματα, προκύπτει πως είναι δυνατή η παραγωγή τσιμεντοκονιαμάτων με πούδρα ανακυκλωμένου ελαστικού με ικανοποιητικά μηχανικά χαρακτηριστικά και αυξημένη αντίσταση στη διείσδυση χλώριο-ιόντων συγκριτικά με τα αντίστοιχα συμβατικά.

Use of recycled tire rubber in repair cement mortars

S. Mavridou, I. Papayianni

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki (A.U.Th)
e-mails: smavrido@civil.auth.gr; papayian@civil.auth.gr

Keywords: cement mortars, recycled rubber, mechanical strengths, porosity, penetration of chloride ions

ABSTRACT: This report presents laboratory results of cement mortars with recycled rubber as additional aggregate. Recycled rubber, in the form of powder, came from mechanical shredding of end of life worn mobile tires. The report consists of the physical characteristics of recycled tire rubber, while characteristics of cement mortars in fresh and hardened state are examined. Moreover, resistance to chloride ion penetration is measured through capillarity by suction. Based on the results, it seems possible to produce cement mortars with recycled rubber with satisfactory mechanical strengths and greater resistance to chloride ion penetration than the conventional ones.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο χρησιμοποιημένα ελαστικά χαρακτηρίζονται τα ελαστικά, τα οποία έχουν συμπληρώσει το χρόνο λειτουργίας τους και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλέον σε οχήματα. Μέχρι σήμερα, οι σωροί των φθαρμένων ελαστικών είτε θάβονταν σε χωματερές είτε εναποτίθετο ανεξέλεγκτα σε ρέματα και κοιλάδες Στην Ευρώπη το ποσό των φθαρμένων ελαστικών που συγκεντρώνεται ανέρχεται στα 250 εκατομμύρια κομμάτια, ενώ περίπου το 60% αυτών καταλήγει στις χωματερές [ETRA, Used Tire Working Group]. Τα ελαστικά αυτά αποτελούν ένα μεγάλο πρόβλημα παγκοσμίως καθώς καταλαμβάνουν μεγάλο ειδικό όγκο, έχουν πολύ ανθεκτική δομή κατασκευής τόσο φυσικά όσο και χημικά με συνέπεια να δυσχεραίνεται πολύ οποιαδήποτε διαδικασία επεξεργασίας και κατ' επέκταση ανακύκλωσής τους.

Στην Ελλάδα, από το 2004, έχει θεσπισθεί Προεδρικό Διάταγμα σχετικά με τα μέτρα και τους όρους για την εναλλακτική διαχείριση των φθαρμένων ελαστικών οχημάτων σύμφωνα με το οποίο, από τα μέσα του 2006 θα έπρεπε να αξιοποιείται το 65% της αποτιθέμενης ποσότητάς τους και να ανακυκλώνεται αντίστοιχα το 10%. Για το έτος 2007, η ποσότητα που θεωρητικά ανακυκλώθηκε ανήλθε στο 78.5% της συλλογικής ποσότητας που συλλέχθηκε από το μοναδικό εγκεκριμένο φορέα συλλογικής διαχείρισης μεταχειρισμένων ελαστικών οχημάτων –Ecoelastika-(Μαυριάς Γ., 2008). Ωστόσο αρνητικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός της μη ευρείας διάθεσης του κοκκοποιημένου ελαστικού λόγω και των περιορισμένων –επί του παρόντος- χρήσεων του στη χώρα μας.

Με βάση προηγούμενες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του ΑΠΘ, προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού ως αντικατάστατο μέρους των φυσικών αδρανών- της άμμου- σε τσιμεντοκονιάματα επιφέρει μείωση των μηχανικών αντοχών ενώ ενισχύει την αντίσταση αυτών στη διείσδυση χλώριο-ιόντων [Oikonomou N and Mavridou S, 2009].

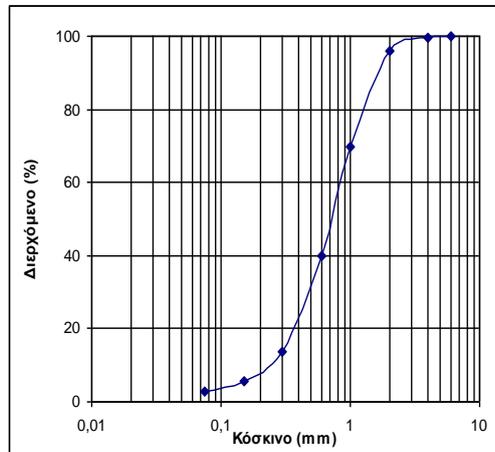
Στην παρούσα εργασία μελετάται η επίδραση της προσθήκης ανακυκλωμένου ελαστικού, ως πρόσθετο αδρανές υλικό- σε ιδιότητες τσιμεντοκονιαμάτων σε νωπή και σκληρυμένη κατάσταση. Η χρήση του ανακυκλωμένου ελαστικού ως πρόσθετο υλικό είχε ως στόχο την επίτευξη υψηλότερων μηχανικών αντοχών σε σύγκριση με τις αντίστοιχες κονιαμάτων όπου το ελαστικό αντικαθιστούσε μέρος της άμμου ενώ οι πραγματοποιούμενοι έλεγχοι περιελάμβαναν μέτρηση της εργασιμότητας μέσω της εξάπλωσης, του φαινόμενου ειδικού βάρους σκληρυμένου κονιαματος, του πορώδους καθώς και μηχανικών χαρακτηριστικών. Η μελέτη ολοκληρώθηκε με έλεγχο της φθοράς των τσιμεντοκονιαμάτων από χλώριο-ιόντα προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την πιθανή εφαρμογή τους ως επισκευαστικά κονιάματα.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

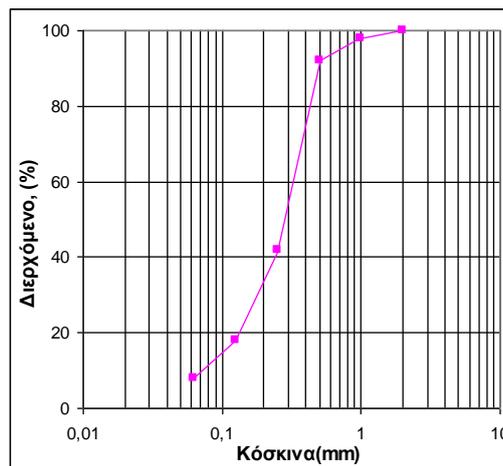
Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

1. Τσιμέντο Portland τύπου CEM IV/B 32,5N (TITAN)
2. Αδρανές υλικό: ποτάμια άμμος Αξίου μεγίστου κόκκου 4mm (διάγραμμα 1)
3. Ανακυκλωμένο ελαστικό μεγίστου κόκκου 2mm, που προήλθε από τεμαχισμό φθαρμένων ελαστικών στο Εργοστάσιο Καραμπάς Αντιρρυπαντική ΑΕΒΕ
4. Υπερρευστοποιητής eco-4 και βελτιωτικό latex SBR της εταιρείας SIKA S.A
5. Ανιονικό ασφαλικό γαλάκτωμα της ΒΙΤΟΥΜΙΝΑ Α.Ε καθώς και
6. Στεγανωτικό μάζας της εταιρείας Vimatec

Το ανακυκλωμένο ελαστικό, σε μορφή πούδρας, προστέθηκε στα παραγόμενα μίγματα ως πρόσθετο αδρανές υλικό. Η υδατοαπορρόφησή του υπολογίσθηκε εργαστηριακά ίση με 0%, το φαινόμενο ειδικό βάρος του ίσο με $0,9\text{gr}/\text{cm}^3$ ενώ η κοκκομετρική του διαβάθμιση δίνεται στο διάγραμμα 2.



Διάγραμμα 1. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου ποταμού Αξιού



Διάγραμμα 2. Κοκκομετρική διαβάθμιση ανακυκλωμένου ελαστικού

Σε όλες τις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής προκειμένου να επιτευχθεί σταθερή εξάπλωση $11\pm 1\text{cm}$ χωρίς να προστεθεί επιπλέον ποσότητα νερού, η οποία θα επηρέαζε αρνητικά τα χαρακτηριστικά των κονιαμάτων.

Με βάση προηγούμενες μελέτες [Οικονόμου κ.α, 2006], προέκυψε ότι η χρήση βελτιωτικών μέσων όπως ανιονικό ασφαλτικό γαλάκτωμα και αιώρημα συμπολυμερών στυρενίου – βουταδιενίου ενισχύουν τις μηχανικές αντοχές των μιγμάτων. Παράλληλα έγινε χρήση και στεγανωτικού μάζας ως πρόσθετο βελτιωτικό.

Στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του ΑΠΘ παρασκευάστηκαν 19 συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων. Τα ποσοστά προσθήκης του ελαστικού, ο λόγος νερού προς τσιμέντο, το ποσοστό του

υπερρυστοποιητή, καθώς και το είδος και το ποσοστό των πρόσθετων βελτιωτικών τσιμεντοκονιαμάτων ήταν οι μεταβλητές που ενδεχομένως άλλαζαν σε κάθε σύνθεση. Οι συνθέσεις περιγράφονται αναλυτικά στους πίνακες 1-3 ενώ η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε 3 στάδια. Στο πρώτο στάδιο παρασκευάστηκαν μητρικές συνθέσεις, χωρίς ανακυκλωμένο ελαστικό με χρήση ρυστοποιητή και πρόσθετων βελτιωτικών, σε διάφορα ποσοστά, προκειμένου να εξετασθεί η επίδραση των βελτιωτικών στις ιδιότητες των μιγμάτων (συνθέσεις Α-Ζ). Στη συνέχεια στις ίδιες συνθέσεις προστέθηκε 2.5% κβ της άμμου ελαστικό(συνθέσεις Α'-Ζ'). Τέλος, πραγματοποιήθηκε ακόμα μια σειρά με προσθήκη 5% κβ άμμου ανακυκλωμένο ελαστικό με περισσότερη ποσότητα ρυστοποιητή με στόχο την επίτευξη ικανοποιητικής εργασιμότητας στα μίγματα(συνθέσεις Η-Ν),όπου με Η συμβολίζεται η πρότυπη σύνθεση χωρίς ελαστικό με 2% ρυστοποιητή.

Πίνακας 1. Επιμέρους ποσότητες των συστατικών για κάθε σύνθεση αναφοράς-χωρίς ανακυκλωμένο ελαστικό- (σε g)

Υλικό	A	B	Γ	Δ	E	Z
Τσιμέντο CEM IV/B 32.5N(gr)	450	450	450	450	450	450
Άμμος ποταμού Αξιού (gr)	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Πούδρα ελαστικού (gr)	0	0	0	0	0	0
Ρυστοποιητής (gr)	7	7	7	7	7	7
Latex (gr)	0	9	22,5	0	0	0
Ασφαλτικό γαλάκτωμα (gr)	0	0	0	9	22,5	0
Στεγανωτικό μάζας (gr)	0	0	0	0	0	5,4
Νερό (gr)	200	195	188	195	188	200
Εξάπλωση (cm)	12	12,1	12	12	11,8	12
Ειδικό βάρος νωπού κονιάματος(gr/cm^3)	2,21	2,08	2,1	2,08	1,76	2,08

Πίνακας 2. Επιμέρους ποσότητες των συστατικών για κάθε σύνθεση με προσθήκη 2.5% κβ της άμμου (σε g)

Υλικό	A'	B'	Γ'	Δ'	E'	Z'
Τσιμέντο CEM IV/B 32.5N(gr)	450	450	450	450	450	450
Άμμος ποταμού Αξιού(gr)	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Πούδρα ελαστικού (gr)	33,75	33,75	33,75	33,75	33,75	33,75
Ρυστοποιητής (gr)	7	7	7	7	7	7
Latex (gr)	0	9	22,5	0	0	0
Ασφαλτικό γαλάκτωμα (gr)	0	0	0	9	22,5	0
Στεγανωτικό μάζας (gr)	0	0	0	0	0	5,4
Νερό (gr)	200	195	188	195	188	200
Εξάπλωση (cm)	12,3	11,8	12	11,8	11,9	11,7
Ειδικό βάρος νωπού κονιάματος(gr/cm^3)	1,95	1,95	2,02	1,95	1,82	1,91

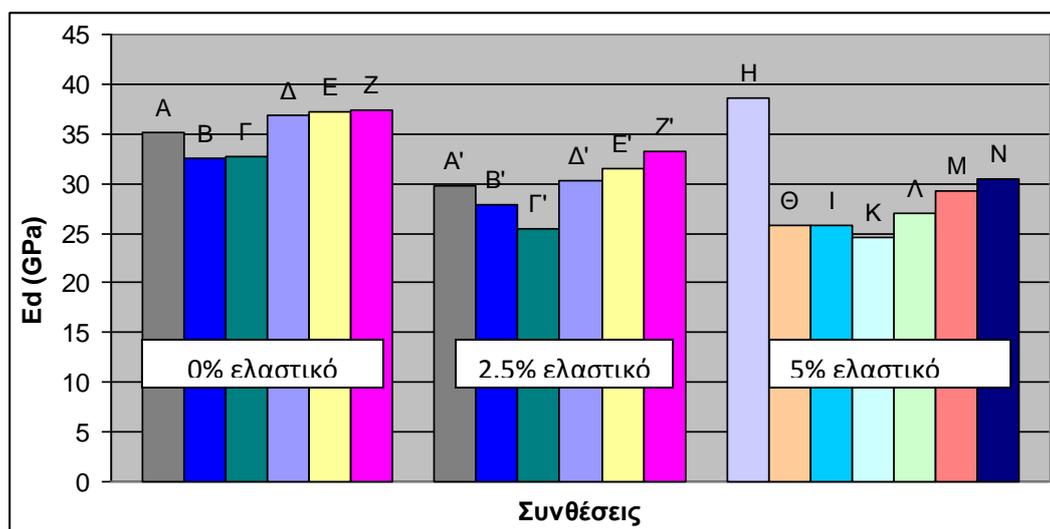
Πίνακας 3. Επιμέρους ποσότητες των συστατικών για κάθε σύνθεση με προσθήκη 5% κβ της άμμου (σε g)

Υλικό	H	Θ	I	K	Λ	M	N
Τσιμέντο CEM IV/B 32.5N(gr)	450	450	450	450	450	450	450
Άμμος ποταμού							
Αξιού(gr)	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Πούδρα ελαστικού (gr)	0	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5	67,5
Ρευστοποιητής (gr)	9	9	9	9	9	9	9
Latex (gr)	0	0	9	22,5	0	0	0
Ασφαλτικό γαλάκτωμα (gr)	0	0	0	0	9	22,5	0
Στεγανωτικό μάζας (gr)	0	0	0	0	0	0	5,4
Νερό (gr)	200	200	195	188	195	188	200
Εξάπλωση (cm)	12,5	12	11,5	11,4	11,5	11,6	11,2
Ειδικό βάρος νωπού κονιάματος(gr/cm ³)	2,21	1,86	1,89	1,95	1,82	1,76	1,82

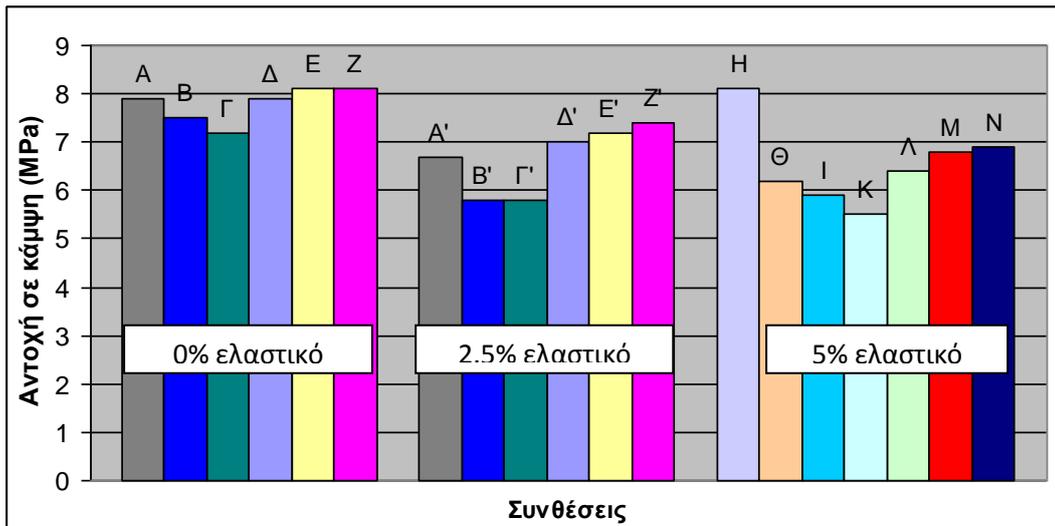
Από τις συνθέσεις αυτές προέκυψαν πρισματικά δοκίμια 4x4x16cm, τα οποία συντηρήθηκαν μέσα σε νερό και σε θερμοκρασία $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ μέχρι την ημερομηνία διεξαγωγής των ελέγχων. Τα δοκίμια ελέγχθηκαν σε μηχανικές ιδιότητες όπως δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, καμπτική αντοχή, θλιπτική αντοχή- καθώς και στο πορώδες. Τέλος μέσω τριχοειδούς ανύψωσης εκτιμήθηκε ποιοτικά η διείδυση γλώριο-ιόντων σε δοκίμια διαστάσεων 4x4x8cm.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

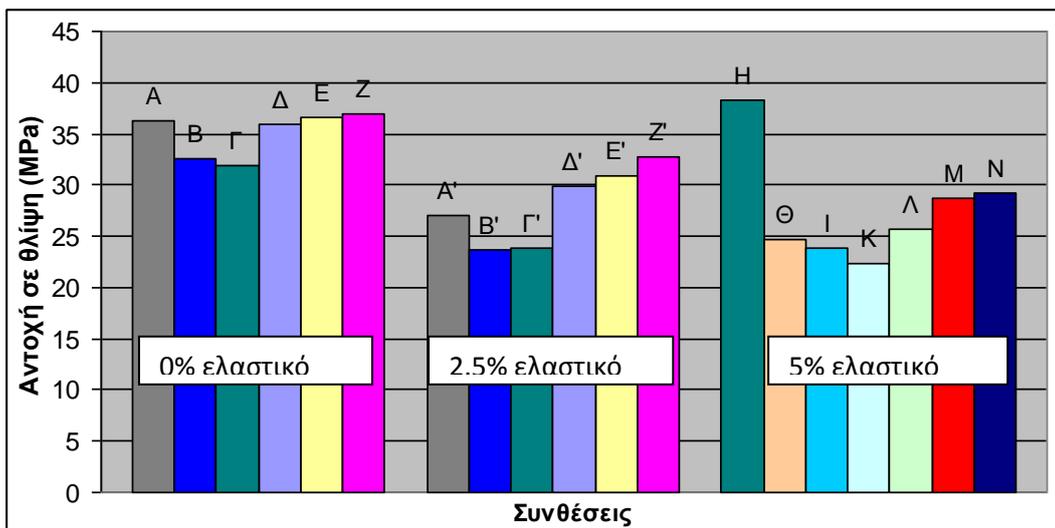
Στα παρακάτω διαγράμματα δίνονται τα αποτελέσματα των ιδιοτήτων των εργαστηριακών συνθέσεων, που αποτελούν μέσο όρο τριών τιμών.



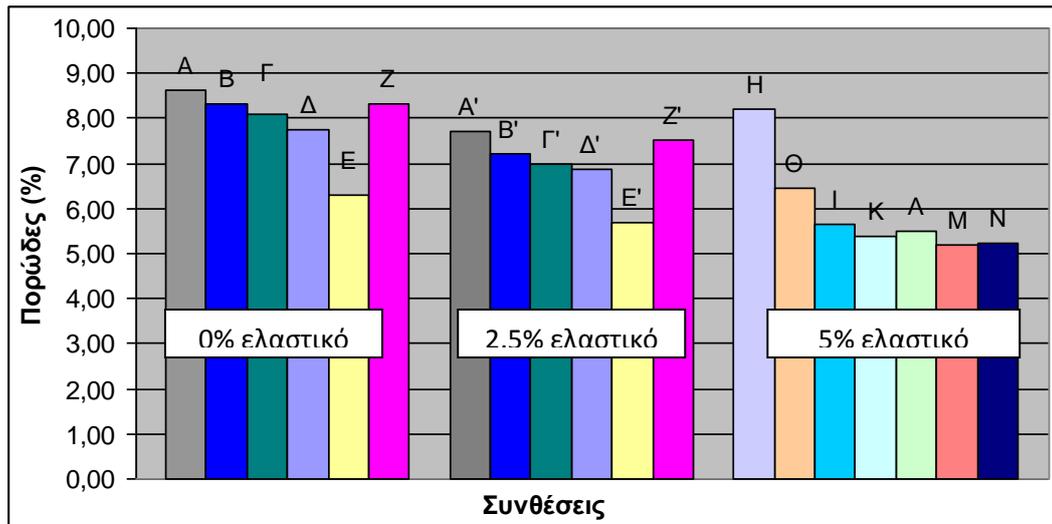
Διάγραμμα 3. Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας τσιμεντοκονιαμάτων



Διάγραμμα 4. Καμπτική αντοχή τσιμεντοκονιαμάτων



Διάγραμμα 5. Θλιπτική αντοχή τσιμεντοκονιαμάτων



Διάγραμμα 6. Πορώδες τσιμεντοκονιαμάτων

ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟ-ΙΟΝΤΩΝ

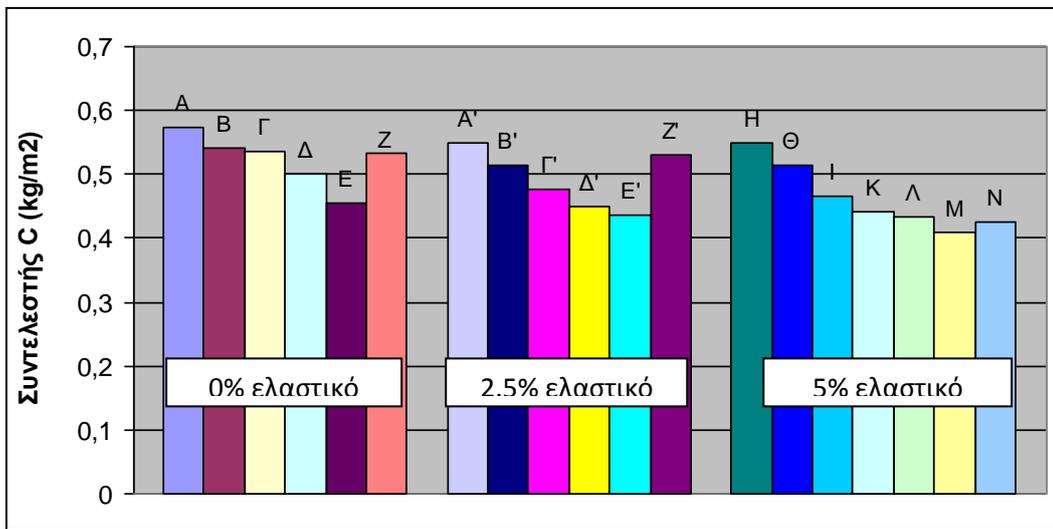
Με βάση προηγούμενη μελέτη προέκυψε πως η προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού σε τσιμεντοκονιάματα ως αντικατάστατο μέρους της άμμου ενίσχυσε την αντίσταση αυτών έναντι διείσδυσης χλώριο-ιόντων [Oikonomou and Manridou, 2009].

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η ανθεκτικότητα σε χλώριο-ιόντα των τσιμεντοκονιαμάτων χωρίς και με ανακυκλωμένο ελαστικό ως πρόσθετο υλικό. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε δοχείο, στην κάτω επιφάνεια του οποίου υπήρχε εμποτισμένο με διάλυμα NaCl 3% κβ χαρτί διήθησης. Τα δοκίμια παρέμειναν στο διάλυμα για 24 ώρες και στο τέλος του πειράματος μετρήθηκε η διαφορά βάρους των τσιμεντοκονιαμάτων σε σύγκριση με το αντίστοιχο πριν τοποθετηθούν στο διάλυμα NaCl, ως ένδειξη της ποσότητας Cl⁻ που διείσδυσαν μέσω τριχοειδών κενών στα κονιάματα (εικόνα 7).



Εικόνα 7. Μέτρηση διείσδυσης χλώριο-ιόντων μέσω τριχοειδούς ανύψωσης

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο συντελεστής τριχοειδούς ανύψωσης για όλα τα τσιμεντοκονιάματα, ο οποίος φαίνεται στο διάγραμμα 7.



Διάγραμμα 7. Συντελεστής τριχοειδούς ανύψωσης σε διάλυμα NaCl

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης πούδρας ανακυκλωμένου ελαστικού για την παραγωγή τσιμεντοκονιαμάτων ως πρόσθετο υλικό σε ποσοστά 2.5 και 5% κβ της άμμου.

Τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν είναι :

- ❖ Η προσθήκη του ανακυκλωμένου ελαστικού προκαλεί μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών των παραγόμενων μιγμάτων, η οποία αυξάνεται αναλογικά με την ποσότητα του προστιθέμενου ελαστικού. Ωστόσο τα μίγματα αυτά παρουσιάζουν ικανοποιητικά μηχανικά χαρακτηριστικά, βελτιωμένα κατά 10-13% σε σύγκριση με τα αντίστοιχα στα οποία η πούδρα ελαστικού αντικαθιστούσε μέρος του αδρανούς υλικού-άμμου-.
- ❖ Η προσθήκη ρευστοποιητή σε όλες τις συνθέσεις κρίθηκε απαραίτητη προκειμένου να μην αυξηθεί η ποσότητα του περιεχόμενου νερού και συνεπώς ο λόγος νερό/τσιμέντο, γεγονός που θα επέφερε μείωση των μηχανικών αντοχών.
- ❖ Από τα βελτιωτικά που χρησιμοποιήθηκαν παρατηρούμε πως καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά στις μηχανικές αντοχές έδωσαν οι συνθέσεις με χρήση ανιονικού ασφαλτικού γαλακτώματος και στεγανωτικού μάζας. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στην περίπτωση που το ανακυκλωμένο ελαστικό αντικαθιστά μέρος της άμμου.
- ❖ Η προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού σε όλες τις συνθέσεις όπου χρησιμοποιήθηκε επέφερε μείωση του πορώδους. Η μείωση αυτή είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σε μίγματα με χρήση πούδρας ελαστικού ως αντικατάστατο μέρους της άμμου.

- ❖ Τέλος, σημαντική ιδιότητα αποτελεί η αντίσταση σε διείσδυση Cl⁻. Φαίνεται πως οι κόκκοι του ελαστικού αποτρέπουν τη διείσδυση Cl⁻ στο εσωτερικό των τσιμεντοκονιαμάτων μέσω τριχοειδών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται στον Καθηγητή του ΤΠΜ ΑΠΘ Οικονόμου Νικόλαο για την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διάρκεια εκπόνησης του πειραματικού και του θεωρητικού μέρους της εργασίας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. European Tire Recycling Association, ETRA, <http://www.etra-eu.com>
2. Used Tire Working Group (UTWG), Tire Recycling, Department of Trade and Industry, London, UK
3. N. Οικονομου, S. Mavridou, “Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires”, corrected proof στο περιοδικό *Cement and Concrete Composites*, 2009.
4. Οικονόμου Ν., Στεφανίδου Μ., Μαυρίδου Σ., Βελτίωση της πρόσφυσης ανακυκλωμένων ελαστικών αυτοκινήτων σε προϊόντα τσιμέντου, *Πρακτικά 15^ο Συνέδριο Συνέδριο ΤΕΕ*, σελ. 234-242, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου 2006.
5. Γ. Μαυριάς, (2008), «Συλλογικό Σύστημα Εναλλακτικής Διαχείρισης Μεταχειρισμένων Ελαστικών Οχημάτων, 08/05/2008, Κύπρος

Παραγωγή σκυροδέματος με Ελληνική τέφρα φλοιού ρυζιού (ΤΦΡ). Προσεγγίσεις και προοπτικές

Σ.Κ. Αντίοχος¹, Δ. Φίλη¹, Ε. Παπαδάκης², Α. Κυρίτσι³, Μ. Τσίμας¹, Χ.-Τ. Γκαλμπένης¹ και Σ. Τσίμας¹

¹ Εργαστήριο Ανόργανης & Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π

² Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

³ «Agrino», ΕΥ.ΓΕ. Πιστιόλας Α.Ε., Τμήμα R&D

Λέξεις κλειδιά: Τέφρα φλοιού ρυζιού, Σύνθετα τσιμέντα, Σκυρόδεμα, Ανθεκτικότητα, Βιωσιμότητα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Πέρα από τα ευρέως γνωστά υλικά (ιπτάμενη τέφρα, σκωρία, κτλ.) που η έρευνα έχει καταδείξει ως αποτελεσματικούς μερικούς υποκαταστάτες του τσιμέντου, στα πλαίσια του προγράμματος “Ανταγωνιστικότητα” της ΓΓΕΤ αξιολογήθηκε η τέφρα φλοιού ρυζιού (ΤΦΡ) που παράγεται στις εγκαταστάσεις της βιομηχανίας Agrino. Η εργασία κινείται πλέον του χαρακτηρισμού του Ελληνικού παραπροϊόντος και παρουσιάζει αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την ενσωμάτωση του στο σκυρόδεμα χρησιμοποιώντας δοκιμές που σχετίζονται με την επιρροή του παραπροϊόντος στην μηχανική συμπεριφορά, την ανθεκτικότητα σε επίθεση χλωριόντων αυτού, ενώ υπολογίζονται οι συντελεστές αποδοτικότητας (k-values) για κάθε σύστημα που αξιολογήθηκε. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα κυριότερα ευρήματα από συγκριτική τεchnοοικονομική μελέτη με στόχο την διερεύνηση εφικτότητας και βιωσιμότητας ανάπτυξης μιας μονάδας εκμετάλλευσης της RHA και τέλος σκιαγραφείται το επιχειρηματικό σχέδιο εκμετάλλευσης της νέας τεχνολογίας.

Concrete incorporating Hellenic Rice Husk Ash (RHA); Approach and perspectives

S. K. Antiohos¹, D. Fili¹, V.G. Papadakis², A. Kiritsi³, M. Tsimas¹, C-T. Galbenis¹ and S. Tsimas^{*1}

¹ Laboratory of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineering, NTUA

² Department of Environmental and Natural Resources Management, University of Ioannina

³ «Agrino», EVGE Pistiolas S.A., R&D Department

Keywords: Rice husk ash, Blended cements, Concrete, Durability, Viability

ABSTRACT: Apart from already known materials (such as fly ash, slag, etc.) that respective research has proved that they may partially replace cement, in the frame of “Competitiveness” Program of GSRT, the Hellenic Rice Husk Ash (RHA) produced in Agrino industry was evaluated. The paper is going beyond solely characterizing the Hellenic by-product and introduces results from its use in concrete with testing involving its influence on mechanical behaviour and resistance against chlorides attack of concrete, whilst efficiency factors are being estimated for each system evaluated. Further, the main findings derived from the comparative techno-economical study are presented mainly focused on the feasibility and viability of a RHA treatment unit. Finally, the corporate plan of utilizing the new know-how developed is being explored.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τέφρα φλοιών ρυζιού (ΤΦΡ ή rice husk ash: RHA) είναι το στερεό υπόλοιπο της καύσης των φλοιών ρυζιού, διεργασία η οποία γίνεται από την γεωργική βιομηχανία για ενεργειακούς λόγους (παραγωγή θερμότητας, ατμού, ηλεκτρικής ενέργειας). Η RHA έχει ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά τα οποία την καθιστούν πολύ ελκυστική για αξιοποίηση σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς. Στα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, η λεπτότητά της και η περιεκτικότητά της σε άμορφο πυρίτιο. Βασικό της μειονέκτημα είναι η σχετικά υψηλή απώλεια πύρωσης, η οποία σε μεγάλο ποσοστό οφείλεται σε άκαυστο άνθρακα, που κυμαίνεται μεταξύ 6-20%.

Πέρα από την χρήση της στο τσιμέντο (Chindaprasit et al.; 2008), η δυνατότητα χρησιμοποίησης της RHA στην παραγωγή σκυροδέματος ως απ' ευθείας ενεργός προσθήκη έχει επίσης εξεταστεί. Η δυνατότητα αυτή είναι εφικτή (και βιώσιμη) όπως πιστοποιήθηκε από τα αποτελέσματα σχετικής έρευνας κατά την οποία κοκκομετρικά κλάσματα RHA προστέθηκαν σε συστήματα σκυροδέματος (σε σημαντικά ποσοστά από 10-30% κατά βάρος τσιμέντου) με τις αντοχές αυτών να αγγίζουν τα 70 MPa (Ampadu et al.; 1999, Bouzoubaa et al.; 1999, Hanehara et al.; 2001). Σε άλλη προσπάθεια (Nehdi et al.; 2003), νέα τεχνολογία βασισμένη σε Torbed αντιδραστήρα χρησιμοποιήθηκε προς παραγωγή υψηλής ενεργότητας RHA με σαφώς λιγότερο άκαυστο άνθρακα. Η παραγόμενη με τον τρόπο αυτό RHA απαιτεί λιγότερο χρόνο άλεσης από την τέφρα που προέρχεται από την συνήθη διαδικασία χωρίς παράλληλα να οδηγεί σε αύξηση της απαίτησης σε νερό και ρευστοποιητή για το αντίστοιχο σκυροδέμα. Διαπιστώθηκε πως η RHA αύξησε δραστικά την θλιπτική αντοχή του σύνθετου σκυροδέματος σε βαθμό έως και 40% στις 56 ημέρες και κατά συνέπεια βρέθηκε ανώτερο (και οικονομικότερο) του αντίστοιχου σκυροδέματος με SF.

Δεδομένου πως η κύρια πρόκληση που αντιμετωπίζει σήμερα ο κλάδος της κατασκευής είναι να ισορροπήσει την απαίτηση για προστασία του περιβάλλοντος με την ανάγκη για οικονομία και αναβαθμισμένη ποιότητα, εξετάστηκε η αποτελεσματικότητα της RHA σε διάφορα συστήματα σκυροδέματος, μέσα από συγκριτική αντιπαράθεση με το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με συμβατικές πρώτες ύλες. Στα πλαίσια της εργασίας εξετάστηκαν και αναλύονται στις ενότητες που ακολουθούν:

- *Η παραγωγή σκυροδέματος με χρησιμοποίηση RHA ως τέταρτου συστατικού*
- *Η αξιολόγηση ιδιοτήτων νωπού και σκληρωμένου σκυροδέματος*
- *Η ανθεκτικότητα σκυροδέματος με RHA απέναντι στην επίθεση χλωριόντων*
- *Η αξιολόγηση της Ελληνικής RHA μέσω της έννοιας του συντελεστή αποδοτικότητας (k-value)*

Επιπλέον, παρουσιάζονται τα κυριότερα ευρήματα από συγκριτική τεχνοοικονομική μελέτη με στόχο την διερεύνηση εφικτότητας και βιωσιμότητας ανάπτυξης μιας μονάδας εκμετάλλευσης της RHA και τέλος σκιαγραφείται το επιχειρηματικό σχέδιο εκμετάλλευσης της νέας τεχνολογίας.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

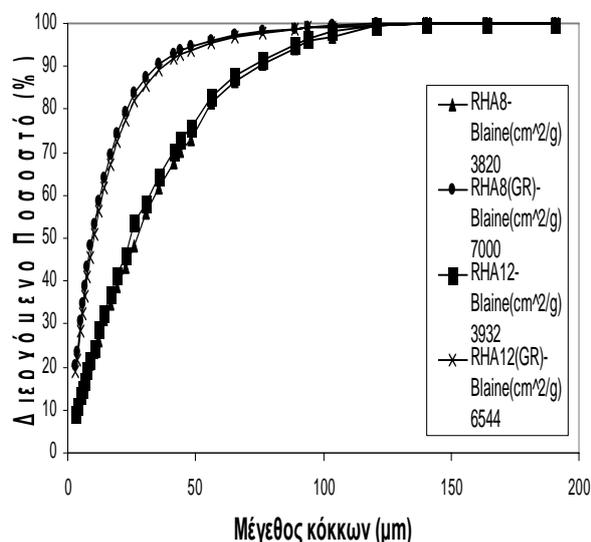
2.1 Χαρακτηρισμός υλικών και προετοιμασία σκυροδέματος

Από την αξιολόγηση 13 συνολικά δειγμάτων – με βασικά κριτήρια την προέλευση, την περιεκτικότητά τους σε ενεργό SiO₂, την υαλώδη φάση και τον περιεχόμενο άκαυστο άνθρακα, επιλέχθηκαν οι RHA8 και RHA12 από τα εργοστάσια της εταιρίας 'Agrino' στην Θεσσαλονίκη και το Αγρίνιο αντίστοιχα. Οι βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες των δειγμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Αντίστοιχα στοιχεία δίνονται και για το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε (τύπου

CEM I42,5). Αμφότερες ΤΦΡ χρησιμοποιήθηκαν αφού αλέστηκαν σταδιακά σε εργαστηριακό τριβέα με βασικό στόχο την επίτευξη παρόμοιας κοκκομετρικής κατανομής (Σχήμα 1).

Πίνακας 1. Φυσικοχημικές ιδιότητες α' υλών¹

	C	RHA8	RHA12
SiO ₂	20.28	89.46	93.15
<u>SiO₂ (re)</u>	=	52.4	59.15
CaO	65.01	1.18	0.82
Al ₂ O ₃	4.75	0.27	0.21
Fe ₂ O ₃	3.76	0.43	0.33
MgO	1.61	0.55	0.26
Na ₂ O	0.32	0.47	0.25
K ₂ O	0.2	1.62	0.82
ZnO	-	<0.001	<0.001
MnO	-	0.12	0.08
CuO	-	0.04	0.1
LOI	2.31	4.06	5.61
IR	0.18	41.33	36.29
<u>GC</u>	=	58.67	63.71
Ειδικό βάρος	3.13	2.16	2.18



Σχήμα 1. Κοκκομετρική κατανομή αλεσμένων RHA

Επιλέχθηκε η μέχρι και 20% κ.β. συμμετοχή RHA στα δοκίμια που εξετάστηκαν προκειμένου (α) να μην αλλοιωθεί σημαντικά ο ρυθμός ενυδάτωσης της πάστας (κάτι που έχει παρατηρηθεί σε συστήματα με μεγαλύτερη ενσωμάτωση ποζολανών), (β) να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της στο σύστημα και (γ) να είναι ρεαλιστική η προσέγγιση της χρήσης της, δεδομένου πως ακόμη και στην περίπτωση της ένταξης της σε σύνθετα τσιμέντα η περιεκτικότητα της δεν αναμένεται να ξεπεράσει το 30% και πως (δ) πρόκειται ουσιαστικά για υλικό για το οποίο δεν υπάρχει πρότερη έρευνα στον Ελλαδικό χώρο και συνεπώς η αντικατάσταση των βασικών συστατικών του σκυροδέματος θα πρέπει να είναι λογικά αυξανόμενη.

Κατά την προετοιμασία των σκυροδεμάτων, για όση τέφρα προστέθηκε στο μίγμα (10 και 20% κ.β. τσιμέντου) τόση ποσότητα τσιμέντου αφαιρέθηκε από το μίγμα. Χρησιμοποιήθηκαν οι λεπτότερες τέφρες (GR). Σε ένα δεύτερο κομμάτι εργασίας, ίδιες ποσότητες από το φάσμα των αδρανών αντικαταστάθηκαν από τις δυο RHA. Ο λόγος w/Cm παρέμεινε σταθερός της τάξεως του 0,60, ενώ προστέθηκε τόση ποσότητα ρευστοποιητή (Glenium 11 της BASF) προκειμένου να διατηρηθεί η κάθιση του νερού σκυροδέματος στα επιθυμητά επίπεδα (60-70 mm). Τέλος, ασβεστολιθικά αδρανή τυπικής διαβάθμισης (λεπού και χοντρού διαμετρήματος) χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα δοκίμια. Το μέγιστο μέγεθος των χοντρών αδρανών ήταν 31,5 mm και των λεπτών 4 mm αντίστοιχα. Παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια πλευράς 10 cm για την εκτίμηση των θλιπτικών αντοχών και κυλινδρικά δοκίμια (ύψους 20 cm και διαμέτρου 10 cm) για την αντίσταση στην επίθεση χλωριόντων. Η σύνθεση των σκυροδεμάτων που ετοιμάστηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 2 (οι ποσότητες των υλικών είναι σε Kg/m³).

¹ SiO₂ (re) – Ενεργό SiO₂ όπως αυτό προσδιορίστηκε κατά EN450-1, IR – Αδιάλυτο υπόλειμμα (EN450-1), GC – Περιεκτικότητα ναλώδους φάσης (κατά RILEM TC FAB67), SG – Ειδικό βάρος

Πίνακας 2: Σύνθεση δειγμάτων σκυροδέματος σε Kg/m³ (C: αντικατάσταση τσιμέντου από RHA, A: αντικατάσταση αδρανών από RHA)

	CONTROL	10RHA8 ^C	20RHA8 ^C	10RHA12 ^C	20RHA12 ^C	10RHA8 ^A	20RHA8 ^A	10RHA12 ^A	20RHA12 ^A
Τσιμέντο (C)	310,0	279,0	248,0	279,0	248,0	310,0	310,0	310,0	310,0
RHA (P)	0,0	31,0	62,0	31,0	62,0	31,0	62,0	31,0	62,0
C+P	310,0	310,0	310,0	310,0	310,0	341,0	372,0	341,0	372,0
Νερό (W)	186,0	186,0	186,0	186,0	186,0	186,0	186,0	186,0	186,0
W/(C+P)	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,55	0,50	0,55	0,50
Γαρμπίλι	840,0	835,0	840,0	840,0	840,0	827,5	795,0	827,5	795,0
Άμμος	1030,0	1020,0	1030,0	1030,0	1030,0	1011,5	993,0	1011,5	993,0
Αδρανή Σύνολο	1870,0	1855,0	1870,0	1870,0	1870,0	1839,0	1788,0	1839,0	1788,0
SP (g/lit)	20,0	24,0	28,9	25,5	28,9	30,6	48,1	34	49,3
Slump (mm)	70.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0

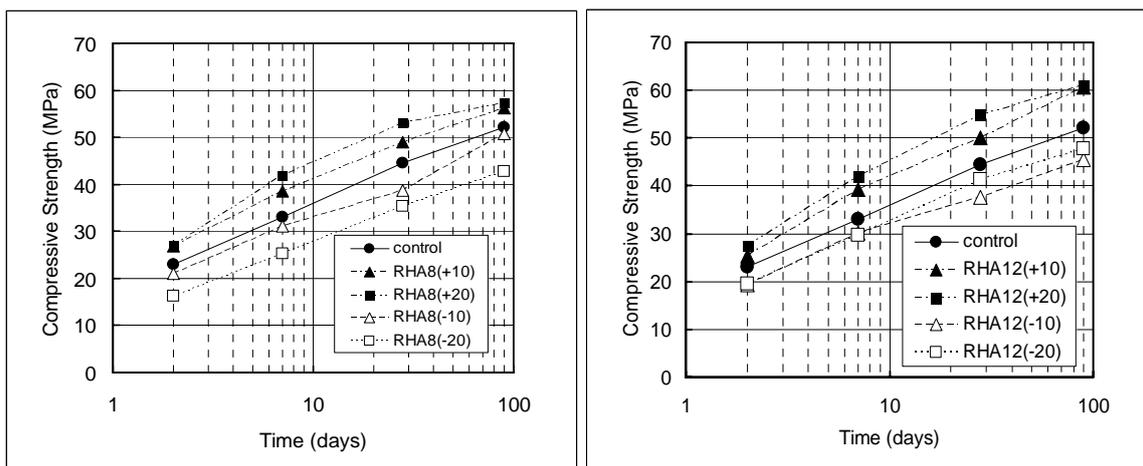
Παρατηρείται πως η ποσότητα του SP που προστέθηκε κυμάνθηκε μεταξύ 24 και 50 g/l σκυροδέματος. Πρακτικά, η εισαγωγή RHA στο μίγμα των πρώτων υλών, επέφερε αύξηση της απαίτησης σε SP (ή αλλιώς αύξηση της απαίτησης του σκυροδέματος σε νερό για την ίδια εξάπλωση). Η απαίτηση σε SP είναι ανάλογη και στους δύο τύπους υποκατάστασης που εφαρμόστηκαν (τσιμέντου και αδρανών) της ποσότητας της RHA που εισάγεται στο μίγμα, με την μέγιστη απαίτηση να διαπιστώνεται στην περίπτωση όπου οι τέφρες αντικατέστησαν αδρανή. Αυτό σαφώς οφείλεται στο ότι στα εν λόγω σκυροδέματα η συνολική ποσότητα των υδραυλικών υλικών (που είναι αυτά που κυρίως καθορίζουν την απαίτηση σε νερό) αυξήθηκε, κάτι που δεν έγινε στα δοκίμια όπου οι τέφρες αντικατέστησαν τσιμέντο. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, η προσθήκη αυτή κυμάνθηκε σε χαμηλά επίπεδα, ενώ η ποιότητα της τέφρας που προστέθηκε είχε αμελητέα επίδραση στην εργασιμότητα, όπως διαπιστώνεται από τις παρόμοιες τιμές SP προσθήκης για κάθε τύπο σκυροδέματος. Αυτό είναι λογικό δεδομένης της κοινής λεπτότητας των RHA8 και RHA12, αλλά και της απουσίας σημαντικών διαφορών στα εγγενή τους συστατικά που μπορεί να απαιτήσουν νερό (π.χ. ύπαρξη ασβεστίτικων ενώσεων, ή ενώσεων ανυδρίτη).

2.2 Θλιπτική αντοχή

Η εξέλιξη των θλιπτικών αντοχών για τα δοκίμια σκυροδέματος με ενσωμάτωση RHA8 και RHA12 παρουσιάζεται στα σχήματα 2 (α) και (β) αντίστοιχα (P(+): το SCM αντικαθιστά αδρανή; P(-): το SCM αντικαθιστά τσιμέντο, κατά βάρος της περιεκτικότητας του τσιμέντου του δοκιμίου αναφοράς).

Παρατηρείται πως σε όλες τις ηλικίες το συμβατικό σκυρόδεμα (χωρίς RHA) παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή στην δοκιμή θλίψης. Ο ρυθμός ωστόσο με τον οποίο τα RHA-δοκίμια

αναπτύσσουν αντοχή είναι ισοδύναμος του δοκιμίου αναφοράς, ενώ μετά την πρώτη εβδομάδα συντήρησης και ιδιαίτερα στην περίπτωση της αυξημένης συμμετοχής ποζολάνης (20% κ.β. τσιμέντου) ο ρυθμός αυτός υπερβαίνει τον αντίστοιχο του συμβατικού. Στο τελευταίο στάδιο της ενυδάτωσης (28-90 ημ.) παρατηρείται η αντίθετη τάση με τα δοκίμια που περιέχουν λιγότερη τέφρα να αναπτύσσουν αντοχή ταχύτερα με χαρακτηριστικό παράδειγμα το σκυρόδεμα 10RHA8^{CEM} που προσεγγίζει το συμβατικό. Η μεγαλύτερη συμμετοχή RHA8 στο μίγμα επιφέρει μείωση των αντοχών του σκυροδέματος σε όλη την δοκιμαστική περίοδο, κάτι όμως που δεν συμβαίνει στην περίπτωση της έτερης τέφρας RHA12 όπου το μίγμα με την περίσσεια τέφρας εμφανίζει καλύτερη μηχανική συμπεριφορά. Δεδομένου πως η λεπτότητα των δύο τεφρών είναι παρόμοια, η διαφορά αυτή δεν μπορεί παρά να αποδοθεί στην χημική τους σύσταση και ιδιαίτερα στο ενεργό τους SiO₂ που βρέθηκε να εμπλουτίζει την RHA12 (59% έναντι 52% της RHA12). Έχει διαπιστωθεί στην περίπτωση άλλων λεπτόκοκκων ενώσεων πως αυξημένη συμμετοχή τους σε μίγματα, είτε πρόκειται για κονιάματα είτε για σκυρόδεμα, με το τσιμέντο είναι ανταγωνιστικά με το συμβατικό μόνο όταν η ενεργή τους πυριτία υπερβαίνει ένα κατώτερο όριο. Και στην περίπτωση της Ελληνικής RHA παρατηρείται η ίδια τάση κάτι που πιστοποιείται και από την αδυναμία του σκυροδέματος με μικρή συμμετοχή της RHA12 (10RHA12^{CEM}) να υπερβεί το αντίστοιχο δοκίμιο της RHA8. Σε κάθε περίπτωση και σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα, διαπιστώνεται πως και τα 4 σκυροδέματα με RHA είναι ανταγωνιστικά τόσο στις πρώιμες όσο και στις μετέπειτα ηλικίες, ως αποτέλεσμα της πληρωτικής τους δράσης (filler effect) αλλά και της εκδήλωσης του ποζολανικού τους δυναμικού που εκδηλώνεται με την πάροδο του χρόνου.



Σχήμα 2 (α), (β) - Ανάπτυξη θλιπτικών αντοχών για σκυρόδεμα που περιέχει RHA8 και RHA12

Στην περίπτωση αντικατάστασης αδρανών, η κατάσταση αντιστρέφεται εμφανώς με τα σύνθετα σκυροδέματα να υπερτερούν σημαντικά του συμβατικού σκυροδέματος από την έναρξη της ενυδάτωσης. Η διαφορά της αντοχής διογκώνεται με την εξέλιξη της ενυδάτωσης με τα ποζολανικά σκυροδέματα να ξεπερνούν εύκολα το συμβατικό στο τέλος της περιόδου. Η εικόνα αυτή ήταν μάλλον αναμενόμενη δεδομένου πως στην προκειμένη περίπτωση οι RHA χρησιμοποιήθηκαν ως αδρανή χωρίς ωστόσο να είναι, όπως φάνηκε κατά την εξέταση του ποζολανικού τους δυναμικού. Η ποζολανική τους ικανότητα που εκδηλώνεται ως δέσμευση της υδρασβέστου που παράγεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου (που είναι σταθερή κονία και στα 4 εναλλακτικά σκυροδέματα) και ποσοτικοποιήθηκε στην ενότητα της ενυδάτωσης, οδηγεί σε σχηματισμό επιπλέον C-S-H που στο συμβατικό σκυρόδεμα δεν μπορεί να υπάρξει αφού τα ασβεστολιθικά αδρανή παραμένουν ανενεργά στις αλκαλικές συνθήκες. Σε αντίθεση με τον προηγούμενο τύπο αντικατάστασης τσιμέντου, εδώ τα δοκίμια με αυξημένη συμμετοχή RHA

αποδίδουν καλύτερα σε όλες τις ηλικίες. Φαίνεται πως η προηγούμενη απαίτηση για RHA με αρκετό ενεργό SiO₂ δεν είναι εξίσου καθοριστική στην περίπτωση όπου αυτή υποκαθιστά αδρανή. Ωστόσο και πάλι η RHA12 εμφανίζει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και το γεγονός πως η διαφορά της με τα αντίστοιχα σκυρόδεμα της RHA8 μεγιστοποιείται μετά τον πρώτο μήνα της ενυδάτωσης μπορεί να αποτελεί ένδειξη πως κυρίως σε αυτό το στάδιο η Ελληνική τέφρα εκδηλώνει την χημική της ενεργότητα.

2.3 Αντίσταση σε επίθεση χλωριόντων

Αξιολογήθηκε η αντίσταση σκυροδέματος με RHA εφαρμόζοντας την επιταχυνόμενη δοκιμή διείσδυσης ASTM C1202. Τα δοκίμια εξετάστηκαν αφού πρώτα είχαν συντηρηθεί για 55 ημέρες σε νερό κορεσμένο με Ca(OH)₂, διάστημα που θεωρείται επαρκές για την εξασφάλιση σημαντικού βαθμού ενυδάτωσης του τσιμέντου αλλά και για την εκδήλωση μέρους της ποζολανικής δράσης των τεφρών που χρησιμοποιήθηκαν. Η εξαιρετική επίδοση και των δύο τύπων τεφρών που δοκιμάστηκαν σε σχέση με την απόδοση του δοκιμίου αναφοράς απεικονίζεται στον Πίνακα 3, όπου το ηλεκτρικό φορτίο που διήλθε από τα δοκίμια παρουσιάζεται συναρτήσει της παρουσίας RHA στο σκυρόδεμα. Η ηλικία στην οποία τα δοκίμια εξετάστηκαν (55 ημέρες ενυδάτωσης) εξασφάλισε την εκδήλωση μέρους της ποζολανικής δράσης από τις τέφρες που εντάχθηκαν στα σύνθετα σκυροδέματα, ωστόσο αυτή δεν εξαντλήθηκε (όπως αποδεικνύεται σε προηγούμενη ενότητα), γεγονός που καθιστά την αξία της τέφρας ακόμη σημαντικότερη για μακροπρόθεσμα αποτελέσματα. Αυτός είναι προφανώς και ο βασικός λόγος που τα τεφρό-σκυροδέματα επιτρέπουν την διέλευση μικρότερου φορτίου από το συμβατικό σκυρόδεμα.

Πίνακας 3 – Ηλεκτρικό φορτίο (adjusted charge) που διέρχεται από σκυροδέματα με προσθήκη RHA (CEM: αντικατάσταση τσιμέντου από RHA, AGG: αντικατάσταση αδρανών από RHA)

	Ημέρες συντήρησης	Charge Passed (cbs)	Adjusted charge passed (cbs)	Permeability Class (ASTM)
CONTROL	51	3135	2719	Moderate
10RHA1 ^{CEM}	51	3896	3380	Moderate
20RHA1 ^{CEM}	51	1962	1702	Low
10RHA2 ^{CEM}	51	2962	2569	Moderate
20RHA2 ^{CEM}	55	996	864	Very Low
10RHA1 ^{AGGR}	55	1842	1598	Low
20RHA1 ^{AGGR}	56	490	425	Very Low
10RHA2 ^{AGGR}	56	287	249	Very Low
20RHA2 ^{AGGR}	55	1049	910	Very Low

Θεωρείται προφανές πως η μηχανική άλεση που προηγήθηκε της χρήσης των ποζολανών οδήγησε στην δημιουργία λεπτότερων κόκκων από αυτών του τσιμέντου. Είναι γενικώς αποδεκτό πως – σε επίπεδο σκυροδέματος – οι μικρότεροι κόκκοι των ιπταμένων τεφρών ενισχύουν (μέσα από το filler effect) την στοιβαξη (packing) μεταξύ των αδρανών (ειδικώς των λεπτών) και των κόκκων του τσιμέντου, μειώνοντας έτσι το συνολικό πορώδες (άρα και την διαπερατότητα) του τελικού προϊόντος (Hanehara et al; 2001). Σε κάθε περίπτωση και σύμφωνα με την επίσημη κατάταξη κατά ASTM C1202, τα ποζολανικά σκυροδέματα εμφανίζουν χαμηλότερη (για αντικατάσταση τσιμέντου) και πολύ χαμηλότερη (για αντικατάσταση αδρανών) διαπερατότητα στην διείσδυση

χλωριόντων, την στιγμή που τα συμβατικό σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από μέτρια διαπερατότητα στην επίθεση του ίδιου μέσου.

2.4 Αξιολόγηση RHA μέσω k-value

Ο συντελεστής ενεργότητας k (k-value) (Papadakis, Tsimas; 2002, Papadakis et al.; 2002) ορίζεται ως το μέρος της ποζολάνης που μπορεί να θεωρηθεί ως ισοδύναμο του τσιμέντου Portland παρέχοντας ίσες τιμές ιδιοτήτων με το σκυρόδεμα χωρίς ποζολάνη (προφανώς k=1 για τσιμέντο Portland). Ως τέτοια ιδιότητα σύγκρισης χρησιμοποιείται συχνά η θλιπτική αντοχή, παρά ταύτα και άλλες ιδιότητες μπορεί να χρησιμοποιηθούν όπως διαπερατότητα, ανθεκτικότητα, κλπ.

Στην περίπτωση ποζολανικού σκυροδέματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη εξίσωση που περικλείει την έννοια του συντελεστή k:

$$f_c = K \left(\frac{1}{W / (C + kP)} - \alpha \right) \quad (1)$$

όπου P είναι η περιεκτικότητα SCM στο σκυρόδεμα (kg/m^3). Χρησιμοποιώντας τις μέσες μετρηθείσες τιμές αντοχής για το δοκίμιο αναφοράς, το α υπολογίστηκε ως 1.06, 0.8, 0.5 και 0.3, για 2, 7, 28, και 90 ημέρες, αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας αυτήν την εξίσωση και τις παρούσες (Σχήματα 2(α) & 2(β)) πειραματικές τιμές αντοχής, οι συντελεστές ενεργότητας k για RHA8 και RHA12 υπολογίζονται και δίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Συντελεστές ενεργότητας (k-values) για διάφορα δευτερεύοντα υδραυλικά υλικά.

Ιδιότητα Σκυροδέματος	RHA8*	RHA12*	FL**	SF**
Αντοχή 2 ημερών	0.5	0.5	-	-
Αντοχή 7 ημερών	0.7	0.8	-	-
Αντοχή 28 ημερών	0.7	0.8	0.5	3
Αντοχή 90 ημερών	0.8	0.9	0.7	2.4

* αυτή η εργασία

** προηγούμενες εργασίες (7-8): FL: ιπτάμενη τέφρα ανθρακίτη – χαμηλού ασβεστίου. SF: πυριτική παιπάλη -silica fume.

Σε γενικές γραμμές, η RHA αναπτύσσει ικανοποιητικές αντοχές που έχουν ως αποτέλεσμα μέτριες τιμές για το k, περίπου 0.8 στις 28 ημέρες (με μια μέση τιμή k=0.66 για RHA8 και k=0.74 για RHA12). Αυτή η συμπεριφορά είναι καλύτερη σε σχέση με την χαμηλής ασβεστίου ιπτάμενη τέφρα (FL όπου k=0.5) αλλά αρκετά χειρότερη από την πυριτική παιπάλη (silica fume, SF, όπου k=2.5-3).

2.5 Τεχνοοικονομική μελέτη

Η εταιρεία AGRINO δραστηριοποιείται από το 1950 στην επεξεργασία ρυζιού. Διαθέτει ένα ιδιαίτερα πρωτοποριακό προφίλ, ενώ μεγάλο μέρος του κύκλου εργασιών της αφορά σε εξαγωγές. Το βασικό της προϊόν είναι το κίτρινο (parboiled) ρύζι - περιζήτητο στην εγχώρια και διεθνή αγορά για την υψηλή του θρεπτική αξία - και σε μικρότερο ποσοστό το λευκό ρύζι. Παράλληλα, είναι η πρώτη εταιρεία που ασχολήθηκε με την επεξεργασία και μεταποίηση του ρυζιού, εισάγοντας ουσιαστικά στη χώρα μας την αντίστοιχη εξειδικευμένη τεχνολογία που απαιτεί το ρύζι parboiled.

Εντάσσοντας το ρύζι parboiled στη γραμμή παραγωγής της, η εταιρεία λόγω της ειδικής υγροθερμικής επεξεργασίας του, διαπίστωσε τις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις και την περιβαλλοντική επιβάρυνση που επέφερε η καύση σημαντικών ποσοτήτων πετρελαίου εξωτερικής καύσης (μαζούτ). Κατ' επέκταση, το κόστος παραγωγής ήταν ιδιαίτερα αυξημένο και η εταιρεία αναζητούσε μια βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση του διττού αυτού προβλήματος. Η λύση αυτή επιτεύχθηκε με την κατασκευή ενός πρωτοποριακού συστήματος καύσεως του φλοιού του ρυζιού. Με το σύστημα αυτό εξασφαλίστηκαν τα παρακάτω:

1. Η εξάλειψη της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης αφού πλέον στη διαδικασία δεν χρησιμοποιείται καύση μαζούτ, αλλά φλοιού.
2. Η κάλυψη του συνόλου των ενεργειακών αναγκών για την υγροθερμική επεξεργασία από την διαδικασία καύσης του φλοιού.
3. Η παραγωγή και εξαγωγή της τέφρας φλοιού ρυζιού (RHA), η περιεκτικότητα της οποίας σε πυρίτιο την καθιστά πολύτιμη σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.
4. Η αύξηση της προστιθέμενης αξίας των τελικών προϊόντων.

Το σύνολο της RHA που παράγεται και στα δύο εργοστάσια της AGRINO, Αγρίνιο & Θεσσαλονίκη, είναι περί τα 1.5-2.5 t/day, και ήτοι η συνολικά παραγόμενη ποσότητα είναι 500 t/yr. Σε ολοκληρωμένο έργο (9) διεξήχθη συγκριτική τεχνοοικονομική μελέτη με στόχο την διερεύνηση εφικτότητας και βιωσιμότητας ανάπτυξης μιας μονάδας εκμετάλλευσης της RHA, και την αποσαφήνιση των πιθανών οφελών και κινδύνων. Συγκεκριμένα, για τις μεθοδολογίες αξιοποίησης RHA που αναπτύσσονται σε επιμέρους ερευνητικές εργασίες προσεγγίζονται: η βιομηχανική μέθοδος παραγωγής, οι πρώτες ύλες και ο σχετικός εξοπλισμός, οι απαιτήσεις σε προσωπικό, οι λειτουργικοί και άλλοι περιορισμοί, η εκτίμηση συνολικού πάγιου και λειτουργικού κόστους, η αγορά των νέων προϊόντων και ο σχετικός ανταγωνισμός, τα αναμενόμενα έσοδα και ο βαθμός απόδοσης, και τέλος σκιαγραφείται το επιχειρηματικό σχέδιο εκμετάλλευσης της νέας τεχνολογίας.

Η RHA μπορεί να χρησιμοποιηθεί απλώς κονιορτοποιημένη και ομογενοποιημένη σε δομικές εφαρμογές. Υπάρχει δυνατότητα προσθήκης σε τσιμέντα ως δευτερεύων συστατικό (φίλλερ) ή ακόμα καλύτερα ως ποζολανικό υλικό με δυνατότητα αντικατάστασης τσιμέντου (κλίνκερ). Επιπλέον μπορεί να προστεθεί απευθείας σε σκυροδέματα βελτιώνοντας σημαντικά τις αντοχές και ιδιαίτερα σημαντικά την αντίσταση του σκυροδέματος σε διείσδυση χλωριόντων και επερχόμενη διάβρωση των χαλύβδινων ράβδων οπλισμού. Η μελέτη εκτείνεται στην διεργασία παραγωγής κρυσταλλικών ζεόλιθων υψηλής πυριτίας από RHA, κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες σύνθεσης όπου οι ζεόλιθοι και συγκεκριμένα ο ZSM-5 χρησιμοποιείται ευρέως ως καταλύτης στην οργανική σύνθεση και στην πετροχημική βιομηχανία. Επιπλέον η RHA χρησιμοποιείται και για την παραγωγή υδρύαλου. Η υδρύαλος (πυριτικό νάτριο ή κάλλιο) παρουσιάζει πολλές εφαρμογές σε τομείς όπως: στη βιομηχανία απορρυπαντικών ως φορέας των δραστικών ουσιών, στη βιομηχανία χυτηρίων για την σκλήρυνση των καλουπιών, στη χαρτοβιομηχανία ως κολλητική ουσία, στην υφαντουργία, στη στερεοποίηση εδαφών, στις αναπαλαιώσεις κτιρίων, στα κεραμικά και στα χρώματα.

Από την συγκριτική μελέτη προκύπτει ότι η παραγωγή νέων προηγμένων υλικών από RHA είναι συμφέρουσα σε όλες τις περιπτώσεις, με προσδοκώμενο κέρδος και ρυθμό επιστροφής αρχικής επένδυσης να αυξάνει κατά σειρά παραγωγής υλικών : βελτιωτικά υλικά παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος → ζεόλιθος → υδρύαλος, με αυξανόμενο επίσης τον βαθμό επικινδυνότητας και αβεβαιότητας κατά σειρά παραγωγής των υλικών : βελτιωτικά υλικά παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος → υδρύαλος → ζεόλιθος.

3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά από μία εντελώς ελεγχόμενη συμπληρωματική άλεση, η προσθήκη Ελληνικής RHA στο σκυρόδεμα έδωσε τιμές μηχανικών ιδιοτήτων και αντίστασης σε επίθεση χλωριόντων που δικαιολογούν την πολύ καλή ποζολανική συμπεριφορά της RHA που εκτιμάται καλύτερη από αυτή των ιπταμένων τεφρών. Ειδικά τα εντυπωσιακά αποτελέσματα που προκύπτουν από την υποκατάσταση αδρανών με RHA σε σκυροδέματα, δικαιολογούν την ανάπτυξη του σκυροδέματος υψηλών αντοχών για εξειδικευμένες χρήσεις, ως ένα νέο δομικό υλικό. Η παρατήρηση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία, καθόσον θεαματικότερη συμπεριφορά στα μηχανικά χαρακτηριστικά, σίγουρα θα προδιέθετε διαφορετικά τους βασικούς εν δυνάμει χρήστες του υλικού (όπως είναι οι τσιμεντοβιομηχανίες) οι οποίες και θα παρέβλεπαν το βασικό μειονέκτημα του υλικού που, σίγουρα, δεν είναι η ποιότητα του, αλλά το περιορισμένο της παραγωγής του. Όντως ποσότητες RHA της τάξης των 500 τόνων ετησίως, που εκτιμάται ότι είναι η συνολική παραγωγή της AGRINO, θεωρούνται αμελητέες για ενσωμάτωση του υλικού στην συνηθισμένη παραγωγή της τσιμεντοβιομηχανίας. Επιπροσθέτως η εντυπωσιακή βελτίωση που έδειξε η ΤΦΡ με ελεγχόμενη άλεση οδηγεί στο αβίαστο συμπέρασμα ότι περαιτέρω άλεση η οποία, όπως επισημάνθηκε, δεν θα είναι ενεργειοβόρος (δεδομένου ότι η ΤΦΡ αλέθεται πολύ εύκολα), θα οδηγήσει σε περισσότερο εντυπωσιακά αποτελέσματα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. P. Chindaprasirt, S. Rukzon, V. Sirivivatnanon, Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 932–938
2. Ampadu, K. O., Torii, K., Kawamura, M., Beneficial effect of fly ash on chloride diffusivity of hardened cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No.4, 1999, pp. 585-590.
3. Bouzoubaa, N. et al, Production and Performance of Laboratory Produced High-Volume Fly Ash Blended Cements in Concrete. Paper Presented at the Two-Day CANMET/ACI International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development, Vancouver, Canada, April 1999, pp 1-13.
4. Hanehara, S. et al, "Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste"; *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 1, 2001, pp. 31-39.
5. M. Nehdi, J. Duquette, A. El Damatty, Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 33 (8), 2003, 1203-1210.
6. European Standard EN 206, "Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity", CEN, Brussels (2000).
7. Papadakis, V.G. and S. Tsimas, "Supplementary Cementing Materials in Concrete - Part I: Efficiency and Design", *Cement and Concrete Research*, **32**(10), 1525-1532 (2002).
8. Papadakis, V.G., S. Antiohos, and S. Tsimas, "Supplementary Cementing Materials in Concrete - Part II: A Fundamental Estimation of the Efficiency Factor", *Cement and Concrete Research*, **32**(10), 1533-8 (2002).
9. Έργο PYRICE 05ΔΣΒΕΠΡΟ-6: «Διερεύνηση ανάπτυξης προηγμένων υλικών υψηλής προστιθέμενης αξίας από τέφρα φλοιών ρυζιού», Πρόγραμμα ΔΙΕΘΝΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΣΕ ΠΡΟΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟ ΣΤΑΔΙΟ -2005, Γενική Γραμματεία Έρευνας & Τεχνολογίας, Υπεύθυνος Φορέας : ΕΥ.ΓΕ. Πιστιόλας ΑΕ (AGRINO), Έναρξη: 7/2006, Λήξη: 4/2008.

Νέες πρακτικές αναβάθμισης και ενεργοποίησης Ελληνικών ιπταμένων τεφρών για χρήση στον δομικό τομέα

Σ.Κ. Αντίοχος και Σ. Τσίμας

Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Λέξεις κλειδιά: Ιπτάμενη τέφρα, Κατεργασία, Ενεργοποίηση, Δραστικότητα, Σύνθετα τσιμέντα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Μολονότι η εφαρμογή μεθόδων ενεργοποίησης της χημικής δραστικότητας της ιπτάμενης τέφρας ξεκίνησε να εφαρμόζεται στις περιπτώσεις όπου το παραπροϊόν είναι χαμηλής ποιότητας, θεωρείται πλέον κοινός τόπος στην παγκόσμια πρακτική διαχείρισης συμπληρωματικών υδραυλικών υλικών (SCMs) ανάλογα με τις ανάγκες της κατασκευής. Στα πλαίσια του παρόντος, εξετάζονται διαφορετικοί τρόποι αναβάθμισης της δραστικότητας των δύο τύπων της Ελληνικής τέφρας, αποσκοπώντας στην καθιέρωση ενός καινοτόμου know-how που θα οδηγήσει στην περαιτέρω αξιοποίηση του προϊόντος στον δομικό τομέα. Οι τρόποι αναβάθμισης που εξετάζονται είναι (α) η προσθήκη χημικού μέσου, (β) η ανάμιξη διαφορετικών τύπων τεφρών και (γ) η κατεργασία του χονδρόκοκκου μέρους της τέφρας. Συμπεραίνεται πως και οι τρεις μεθοδολογίες λειτουργούν εις όφελος των ιδιοτήτων της τέφρας που μπορεί κατόπιν να ενσωματωθεί είτε στο τσιμέντο (blended cements), είτε απ' ευθείας στο σκυρόδεμα, ωστόσο η προσεκτική προσέγγιση επί του τελικού κόστους – σε συνάρτηση με το όφελος που θα επιφέρει στην εκάστοτε εφαρμογή – είναι απαραίτητη.

New practices of improving and activating Hellenic fly ashes for use in the construction sector

S.K. Antiohos and S. Tsimas

Labs of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineering, NTUA

Keywords: Fly ash, Processing, Activation, Reactivity, Blended cements

ABSTRACT: Even though the application of activation techniques for fly ash was initiated by the need for improving the performance of low-quality ashes, it is considered nowadays a common tactic in the management of supplementary cementing materials (SCMs), depending on the needs of the structure. In the current paper, different means of improving the reactivity of both types of Hellenic fly ashes are being investigated, aiming at producing an innovative know-how deposit that will help towards increasing fly ash utilization rate. Chemical activation, blending of different ashes and processing the coarser part of the ash are the ways examined and evaluated. It is gathered that all three methods benefit the properties of fly ash that can be incorporated into blended cement or as a direct reactive addition into concrete. However, cost data - in relation to associated gain per application - should be always taken into consideration before adopting any of those methods.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μολονότι το πρόσφατα συνταχθέν Εθνικό σχέδιο προδιαγραφών για την χρήση της υψηλού ασβεστίου τέφρας στο – άοπλο προς το παρόν – σκυρόδεμα αναμένεται να ενεργοποιήσει την υψηλότερη εκμετάλλευση του υλικού στον δομικό τομέα, η παρούσα κατάσταση (Papadakis, Tsimas; 2001) δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ιδεατή δεδομένου πως από τους περίπου 11 εκ. τόνους που παράγονται ετησίως ο ρυθμός απορρόφησης τους δεν ξεπερνά το φτωχό 10-12%. Δεδομένου πως αρκετά έχουν γίνει αναφορικά με την ερμηνεία της δράσης της Ελληνικής τέφρας, το επόμενο βήμα είναι η εφαρμογή βιώσιμων πρακτικών που μπορούν να εξουδετερώσουν τα μειονεκτήματα της. Είναι σαφές ωστόσο πως το εγχείρημα αυτό δεν είναι εύκολο, αφού πρόκειται για ένα ιδιαίτερα ετερογενές υλικό, όπου όλα τα ρεύματα παραγωγής δεν είναι ίδια και επιπλέον η ακριβής επίδραση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τους στην απόδοση του τσιμέντου δεν μπορεί να προβλεφθεί.

Προς αντιμετώπιση του προβλήματος της αργής εξέλιξης της ποζολανικής δράσης της ιπτάμενης τέφρας, μια σειρά μεθόδων ενεργοποίησης έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν. Μηχανική άλεση (Bouzoubaa et al.;1997), κατεργασία σε υψηλή θερμοκρασία (Shi and Day; 1993), αλκαλική (Palomo et al.;1999) και χημική (Shi and Day; 1995) ενεργοποίηση είναι μερικές από αυτές. Ωστόσο η αποτελεσματικότητά τους έχει επικριθεί δεδομένου πως άλλες αποδείχθηκαν ενεργειακά ασύμφωρες, άλλες λειτούργησαν θετικά μόνο για τις τέφρες χαμηλού ασβεστίου ενώ τέλος αρκετές από αυτές απέτυχαν οικονομοτεχνικά (cost-benefit analysis). Συνολικά, στα πλαίσια της εργασίας, εξετάζεται η αποτελεσματικότητά τριών μεθόδων – χημικής ενεργοποίησης, ανάμιξης ιπταμένων τεφρών και κατεργασίας του χονδρόκοκκου κλάσματος της τέφρας – ως προς την βελτίωση της μηχανικής απόδοσης των αντίστοιχων συστημάτων τσιμέντου και επιχειρείται συγκριτική ανάλυση με προσέγγιση κόστους για κάθε μία από αυτές.

2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

2.1. Υλικά και τεχνικές βελτίωσης

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τσιμέντο CEM I 42,5N (C), ασβεστούχος τέφρα Πτολεμαΐδας (T_F) και τέφρα μικρότερης περιεκτικότητας σε ασβέστιο από την Μεγαλόπολη (T_M). Οι δύο ποζολάνες αλέστηκαν πριν την χρήση τους σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο (στον ίδιο βαθμό) προς εξουδετέρωση της επίδρασης της λεπτότητας τους. Η χημική σύσταση και κύριες φυσικές ιδιότητες των υλικών συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

Για την χημική ενεργοποίηση χρησιμοποιήθηκε βιομηχανικός ασβέστης (quicklime) υψηλής καθαρότητας. Όταν προστέθηκε quicklime, ίση μάζα τέφρας αφαιρέθηκε από το μίγμα. Η προσθήκη του χημικού μέσου ήταν της τάξης του 3% και 6% και τα αντίστοιχα δείγματα κωδικοποιήθηκαν ως T_{F_3Q} και T_{F_6Q} αντίστοιχα. Στην αναβάθμιση με κατεργασία, η T_F διαχωρίστηκε με την βοήθεια ενός εργαστηριακού αεροδιαχωριστή και την προσαρμογή κόσκινου των 45 μm και συστήματος κυκλώνα προς συλλογή του ρεύματος που διήλθε από το κόσκινο. Με τη παραπάνω διάταξη δύο νέες τέφρες προέκυψαν: το χονδρόκοκκο κλάσμα της T_F (~58% της αρχικής) που παρέμεινε πάνω από το διαχωριστικό κόσκινο (T_{FP}) και το λεπτότερο κλάσμα (T_{FM}) με σωματίδια λεπτότητας μικρότερης των 45 μm . Η χημική σύσταση και τα κύρια φυσικά χαρακτηριστικά των διαχωρισμένων κλασμάτων δίνονται επίσης στον Πίνακα 1. Και σε αυτήν την περίπτωση ακολούθησε μηχανική κατεργασία προκειμένου να εξουδετερωθεί η επίδραση της λεπτότητας από την συνολική δράση των υλικών αλλά και επιπρόσθετα για να μην απολεσθεί το filler effect του χονδρόκοκκου κλάσματος. Τα δεδομένα του Πίνακα 1, αλλά και η παρόμοια κοκκομετρική κατανομή (Antiohos et al; 2007) πιστοποιούν την επιτυχή έκβαση της άλεσης. Τα διαχωρισμένα δείγματα εισήχθησαν σε κονιάματα τσιμέντου αντικαθιστώντας την κλασσική

πρώτη ύλη σε ποσοστό 20% κ.β. (cementitious materials-to-sand ratio 1:3 και W/C_M 0.5 χρησιμοποιήθηκαν κατά την μίξη). Η ίδια τακτική ακολουθήθηκε για όλες τις τεχνικές που αξιολογήθηκαν.

Πίνακας 1. Κύριες χημικές και φυσικές ιδιότητες τσιμέντου και ιπταμένων τεφρών

	C	T _F	T _M	T _T	T _{FP}	T _{FM}
CaO	65.01	29.79	13.80	21.50	21.02	33.02
CaO _f	0.63	4.05	0.95	3.65	2.36	4.45
CaO _{re} ^a	<i>n.a.</i> ^c	25.13	9.42	14.76	16.35	27.43
SiO ₂	20.28	36.92	51.36	44.08	42.79	33.50
SiO _{2re} ^a	<i>n.a.</i>	29.13	31.36	30.36	32.46	26.49
Al ₂ O ₃	4.75	13.50	16.73	15.70	14.92	11.80
Fe ₂ O ₃	3.76	7.06	8.75	8.75	5.82	5.70
MgO	1.61	2.69	2.26	2.45	3.32	3.43
SO ₃	2.55	5.10	1.49	3.17	3.09	8.79
Na ₂ O	0.17	0.92	0.77	0.72	0.74	0.71
K ₂ O	0.35	0.50	1.52	1.02	0.56	0.61
LOI	2.31	4.36	4.86	4.61	4.66	4.01
γ_s^d	<i>n.a.</i>	78.90	74.84	82.38	75.86	79.07
IR (%) [*]	0.18	14.52	25.16	17.62	15.69	10.40
Glass content. S ^b (%)	<i>n.a.</i>	85.48	74.84	82.38	84.31	89.60
Blaine Fineness (cm ² /g)	3.760	5.450	5.600	5.500	5.420	5.250
Specific Gravity	3.13	2.80	0.95	3.65	2.92	2.78

^a Οι μέθοδοι που περιγράφονται στα EN 450-1 και 196-2 εφαρμόστηκαν για τον προσδιορισμό του ενεργού SiO₂

^b GC: Ποσοστό της ναλώδους φάσης στο υλικό, σύμφωνα με τις οδηγίες της RILEM(TC FAB-67 [12])

^c *n.a.*: μη διαθέσιμο

^d γ_s : active ratio (ratio of active: total silica)

Για την κατασκευή του τριμερούς μίγματος, η ασβεστούχος τέφρα αναμίχθηκε (χωρίς επιπλέον άλεση) με την πυριτική σε αναλογία 50:50 σε ένα περιστρεφόμενο αναμικτήρα για 30 min. Αυτό το διάστημα κρίθηκε επαρκές για την πλήρη ομογενοποίηση του αναμίγματος (T_T), τα χαρακτηριστικά του οποίου δίνονται στον Πίνακα 1. Παρατηρείται πως η διαδικασία ανάμιξης είχε ευεργετικά αποτελέσματα στα περιεχόμενα ποσοστά SO₃ και ελευθέρως ασβέστου (free-CaO) του αναμίγματος, δεδομένου ότι προσεγγίστηκε η προσαρμογή τους με τις απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού προτύπου EN 450-1. Αυτό είναι ιδιαίτερης σημασίας δεδομένου πως παράγοντες όπως τα SO₃ και CaO_f απειλούν – όταν βρίσκονται σε περίσσεια στην τέφρα – την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος γεννώντας αντιδράσεις διόγκωσης (Chen et al; 2002, Ouyang et al; 1988).

2.2. Δοκιμές

Πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ανάπτυξης των θλιπτικών αντοχών των νέων συστημάτων στις 2,7,28 και 90 ημέρες μετά την μίξη. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να εκτιμηθούν οι αντίστοιχοι συντελεστές αποδοτικότητας (k-values) για κάθε δοκίμιο και αυτοί χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να επιβεβαιωθεί θεωρητική σχέση (Antiohos, Tsimas; 2004) που

τους συσχετίζει με το ενεργό SiO₂ των ποζολανών που περιέχονται στα σύνθετα συστήματα. Για να προσομοιωθεί η συμπεριφορά των τεφρών στα κονιάματα προετοιμάστηκαν πάστες με τα σύνθετα τσιμέντα που προέκυψαν από κάθε τεχνική ακολουθώντας ανάλογη διαδικασία με αυτήν των κονιαμάτων. Στις ίδιες ηλικίες που έγινε έλεγχος των αντοχών διεκόπη η ενυδάτωση τους με την χρήση οργανικών διαλυτών και κατεργασία υπό κενό (προς αφαίρεση του μη-χημικώς ενωμένου νερού). Τα ξηρά δείγματα εξετάστηκαν με θερμική ανάλυση προκειμένου να εκτιμηθεί σε κάθε περίπτωση ο ρυθμός ποζολανικής δράσης κάθε ποζολάνης (Mettler STARe Toledo 851/LF/1600 TG σε περιβάλλον N₂ (50 ml/min) και σε ρυθμό ανάπτυξης θερμοκρασίας 10⁰C/min).

3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα των θλιπτικών αντοχών συνοψίζονται στον Πίνακα 2 συναρτήσει της ηλικίας συντήρησης. Τα αποτελέσματα αυτά συζητούνται ξεχωριστά ανά εφαρμοζόμενη μέθοδο στις αντίστοιχες ενότητες που ακολουθούν.

3.1 Ανάμιξη ιπταμένων τεφρών

Διαπιστώνεται πως το δοκίμιο αναφοράς αποδίδει καλύτερα σε σύγκριση με τα ποζολανικά δοκίμια κατά τα πρώτα στάδια της ενυδάτωσης. Η τάση αυτή είναι σύμφωνη με την θεωρία σχετικά με την αργή εκδήλωση της δράσης των ιπταμένων τεφρών και την αδυναμία τους να συνεισφέρουν σημαντικά στην σκλήρυνση του συστήματος από την αρχή της ενυδάτωσης. Μετά την πρώτη εβδομάδα, τα ποζολανικά δείγματα αναπτύσσουν αντοχή γρηγορότερα από το δοκίμιο αναφοράς με αποτέλεσμα μετά τις 28 ημέρες να το προσεγγίζουν είτε να το ξεπερνούν. Σε αυτήν την ηλικία, το ανάμιγμα T_T των τεφρών είναι το δείγμα με την μέγιστη θλιπτική αντοχή. Κατά το ίδιο στάδιο, οι αντοχές των διμερών συστημάτων με τις τέφρες που συμμετέχουν στο συγκεκριμένο ανάμιγμα εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές, παρέχοντας ενδείξεις συνεργετικής δράσης μεταξύ των δύο τύπων τεφρών. 3 μήνες μετά την μίξη, τα διμερή ποζολανικά δοκίμια αποδίδουν ικανοποιητικά προσεγγίζοντας την απόδοση του δοκιμίου αναφοράς. Φαίνεται πως σε αυτό το στάδιο, η συμβολή των ενεργών συστατικών της τέφρας είναι σημαντικότερη αυτής των στοιχείων του κλίνκερ που αντικαταστάθηκε. Και στο προχωρημένο αυτό στάδιο συντήρησης το ανάμιγμα των τεφρών εμφανίζει την μεγαλύτερη αντοχή, παρέχοντας μια πρώτη ένδειξη πως για μέσες αντικαταστάσεις τσιμέντου η αναλογία 50:50 ανάμιξης των δύο τύπων Ελληνικών τεφρών είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για την μηχανική συμπεριφορά του αντίστοιχου σύνθετου συστήματος.

Πίνακας 2. Εξέλιξη θλιπτικής αντοχής κονιαμάτων

	Θλιπτική Αντοχή (MPa)			
	Ηλικία (ημέρες)			
	2	7	28	90
Control	24.7	39.2	50.6	59.7
T _F	19.4	38.0	49.4	59.7
T _M	21.5	34.6	48.7	59.4
T _T	21.8	38.2	52.1	62.2
T _{F_3Q}	23.6	38.9	49.6	61.7
T _{F_6Q}	23.4	38.4	49.4	60.0
T _{FM}	14.0	28.0	46.6	58.0
T _{FP}	25.8	38.3	51.7	62.7

3.2 Χημική ενεργοποίηση

Διαπιστώνεται πως η 3% και 6% προσθήκη του χημικού μέσου οδήγησε σε αύξηση των αντοχών των απλών τεφρό-κονιαμάτων από την πρώτη περίοδο συντήρησης. Ωστόσο, η αντοχή του δοκιμίου αναφοράς μετρήθηκε μεγαλύτερη αυτής των ενεργοποιημένων δειγμάτων κατά την πρώτη εβδομάδα ενυδάτωσης. Είναι φανερό πως η θετική συμβολή της παρουσίας quicklime στο σύστημα δεν μπορεί να αντισταθμίσει την απουσία κλίνκερ κατά τα πρώτα στάδια της συντήρησης. Από τις 7 ημέρες και έπειτα τα ποζολανικά δοκίμια προσεγγίζουν την αντοχή του κονιάματος χωρίς τέφρα και την ξεπερνούν στο τέλος της δοκιμαστικής περιόδου ως συνέπεια της εξέλιξης της ποζολανικής τους δράσης.

Στην περίπτωση αυτή, μικρή προσθήκη quicklime προκάλεσε αύξηση της αντοχής της ενεργοποιημένης τέφρας σε όλες τις εξεταζόμενες ηλικίες και κυρίως κατά τα πρώτα στάδια της ενυδάτωσης με αποτέλεσμα το ενεργοποιημένο μίγμα να αποδίδει καλύτερα του αντίστοιχου χωρίς την παρουσία του χημικού μέσου. Είναι εμφανές πως η ικανοποιητική απόδοση της τέφρας T_F στις πρώιμες ηλικίες (38 MPa μετά τις 7 πρώτες ημέρες), αποτέλεσμα της μεγάλης ειδικής της επιφάνειας αλλά και του υδραυλικού της χαρακτήρα, βελτιώθηκε επιπλέον με την παρουσία CaO στο μίγμα. Όταν η παρουσία CaO (πάντα εις βάρος της τέφρας) αυξήθηκε στο 6%, η αντοχή του ενεργοποιημένου δείγματος μετρήθηκε υψηλότερη του δοκιμίου αναφοράς σε όλη την περίοδο συντήρησης, αλλά ελάχιστα κατώτερη των τιμών των δειγμάτων με 3% προσθήκη, παρέχοντας μια ένδειξη πως η προσθήκη του χημικού μέσου θα πρέπει να περιορίζεται σε μικρές δόσεις (3%), ποσοστό που βρέθηκε το βέλτιστο τόσο για τα πρώτα όσο και για τα μετέπειτα στάδια της σκλήρυνσης.

3.3 Κατεργασία χονδρόκοκκου κλάσματος

Τα δεδομένα του Πίνακα 2 δείχνουν πως η χρήση του αλεσμένου χονδρόκοκκου κλάσματος T_{FP} συνοδεύτηκε από εντυπωσιακή αύξηση των αντοχών του σύνθετου συστήματος, το οποίο ξεπέρασε την θλιπτική αντοχή του δοκιμίου αναφοράς από τις πρώτες 2 ημέρες. Αντίθετα το λεπτότερο κλάσμα της αρχικής ασβεστούχου τέφρας (T_{FM}) αδυνατεί να αναπτύξει ανταγωνιστική αντοχή στο ίδιο διάστημα. Δεδομένου πως η κοκκομετρική κατανομή των δύο κλασμάτων (και η λεπτότητα τους κατά Blaine) είναι πρακτικά η ίδια, η διαφορετική συμπεριφορά τους σε σύνθετα συστήματα τσιμέντου θα πρέπει να αποδοθεί στις διαφορές της χημικής τους σύστασης, πρωτίστως στην περιεκτικότητα τους σε ενεργό SiO_2 και Al_2O_3 . Με την εξέλιξη της ενυδάτωσης, το δοκίμιο με την T_{FP} συνεχίζει να αποδίδει καλύτερα από τα υπόλοιπα τεφρό-δοκίμια φτάνοντας σε τιμές της τάξης των 62,7 MPa στο τέλος της δοκιμαστικής περιόδου. Η παρατηρούμενη διαφορά των μηχανικών αντοχών διαπιστώνεται πως αυξάνεται με τον χρόνο συντήρησης και κυρίως μετά τον πρώτο μήνα, δεδομένου πως αυτό είναι το στάδιο που το ενεργό SiO_2 των ιπταμένων τεφρών διαδραματίζει πιο καθοριστικό ρόλο (Antiohos and Tsimas;2004).

3.4 Συντελεστές ενεργότητας (*k-values*)

Έχει διατυπωθεί στην σχετική βιβλιογραφία (Papadakis; 2001, Antiohos and Tsimas; 2004) πως στην περίπτωση σύνθετων συστημάτων με συμπληρωματικά υδραυλικά υλικά, ο συντελεστής ενεργότητας k μπορεί να υπολογιστεί με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$f_c = K \left(\frac{1}{W / (C + kP)} - \alpha \right) \quad (1)$$

όπου f_c η θλιπτική αντοχή (MPa) του σκυροδέματος, W είναι η περιεκτικότητα σε νερό του αρχικού μίγματος σκυροδέματος (kg/m^3), C η περιεκτικότητα σε τσιμέντο (kg/m^3), P είναι η περιεκτικότητα SCM στο σκυρόδεμα (kg/m^3), K μία παράμετρος που εξαρτάται από τον τύπο τσιμέντου (στην παρούσα εργασία ίση με 38.8 MPa) και α μία παράμετρος που εξαρτάται κυρίως

από τον χρόνο και συνθήκες συντήρησης. Χρησιμοποιώντας αυτήν την εξίσωση και τις τιμές των θλιπτικών αντοχών (πίνακας 2), υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται στον πίνακα 3, συντελεστές ενεργότητας για τα πιο αποτελεσματικά ποζολανικά δοκίμια.

Πίνακας 3. Συντελεστές ενεργότητας ποζολανικών κονιαμάτων

	k-values			
	Ηλικία (ημέρες)			
	2	7	28	90
T _F	0.66	0.92	0.92	1.00
T _T	0.82	0.94	1.09	1.15
T _{T (theor-v)} ^a	n.a. ^b		1.03	1.08
T _{F_3Q}	0.96	0.98	0.94	1.12
T _{FP}	1.07	0.94	1.07	1.19
T _{FP (theor-v)} ^a	n.a. ^b		1.05	1.23

^a Θεωρητικές τιμές με βάση την εξίσωση (2)
^b n.a.: μη διαθέσιμες

Τα δεδομένα του Πίνακα 3 επιβεβαιώνουν την ανικανότητα της αρχικής (μη ενεργοποιημένης) τέφρας T_F να δράσει από την αρχή της ενυδάτωσης, αλλά και την βελτιωτική δράση και των τριών μεθόδων που εφαρμόστηκαν. Τα σύνθετα τσιμέντα με το ανάμιγμα των τεφρών (T_T), την χημικά ενεργοποιημένη τέφρα (T_{F_3Q}), καθώς και το αλεσμένο χονδρόκοκκο κλάσμα της T_F (T_{FP}) εμφανίζουν συντελεστές k υψηλότερους του δοκιμίου αναφοράς, αφού προσεγγίζουν την μονάδα (η T_{FP} μάλιστα την ξεπερνά από τις 2 ημέρες) και αργότερα (στις 90 ημέρες) την ξεπερνούν εύκολα.

Σε προηγούμενη εργασία των ερευνητών (Papadakis, Antiohos and Tsimas; 2002), αναφέρθηκε, για πρώτη φορά, αναλυτική σχέση που συνδέει το ενεργό πυριτικό κλάσμα της τέφρας με τους συντελεστές ενεργότητας των σύνθετων δομικών συστημάτων που την περιέχουν, σε μια προσπάθεια προκαταρκτικής εκτίμησης της συμβολής τους στην μηχανική απόδοση των σύνθετων τσιμέντων γνωρίζοντας μόνο την περιεκτικότητά τους σε ενεργό SiO₂. Η συσχέτιση αυτή εκφράστηκε μέσω της παρακάτω θεωρητικής σχέσης (2) για τον συντελεστή k:

$$k = (\gamma_S f_{S,P} / f_{S,C})(1 - a W/C) \quad (2)$$

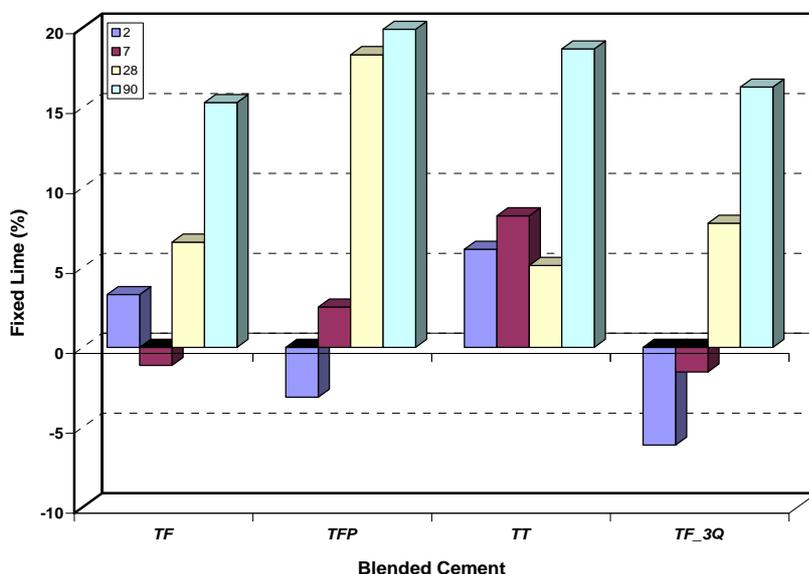
όπου : γ_S είναι το δραστικό πυριτικό κλάσμα της ποζολάνης (δίνεται στον Πίνακα 1), and $f_{S,P}$ and $f_{S,C}$ είναι τα κλάσματα του πυριτίου στην τέφρα και στο τσιμέντο αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας την εξίσωση (2) για την περίπτωση των τσιμέντων που εξετάστηκαν για διάστημα μετά των πρώτων 28 ημερών (όπου το ενεργό πυρίτιο κατέχει κυρίαρχο ρόλο στο σύστημα), θεωρητικές τιμές σε καλή συμφωνία με τις πειραματικές υπολογίστηκαν. Η παραπάνω διαπίστωση επιβεβαιώνει ακόμη μια φορά την πιστότητα και την αναβαθμισμένη δυνατότητα πρόβλεψης της διατυπωθείσας σχέσης, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου οι ποζολάνες έχουν κατεργαστεί (είτε μέσω της ανάμιξης με δεύτερη τέφρα είτε μέσω διαχωρισμού και άλεσης) πριν την εισαγωγή τους σε συστήματα τσιμέντου.

3.5 Εξέλιξη ποζολανικής δράσης

Μετρώντας την διαθέσιμη ποσότητα Ca(OH)_2 που επέμεινε σε κάθε σύστημα που ενυδατώνεται στις εξεταζόμενες ηλικίες, ο ρυθμός με τον οποίο εξελίσσεται η δράση της τέφρας σε κάθε σύστημα μπορεί να εκτιμηθεί. Στην παρούσα ενότητα, τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν για να εκτιμηθεί η ποσότητα της υδρασβέστου που δεν καταναλώθηκε από την ποζολάνη. Τα αποτελέσματα κατόπιν εισήχθησαν στην εξίσωση (3) που προτάθηκε από τους Paya et al. (Paya et al; 2003) προκειμένου να προσδιοριστεί το ποσοστό της δεσμευμένης ασβέστου (fixed lime – FL), παράγοντας που συνδέεται με την εξέλιξη της δράσης της περιεχόμενης σε κάθε σύστημα τέφρας (τα αποτελέσματα απεικονίζονται στην Εικόνα 1):

$$FL (\%) = \frac{(CH_c \cdot C_{\%}) - CH_P}{CH_c \cdot C_{\%}} \times 100 \quad (3)$$

όπου CH_c είναι το ποσοστό του Ca(OH)_2 που μετρήθηκε στο δοκίμιο αναφοράς σε δεδομένη ηλικία συντήρησης, CH_P το αντίστοιχο ποσοστό στην πάστα με ποζολάνη στην ίδια ηλικία και $C\%$ η περιεκτικότητα του τσιμέντου στην συγκεκριμένη πάστα.



Εικόνα 1. Ποσοστά FL σύνθετων παστών ανά μέθοδο βελτίωσης

Σε κάθε περίπτωση μπορεί να διαπιστωθεί πως οι τιμές FL αυξάνουν με την ηλικία συντήρησης. Οι αρνητικές τιμές – στα αρχικά στάδια της ενυδάτωσης – είναι ενδεικτικές της περίσσειας του Ca(OH)_2 που δημιουργείται από την ενυδάτωση της ελευθέρως ασβέστου της τέφρας και του προστιθέμενου CaO (στην περίπτωση του δοκιμίου T_{F_3Q}) αλλά και της ανικανότητας της ποζολάνης να δράσει άμεσα κατά την εισαγωγή της στο μίγμα. Η εισαγωγή της T_{FP} στο μίγμα των πρώτων υλών επιφέρει θετικά αποτελέσματα, ειδικά μετά τον πρώτο μήνα της ενυδάτωσης, όπως πιστοποιείται από την πολύ υψηλή τιμή FL που μετρήθηκε στις 28 ημέρες (~18% ενώ την ίδια χρονική περίοδο οι αντίστοιχες τιμές των άλλων συστημάτων δεν ξεπερνούν το 6-8%). Στο χημικά ενεργοποιημένο σύστημα, αξίζει να σημειωθεί η αύξηση του παράγοντα FL παρά το γεγονός πως λιγότερη ποζολάνη (και περισσότερη υδρασβέστος) υπάρχει στην πάστα. Σε όλη την διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου, το τσιμέντο με το κατεργασμένο χονδρόκοκκο κλάσμα της T_F αντιδρά περισσότερο με την υδρασβέστο λόγω του εμπλουτισμού της ποζολάνης σε ενεργό SiO_2 σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα. Το τελευταίο απελευθερώνεται σταδιακά από την υαλώδη φάση της τέφρας και αντιδρά με την παραγόμενη υδρασβέστο προς σχηματισμό επιπλέον C-S-H το

οποίο ενισχύει την αντοχή της πάστας (το αντίστοιχο κονίαμα επέδειξε πολύ υψηλό συντελεστή k της τάξης του 1,17).

3.6 Συγκριτική αξιολόγηση

Διαπιστώνεται πως όλες οι εφαρμοζόμενες μέθοδοι βελτιώνουν την μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων τσιμέντων με ασβεστόχυλο τέφρα. Αναμιγνύοντας την τέφρα υψηλού ασβεστίου με ίση ποσότητα τέφρας χαμηλού ασβεστίου, η πρώιμη αντοχή βελτιώθηκε, ωστόσο η κύρια επίδραση της διαδικασίας εντοπίστηκε στις μετέπειτα αντοχές του συστήματος. Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί μόνο ένα στάδιο ομογενοποίησης συνεπώς το κόστος της εκτιμάται χαμηλό. Η χημική ενεργοποίηση με την προσθήκη CaO (ίση ποσότητα τέφρας αντικαταστάθηκε στο μίγμα) αποδείχτηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική για τις πρώιμες αντοχές του συστήματος. Μολονότι η τρέχουσα τιμή του CaO στην αγορά είναι σχετικά υψηλή (περί τα 65€/τον.), το γεγονός πως προσθέτοντας πολύ μικρή ποσότητα αυτού η μηχανική αντοχή των συστημάτων με την ασβεστόχυλο τέφρα αυξήθηκε σημαντικά, δεικνύει πως και αυτή η μέθοδος μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση για εφαρμογές όπου απαιτούνται επαρκείς πρώιμες αντοχές. Η προσθήκη του χημικού μέσου μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο κατά την άλεση της ποζολάνης όσο και κατά την ανάμιξη των πρώτων υλών του σκυροδέματος. Με άλλα λόγια δεν απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός ή βελτιστοποίηση διαδικασιών για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου.

Τέλος, η μέθοδος που βασίστηκε (i) στον διαχωρισμό του χονδρόκοκκου κλάσματος της τέφρας και (ii) στην μηχανική άλεση αυτού προκειμένου να μην απολέσει την πληρωτική του δράση (filler effect), αποδείχτηκε η πιο αποτελεσματική για την βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των σύνθετων συστημάτων. Θα πρέπει πάντως να σημειωθεί πως κατά τα δύο στάδια της εφαρμογής της, απαιτείται κατανάλωση επιπλέον ενέργειας, τόσο κατά τον αερό-διαχωρισμό της αρχικής τέφρας, όσο και για την άλεση του επιλεγμένου κλάσματος (που είναι προφανώς πιο χονδρόκοκκο της αρχικής τέφρας). Κατά την τελευταία διαδικασία, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη πως η αύξηση της λεπτότητας του υλικού κατά $10 \text{ m}^2/\text{kg}$ απαιτεί αντίστοιχη αύξηση του ενεργειακού κόστους κατά 10% (Nanjing Institute of Chemical Technology; 1985). Σε αυτήν την περίπτωση, αντίθετα με την χημική ενεργοποίηση, η εγκατάσταση συστήματος αερο-διαχωρισμού επιπλέον της μονάδας άλεσης απαιτείται. Τα αποτελέσματα ωστόσο που παρατίθενται στην παρούσα εργασία πιστοποιούν πως μια τέτοια επένδυση θα μπορούσε να είναι κερδοφόρος δεδομένης της εξαιρετικής ποιότητας του κατεργασμένου προϊόντος αλλά και της δυναμικής του για χρήση σε μεγαλύτερη γκάμα εφαρμογών (π.χ. σκυρόδεμα υψηλής αντοχής - HSC).

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τρεις διαφορετικοί τρόποι βελτίωσης Ελληνικής τέφρας εφαρμόστηκαν και αξιολογήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας. Όλες βρέθηκαν να βελτιώνουν το μηχανικό προφίλ των εξεταζόμενων τσιμέντων. Πιο αναλυτικά:

- Η ανάμιξη της ασβεστόχυλο τέφρας με ισόποση δόση τέφρας Μεγαλόπολης οδήγησε σε βελτίωση της θλιπτικής αντοχής του διμερούς συστήματος σε όλα τα στάδια της δοκιμαστικής περιόδου. Κατά τα ίδια στάδια, οι αντοχές των διμερών συστημάτων με τις τέφρες που συμμετέχουν στο ανάμιγμα εμφανίζουν σημαντικά χαμηλότερες τιμές, παρέχοντας ενδείξεις συνεργετικής δράσης μεταξύ των δύο τύπων τεφρών. Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί μόνο ένα στάδιο ομογενοποίησης συνεπώς το κόστος της εκτιμάται χαμηλό.
- Η προσθήκη CaO αποδείχτηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική για τις πρώιμες αντοχές του συστήματος. Δεν απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός ή βελτιστοποίηση διαδικασιών για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου. Είναι εύλογο πως θέματα ανθεκτικότητας που

συνδέονται με την χρήση του χημικού μέσου σε συγκεκριμένο περιβάλλον θα πρέπει να αναδεικνύονται και να εξετάζονται πριν την εφαρμογή της μεθόδου σε επίπεδο έργου.

- Η μέθοδος που βασίστηκε στην κατεργασία (διαχωρισμό και άλεση) του χονδρόκοκκου κλάσματος της τέφρας αποδείχθηκε η καλύτερη για την βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των σύνθετων συστημάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση (α) απορριπτέων (reject) τεφρών αποσκοπώντας στην ανάκτηση αποδεκτών (σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές) κλασμάτων αυτής και (β) εξαιρετικής ποιότητας τεφρών ενισχυμένων σε κρίσιμα ενεργά συστατικά.
- Πιστοποιήθηκε η αξιοπιστία θεωρητικής σχέσης που συνδέει το ενεργό πυρίτιο της τέφρας με την μηχανική απόδοση των σύνθετων τσιμεντών μέσω της έννοιας του συντελεστή αποδοτικότητας (k -value). Η εφαρμογή της προσεγγιστικής σχέσης μπορεί να οδηγήσει σε μια πρώτη πρόβλεψη της μελλοντικής μηχανικής συμπεριφοράς συστημάτων τσιμεντού που ενσωματώνουν ιπτάμενες τέφρες που έχουν υποστεί διαδικασίες ενεργοποίησης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Papadakis, V.G., Tsimas, S. *Supplementary Cementing Materials for Sustainable Building-Sector Growth*, European Commission DGXII, Marie Curie Fellowship, Final Scientific Report, Project No HPMF-CT-1999-00370, National Technical University of Athens, Greece, 2001, pp. 23-27.
2. N. Bouzoubaâ, M. H. Zhang, A. Bilodeau and V. M. Malhotra, The effect of grinding on the physical properties of fly ashes and a Portland cement clinker, *Cem Concr Res* 27 (12) (1997), 1861-1874.
3. C. Shi and R. L. Day, Acceleration of strength gain of lime-natural pozzolan cements by thermal activation, *Cem Concr Res* 23 (4) (1993), 824 -832.
4. A. Palomo, M. W. Grutzeck and M. T. Blanco, Alkali-activated fly ashes; A cement for the future, *Cem Concr Res* 29 (8) (1999), 1323-1329.
5. C. Shi and R.L. Day, Acceleration of the reactivity of fly ash by chemical activation, *Cem Concr Res* 25 (1) (1995), 15-21.
6. Antiohos S.K. Tsimas S. A novel way to upgrade the coarse part of a high calcium fly ash for reuse into cement systems; *Waste Management*, 27(5), 2007, 675-683.
7. B. Chen, J. Liu, Effect of fibers on expansion of concrete with a large amount of high f-CaO fly ash, *Cem Concr Res*, 32 (10) (2002), 1549-1552.
8. C. Ouyang, A. Nanni, W.F. Chang, Internal and external sources of sulfate ions in portland cement mortar: two types of chemical attack, *Cem Concr Res* 18 (5) (1988), 699-709.
9. Antiohos, S. and Tsimas, S., 2004. Investigating the role of active silica on the hydration mechanisms of high-calcium fly ash/cement systems, *Cement and Concrete Composites* 27, 171-181.
10. Papadakis, V.G., Antiohos, S., Tsimas, S., 2002. Supplementary cementing materials in concrete - Part II: A fundamental estimation of the efficiency factor, *Cement and Concrete Research* 32, 1533-1538.
11. Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V., Velasquez, S., 2003. Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes, *Cement and Concrete Research* 33, 603-609.
12. Nanjing Institute of Chemical Technology, *Cement Technology*, Chinese Construction Press, Beijing, 1985.

Σκυρόδεμα υψηλής αντοχής με μεγάλη περιεκτικότητα τέφρας EIT2 των Ελληνικών προδιαγραφών

I. Παπαγιάννη, Ε. Αναστασίου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Λέξεις κλειδιά: σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, ιπτάμενη τέφρα EIT2, εμπορικό σκυρόδεμα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η εργασία αφορά την παραγωγή σκυροδέματος υψηλής αντοχής (>60 MPa) με τη χρησιμοποίηση μεγάλου ποσοστού επεξεργασμένης ασβεστούχου ιπτάμενης τέφρας. Το προτεινόμενο σκυρόδεμα μπορεί να παραχθεί με συμβατικά υλικά στις βιομηχανίες σκυροδέματος και για αυτό το λόγο επιλέγονται αντίστοιχα τα υλικά και οι αναλογίες ανάμιξης. Πιο συγκεκριμένα, στις δοκιμαστικές συνθέσεις χρησιμοποιήθηκαν περιεκτικότητες σε κονία 600 ή 700 kg/m³, στις οποίες το 30-50% του τσιμέντο αντικαταστάθηκε με επεξεργασμένη ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας EIT2, σύμφωνα με την Εθνική Προδιαγραφή για την ιπτάμενη τέφρα. Επίσης, επιλέχθηκε χαμηλός λόγος N/K (0,22~0,30) και εργασιμότητα κατηγορίας S2, που επιτεύχθηκε με χρήση κατάλληλου ρευστοποιητή. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι είναι δυνατό να επιτευχθεί εμπορικό σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (>60 MPa) με χρήση ιπτάμενης τέφρας σε ποσοστό έως και 50% του συνόλου της κονιάς.

High strength concrete with high volume of EIT2 fly ash according to the Greek National Standards

I. Papayanni, E. Anastasiou

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki

Keywords: high-strength concrete, EIT2 high calcium fly ash, commercially produced concrete

ABSTRACT: The production of high-strength concrete (>60 MPa) containing high volume of processed high calcium fly ash is discussed in this paper. The proposed concrete can be produced commercially with conventional building materials at ready-mix concrete plants and, thus, materials and mixtures are designed accordingly. The test mixtures were produced using 600 or 700 kg/m³ binder content, in which 30-50% of the cement was replaced with processed high calcium fly ash type EIT2, according to the Greek National Standard for Fly Ash. Furthermore, a low w/b ratio (0.22~0.30) and S2 workability were selected and achieved using a suitable plasticizer. From the results it seems that high-strength concrete (>60 MPa) can be produced commercially using fly ash up to 50% of the total binder content.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (HSC) θεωρείται σήμερα [1] το σκυρόδεμα με συμβατικά αδρανή χαρακτηριστικής αντοχής f_{ck} από 60 MPa έως 130MPa με λόγο νερού/τσιμέντου κάτω από 0.40. Υψηλότερες αντοχές της τάξεως των 200MPa αναφέρονται επίσης στη βιβλιογραφία [2]. Το ενδιαφέρον για υψηλής αντοχής σκυρόδεμα εμφανίζεται τις τελευταίες δεκαετίες του παρελθόντα αιώνα όπου συνέβη αλματώδης ανάπτυξη της τεχνολογίας σκυρ/τος με την εισαγωγή στη βιομηχανία του σκυροδέματος των ρευστοποιητών και των τεχνικών μεταφοράς και διάστρωσης. Τα υψηλά κτίρια, οι παρά τη θάλασσα κατασκευές απαιτούν οικονομικές διατομές και υψηλή ανθεκτικότητα με εγγυημένο ωφέλιμο χρόνο ζωής. Έτσι, το 1960, υψηλής αντοχής εθεωρείτο το σκυρόδεμα αντοχής 40-50MPa. Το 1970 το όριο που επιτεύχθηκε ήταν 60MPa. Σήμερα σκυρόδεμα πάνω από 100MPa προδιαγράφεται σε έργα γεφυροποιίας.

Η χρήση HSC επιτρέπει σημαντική μείωση των διαστάσεων των υποστυλωμάτων που αποδίδει μέχρι και 30% επιπλέον διαθέσιμο χώρο στα parking των υψηλών κτιρίων καθώς επίσης και τη μείωση του αριθμού των μεσαίων δοκών στην κατασκευή γεφυρών [3]. Στις παραθαλάσσιες κατασκευές το HSC εξασφαλίζει πάνω από 100 χρόνια ωφέλιμο χρόνο ζωής.

Χαρακτηριστικό είναι ότι για το υψηλής αντοχής σκυρόδεμα δεν απαιτούνται διαφορετικά από τα συμβατικά υλικά παρά μόνο καλύτερος ποιοτικός έλεγχος όλων των υλικών και όλων των σταδίων παραγωγής και εφαρμογής του σκυροδέματος. Τόσο στον Καναδά όσο και στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη τα σκυροδέματα αυτά παράγονται με τη χρήση συμπληρωματικών του τσιμέντου πουζολανικού χαρακτήρα υλικών όπως είναι οι ιπτάμενες τέφρες, οι σκωρίες, η πυριτική παιπάλη ή και συνδυασμοί αυτών [4]. Τη δεκαετία του 80 αναπτύσσεται από το ερευνητικό κέντρο CANMET [5] το υψηλής περιεκτικότητας σε τέφρα σκυρόδεμα με τουλάχιστον 50% αντικατάσταση τσιμέντου με μη ασβεστούχα τέφρα [5].

Οι πρώτοι κανονισμοί για το υψηλής αντοχής σκυρόδεμα θεσμοθετούνται στη Νορβηγία NS 3473-1989. Σήμερα η παραγωγή και ο έλεγχος καλύπτονται από οδηγίες και προδιαγραφές όπως είναι τα CSA Standard A23.3 1994 και οι οδηγίες της ACI Committee ACI 363 2R-98 [1].

Στόχος της πειραματικής αυτής εργασίας ήταν να επιτευχθεί υψηλής αντοχής εμπορικό σκυρόδεμα που να μπορεί να παραχθεί με συμβατικά υλικά στις βιομηχανίες σκυροδέματος με την προσθήκη υψηλού ποσοστού επεξεργασμένης ασβεστούχας τέφρας της ευρύτερης περιοχής της Πτολεμαΐδας. Επιλέχθηκε ένα επιθυμητό επίπεδο εργασιμότητας S2 (7-9cm) για όλες τις συνθέσεις που θα μπορούσε να εφαρμοσθεί σε βιομηχανία προκατασκευασμένων στοιχείων ή προϊόντων όπως είναι οι σωλήνες από σκυρόδεμα.

Στο πρώτο στάδιο της έρευνας μελετήθηκαν τα μηχανικά και ελαστικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος αυτού υψηλής αντοχής 150MPa με υψηλό ποσοστό τέφρας.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Σκυροδετήθηκαν 6 διαφορετικές συνθέσεις με συνολικό ποσό συνδετικών κονιών 600-700kg/m³. Για κάθε σύνθεση κατασκευάστηκαν 10 κύλινδροι 15x30cm, πέντε κύβοι

15x15x15cm και 5 πρισματικά δοκίμια 10x10x40cm προκειμένου να γίνει προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής σε διάφορες ηλικίες, εφελκυστικής αντοχής από διάρρηξη και κάμψη καθώς και προσδιορισμός του στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν η επιρροή του συνολικού ποσού κονιάς, το ποσοστό της τέφρας και ο λόγος νερού/τσιμέντο για το επιθυμητό επίπεδο εργασιμότητας.

Πίνακας 1. Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών

Αδρανή	Μέγεθος κόκκων (mm)					
	0,25	1,0	2,0	4,0	8,0	16
Αθροιστικό διερχόμενο (%)						
Άμμος ποταμού	8,61	62,82	84,60	97,77	100	100
Ρύζι	2,25	2,50	3,00	25,75	100	100
Γαρμπίλι	1,61	1,81	2,47	3,46	32,08	100
Μίγμα						
40% άμμος	3,444	25,128	33,84	39,108	40,00	40,00
20% Ρύζι	0,450	0,500	0,600	5,150	20,00	20,00
40% Γαρμπίλι	0,660	0,724	0,988	1,384	12,832	40,00
Προκύπτουσα καμπύλη	4,55	26,352	35,42	45,642	72,83	100,00
Επιδιωκόμενη καμπύλη	7,00	20,00	30,00	45,00	70,00	100,00

Χρησιμοποιήθηκαν αδρανή εγχώρια με κοκκομετρική διαβάθμιση που φαίνεται στον Πίνακα 1 και προέκυψε από την επιμέρους κοκκομετρική ανάλυση των κλασμάτων των αδρανών 0-4mm, 4-8mm και γαρμπίλι 4-12,5mm. Τα χαρακτηριστικά των αδρανών φαίνονται στον Πίνακα 2. Ως άμμος χρησιμοποιήθηκε πλυμένη άμμος από Στρυμόνα ποταμό. Ως χονδρόκοκκα θραυστά ασβεστολιθικά λατομείου Δρυμού. Το ποσοστό της υγρασίας των αδρανών ελέγχονταν αμέσως πριν τη σκυροδέτηση για να γίνεται η σχετική διόρθωση εφόσον ο σχεδιασμός βασίζονταν σε κεκορεσμένης στεγνής επιφάνειας αδρανή.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν

Αδρανή	Φαινόμενη ειδική πυκνότητα (kg/dm ³)	Απορροφητικότητα (%)	Υγρασία (%)
Άμμος	2,564	0,80	8-11
Ρύζι	2,675	0,50	1,4-3,6
Γαρμπίλι	2,680	0,33	1,05-2,6

Ως τσιμέντο χρησιμοποιήθηκε το CEM I 42.5.

Η τέφρα χαρακτηρίστηκε ως τύπου EIT2 με χαρακτηριστικά: CaO=2.8<3.0%, SO₃=3.5<5.0%, φαινόμενο ειδικό βάρος 2.42, λεπτότητα άλεσης 328m²/kg, R_{45μm} ~ 20% < 30%.

Χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής πολυκαρβοξυλικής βάσης σε ποσοστό 1-2%κβ κονιών.

Οι συνθέσεις των σκυροδεμάτων που χυτεύθηκαν στα δοκίμια και οι ιδιότητες των νωπών σκυροδεμάτων φαίνονται στον Πίνακα 3. Τα μηχανικά και ελαστικά χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 4. Σύγκριση των μηχανικών χαρακτηριστικών και του ρυθμού ανάπτυξης της θλιπτικής αντοχής φαίνεται στα διαγράμματα 1 και 2.

Πίνακας 3. Συνθέσεις σκυροδεμάτων με ιπτάμενη τέφρα

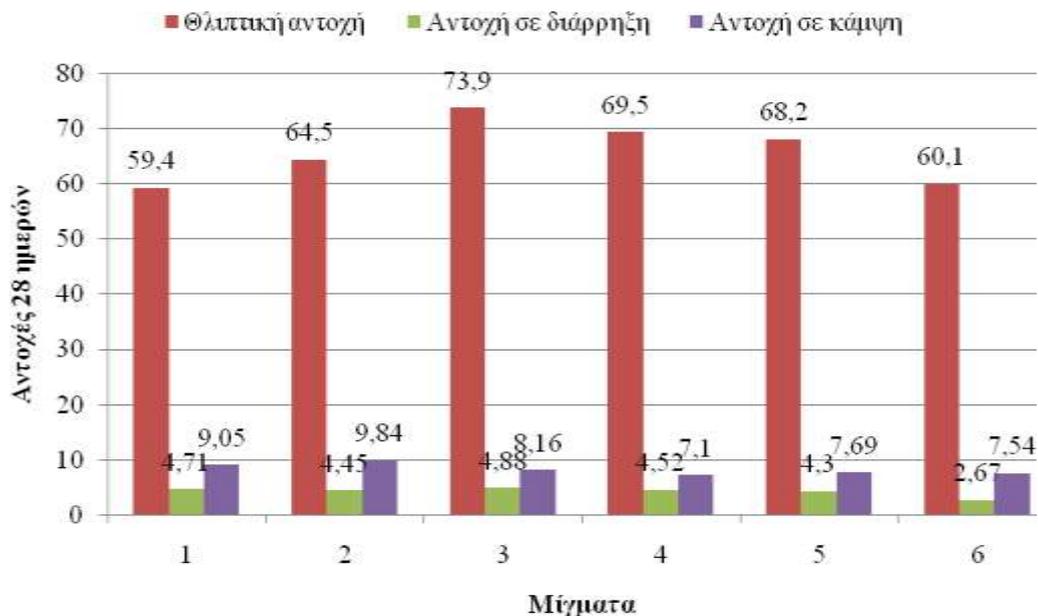
Υλικά (kg)	1	2	3	4	5	6
Γαρμπίλι	635,85	637,10	632,08	561,3	549,60	549,63
Ρύζι	324,38	323,10	319,67	283,92	274,44	274,21
Άμμος	683,90	676,50	689,83	598,14	565,20	565,24
CEM I42,5	450	450	300	350	350	350
Ιπτάμενη τέφρα	150 (33%)	150 (33%)	300 (50%)	350 (50%)	350 (50%)	350 (50%)
Νερό	182,2	145,8	132,78	167,02	213,40	214,00
Ρευστοποιητής	4,0	6,0	12,0	14,0	14,5	7,00
Λόγος N/T	0,30	0,25	0,22	0,238	0,30	0,30
Κάθιση (cm)	6,9	6,8	8,0	8,5	7,0	7,2
% ρευστοποιητή	0,5	0,65	1,2	1,4	1,0	1,0

Πίνακας 4. Μηχανικά χαρακτηριστικά σκυροδεμάτων με τέφρα

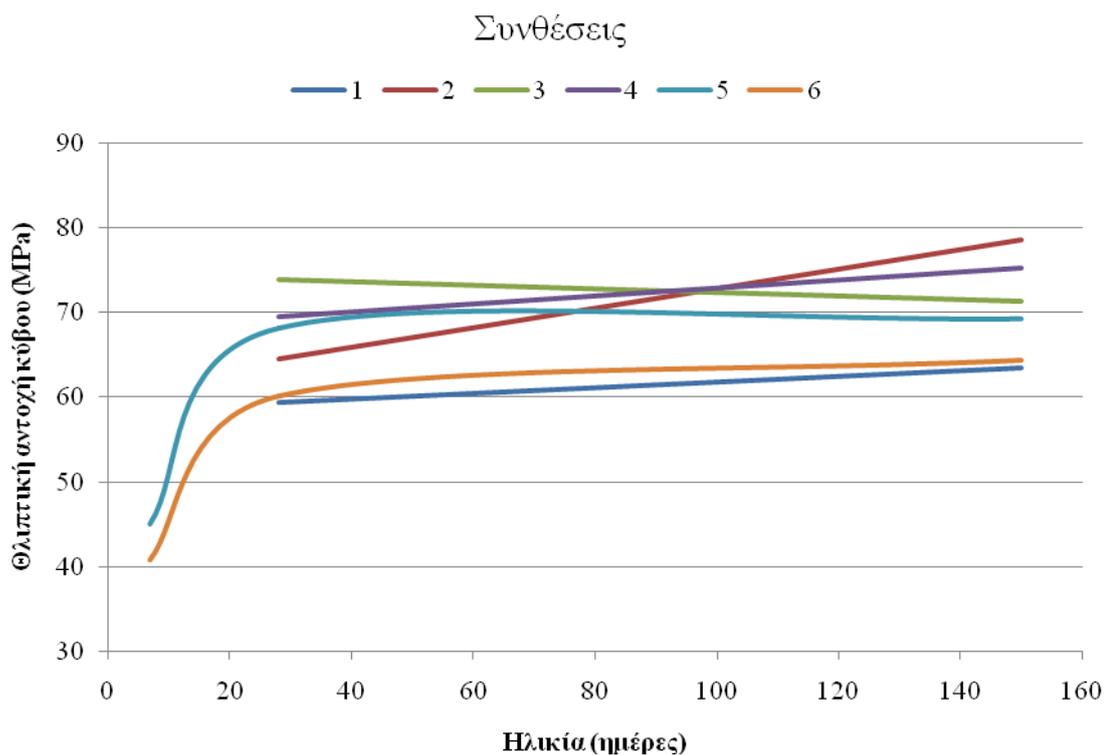
Μίγματα	1	2	3	4	5	6
Θλιπτική αντοχή (MPa)						
7 ημερών κυβ.	-	-	-	-	45,1	40,8
28 ημερών κυλ.	49,5	56,8	65,9	59,9	55,3	50,9
28 ημερών κυβ.	59,4	64,5	73,9	69,5	68,2	60,1
5 μηνών κυβ.	63,5	78,6	71,3	75,2	69,3	64,4
Εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη 28 ημ. (MPa)	4,71	4,45	4,88	4,52	4,30	2,67
Εφελκυστική αντοχή από κάμψη 28 ημ. (MPa)	9,05	9,84	8,16	7,10	7,69	7,54
Στατικό μέτρο ελαστικότητας 28 ημ. (GPa)	27,2	32,5	33,6	29,2	27,8	29,2
Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας 28 ημ. (GPa)	42,9	47,5	47,85	40,9	45,3	44,34
Λόγος $f_{c,κυβ,28}/f_{c,κυλ,28}$	1,20	1,13	1,12	1,17	1,23	1,18
Λόγος $f_{c,διάρρηξη}/f_{c,θλίψη}$ (%)	9,51	7,84	7,40	7,62	7,79	5,21
Λόγος $f_{c,θλίψη}/f_{c,κάμψη}$ (%)	15,2	15,2	11,02	10,2	11,2	12,5
Λόγος $E_{δυν}/E_{στατ}$	1,576	1,462	1,422	1,401	1,631	1,516

Τα δοκίμια συμπεκνώθηκαν με δονητική τράπεζα. Ο έλεγχος της συμπεκνωσιμότητας έγινε με προσδιορισμό του υπολογιστικού ειδικού βάρους του σκυρ/τος γ'' , του ειδικού βάρους του συμπεκνωμένου γ' και του ασυμπύκνωτου, γ . Οι λόγοι γ'/γ'' κυμαίνονταν από 0.88 έως 0.93 και κρίθηκε ικανοποιητικός. Όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν επί ένα μήνα σε θάλαμο συντήρησης με τις προδιαγραφόμενες από τους κανονισμούς συνθήκες και μετά παρέμειναν σε συνθήκες περιβάλλοντος.

Οι έλεγχοι των μηχανικών χαρακτηριστικών έγιναν σύμφωνα με τους κανονισμούς ASTM C496 για εφελκυσμό από διάρρηξη, ASTM C293 για εφελκυσμό από κάμψη και ASTM C469 για το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων απ' όπου υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας. Ο υπολογισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας έγινε με σονόμετρο κατά ASTM C586 σε πρισματικά δοκίμια.



Εικόνα 1. Μηχανικά χαρακτηριστικά σκυροδεμάτων με τέφρα



Εικόνα 2. Ρυθμός ανάπτυξης αντοχής κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος με τέφρα

3 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Κατ' αρχήν επιτεύχθηκαν επίπεδα 28 ημερών θλιπτικής αντοχής πάνω από 60MPa για κύβους με ένα συνολικό ποσό κονιών από 600 έως 700kg/m³. Συγκρίνοντας τα μίγματα 1-3 και 4-6 δεν φαίνεται να είναι εμφανής κάποια διαφοροποίηση λόγω του μεγαλύτερου

(700kg/m³) ποσοστού κονιών των 4-6 μιγμάτων. Μια τάση χαμηλότερων αντοχών εφελκυσμού και μέτρων ελαστικότητας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι καλύτερα συμπεριφέρονται ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά τα μίγματα με 600kg/m³ συνολικής κονιάς. Η παράμετρος που φαίνεται να επηρεάζει τις αντοχές είναι ο λόγος νερού/τσιμέντου. Σε λόγους νερού/τσιμέντου κάτω από 0.30 οι τιμές που επιτεύχθηκαν είναι υψηλότερες. Φαίνεται επίσης ότι αυξημένα ποσοστά της ασβεστούχας τέφρας οδηγούν σε υψηλότερες δόσεις ρευστοποιητή. Υπάρχει ένας καλός ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής και φαίνεται πως στις 7 ημέρες ένα επίπεδο αντοχής 40-50MPa είναι εφικτό.

Η εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη κυμαίνεται από 2.6 έως 4.8% της θλιπτικής ενώ η εφελκυστική αντοχή από κάμψη κυμαίνεται από 7 έως 9% της θλιπτικής. Το στατικό μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται από 27 έως 33.5GPa. Εάν συγκριθούν οι τιμές αυτές με τις υπολογιζόμενες (βάσει του τύπου $E_{cm}=9,5(f_{ck}+8)^{1/3}$) τιμές $E_{στατικού}$ συμβατικών σκυροδεμάτων φαίνεται ότι οι τιμές στα σκυροδέματα με τέφρα είναι λίγο χαμηλότερες (33,5 GPa αντί 37GPa).

Πρέπει επίσης να λεχθεί ότι παρ'όλο που τα μηχανικά και ελαστικά χαρακτηριστικά προϊδεάζουν για τη συμπεριφορά του σκυροδέματος στο χρόνο απαιτείται περαιτέρω έλεγχος σε βασικές δοκιμασίες ανθεκτικότητας που να έχουν σχέση με τη χρήση του τελικού προϊόντος προκειμένου να αποφασισθεί ο σχεδιασμός υψηλής αντοχής σκυροδέματος με μεγάλη περιεκτικότητα σε τέφρα.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Είναι δυνατό να επιτευχθεί εμπορικό σκυρόδεμα υψηλής αντοχής με επεξεργασμένη τέφρα που εμπίπτει στην κατηγορία EIT2 σε υψηλό ποσοστό 30 έως 50% του συνόλου της συνδετικής κονιάς.

Προτείνεται το χαμηλότερο δυνατό ποσό συνολικής κονιάς στο ανάμιγμα, που στην έρευνα ήταν 600kg/m³. Περαιτέρω έρευνα ίσως ελαχιστοποιήσει ακόμα περισσότερο το ποσό αυτό. Η πιο σημαντική παράμετρος για την επίτευξη υψηλής αντοχής φαίνεται ότι είναι ο λόγος Ν/τσιμέντου+Ιπτ. Τέφρα. Τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής με μεγάλο ποσοστό τέφρας έχουν σχετικά χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας από τα συμβατικά σκυροδέματα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- 1 ACI Committee ACI 363 2R-98 Guide to Quality Control and Testing of High-Strength Concrete
2. S.I Keda et all, "Innovative Design and Construction of a 50m Span Footbridge using Reactive Powder Concrete", Proc. of G. C. Hoff, Symp. on High Performance Concrete and Concrete for Marine Environment", Las Vegas, May 2004 Editor T.C. Lin, pp.93-107.
3. H.G. Russel, "Applications of High Performance Concrete and Concrete for Marine Environment", Editor T.C Lin, pp.1-17, Las Vegas USA, 2004.
4. J.A.Bickley, "North American Trends in the Development of High Strength Concrete", 5th Int. Symp.on Utilization of High Strength and High Performance Concrete", Proc.Vol.1, pp1-14 Editor I Holand and E.Sellevold, Sandefjord, Norway, 1999.

5. V.M. Malhotra and P.K Mehta, "High Performance, High Volume Fly Ash Concrete", pp.33-35, Canada 2002.

Πειραματική προσέγγιση της χρήσης ανακυκλωμένων αδρανών βιομηχανικής επεξεργασίας στην παράγωγή νέου σκυροδέματος. Μέρος Ι

Σ. Μαυρίδου, Ν. Οικονόμου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών,, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ, 54124, Θεσσαλονίκη,
e-mail: smavrido@civil.auth.gr; ikonomou@civil.auth.gr

Κλ. Γιάνναρης, Στ. Παντούλα

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ

Λέξεις κλειδιά: ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος (Α.Α.Σ), Απόβλητα από Εκσκαφές, Κατασκευές και Κατεδαφίσεις (Α.Ε.Κ.Κ), σκυρόδεμα, περιβάλλον

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την πρώτη σειρά μιγμάτων σκυροδέματος με χρήση ανακυκλωμένων αδρανών παλαιού σκυροδέματος από σύγχρονη βιομηχανική μονάδα επεξεργασίας Αποβλήτων από Εκσκαφές, Κατασκευές και Κατεδαφίσεις (Α.Ε.Κ.Κ) σταθερού τύπου. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν μίγματα σκυροδέματος με ολική αντικατάσταση των φυσικών αδρανών με ανακυκλωμένα αδρανή, τα οποία προήλθαν από συλλογή παλαιών στοιχείων σκυροδέματος από κατεδαφίσεις στο ευρύτερο Πολεοδομικό Συγκρότημα της Θεσσαλονίκης. Παρουσιάζονται χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων αδρανών καθώς και χαρακτηριστικά των παραγόμενων μιγμάτων. Βάσει των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι είναι δυνατή η χρήση ανακυκλωμένων αδρανών σκυροδέματος τυχαίας σύστασης, ηλικίας και προέλευσης στην παραγωγή νέου σκυροδέματος με οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Experimental approach of the use of industrially recycled aggregates in the production of new concrete. Part I

S. Mavridou, N. Oikonomou

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki (A.U.Th)
e-mails: smavrido@civil.auth.gr; ikonomou@civil.auth.gr

Kl. Giannaris, St. Pantoula

Civil Engineer, A.U.Th

Keywords: recycled aggregates, demolition wastes, concrete, environment

ABSTRACT: This report presents primary laboratory results of concrete mixtures with industrially recycled aggregates. The recycled aggregates came from old concrete

generated from demolition wastes from the region of Thessaloniki and were treated industrially in a steady type plant. The report consists of the suitability tests for recycled aggregates while characteristics of concrete mixtures in fresh and hardened state are examined. Based on the results, it seems possible to produce concrete with recycled aggregates of random age, origin and composition environmentally and economically profitable.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τομέας των κατασκευών είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τον άνθρωπο αλλά παράλληλα υπεύθυνος σε ποσοστό 50% [1] για τη λήψη από τη φύση πρώτων υλών. Ο κύριος όγκος των δομικών υλικών που κατευθύνονται στην κατασκευή αποτελείται από αδρανή υλικά που θεωρούνται το πρώτο φυσικό υλικό που καταναλώνεται μετά το νερό και τα καύσιμα. Τα απόβλητα από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ) συνιστούν ένα από τα μεγαλύτερα ρεύματα αποβλήτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση, μαζί με τα αντίστοιχα από τις μεταλλευτικές και αγροτικές δραστηριότητες και μάλιστα σε ποσοστό 25%[2].

Όσον αφορά στο νομοθετικό πλαίσιο της χώρας μας, το σχετικό με την εναλλακτική διαχείριση των Αποβλήτων από Εκσκαφές, Κατασκευές και Κατεδαφίσεις(ΑΕΚΚ) Προεδρικό Διάταγμα έχει ήδη υπογραφεί ενώ εκκρεμεί η δημοσίευσή του στην Εφημερίδα της Κυβερνήσεως. Οι στόχοι που θέτει αυτό είναι οι εξής [3]:

Α) μέχρι την 1^η Ιανουαρίου 2006 να αξιοποιείται κατ' ελάχιστο το 30% κ.β των παραγόμενων απορριμμάτων, από το οποίο το 50% να ανακυκλώνεται (!)

Β) μέχρι την 1^η Ιανουαρίου 2008 να αξιοποιείται κατ' ελάχιστο το 50% κ.β των παραγόμενων απορριμμάτων, από το οποίο το 50% να ανακυκλώνεται (!)

Γ) μέχρι την 1^η Ιανουαρίου 2015 να αξιοποιείται κατ' ελάχιστο το 80% κ.β των παραγόμενων απορριμμάτων, από το οποίο το 50% να ανακυκλώνεται.

Οι στόχοι Α και Β δυστυχώς δεν έχουν επιτευχθεί ενώ η δημοσίευση του Προεδρικού Διατάγματος και συνεπώς η ομαλή και νόμιμη λειτουργία των ήδη υπαρχουσών- αλλά χωρίς άδεια- μονάδων επεξεργασίας Α.Ε.Κ.Κ ίσως σταθεί αρωγός στην επίτευξη του στόχου Γ.

Στην παρούσα εργασία μελετώνται ιδιότητες σκυροδέματος με χρήση ανακυκλωμένων αδρανών αντί φυσικών. Αρχικά ελέγχεται η καταλληλότητα χρήσης των ανακυκλωμένων αδρανών, τα οποία προήλθαν από συλλογή παλαιών στοιχείων σκυροδέματος από κατεδαφίσεις στο ευρύτερο Πολεοδομικό Συγκρότημα της Θεσσαλονίκης και στη συνέχεια εξετάζονται ιδιότητες του σκυροδέματος σε νωπή και σκληρυμένη κατάσταση.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των συνθέσεων ήταν:

- Αδρανή λατομείου Δρυμού (άμμος-γαρμπίλι)
- Αδρανή ανακυκλωμένα από την 'Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας Α.Ε.' (άμμος-γαρμπίλι)
- Νερό δικτύου ύδρευσης
- Τσιμέντο TITAN CEM I 42,5R
- Τσιμέντο TITAN CEM II 32,5N
- Επιβραδυντής Pozzolith 134 CF
- Υπερρευστοποιητής Glenium C329

Όσον αφορά στα ανακυκλωμένα αδρανή, αυτά προήλθαν από το συλλογικό σύστημα ανακύκλωσης ΑΕΚΚ 'Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας ΑΕ', που εδρεύει στο ευρύτερο Πολεοδομικό Συγκρότημα του νομού Θεσσαλονίκης[5]. Η ύπαρξη της μονάδας αυτής, με το μέγεθός της και την ποιότητα παραγωγής, έδωσε τη δυνατότητα μελέτης της συμπεριφοράς και των δυνατοτήτων του σκυροδέματος με Α.Α.Σ. στην πράξη. Για την παραγωγή αυτών, τροφοδοτήθηκαν στο σύστημα, κομμάτια από κράσπεδα και πλάκες σκυροδέματος, ενώ το υλικό που προέκυψε συλλέχθηκε ξεχωριστά, για αποφυγή ανάμιξης του με τα στοκ των υπολοίπων προϊόντων. Διευκρινίζεται ωστόσο, πως η προέλευση των τεμαχίων πρωτογενούς σκυροδέματος είναι άγνωστη. Κάτι ανάλογο θα ισχύει γενικά και στην πράξη αφού η παραγωγή και η ύπαρξη στοκ καθαρών (Α.Α.Σ.) θα εξαρτάται άμεσα από τη διαθεσιμότητα στοιχείων σκυροδέματος από ποικίλες κατεδαφίσεις.

Ο χώρος εγκατάστασης της μονάδας, σταθερού τύπου, είναι πρώην χώρος αμμοληψίας αυτούσιου υλικού. Για τη δημιουργία της μονάδας, η μορφολογία της περιοχής χρειάστηκε να αλλάξει με χωματουργικές εργασίες διαμόρφωσης και φυτοκάλυψη μεγάλης κλίμακας. Έτσι, η όλη εγκατάσταση βρίσκεται 24m κάτω από τον περιβάλλοντα χώρο ενώ το εμβαδόν της διαμορφωμένης έκτασης ξεπερνά τα 110.000m².



Σχήμα 1^α,β,γ. Συλλογικό σύστημα ανακύκλωσης ΑΕΚΚ ‘Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας ΑΕ’.

ΕΛΕΓΧΟΙ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ

A) Έλεγχοι σε υγεία και σε φθορά κατά Los Angeles

Οι έλεγχοι σε υγεία και φθορά κατά Los Angeles διενεργήθηκαν στο κρατικό εργαστήριο ΠΕΔΕ Κεντρικής Μακεδονίας. Όσον αφορά το ανακυκλωμένο γαρμπίλι, ο έλεγχος σε φθορά κατά Los Angeles έδωσε 29,4% ενώ η αντίστοιχη τιμή για τα αδρανή του λατομείου Δρυμού ήταν 24,8%- ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ) θέτει ως όριο το 40%-.

Ο έλεγχος σε υγεία για το γαρμπίλι έδωσε 1,8%, έναντι 0,3% των χονδρόκοκκων Δρυμού, τιμή αποδεκτή βάσει του αντίστοιχου ορίου 12%.

B) Ειδικό Βάρος – Υδαταπορροφητικότητα

Στη συνέχεια μετρήθηκαν το ειδικό βάρος (Ε.Β.) και η υδαταπορροφητικότητα των (Α.Α.Σ.), ενώ οι τιμές που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν στον κατοπινό σχεδιασμό των συνθέσεων που πραγματοποιήθηκαν. Οι μετρήσεις αυτές, όπως και οι προαναφερθείσες συνθέσεις σκυροδέματος, έγιναν στο κεντρικό εργαστήριο ελέγχου ποιότητας της ΑΕΓΕΚ ως αναδόχου της κατασκευής του Μετρό Θεσσαλονίκης.

Πίνακας 1 . Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος και υδαταπορροφητικότητα αδρανών, ανακυκλωμένων και φυσικών

	Άμμος ανακυκλωμένη	Άμμος Δρυμού	Γαρμπίλι Δρυμού	Γαρμπίλι ανακυκλωμένο
ΜΙΚΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ Ε.Β.	2,63	2,89	2,71	2,45

ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ %	8,13	2,0	0,30	5,13
--------------------	------	-----	------	------

Όπως ήταν αναμενόμενο, το ειδικό βάρος των ανακυκλωμένων αδρανών είναι μικρότερο από των πρωτογενών, ενώ η υδαταπορροφητικότητά τους αρκετά μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται στη στιβάδα της επικολλημένης τσιμεντόπαστας με το μεγάλο πορώδες. Συγκρίνοντας τώρα τα κλάσματα μεταξύ τους, παρατηρούμε πως το ανακυκλωμένο γαρμπίλι παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με τα πιο λεπτόκοκκα (Α.Α.Σ.) αφού όπως έχει αναφερθεί έχει μικρότερο ποσοστό τσιμεντοπήγατος[4].

Γ) Ισοδύναμο Άμμου

Παρατηρείται πως τα ανακυκλωμένα υλικά έχουν ελαφρώς καλύτερη τιμή ισοδυνάμου άμμου από τα μητρικά- 71 έναντι 70 των μητρικών-. Είναι γενικά αποδεκτό πως τα πρωτογενή αδρανή παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές τιμές λόγω του τρόπου παραγωγής τους στα λατομεία. Από την άλλη τα ανακυκλωμένα εμφανίζονται ικανά να καλύψουν τις απαιτήσεις της δοκιμής αυτής (κατώτατο όριο για χρήση σε σκυρόδεμα 65).

Δ) Κοκκομετρική ανάλυση

Τα συσσωματώματα των (Α.Α.Σ.) θεωρήθηκαν ως κανονικοί κόκκοι αδρανών χωρίς καμία περαιτέρω μελέτη για την κοκκομετρική καμπύλη των πρωτογενών ασβεστολιθικών αδρανών μέσα σε αυτά. Παρατηρήθηκε ότι η άμμος λατομείου είχε μεγαλύτερο ποσοστό διερχόμενων από το κόσκινο Νο 200 σε σχέση με την ανακυκλωμένη, γεγονός που συντελεί και στη μικρότερη τιμή ισοδυνάμου άμμου. Οι κοκκομετρικές καμπύλες της άμμου και του γαρμπιλιού φαίνονται στο σχήμα 2 στην ενότητα των συνθέσεων.

ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ

Χρησιμοποιώντας τα (Α.Α.Σ.) της ‘Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας Α.Ε.’, καθώς και φυσικά αδρανή από το λατομείο του Δρυμού, πραγματοποιήθηκαν έξι συνθέσεις σκυροδέματος. Ο σχεδιασμός των συνθέσεων αυτών έγινε με γνώμονα την απόκτηση εμπειρίας επί των βασικών ιδιοτήτων, δηλαδή ως προς την εργασιμότητα και την ανάπτυξη αντοχών, από διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος παρά την παραγωγή ομοειδών μιγμάτων ενός μόνο τύπου για άμεση σύγκριση. Τα ποσοστά αντικατάστασης, το είδος του τσιμέντου, ο λόγος νερού προς τσιμέντο, το ποσοστό του υπερρευστοποιητή, ήταν οι μεταβλητές που ενδεχομένως άλλαζαν σε κάθε σύνθεση.

Οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν στόχευαν στην παραγωγή σκυροδέματος κατηγορίας C20/25 (συνθέσεις 1-3) και C30/37 (συνθέσεις 4-6) όπως φαίνεται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2. Επιμέρους ποσότητες των συστατικών για κάθε σύνθεση (σε kg/m³)

ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	1	2	3	4	5	6
Γαρμπίλι Δρυμού	835			823		
Άμμος Δρυμού	976			962		
Γαρμπίλι ανακυκλωμένο		734	734		747	682
Άμμος ανακυκλωμένη		860	860		875	800

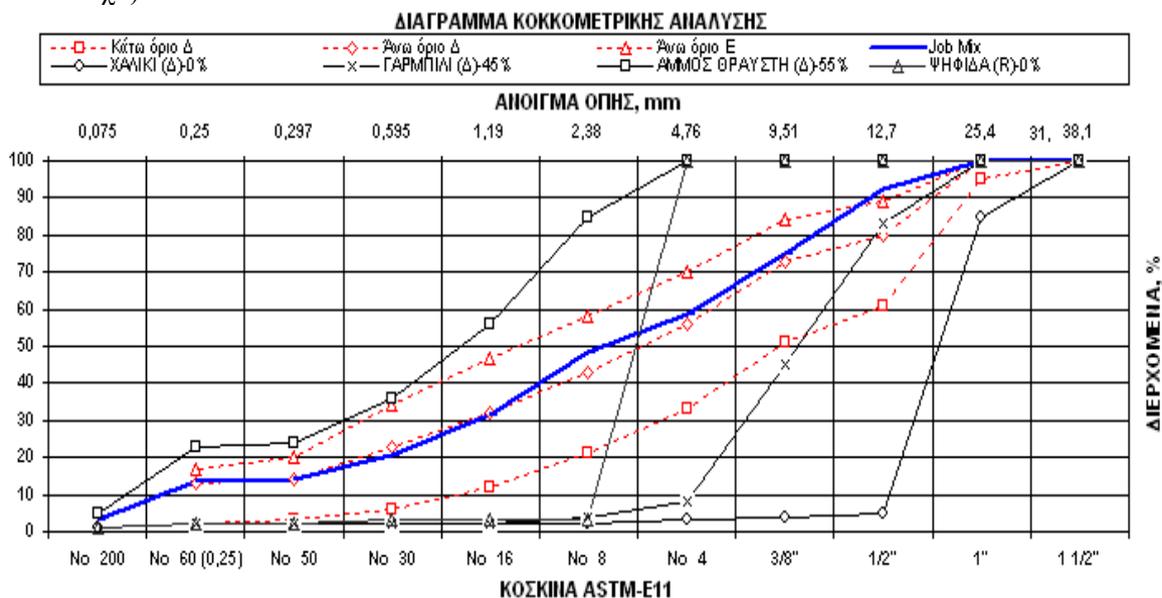
Νερό	225	310	310	190	276	325
TITAN CEM I 42,5R	200	200	200	100	100	100
TITAN CEM II 32,5N	100	100	100	300	300	300
Pozzolith 134 CF	0,90	0,90	0,90	1,40	1,40	1,40
Glenium C329	2,40	2,40	5,10	4,40	4,40	4,40
Glenium C329 (προσθήκη σε 60')	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,40 ¹

¹ προστέθηκε με στόχο την επίτευξη μεγαλύτερης κάθισης

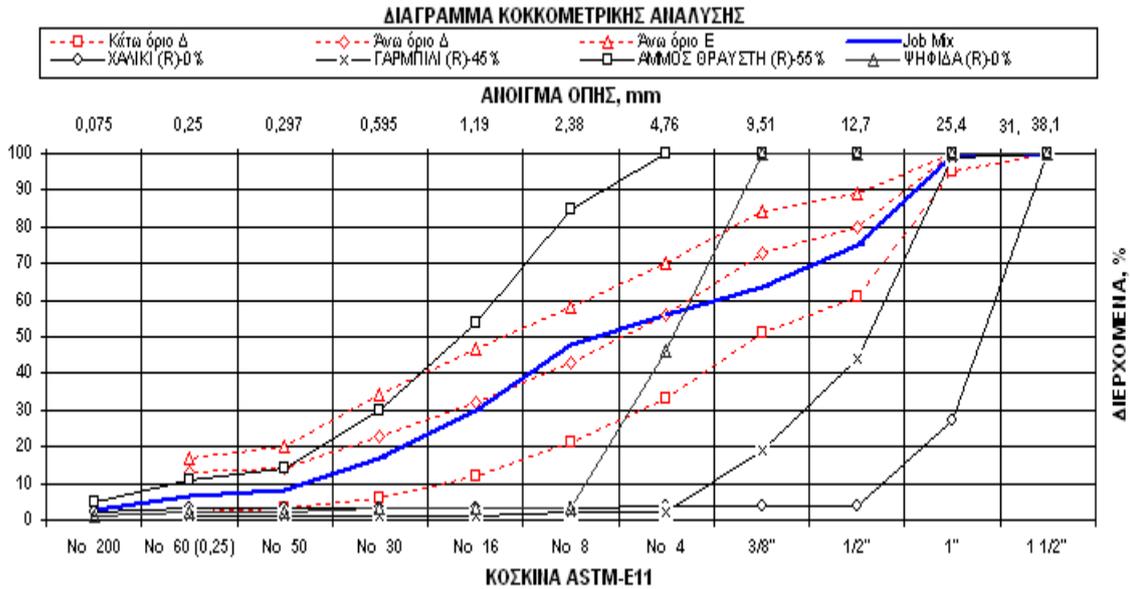
Όπως φαίνεται και από τον πίνακα, οι συνθέσεις μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες

- Όλα τα αδρανή είναι λατομείου
- Όλα τα αδρανή είναι ανακυκλωμένα

Για τον κάθε συνδυασμό σχεδιάστηκε η αντίστοιχη κοκκομετρική καμπύλη (σχήματα 2 και 3 αντίστοιχα).



Σχήμα 2. Κοκκομετρική καμπύλη για συνθέσεις με αδρανή λατομείου (συνθέσεις 1 και 4)



Σχήμα 3. Κοκκομετρική καμπύλη για συνθέσεις αδρανή ανακυκλωμένα (συνθέσεις 2,3,5,6)

Για την υλοποίηση των συνθέσεων παρασκευάστηκαν 60lt μίγματος για την κάθε μία από αυτές ενώ ελήφθησαν κυβικά, κυλινδρικά και πρισματικά δοκίμια για έλεγχο. Οι έλεγχοι που διενεργήθηκαν αφορούσαν χαρακτηριστικά των μιγμάτων σε νωπή κατάσταση (πυκνότητα, αρχική κάθιση, κενά αέρος σκυροδέματος) και σε σκληρυμένη (το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, την θλιπτική και καμπτική αντοχή καθώς και την αντοχή σε διάρρηξη). Η εργασία συμπληρώνεται με μελέτη της μικροδομής των μιγμάτων ώστε να διαπιστωθεί η καλή ή όχι συνάφεια των ανακυκλωμένων κόκκων με το υπόλοιπο μίγμα. Όλοι οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια 28 ημερών τα οποία συντηρήθηκαν σε θάλαμο θερμοκρασίας $20 \pm 2^\circ\text{C}$ και υγρασία $>95\%$.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών συνθέσεων, που αποτελούν μέσο όρο τριών τιμών.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα δοκιμών και ελέγχων στο νωπό και σκληρυμένο σκυρόδεμα για κάθε σύνθεση

Ιδιότητα	Σύνθεση	Σύνθεση					
		1	2	3	4	5	6
Κατηγορία σκυροδέματος		C20/25	C20/25	C20/25	C30/37	C30/37	C30/37
Πυκνότητα (Kg/m^3)		2403	2168	2123	2410	2201	2148
Αρχική κάθιση δοκιμίων (cm)		21	3	9	26	2	11
Κενά αέρος νωπού σκυρ/τος %		1,7	4,2	3,9	1,7	3,8	3,5
Αντοχή σε διάρρηξη		2,61	1,86	1,56	3,57	2,63	2,12
Αντοχή σε κάμψη		3,96	2,59	2,43	4,95	3,94	3,60
Αντοχή σε θλίψη		35,80	22,30	20,17	47,05	33,83	26,67
Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)		44,37	26,55	24,48	53,50	35,67	30,05

Με βάση τα εργαστηριακά αποτελέσματα παρατηρήθηκε μείωση της πυκνότητας των μιγμάτων σκυροδέματος με προσθήκη ανακυκλωμένων αδρανών, η οποία μειώθηκε περαιτέρω με προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας υπερρρευστοποιητή. Η μείωση αυτή ήταν αναμενόμενη δεδομένου του χαμηλότερου ειδικού βάρους των ανακυκλωμένων αδρανών.

Η εργασιμότητα των μιγμάτων με ανακυκλωμένα αδρανή, η οποία μετρήθηκε με την κάθιση, εμφανίστηκε αισθητά μειωμένη σε σχέση με την αντίστοιχη των μιγμάτων που περιείχαν φυσικά αδρανή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ιδιαίτερα αυξημένη ποσότητα νερού που απορροφούν τα ανακυκλωμένα αδρανή. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν και συνθέσεις με μεγαλύτερη ποσότητα υπερρρευστοποιητή και νερού.

Επίσης, τα θεωρούμενα κενά, σε λίτρα ανά κυβικό μέτρο, που συνυπολογίζονταν σε κάθε σύνθεση, χρειάστηκε να αναπροσαρμοστούν σε τιμές μεγαλύτερες από την τυπική τους των 15 lt/m^3 για καλύτερη προσέγγιση του αυξημένου ποσοστού κενών που προέκυπτε πειραματικά όποτε χρησιμοποιούνταν (Α.Α.Σ.).

Όσον αφορά στα μηχανικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων μιγμάτων παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Οι συνθέσεις 1 και 4 ικανοποιούν πλήρως τους στόχους αντοχής που τέθηκαν κατά το σχεδιασμό των συνθέσεων δηλαδή των κατηγοριών C20/25 και C30/37, αντίστοιχα.
- Η σύνθεση 2, η οποία περιείχε αποκλειστικά ανακυκλωμένα αδρανή και στα δύο κλάσματα που χρησιμοποιήθηκαν εμφάνισε μηχανικά χαρακτηριστικά λιγότερο ικανοποιητικά από τα αντίστοιχα του στόχου σχεδιασμού ενώ η μείωση της θλιπτικής αντοχής της ανήλθε στο 37,71% σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς 1.
- Η σύνθεση 3, η οποία περιείχε και αυτή αποκλειστικά ανακυκλωμένα αδρανή και στα δύο κλάσματα που χρησιμοποιήθηκαν εμφάνισε ακόμα χαμηλότερες τιμές μηχανικών αντοχών παρά την αυξημένη ποσότητα υπερρρευστοποιητή. Αυτό οφείλεται στον επίσης αυξημένο λόγο νερό/τσιμέντο, ο οποίος δρα αρνητικά στην ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών.
- Όσον αφορά στη σύνθεση 5, η οποία περιείχε ανακυκλωμένα αδρανή, εμφάνισε θλιπτική αντοχή ίση με 33,83MPa, τιμή μειωμένη σε σχέση με την αντίστοιχη του συμβατικού μίγματος κατά 28,09%.
- Η σύνθεση 6 εμφάνισε παρόμοια συμπεριφορά με τη σύνθεση 3, δηλαδή αν και αυξήθηκε η ποσότητα του υπερρρευστοποιητή, αυξήθηκε και η ποσότητα νερού και επομένως παρασκευάστηκαν μίγματα με μειωμένες μηχανικές αντοχές.
- Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζεται και στις υπόλοιπες ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος δηλαδή της καμπτικής αντοχής, της αντοχής σε διάρρηξη καθώς και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ωστόσο η μείωση των τιμών των χαρακτηριστικών αυτών δεν ήταν τόσο μεγάλη.
- Τέλος, παρατηρούμε πως η προσθήκη των ανακυκλωμένων αδρανών στις συνθέσεις κατηγορίας C30/37 επηρέασε λιγότερο αρνητικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων από τις αντίστοιχες της κατηγορίας C20/25.

ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ

Η μικροδομή των μιγμάτων σκυροδέματος, τόσο των συμβατικών όσο και αυτών που περιείχαν ανακυκλωμένα αδρανή, εξετάστηκαν με χρήση οπτικού μικροσκοπίου τύπου Leica Wild M10. Τα αποτελέσματα έδειξαν ισχυρή πρόσφυση της τραχείας επιφάνειας των γωνιωδών ανακυκλωμένων κόκκων με την πάστα. Από την μικροσκοπική παρατήρηση φάνηκε επίσης πως τα δύο υλικά

λειτουργούν ενιαία με τις ρωγμές να προχωρούν στο ανακυκλωμένο αδρανές και να μη σταματάνε στη διεπιφάνεια αδρανούς – κονιάς. Συγκεκριμένα για τις :

➤ *Συνθέσεις με χρήση αδρανών λατομείου (συνθέσεις 1 και 4)*

Παρατηρήθηκε ισχυρή συνάφεια πάστας και αδρανών ωστόσο παρατηρούνται αποκολλήσεις των ασβεστολιθικών αδρανών με ύπαρξη σφαιρικών πόρων διαμέτρου 200-400μm σε θέσεις όπου αποκολλήθηκαν αδρανή-σχήμα 4.



Σχήμα 4. Δομή σκυροδέματος με χρήση αδρανών λατομείου (x8)

➤ *Συνθέσεις με χρήση ανακυκλωμένων αδρανών(συνθέσεις 2,3,5,6.)*

Αν και στις συνθέσεις αυτές παρατηρούνται αποκολλήσεις μερικών αδρανών, η συνάφεια παραμένει ισχυρή. Επίσης παρατηρήθηκε ύπαρξη λίγων λεπτοκρυσταλλικών αλάτων σε πόρους των (Α.Α.Σ.)- σχήμα 5.



Σχήμα 5. Δομή σκυροδέματος με χρήση ανακυκλωμένων αδρανών (x8)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Με την παρούσα εργασία έγινε μία ουσιαστική προσέγγιση του πολύ σημαντικού περιβαλλοντολογικά θέματος της εναλλακτικής διαχείρισης των ΑΕΚΚ. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν ανακυκλωμένα αδρανή που προέρχονται από παλιό σκυρόδεμα, στην παραγωγή νέου συμβατικού σκυροδέματος. Το ανακυκλωμένο υλικό χορηγήθηκε από την ‘Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας Α.Ε.’ μία μονάδα ανακύκλωσης ΑΕΚΚ σταθερού τύπου. Ως

εκ τούτου τα αδρανή που ελήφθησαν αφορούν προϊόντα που παράγονται στην πράξη και όχι σε εργαστηριακό επίπεδο.

Στις συνθέσεις όπου χρησιμοποιήθηκαν ανακυκλωμένα αδρανή, αυτά αντικατέστησαν τα φυσικά σε ποσοστό 100%. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν-φυσικά και ανακυκλωμένα-, το νωπό σκυρόδεμα καθώς και το σκληρυμένο που παρασκευάστηκε υποβλήθηκαν σε μία σειρά ελέγχων και δοκιμών για να διαπιστωθεί η καταλληλότητα και η συμπεριφορά τους.

Τα ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος ικανοποίησαν τους αντίστοιχους ελέγχους που τα προκρίνουν για χρησιμοποίηση τους στην παραγωγή νέου σκυροδέματος.

Το πρόβλημα που προκύπτει από αυτά αφορά την αυξημένη τους υδαταπορροφητικότητα σε σχέση με τα φυσικά αδρανή, ποταμού ή λατομείου. Αυτό συμβαίνει λόγω της επικολημένης στην επιφάνειά τους τσιμεντόπαστας του σκυροδέματος στο οποίο είχαν αρχικά χρησιμοποιηθεί. Προσοχή θα πρέπει να δίνεται λοιπόν στο σχεδιασμό των συνθέσεων, στις οποίες χρειάζεται να αντισταθμίζεται η αρνητική ιδιότητα της μεγάλης υδαταπορροφητικότητας με προσθήκη περισσότερου νερού. Αυτό με τη σειρά του όμως δημιουργεί αλλοίωση στον ενεργό λόγο νερού προς τσιμέντο ιδίως όταν η ποσότητα του τσιμέντου είναι μικρή όπως φάνηκε και στις εξεταζόμενες συνθέσεις.

Η μικροσκοπική εξέταση του σκυροδέματος με (Α.Α.Σ.) έδειξε ισχυρή συνάφεια αυτών με την τσιμεντόπαστα και καλή συμπεριφορά ως προς τη ρηγμάτωση. Επίσης τα (Α.Α.Σ.) διαθέτουν γωνιώδες σχήμα το οποίο, ενισχύει τη συνάφεια αδρανών- τσιμεντόπαστας.

Σε επόμενο στάδιο θα εξετασθεί προσθήκη ανακυκλωμένων αδρανών σε διάφορα ποσοστά και συνδυασμούς, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση καθενός εκ των δυο κλασμάτων των ανακυκλωμένων αδρανών ξεχωριστά. Παράλληλα θα ολοκληρωθεί η μελέτη με επιπλέον ελέγχους στο σύνολο των συνθέσεων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς εκφράζουν θερμές ευχαριστίες στον Πρόεδρο της «Ανακύκλωσης Αδρανών Μακεδονίας Α.Ε» κ. Καϊσίδη για τη χορήγηση των ανακυκλωμένων αδρανών καθώς και την εταιρεία «ΚΟΙΝΟΠΡΑΞΙΑ ΕΡΓΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ» και ιδιαίτερα τους Χημικούς Μηχανικούς κ. Μιχαηλίδη Εμμανουήλ, Προϊστάμενο και Μαρκογιάννη Κωνσταντίνο, Αναπληρωτή Προϊστάμενο του Εργαστηρίου της εταιρείας για την πολύτιμη βοήθεια τους. Οι συγγραφείς ευχαριστούν επίσης τη Λέκτορα του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών κα Στεφανίδου Μαρία για την πολύτιμη βοήθειά της στη μικροσκοπική παρατήρηση των δειγμάτων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Oikonomou, N. 'Recycled concrete aggregates' Cement and Concrete Composites 2005; Vol. 27, pp. 315-318
2. N. Μουσιόπουλος, Ε. Ιακωβίδης, Α. Παπαδόπουλος, Χ. Αχίλλας, Δ. Αηδόνης, Δ. Αναστασέλος, Γ. Μπανιάς, (2007), Μεθοδολογικό πλαίσιο λήψης αποφάσεων για τη σχεδίαση

και λειτουργία μονάδας ανακύκλωσης αδρανών υλικών, Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας & Περιβαλλοντικής Μηχανικής, Εργαστήριο Ποσοτικής Ανάλυσης, Θεσσαλονίκη.-2

3. Προεδρικό Διάταγμα με Θέμα: 'Μέτρα και Όροι για την Εναλλακτική Διαχείριση των Αποβλήτων από Εκσκαφές, Κατασκευές και Κατεδαφίσεις. Πρόγραμμα για την Εναλλακτική Διαχείρισή τους', (2007), Υπουργείο ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ.
4. Marta Sanchez de Juan, Pilar AlaeJow Gutierrez, (2008), Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, CEDEX, Spain.
5. <http://anakyklosi-am.gr> (Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας).

Δάπεδα σκυροδέματος αθλοπαιδιών με χρήση ανακυκλωμένου ελαστικού. Βιοκινητικές μετρήσεις σε μεγάλης ηλικίας δάπεδα.

Α. Μπάτσιος, Ι. Παπαγιάννη, Σ. Μαυρίδου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ

Λέξεις κλειδιά: δάπεδα αθλοπαιδιών, ανακυκλωμένο ελαστικό, μηχανικά χαρακτηριστικά, βιοκινητικές μετρήσεις

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν βιοκινητικές μετρήσεις (με δυναμοδάπεδο) σε μεγάλης ηλικίας (1έτους) δάπεδα συμβατικού σκυροδέματος και σκυροδέματος με ανακυκλωμένο ελαστικό. Σχεδιάστηκαν μίγματα σκυροδέματος κατηγορίας C16/20. Αρχικά μετρήθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους (αντοχή σε θλίψη, σε κάμψη, σε διάρρηξη καθώς και το δυναμικό και στατικό μέτρο ελαστικότητας). Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν βιοκινητικές μετρήσεις -κατακόρυφες αντιδράσεις εδάφους , χρόνος εκδήλωσης μέγιστης τιμής και συνολικός χρόνος επαφής-.

Concrete mixtures with rubber from worn automobile tires proposed for usage as athletic pavements. Biomechanical characteristics in aged pavements

A. Batsios, I. Papayianni, S. Mavridou

Laboratory of Building Materials, Department of Civil Engineering, A.U.Th

Key-words: pavement for athletic activities, recycled tire rubber, concrete, biomechanical characteristics

ABSTRACT: This study presents the biomechanical characteristics in 1 year's old concrete mixtures, with and without recycled rubber as aggregates, for athletic floors using force-plate. The category of these mixtures was set at C16/20 category. This paper examines mechanical characteristics (compression strength, bending strength, splitting tensile strength, dynamic and static modulus of elasticity) as well as biomechanical characteristics such as the maximum vGRF value, the contact time on the specimen (T_c) and the time to achieve this value.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το δάπεδο των χώρων αθλοπαιδιών παίζει σημαντικό ρόλο στην απορρόφηση των κατακόρυφων αντιδράσεων που δέχεται ο αθλητής και που καταπονούν ιδιαίτερα τις αρθρώσεις των κάτω άκρων. Μεγάλο ποσοστό των σχολικών προαυλίων, συμπεριλαμβανομένων και των δαπέδων των χώρων για αθλοπαιδιές, καλύπτεται από σκυρόδεμα. Έχει καταγραφεί (McKay et al., 2005) ότι σε μαθητές δημοτικού σχολείου εφαρμόζονται κατακόρυφες δυνάμεις αντίδρασης του εδάφους (vGRF) έως και πέντε φορές το βάρος του σώματός τους, ενώ η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στα πρώτα 20-30 ms της κρούσης, πριν δηλαδή αναλάβει το έλεγχο της κίνησης ο νευρομυϊκός μηχανισμός τους. Σύμφωνα με τους Kollias et al (2004), η κατακόρυφη αντίδραση κατά την εκτέλεση κατακόρυφου άλματος από ύψος 60 εκατοστών μεταξύ αθλητών από διάφορα αθλήματα, βρέθηκε ίση μέχρι και 5 φορές το βάρος του σώματος.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού προτείνεται η δυνατότητα τροποποίησης του δαπέδου με χρήση κοκκοποιημένου ανακυκλωμένου ελαστικού αυτοκινήτων ως αδρανές υλικό, καθώς αρχικές μελέτες προσθήκης του ελαστικού σε προϊόντα με βάση το τσιμέντο κρίνουν ικανοποιητική την συμπεριφορά του ελαστικού σε αυτά (Οικονόμου κα, 2007).

Το ανακυκλωμένο ελαστικό προέρχεται από μηχανικό τεμαχισμό ελαστικών οχημάτων μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, σύμφωνα με στοιχεία της European Tire Recycling Association -E.T.R.A-, αποσύρονται περίπου 3δς τόννοι ενώ στην Ελλάδα οι ετήσιες ποσότητες φθαρμένων ελαστικών ανέρχονται σε περισσότερους από 58500 τόνους. Υπάρχει ήδη θεσμοθετημένη νομοθεσία και συγκεκριμένα το υπ'αριθμόν 109/75/2004 Προεδρικό Διάταγμα που θέτει προδιαγραφές και στόχους για την εναλλακτική διαχείριση των μεταχειρισμένων ελαστικών. Σύμφωνα με αυτό, η

αξιοποίηση των μεταχειρισμένων αποβλήτων ελαστικών οχημάτων πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον το 65% των αποσυρόμενων ελαστικών με ταυτόχρονη ανακύκλωση 10% της συνολικής τους ποσότητας (ΠΔ 109/2004).

Σε παλαιότερη εργασία μετρήθηκαν οι βιοκινητικές παράμετροι 28 ημέρες μετά τη σκυροδέτηση των μιγμάτων σκυροδέματος (Batsios et al, 2008). Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η μέτρηση των βιοκινητικών αυτών παραμέτρων σε δάπεδα μεγάλης ηλικίας (1 έτους) και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Υλικά, συνθέσεις

Παρασκευάστηκαν τέσσερις σειρές μιγμάτων σκυροδέματος κατηγορίας C16/20. Στην πρώτη σύνθεση (M) χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM IV B 32.5N, άμμος θραυστή ασβεστολιθική (0-4mm), ρύζι (4-8mm), γαρμπίλι (8-16mm) και ρευστοποιητής Pozzolith 390N (BASF CC HELLAS SA). Στη δεύτερη (K30) και τρίτη (K60) σύνθεση χρησιμοποιήθηκε ίδιας κατηγορίας τσιμέντο, ρύζι και ασβεστολιθική άμμος, η οποία όμως αντικαταστάθηκε σε ποσοστό 30% και 60% κατ'όγκον από ανακυκλωμένο ελαστικό αυτοκινήτων ελληνικής προέλευσης (Καραμπάς Ελληνική Αντιρρυπαντική Ανακύκλωσης ΑΕΒΕ, Λιβανάτες Λοκρίδος) αντίστοιχης κοκκομετρίας (0-4mm)-εικόνα 1. Στην τέταρτη σύνθεση (Y60) χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο υψηλής αντοχής CEM I 42.5 αντί κοινού τσιμέντου, ενώ τα υπόλοιπα συστατικά παρέμειναν κοινά με τα αντίστοιχα της K60. Οι μηχανικές αντοχές (αντοχή σε θλίψη, σε κάμψη, σε διάρρηξη καθώς και το στατικό και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας) εξετάστηκαν με τυποποιημένες διαδικασίες στο πιστοποιημένο (DIN EN ISO 9001:2000) Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. Παράλληλα, στα παραχθέντα μίγματα καθορίστηκαν η κατακόρυφη αντίδραση σε διάφορα είδη αλμάτων, παράλληλα με τις μηχανικές αντοχές (θλίψη, κάμψη, διάρρηξη, δυναμικό και στατικό μέτρο ελαστικότητας).



Εικόνα 1. Ανακυκλωμένο ελαστικό – μικροσκόπιο, σκυροδέτηση-

Πίνακας 1.Αναλογίες της 1 ^{ης} σύνθεσης σκυροδέματος(M)	
Τσιμέντο CEM IV/B 32.5	325,0 Kg
Νερό (N/T=0,60)	195,0 Kg
Άμμος (33%)	598,5 Kg
Ρύζι (27%)	489,7 Kg

Γαρμπίλι (40%)	725,5 Kg
Ρευστοποιητής 1% κ.β.τσιμ.	3,25 Kg
Νέος λόγος N/T=0,55	178,7 Kgr
Κάθιση	4,0 cm

Πίνακας 2.Αναλογίες της 2^{ης} σύνθεσης σκυροδέματος (K30)

Τσιμέντο CEM IV/B 32.5	325,0 Kg
Νερό (N/T=0,60)	195,0 Kg
Άμμος (50%)	634,8 Kg
Ρύζι (50%)	906,8 Kg
Λάστιχο 30% κ.ό. της άμμου	92,9 Kg
Ρευστοποιητής 1% κ.β.τσιμ.	3,25 Kg
Νέος λόγος N/T=0,50	162,5 Kgr
Κάθιση	1,5 cm

Πίνακας 3.Αναλογίες της 3^{ης} σύνθεσης σκυροδέματος (K60)

Τσιμέντο CEM IV/B 32.5	325,0 Kg
Νερό (N/T=0,60)	195,0 Kg
Άμμος (50%)	362,7 Kg
Ρύζι (50%)	906,8 Kg
Λάστιχο 60% κ.ό. της άμμου	186,2 Kg
Ρευστοποιητής 1%κ.β. τσιμ.	3,25 Kg
Νέος λόγος N/T=0,45	146,2 Kgr
Κάθιση	2,5 cm

Πίνακας 4.Αναλογίες της 4^{ης} σύνθεσης σκυροδέματος (Y60)

Τσιμέντο CEM I 42.5	300,0 Kg
Νερό (N/T=0,70)	210,0 Kg
Άμμος (50%)	358,0 Kg
Ρύζι (50%)	895,0 Kg
Λάστιχο 60% κ.ό. της άμμου	183,0 Kg
Ρευστοποιητής 1%κ.β. τσιμ.	3,0 Kg
Νέος λόγος N/T=0,42	126,3 Kgr
Κάθιση	2,0 cm

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μιγμάτων δίνονται στον πίνακα 5.

Πίνακας 5.Αναλογίες της 4^{ης} σύνθεσης σκυροδέματος (Y60)

Παράμετρος		M	K30	K60	Y60
Θλιπτική αντοχή	(MPa)	28.0	14.5	6.5	9.9
Αντοχή σε κάμψη	(MPa)	4.95	4.60	4.40	4.70
Αντοχή σε διάρρηξη	(MPa)	2.57	2.21	2.02	2.12
Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας	(GPa)	44.8	32.7	18.6	25.9
Στατικό μέτρο ελαστικότητας	(GPa)	24.0	17.0	7.5	12.0
Ειδικό βάρος	(t/m ³)	2.3	2.1	2.0	2.0

ΒΙΟΚΙΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΒΙΟΚΙΝΗΤΙΚΗΣ

Οι βιοκινητικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Βιοκινητικής του Τ.Ε.Φ.Α.Α. – Α.Π.Θ. Κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε με τυχαία σειρά σε δυναμοδάπεδο AMTI OR6-5-1 (AMTI, Newton, MA), συνδεδεμένο με Η/Υ (2kHz) μέσω A/D κάρτας (PCL-812PG, Advantech Co, Taiwan). Το δυναμοδάπεδο είναι ένα συνηθισμένο όργανο μέτρησης της δύναμης στην αθλητική κίνηση. Πρόκειται για ένα όργανο με ορθογώνια επίπεδη επιφάνεια διαστάσεων συνήθως 50X60 cm, τοποθετείται στο δάπεδο με την επιφάνειά του να βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με αυτή του δαπέδου. Λόγω της χρησιμοποίησης τεσσάρων τρισδιάστατων μετατροπέων δύναμης, ένα σε κάθε γωνία, ένα δυναμοδάπεδο έχει την δυνατότητα της μέτρησης της εφαρμοζόμενης δύναμης στους τρεις καρτεσιανούς άξονες X, Y, Z και την δυνατότητα ορισμού του σημείου όπου εφαρμόζεται η συνισταμένη δύναμη (κέντρο πίεσης).



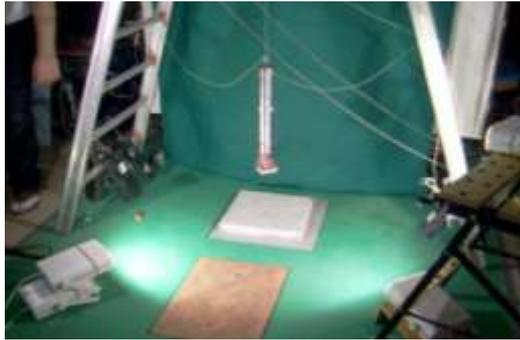
Εικόνα 2. Δυναμοδάπεδο.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης ανθρώπινου σκέλους παρασκευάστηκε ατσάλινος συμπαγής κύλινδρος μήκους 41cm και διαμέτρου 6.5cm δημιουργώντας συνθήκες κρούσης. Στην επιφάνεια κρούσης του κυλίνδρου προσαρμόσθηκε η φτέρνα ενός κοινού αθλητικού υποδήματος μέσω τεφλόν πάχους 5cm. Το συνολικό βάρος του σκέλους ήταν 11.2kg, ενώ για την απελευθέρωση χρησιμοποιήθηκε ειδικός μηχανισμός σκανδάλης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια διαστάσεων 36x36x5cm.



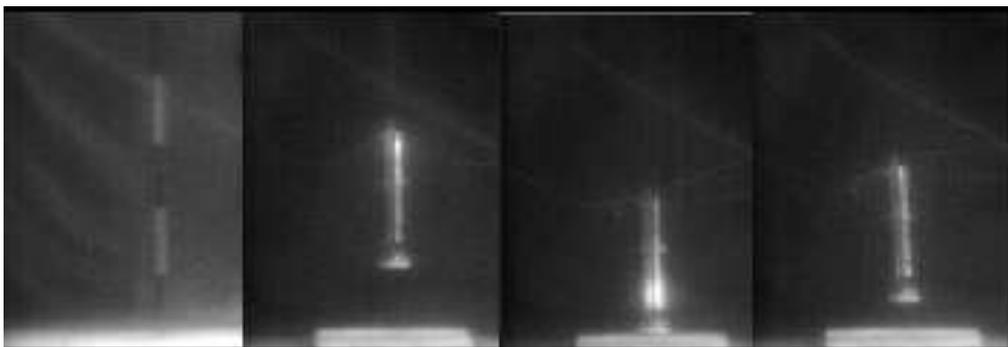
Εικόνα 3. Προσομοιωτής σκέλους.



Εικόνα 4. Συνολική παρουσίαση της διάταξης.

Υπολογίστηκε η κινητική ενέργεια που παράγεται σε άλμα ύψους 30 εκατοστών για μέσο όρο βάρους 76,5kg που ανταποκρίνεται για μαθητές λυκείου (Κόλλιας, 1997).

Κατά την προσομοίωση, κύλινδρος βάρους 11,2kg απελευθερώθηκε 30 φορές για κάθε δοκίμιο από ύψος 8,5εκ. ώστε να αναπαράγονται δυνάμεις αντίδρασης της τάξης μεγέθους περίπου 5 φορές το βάρος του σώματος σύμφωνα πάντα με τη βιβλιογραφία (McKay, 2005; Kollias, 2004). Για την επιβεβαίωση της καθετότητας κατά την κρούση, όλες οι προσπάθειες καταγράφηκαν με κάμερα Redlake MotionScope PCI 1000S (Redlake Imaging Corp., Morgan Hill, CA), με συχνότητα 1kfps.



Εικόνα 5. Στιγμιότυπα τη στιγμή της μέτρησης

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΙΟΚΙΝΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Πίνακας 6. Παράμετροι της κρούσης του σκέλους στα δοκίμια 28 ημερών
(μέσος όρος, $n=30$)

Παράμετρος		M	K30	K60	Y60
vGRF	(kN)	4.6	4.4	4.0	3.9
Tc	(msec)	14.4	16.5	19.0	16.7
Tf	(msec)	7.1	8.0	9.0	8.8

Πίνακας 7. Παράμετροι της κρούσης του σκέλους στα δοκίμια μεγάλης ηλικίας (1 έτος)
(μέσος όρος, $n=30$)

Παράμετρος		M	K30	K60	Y60
vGRF	(kN)	5.1	4.5	4.1	4.1
Tc	(msec)	15.4	16.4	17.1	18.2
Tf	(msec)	8.0	8.2	8.7	9.3

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα από την εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων των διαφόρων συνθέσεων σκυροδέματος που παρουσιάστηκαν διαπιστώνουμε ότι η προσθήκη ελαστικού προκαλεί σχετική μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών τους.

Όσον αφορά τις βιοκινητικές μετρήσεις, οι παράμετροι που εξετάστηκαν κατά την κρούση του σκέλους ήταν ο χρόνος επαφής του σκέλους στο δοκίμιο (TC) και ο χρόνος εμφάνισης της μέγιστης τιμής vGRF (TF). Από την παρατήρηση του πίνακα 6 (28 ημέρες από τη σκυροδέτηση) για τις ενδεικτικές τιμές vGRF για τις συνθέσεις M, K30, K60 και Y60, βλέπουμε τη διαδοχική μείωση της μέγιστης τιμής vGRF, αύξηση του TC και του TF. Από την παρατήρηση των τιμών του πίνακα 7 (1 έτος από τη σκυροδέτηση) βλέπουμε μικρή αύξηση της απόλυτης τιμής της κατακόρυφης αντίδρασης, του συνολικού χρόνου επαφής και του χρόνου εκδήλωσής της για τον μάρτυρα. Παράλληλα οι τιμές αυτές παραμένουν σε ίδια επίπεδα για τις συνθέσεις με ελαστικό, παρουσιάζοντας αναλογικά μείωση όπως και οι αρχικές μετρήσεις.

Σαν πρώτο συμπέρασμα λοιπόν, μπορούμε να πούμε πως η απορροφητικότητα των κατακόρυφων αντιδράσεων παραμένει στα ίδια επίπεδα 1 έτος μετά τη σκυροδέτηση. Επίσης, όπως και στις αρχικές μετρήσεις έτσι και τώρα, οι χρόνοι επαφής και εκδήλωσης της μέγιστης τιμής έχουν αυξηθεί σε σχέση με τον μάρτυρα. Άρα η χρήση του ελαστικού συνεχίζει να δρα -1 έτος μετά τη σκυροδέτηση- κατά τον ίδιο ωφέλιμο τρόπο, αυξάνοντας τον χρόνο επαφής και εκδήλωσης της μέγιστης δύναμης αντίδρασης του εδάφους.

Τέλος, η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών αυτών των συνθέσεων σκυροδέματος, αλλά και η ευρύτερη χρήση του σε δάπεδα αθλοπαιδιών, αποτελεί θέμα περαιτέρω έρευνας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή του ΤΕΦΑΑ-ΑΠΘ Ηρακλή Κόλλια, Διευθυντή του Εργαστηρίου Βιοκινητικής, για τη συμβολή του στην κατασκευή των οργάνων (προσομοιωτής σκέλους, μηχανισμός απελευθέρωσης) καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα του Τμήματος Επιστήμης Φυσικής Αγωγής και Αθλητισμού Βασίλη Πανουτσακόπουλο, για τη βοήθειά του στις μετρήσεις που έγιναν στο χώρο του Εργαστηρίου Βιοκινητικής του Τ.Ε.Φ.Α.Α.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Μπάτσιος Α., Παπαγιάννη Ι., Μαυρίδου Σ., Η. Κόλλιας, “Σκυρόδεμα με προσθήκη ανακυκλωμένου ελαστικού αυτοκινήτων για χρήση σε δάπεδα αθλοπαιδιών”, Πρακτικά 1^{ου} Συνεδρίου Δομικών Υλικών και Στοιχείων, Αθήνα, 21-23 Μαΐου 2008, 799-810.

Οικονόμου Ν., Μαυρίδου Σ., Καζακόπουλος Α., (2007), Μελέτη κρασπέδων σκυροδέματος τροποποιημένων με φθαρμένα ελαστικά αυτοκινήτων, 4^ο Διεθνές Συνέδριο Ασφαλικών Μιγμάτων και Οδοστρωμάτων, Θεσσαλονίκη, 19-20 Απριλίου.

Προεδρικό Διάταγμα ΥΠ’ ΑΡΙΘΜ.109 2004. Μέτρα και όροι για την εναλλακτική διαχείριση των μεταχειρισμένων ελαστικών των οχημάτων. Πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείρισή τους, 5 Μαρτίου 2004, Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Τεύχος Πρώτο

Hyoku, C., Shibukawa, K., Ae, M., Hashihara, Y., Yokoi, T., & Kawabata, A. (1984). Effect of dropping height on a buffer action in landing. *Proceedings for Japanese Society of Biomechanics* (pp. 203-207).

Kollias I., Panoutsakopoulos V., & Papaiakovou G., “Comparing jumping ability among athletes of various sports: vertical drop jumping from 60 cm”, *Journal of Strength and Conditioning Research*,18(3), 2004, 546-550

McKay H., Tsang G., Heinonen A., MacKelvie K., Sanderson D., Khan K., “Ground reaction forces associated with an effective elementary school based jumping intervention”, (2005)

Siddique Rafat, Naik R T. 2004. Properties of concrete containing scrap-tire rubber-an overview, *Waste Management* 24, (2004), 563-569

Batsios A., Panoutsakopoulos V., Mavridou S., Papayanni I., Kollias, I. (2008), “Mechanical characteristics of concrete mixtures with rubber from worn automobile tires proposed for usage as school-yard surfaces”, *Book of Abstracts of the 3rd Conference of the Hellenic Society of Biomechanics*, 37-38.

Διερεύνηση της προσθήκης οικοδομικών απόβλητων σε διαπερατά σκυροδέματα. Πρώτη προσέγγιση

Βαρδάκα Γ.

Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73 Ζωγράφου Αθήνα.

Λέξεις Κλειδιά: Διαπερατό Σκυρόδεμα, Οικοδομικά Απόβλητα, Αδρανή

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Το διαπερατό σκυρόδεμα είναι νέο προϊόν, που έχει αναπτυχθεί κυρίως στις ΗΠΑ ενώ ελάχιστες είναι οι αναφορές του στην Ευρώπη. Η ιδιαιτερότητα του έγκειται στο μεγάλο πορώδες του, που επιτρέπει στο νερό της βροχής να διέρχεται μέσα από τη μάζα του και με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η διαχείριση των όμβριων υδάτων, η αποφυγή πλημμυρών και ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδάτων. Για να επιτευχθεί το υψηλό πορώδες του συγκεκριμένου σκυροδέματος χρησιμοποιούνται κυρίως χονδρόκοκκα αδρανή με ελάχιστη συμμετοχή έως πλήρη απουσία των λεπτόκοκκων αδρανών. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μια θεωρητική προσέγγιση, στο πλαίσιο σχετικής διδακτορικής διατριβής, σχετικά με τη προσθήκη οικοδομικών αποβλήτων ως υποκαταστάτων των χονδρόκοκκων αδρανών.

Investigation of the addition of construction and demolition (c&d) wastes to pervious concrete. First approach

Vardaka G.

Laboratory of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineers NTUA, 9 Iroon Polytechniou str. 157 73 Athens.

Keywords: Pervious Concrete, Construction and Demolition (C&D) waste, Aggregates

ABSTRACT: The pervious concrete is a new product, developed mostly in the U.S. while there are few reports of it in Europe. Its particularity lies on the high porosity, which allows rain water to pass through the mass, thus ensuring the management of rainwater, the prevention of flooding and the enrichment of underground waters. To achieve the high porosity of this concrete there are used mainly coarse aggregates with a little participation of fine aggregate. This paper, in the frame of a relative PhD thesis, makes a theoretical approach to the addition of Construction and Demolition (C&D) wastes as substitutes for coarse aggregates.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συνεχής οικοδόμηση και η εξάπλωση του αστικού ιστού τις περισσότερες φορές αυθαίρετα, με «εξάντληση» των δικτύων υποδομής έχουν επιβαρύνει πολύ τη φύση. Πιο αναλυτικά, οι κατασκευές επηρεάζουν το περιβάλλον άμεσα ή έμμεσα κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου ζωής τους, καθώς επίσης και κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των υλικών και των συστατικών που τις απαρτίζουν, μέσω μιας σειράς ανθρώπινων δραστηριοτήτων και φυσικών διαδικασιών. Οι περιβαλλοντικές αυτές επιπτώσεις μπορεί να είναι τοπικές, όπως η παραγωγή απορριμμάτων, ή παγκόσμιες, όπως η κλιματική αλλαγή, και προκύπτουν από όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των κατασκευών: από την εξόρυξη και τη μεταφορά των πρώτων υλών, τη φάση της κατασκευής, αυτή της λειτουργίας και συντήρησης, και τέλος της κατεδάφισης. Καθώς οι επιπτώσεις από τον κατασκευαστικό κλάδο εμφανίζονται όλο και πιο έντονα, λόγω της αυξημένης οικοδομικής δραστηριότητας, οι έννοιες της αειφορίας και του οικολογικού σχεδιασμού εισέβαλαν επιτακτικά για να δημιουργήσουν ένα πιο υγιές μοντέλο κατασκευών και να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα περιβαλλοντικής επίπτωσης είναι η εφιαλτική μείωση της απορροφητικής ικανότητας του εδάφους λόγω της άναρχης δόμησης και της «τσιμεντοποίησης των πάντων», με τελικό αποτέλεσμα την ανεπαρκή αντιπλημμυρική προστασία, και την αδυναμία εξασφάλισης νερού ανθρώπινης κατανάλωσης. Η τάση που επικρατεί στις σύγχρονες ερευνητικές προσπάθειες έχει ως κεντρικό άξονα την προστασία του περιβάλλοντος και ταυτόχρονα την αντιμετώπιση των προβλημάτων που έχουν προκύψει από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Αυτό διαφαίνεται έντονα από την στροφή των ερευνών, ακόμα και της βιομηχανίας σκυροδέματος, στην ανάπτυξη συστημάτων ορθολογικότερης διαχείρισης των όμβριων υδάτων. Η αρχή των προσπαθειών αυτών εντοπίζεται την τελευταία δεκαετία στις ΗΠΑ με τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη του διαπερατού σκυροδέματος (perVIOUS concrete), ενός νέου τύπου προϊόντος το οποίο έχει μεγάλες πορώδες και επιτρέπει στο νερό της βροχής να διέρχεται μέσα από τη μάζα του. Ελάχιστες είναι οι αναφορές του συγκεκριμένου προϊόντος στην Ευρώπη.

Η βασική πρόκληση για την βιομηχανία σκυροδέματος είναι ότι καλείται να σχεδιάσει και να συνθέσει ένα κατ'εξοχή πορώδες υλικό που να είναι υδατοπερατό σε αντίθεση με το μέχρι τώρα βασικό θέσφατο του χώρου που στόχευε στην μείωση της υδατοπερατότητας μέσω του δραστικού περιορισμού των πόρων που διευκολύνουν την διόδο επιβλαβών για το σκυρόδεμα συστατικών τα οποία δυνητικά θα αποτελέσουν απαρχή διάβρωσης.

Το διαπερατό σκυρόδεμα συνίσταται από τσιμέντο Πόρτλαντ, χονδρόκοκκα αδρανή, λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα αδρανή, πρόσμικτα και νερό, η βέλτιστη αναλογία των οποίων διερευνάται ανάλογα με την φύση των αδρανών που χρησιμοποιούνται και τις επιμέρους απαιτήσεις εφαρμογής του σκυροδέματος. Τελικώς ο συνδυασμός αυτών των συστατικών οδηγεί στην παραγωγή ενός σκληρυμένου προϊόντος με πόρους που συνδέονται μεταξύ τους και κυμαίνονται σε μέγεθος από 2 έως 8 mm, γεγονός που επιτρέπει στο νερό να διαπερνά εύκολα το σκυρόδεμα. Οι κενοί χώροι κυμαίνονται μεταξύ 18 και 35% και οι τυπικές θλιπτικές αντοχές που επιτυγχάνονται είναι της τάξης του 2,8 έως 28 MPa. Το ποσοστό αποστράγγισης ενός πεζοδρομίου που έχει κατασκευασθεί με διαπερατό σκυρόδεμα ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος των αδρανών και την πυκνότητα του μείγματος, αλλά γενικά θα κυμαίνεται από 81 έως 730 L/min/m². (ACI Committee 2008) (Liv Haselbach and Robert Freeman 2006) (Dale P. Bentz, 2008).

Αν και, όπως είναι προφανές, το υψηλό πορώδες του διαπερατού σκυροδέματος, το οδηγεί αναπόφευκτα σε μειωμένες αντοχές, εν τούτοις βρίσκει μεγάλο όγκο ειδικών εφαρμογών όπως: σε χώρους στάθμευσης, στις υπαίθριες πλατείες των εμπορικών κέντρων ως άκαμπτα στρώματα αποστράγγισης, στα δάπεδα των θερμοκηπίων προκειμένου να παραμείνουν αυτά

στεγνά από στάσιμα νερά, σε ελαφροβαρείς δομικούς τοίχους με απαίτηση καλύτερης θερμομόνωσης, σε πεζοδρόμια, τοίχους, δάπεδα και όπου είναι επιθυμητή καλύτερη ηχομόνωση, ως βάση τόσο για τους αστικούς όσο και για τους επαρχιακούς δρόμους όπως επίσης στις εθνικές οδούς, και στα αεροδρόμια, ως επιφανειακό στρώμα χώρων στάθμευσης, γηπέδων τένις, δαπέδων ζωολογικών κήπων και στάβλων, σε αναχώματα γεφυρών, σε χώρους απόθεσης της λάσπης στις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, σε συστήματα αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας και για την επένδυση τοιχωμάτων φρεάτων γεωτρήσεων. Συνήθως το διαπερατό σκυρόδεμα, λόγω του υψηλού κινδύνου διάβρωσης του οπλισμού του χάλυβα μέσω των ανοιχτών πόρων στη δομή του χρησιμοποιείται σε όλες αυτές τις εφαρμογές που απαιτούν μη οπλισμένο σκυρόδεμα. (ACI Committee 2006, ACI Committee 2008).

ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ-ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ

Στην παρούσα εργασία, και στο πλαίσιο σχετικής διδακτορικής διατριβής, γίνεται μια πρώτη - βιβλιογραφική προσέγγιση στην προσθήκη οικοδομικών αποβλήτων ως υποκαταστάτων των χονδροκόκκων αδρανών στο διαπερατό σκυρόδεμα. Η χρήση των συγκεκριμένων θα βελτιώσει το περιβάλλον και θα αποτελεί μία ακόμα εναλλακτική λύση για τα 500 εκ. τόνους το χρόνο των κατασκευαστικών αποβλήτων της Ευρώπης, και όσον αφορά το μερίδιο της Ελλάδας, για τα 5 εκατομμύρια τόνους που παράγονται ετησίως (σύμφωνα με αναφορές του 2003). (Γκαλμπένης Χ.Τ. 2008)

Πλούσιο ερευνητικό έργο έχει σημειωθεί αναφορικά με την αξιοποίηση του ανακυκλωμένου σκυροδέματος ως αδρανούς υλικού για την παραγωγή νέου σκυροδέματος. Κοινό σημείο αναφοράς όλων αυτών των ερευνητικών προσπαθειών είναι ότι το σκυρόδεμα που περιέχει τα ανακυκλωμένα αδρανή μπορεί να αξιοποιηθεί σε δευτερεύουσες εφαρμογές καθόσον τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του εμφανίζονται υποδεέστερα συγκριτικά με ένα κοινώς παραγόμενο σκυρόδεμα. (Γκαλμπένης Χ.Τ. 2008)

Το χαρακτηριστικό που εμφανίζουν τα ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος ως προς τη συγκεκριμένη μορφή αξιοποίησής τους, είναι το υψηλό πορώδες τους το οποίο, για την παραγωγή ενός συμβατικού τύπου σκυροδέματος, αποτελεί μειονέκτημα, όμως για την παραγωγή του διαπερατού σκυροδέματος αποτελεί τη βασικότερη επιθυμητή ιδιότητα. Το υψηλό πορώδες των ανακυκλωμένων αδρανών υλικών, το οποίο κυμαίνεται στην περιοχή του 3-12%, τη στιγμή που το αντίστοιχο εύρος για τα φυσικά αδρανή υλικά είναι 0.5-1%. (Katz A.,2003) (Ryu J.S.,2002a) (Ryu J.S.,2002b) Ο λόγος αυτής της διαφοροποίησης αποδίδεται στην διεπιφάνεια που υπάρχει μεταξύ των ανακυκλωμένων αδρανών και της προσκολλημένης παλιάς τσιμεντοκονίας. Η τσιμεντόπαστα που παραμένει στην διεπιφάνεια των ανακυκλωμένων αδρανών δίνει αδύνατα σημεία στα ανακυκλωμένα σκυροδέματα, αφού αποτελείται από πολύ μικρούς πόρους και ρωγμές, οι οποίοι απορροφούν νερό. Στο υψηλό πορώδες των ανακυκλωμένων αδρανών συνεισφέρει και η ενανθράκωση που έχει υποστεί η τσιμεντόπαστα με την πάροδο του χρόνου. (Tam V.W.Y., Gao X.F. and Tam C.M.,2005)

Δεν υπάρχουν αναφορές για χρήση των οικοδομικών αποβλήτων σε διαπερατά σκυροδέματα, ούτε καν στην Αμερική που το συγκεκριμένο προϊόν παράγεται την τελευταία δεκαετία. Όλες οι έρευνες που έχουν γίνει αφορούν την παρασκευή συμβατικού τύπου σκυροδέματος με υποκατάσταση των φυσικών αδρανών με οικοδομικά απόβλητα. Βάσει αυτών των ερευνών αναφέρονται μειωμένες οι μηχανικές αντοχές (τόσο σε θλίψη όσο σε κάμψη και εφελκυσμό) των σκυροδεμάτων που περιέχουν οικοδομικά απόβλητα σε σχέση με τα κοινώς παραγόμενα σκυροδέματα, γεγονός που οφείλεται στο υψηλό πορώδες τους. (Sagoe – Crentsil K.K., Brown T. and Taylor A.H.,2001) Παρά ταύτα, σύμφωνα με το πρότυπο για το σκυρόδεμα (EN206-1) δεν πρέπει σε όλες τις περιπτώσεις η αντοχή να αποτελεί τον πρωταρχικό παράγοντα για την σύνθεση του σκυροδέματος αλλά η σχετική μελέτη είναι αναπόσπαστα συνδεδεμένη με το πεδίο εφαρμογής του κάθε τύπου σκυροδέματος. Πρέπει δηλαδή το σκυρόδεμα να συντίθεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποκτά τις επιθυμητές ιδιότητες ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής του.

Αναφορικά με τις δοκιμές ανθεκτικότητας των υπό εξέταση σκυροδεμάτων, πέραν της μεγαλύτερης υδατοπερατότητας / υδατοαπορροφητικότητας που επισημάνθηκε ανωτέρω, έχει αναφερθεί και το μεγαλύτερο βάθος ενανθράκωσης των σκυροδεμάτων που περιέχουν τα ανακυκλωμένα αδρανή υλικά (Sagoe – Crentsil K.K., Brown T. and Taylor A.H.,2001), (Otsuki N, Miyazato S. and Yodsudjai W.,2003). Αυτή η συμπεριφορά πιθανόν να αποδίδεται στην μεγαλύτερη διαπερατότητα των ανακυκλωμένων αδρανών υλικών εξαιτίας της παρουσίας της παλιάς τσιμεντοκονίας. Σχετικά με την αντίσταση σε ψύξη και απόψυξη, τα σκυροδέματα που περιέχουν τα ανακυκλωμένα αδρανή δείχνουν ικανοποιητική συμπεριφορά ως προς τη συγκεκριμένη ιδιότητα (Gocke A., Nagataki A., Saeki T. and Hisada M.,2004) (Zaharieva R., Francois B.-B. and Eric W.,2004).

Βάσει όλων όσων προαναφέρθηκαν τα οικοδομικά απόβλητα, δεν ενδείκνυνται για την παραγωγή συμβατικού τύπου σκυροδέματος, παρά μόνο στην περίπτωση που ο σκοπός χρήσης του θα είναι οι δευτερεύουσες εφαρμογές. Το γεγονός ότι αυξάνουν το πορώδες του παραγόμενου σκυροδέματος, κατ' επέκταση και την υδατοπερατότητά του τα καθιστούν μια εξαιρετική επιλογή για την παραγωγή διαπερατού σκυροδέματος, αφού εξασφαλίζουν στο μέγιστο τις επιθυμητές ιδιότητες του προϊόντος.

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής θα ελεγχθεί η επιτελεστικότητα των οικοδομικών αποβλήτων ως υποκατάστατα των φυσικών χονδρόκοκκων αδρανών για την παρασκευή διαπερατού σκυροδέματος. Συγκεκριμένα θα παραχθούν δοκίμια σκυροδέματος τα οποία θα περιέχουν σε καθορισμένες αναλογίες ανάμειξης τσιμέντο Portland τύπου CEM I και ανακυκλωμένο σκυρόδεμα συγκεκριμένης κοκκομετρίας. Τα δοκίμια αυτά θα ελεγχθούν όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες τους (πορώδες, υδατοαπορροφητικότητα και υδατοπερατότητα) και τις μηχανικές ιδιότητες τους (έλεγχος θλιπτικών και εφελκυστικών αντοχών καθώς και έλεγχος αντοχής των δοκιμίων σε συνθήκες ψύξης-απόψυξης -freeze and thaw-). Τέλος θα αξιολογηθούν όλα τα περιβαλλοντικά οφέλη που μπορούν να προκύψουν από την χρήση του συγκεκριμένου τύπου σκυροδέματος. Αυτό θα συμβεί με τη μέτρηση του ποσοστού ενανθράκωσης των δοκιμίων, την ικανότητα απορρόφησης του σκυροδέματος στον αέριο ρύπο CO₂, την κύρια αιτία του φαινομένου του θερμοκηπίου. Θα ελεγχθεί αν μπορούν τα παραγόμενα δοκίμια διαπερατού σκυροδέματος να δράσουν ως φίλτρο καθαρισμού των όμβριων υδάτων από τα οργανικά κατάλοιπα των αυτοκινήτων, που παραμένουν στην άσφαλτο και παρασέρνονται από το νερό της βροχής, καθώς και από τα θειικά και νιτρικά ιόντα, τα οποία βρίσκονται στην όξινη βροχή. Τέλος θα ελεγχθεί η επίδραση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα με σκοπό την αξιολόγηση της χρήσης του σε παραθαλάσσιες περιοχές.

Η τελική επιδίωξη των ερευνητικών προσπαθειών της διδακτορικής διατριβής είναι η παρασκευή του συγκεκριμένου τύπου σκυροδέματος, με αποδεκτές μηχανικές ιδιότητες για το πεδίο εφαρμογών του, το οποίο παράλληλα να λειτουργεί, αφενός ως μέσο αντιπλημμυρικής προστασίας καθόσον συντελεί στην σωστή διαχείριση των όμβριων υδάτων με την διευκόλυνση της διόδου του νερού της βροχής προς τον υδροφόρο ορίζοντα, αφετέρου ως φίλτρο που θα συγκρατεί τους ρύπους που παρασέρνουν τα όμβρια ύδατα και έτσι θα προστατεύει τα υπόγεια ύδατα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Γκαλμπένης Χ.Τ. 2008 Διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης οικοδομικών απορριμμάτων στην παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου, *Διδακτορική Διατριβή*, ΕΜΠ
ACI Committee, 2006, 522R-06: Pervious Concrete, *Technical Documents*.

- ACI Committee, 2008, 522.1-08: Specification for Pervious Concrete Pavement, *Technical Documents*.
- Dale P. Bentz, 2008, Virtual Pervious Concrete: Microstructure, Percolation, and Permeability, *Materials Journal*, Volume 105, Issue 3, pages 297-301.
- Gocke A., Nagataki A., Saeki T. and Hisada M.,2004, Freezing and thawing resistance of air – entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 799-806.
- Katz A.,2003, Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 703-711.
- Liv Haselbach and Robert Freeman, 2006, Vertical Porosity Distributions in Pervious Concrete Pavement», *Materials Journal*, Volume 103, Issue 6, pages 452-458.
- Otsuki N, Miyazato S. and Yodsudjai W.,2003, Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete, *ASCE J. Mater. Civil Eng.*
- Ryu J.S.,2002a, Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate, *Materials Science Letter*, Vol. 21, pp. 1565-1567
- Ryu J.S.,2002b, An experimental study on the effect of recycled aggregate concrete properties, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 54, pp. 7-12.
- Sagoe – Crentsil K.K., Brown T. and Taylor A.H.,2001, Performance of concrete made with commercially produced recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 707-712.
- Tam V.W.Y., Gao X.F. and Tam C.M.,2005, Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two – stage mixing approach, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 1195-1203.
- Zaharieva R., Francois B.-B. and Eric W.,2004, Frost resistance of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 1277-1932.

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΚΑΤΕΡΓΑΣΤΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΣΚΛΗΡΟΥ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ

X. Γουλόπουλος

Τελειόφοιτος Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ.

M. Τζιθριώτης

Τελειόφοιτος Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πρόκειται για την περιγραφή της προσπάθειας παρασκευής κατάλληλου μίγματος ιπτάμενης τέφρας σε διάφορα ποσοστά και εδαφικού υλικού, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στη κατασκευή φράγματος σκληρού επιχώματος. Επίσης αναφέρονται ονομαστικά όλες οι εργαστηριακές δοκιμές που θα πραγματοποιηθούν καθώς και τα έως τώρα αποτελέσματα αυτών.

Λέξεις κλειδιά : ιπτάμενη τέφρα, φράγματα σκληρού επιχώματος, εργαστηριακές δοκιμές εδάφους

ABSTRACT

It is about the description of the effort to produce a proper mixture of different percentages of fly ash with soil, which will be used for the construction of Hardfill dams. We also describe all the laboratory tests which will be carried out and all the results we have so far.

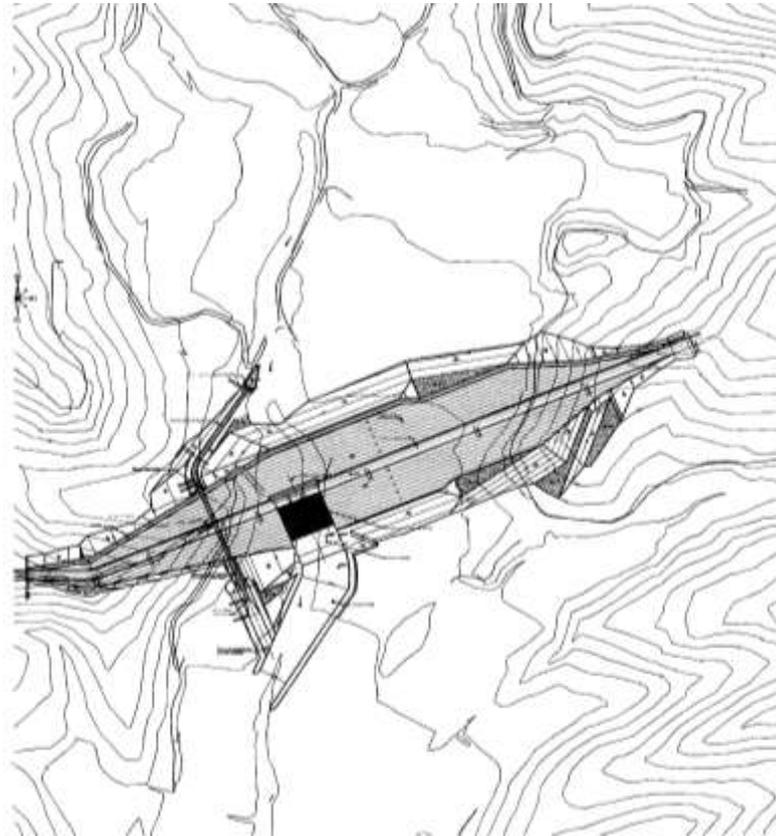
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατασκευή φραγμάτων από «σκληρό επίχωμα» (hardfill dams), αποτελεί μια σχετικά νέα τεχνολογία, η οποία τα τελευταία χρόνια γνωρίζει ιδιαίτερη ανάπτυξη. Συνήθως το υλικό κατασκευής είναι ύφυγρο μείγμα αποτελούμενο από αδρανή, μικρή ποσότητα τσιμέντου (της τάξης των 60 kg/m^3) και ελάχιστη ποσότητα νερού. Αφορμή για την πραγματοποίηση της εν λόγω διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η εκτενής αναφορά των ομιλητών στην συγκεκριμένη τεχνολογία στο πλαίσιο του 1^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Μεγάλων Φραγμάτων τον περασμένο Νοέμβριο στη Λάρισα, την οργάνωση του οποίου ανέλαβε το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος και το Περιφερειακό Τμήμα Κεντρικής & Δυτικής Θεσσαλίας.

Κατά τη διάρκεια των εργασιών του συνεδρίου ενημερωθήκαμε ότι είχε ήδη δρομολογηθεί η ανέγερση παρόμοιου φράγματος στην περιοχή κοντά στο χωριό Άσπος του Νομού Άρτας. Μελετητής του έργου είναι ο κ. Ν. Μουτάφης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός και Λέκτορας του Ε.Μ.Π. Επιπροσθέτως υπήρξε η ιδέα από την κα. Ι. Παπαγιάννη, καθηγήτρια στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ., να γίνει χρήση ιπτάμενης τέφρας προκειμένου να παραχθεί κατάλληλο μίγμα, που θα αποτελέσει και το υλικό κατασκευής του φράγματος. Αυτό λοιπόν είναι και το ακριβές θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφού μελετάται η σταθεροποίηση εδαφικού υλικού με διάφορα ποσοστά ιπτάμενης τέφρας χωρίς την χρήση τσιμέντου.

Μοναδική πηγή αδρανών για το μίγμα θα αποτελέσουν οι φυσικές αποθέσεις της περιοχής κατάντη του έργου. Για αυτό το λόγο αποφασίστηκε η δειγματοληψία εδαφικού υλικού από τρία διαφορετικά σημεία της ευρύτερης περιοχής ώστε να διαπιστωθεί η ποιότητα και τα

χαρακτηριστικά του σε κάθε περίπτωση. Παρακάτω παρατίθεται το τοπογραφικό σχέδιο της περιοχής, όπου φαίνεται και ο άξονας του φράγματος. (Σχήμα 1)



Σχήμα 1. Τοπογραφία περιοχής και άξονας φράγματος.

ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ

Η ιπτάμενη τέφρα αποτελεί ως γνωστό το κυριότερο στερεό κατάλοιπο της καύσης των στερεών ανθράκων που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία παραγωγής ενέργειας. Ο λιγνίτης (ο ελληνικός στερεός άνθρακας) αποτελεί την κυριότερη πρώτη ύλη για το συγκεκριμένο σκοπό στη χώρα μας. Από την καύση του προκύπτουν ως υποπροϊόντα σημαντικές ποσότητες τέφρας. Οι ποσότητες αυτές εκτιμώνται σε ετήσια βάση γύρω στους 11,5 – 12 εκατομμύρια τόνους και προέρχεται κυρίως από τους σταθμούς της Δ.Ε.Η. σε Κοζάνη, Πτολεμαΐδα και Μεγαλόπολη. Από το ποσοστό αυτό αξιοποιείται κυρίως στη βιομηχανία παραγωγής τσιμέντου μόνο το 10%, δηλαδή περίπου 1 – 1,1 εκατομμύρια τόνοι.

Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 450 για τα κατασκευαστικά υλικά, η ιπτάμενη τέφρα ορίζεται ως το λεπτόκοκκο υλικό αποτελούμενο κυρίως από σφαιρικά, υαλώδη σωματίδια διαμέτρου 0,5 – 100 μm. Λαμβάνεται από τα ηλεκτροστατικά ή μηχανικά φίλτρα, τα οποία την δεσμεύουν από τα απαέρια των λεβήτων καύσης κονιορτοποιημένου άνθρακα.

Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 διαχωρίζει τις τέφρες σε δύο κατηγορίες :

- Στις **πυριτικές (V)**, οι οποίες περιέχουν λιγότερο από 10% CaO
- Στις **ασβεστολιθικές (W)**, οι οποίες περιέχουν 10 – 35% CaO

Οι τέφρες της πρώτης κατηγορίας παρουσιάζουν ποζολανικές ιδιότητες ενώ της δεύτερης κατηγορίας ποζολανικές ή/και υδραυλικές ιδιότητες.

Σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο ASTM C-618, οι τέφρες διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Στις τέφρες τύπου **N**, οι οποίες περιλαμβάνουν ακατέργαστες ποζολάνες με τουλάχιστον 70% SiO_2 (διοξείδιο του πυριτίου), Al_2O_3 (οξείδιο του αργιλίου) και Fe_2O_3 (οξείδιο του σιδήρου).
- Στις τέφρες τύπου **F** που παράγονται από την καύση ανθρακίτη ή βιταμινούχου κάρβουνου με τουλάχιστον 70% SiO_2 , Al_2O_3 και Fe_2O_3 ,
- Στις τέφρες τύπου **C**, που είναι εκείνες που παράγονται από την καύση λιγνίτη και υπό-βιταμινούχου κάρβουνου και περιέχουν τουλάχιστον 50 - 70% SiO_2 , Al_2O_3 και Fe_2O_3 .

Οι τέφρες τύπου F περιέχουν συνήθως λιγότερο από 5% CaO , ενώ οι τέφρες τύπου C αντίστοιχα 10 – 35% CaO . Οι ελληνικές ιπτάμενες τέφρες ανήκουν στις ασβεστολιθικές σύμφωνα με το EN 197-1 και στην κατηγορία C σύμφωνα με το ASTM C-618 λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε CaO .

Συγκεκριμένα η τέφρα που θα χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας προέρχεται από τον ατμοηλεκτρικό σταθμό της Δ.Ε.Η. στην Πτολεμαίδα. Πρόκειται για ακατέργαστη τέφρα, η οποία με βάση της Εθνικές Προδιαγραφές κατατάσσεται στην κατηγορία ΕΙΤ 1 (ακατέργαστες τέφρες). Σε γενικές γραμμές το ποσοστό CaO αναμένεται να ξεπεράσει το 20%, ενώ η λεπτότητά της θα κυμαίνεται από 45 – 55% συγκρατούμενο στο κόσκινο των 45 μm . Η ακριβής χημική ανάλυση της τέφρας θα πραγματοποιηθεί εργαστηριακά.

Τα οφέλη από τη χρήση της τέφρας ως συνδετικής κονίας στο μίγμα είναι:

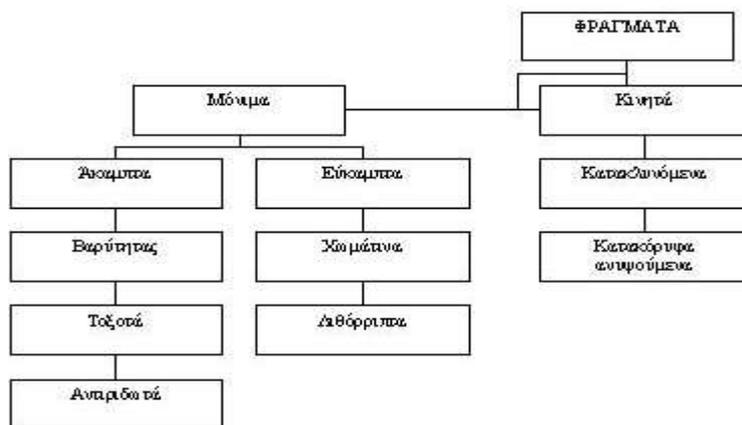
- **Οικονομικά**, λόγω της χαμηλής τιμής της σε σχέση με το τσιμέντο
- **Οικολογικά**, αφού ένα μεγάλο ποσοστό των επιβλαβών συστατικών της π.χ. βαρέα μέταλλα) που θα κατέληγαν στο περιβάλλον με την υγειονομική ταφή της, δεσμεύονται μέσα στα προϊόντα ενυδάτωσης του μίγματος.
- **Τεχνικά**, αφού το μίγμα θα διαθέτει την απαιτούμενη αντοχή περιορίζοντας παράλληλα την τάση του για ρηγμάτωση.

Η τέφρα λόγω του μικρού ειδικού βάρους της μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή επιχωμάτων πάνω σε συμπιεστά εδάφη αφού επιφέρει σημαντική μείωση των φορτίων που μεταβιβάζονται στην επιφάνεια έδρασής τους .

ΦΡΑΓΜΑΤΑ

Τα φράγματα είναι από τα πρώτα τεχνολογικά επιτεύγματα του ανθρώπου, αφού οι πρώτες κατασκευές ανάγονται στα προϊστορικά χρόνια. Το παλαιότερο φράγμα που αναφέρεται στην ιστορία είναι αυτό από την 4^η χιλιετία π.χ. στην Γιάβα της Ιορδανίας για συλλογή πόσιμου νερού.

Πρόκειται για έργα δαπανηρά, τα οποία όμως παρουσιάζουν μεγάλα οικονομικά οφέλη. Από κατασκευαστικής πλευράς κατατάσσονται σύμφωνα με το ακόλουθο διάγραμμα:



Η κατασκευή ενός φράγματος, ανάλογα με το σκοπό που θα εξυπηρετήσει, μελετάται και βρίσκεται τόσο ο καλύτερος τύπος φράγματος όσο και οι απαιτούμενες διαστάσεις του. Κάθε φράγμα έχει τη δική του λειτουργία, τους δικούς του φυσικούς παράγοντες και το δικό του φυσικό περιβάλλον, που παίζει σπουδαίο ρόλο για τη θεμελίωση του.

Τα σημαντικότερα σύγχρονα φράγματα στην Ελλάδα και το εξωτερικό, σχεδιάζονται κυρίως με στόχο την εγκατάσταση υδροηλεκτρικού σταθμού και τα μικρότερα για τη συλλογή πόσιμου νερού, τις αρδεύσεις την αποτροπή πλημμύρων από χείμαρρους κ.τ.λ. Τα γνωστότερα ελληνικά φράγματα είναι αυτά που σχετίζονται με :

- **Υδροηλεκτρικά έργα:** Λούρου (1954), Λάδωνα (1955), Ταυρωπού (1959), Κρεμαστόν (1965), Καστρακίου (1969), Πολυφύτου (1974), Πουρναρίου (1981), Στράτου (1988), κ.α.
- **Συλλογή πόσιμου νερού:** Μαραθώνα (1931), Μόρνου (1979), κ.α.
- **Αρδεύσεις:** Λευκόγεια Δράμας (1972), Απολακκιάς Ρόδου (1978), Λειβαδιού Αστυπάλαιας (1978), Χαβρία Χαλκιδικής (1982), κ.α.

Ένας από τους τύπους φραγμάτων που παρουσιάζει κατασκευαστικά και οικονομικά πλεονεκτήματα είναι τα φράγματα τύπου 'αναχώματος' (embankment dam). Ως τέτοια προσδιορίζονται τα φράγματα που κατασκευάζονται από φυσικά υλικά τα οποία προήρθαν από εκσκαφή σε γειτονική περιοχή του εργοταξίου. Οι δυο βασικές κατηγορίες αυτού του τύπου φράγματος είναι : α) τα χωμάτινα β) τα λιθόρριπα.

Τα βασικά τους πλεονεκτήματα σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους φραγμάτων είναι τα εξής :

- Η καταλληλότητα τους να τοποθετούνται σε μεγάλες κοιλάδες και σε σχετικά απότομα φαράγγια.
- Η προσαρμοστικότητα τους σε ευρύ φάσμα συνθηκών θεμελίωσης.
- Η χρήση φυσικών υλικών, ελαχιστοποιώντας την ανάγκη για μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων επεξεργασμένου υλικού ή τσιμέντου στο εργοτάξιο.
- Η διαδικασία κατασκευής είναι μηχανοποιημένη και αποτελεσματικά συνεχής.
- Το κόστος ανά μονάδα του υλικού παρουσιάζει μικρότερη αύξηση σε σχέση με αυτό του τσιμέντου .
- Όταν κατασκευαστεί κατάλληλα μπορεί να παραλάβει ένα μεγάλο βαθμό παραμόρφωσης χωρίς τον κίνδυνο ρηγμάτωσης και πιθανής αστοχίας .

*ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ RCC ΣΥΜΠΛΗΡΩΣΗΣ
(FACE SYMMETRICAL HARDFILL DAMS - FSHD)*

Όταν οι συνθήκες θεμελίωσης δεν είναι ιδεώδεις ή τα σεισμικά φορτία είναι πολύ μεγάλα, το σύνηθες τριγωνικό σχήμα των φραγμάτων βαρύτητας με κατακόρυφο ανάντη μέτωπο δεν είναι το ιδανικό. Σε τέτοιες συνθήκες μια εναλλακτική λύση είναι η συμμετρική διατομή φράγματος RCC με όμοια ανάντη και κατόντη μορφή, στην οποία η περιεκτικότητα σε συγκολλητικά υλικά (cementitious materials) μπορεί να επιλεγεί ανάλογα με τους διαθέσιμους τύπους αδρανών, οι δε απαιτούμενες μέγιστες αντοχές και μέτρο ελαστικότητας του σώματος του φράγματος ανάλογα με τις συνθήκες θεμελίωσης.

Η πρώτη πρόταση συμμετρικής διατομής σε φράγμα από RCC έγινε το 1970. Η σκέψη ήταν να μελετηθεί ένα τύπος διατομής ανάμεσα στην διατομή φράγματος βαρύτητας και στην διατομή κλαστικού φράγματος, με χρήση υλικών μεταξύ σκυροδέματος και επίχωσης.

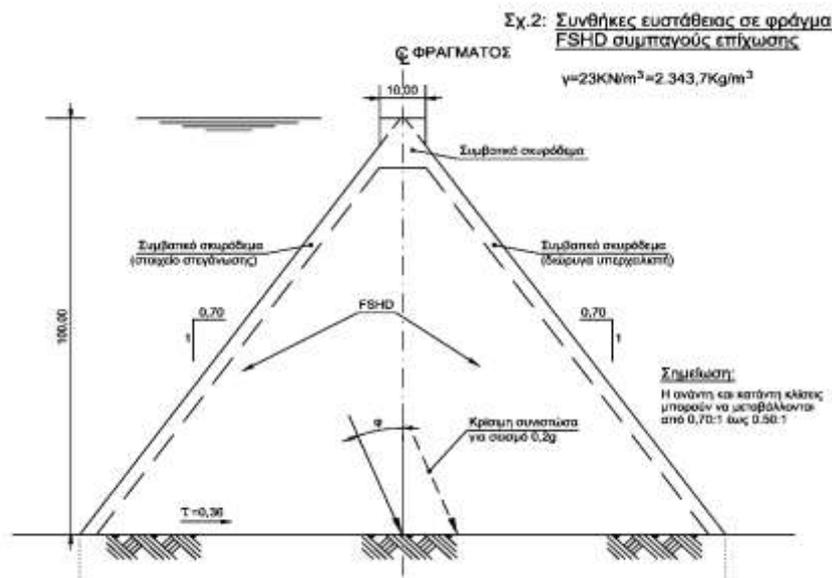
Η αύξηση του όγκου του σώματος του φράγματος δεν επηρεάζει την οικονομικότητα της κατασκευής καθώς η τιμή μονάδας του FSHD είναι σημαντικά κατώτερη από εκείνη της κλαστικής διατομής βαρύτητας του RCC, λόγω των χαλαρότερων προδιαγραφών.

Τα πλεονεκτήματα του τύπου αυτού του φράγματος έναντι του κλαστικού τύπου φράγματος RCC είναι τα ακόλουθα:

- 1) Η ανάντη στρώση του FSHD που απαιτείται για στεγανότητα είναι αναπόσπαστο μέρος του φράγματος. Αυτή η στρώση τοποθετείται επάνω στη συμπαγή επίχωση μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής της. Η κατασκευή της μπορεί να γίνει με την ίδια τεχνολογία που χρησιμοποιείται για CFRD (concrete face rockfill dam).
- 2) Δεν απαιτούνται αρμοί συστολής λόγω της μικρής περιεκτικότητας σε τσιμέντο. Για το FSHD αρκεί μια ποσότητα τσιμέντου 50 Kg/m^3 .
- 3) Δεν απαιτείται ξυλότυπος εφ' όσον οι κλίσεις των ανάντη και κατόντη όψεων δεν υπερβαίνουν το 0,7 προς 1 (H:V).
- 4) Δεν απαιτείται δαπανηρή επεξεργασία των επιφανειών των στρώσεων, ακόμη και στην περίπτωση που το τσιμέντο έχει πήξει (cold joints).
- 5) Μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή, αλλοβιακά υλικά με μεγάλο μέγεθος μέγιστου κόκκου ή θραυστό υλικό από μαλακό βράχο με ελάχιστη επεξεργασία διαχωρισμού, καθώς η αποδεκτή κοκκομετρική περιοχή είναι μεγάλη. Ακόμη και άργιλοι με χαμηλή πλαστικότητα (silts) μπορούν να γίνουν αποδεκτές.
- 6) Η μικρή περιεκτικότητα σε τσιμέντο είναι το βασικό χαρακτηριστικό των φραγμάτων από συμπαγή επίχωση. Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι με περιεκτικότητα 50 kg/m^3 σε τσιμέντο, μπορούν να επιτευχθούν αντοχές 5 Mpa σε 90 ημέρες.
- 7) Το συμμετρικό τριγωνικό σχήμα έχει το μεγάλο πλεονέκτημα, ότι οι εσωτερικές τάσεις και τα φορτία στη θεμελίωση δεν μεταβάλλονται σημαντικά με τη μεταβολή των συνθηκών φόρτισης (πλήρης ή κενός ταμιευτήρας).
- 8) Σεισμική επιτάχυνση 0,2g δεν προκαλεί τάσεις εφελκυσμού. Συμβατικό φράγμα βαρύτητας με κατακόρυφη ανάντη όψη, σε τέτοια περίπτωση δυναμικής φόρτισης θα ανέπτυξε σημαντικές εφελκυστικές τάσεις στην ανάντη όψη.
- 9) Οι θλιπτικές τάσεις σε ένα φράγμα τύπου FSHD είναι σημαντικά μειωμένες σε σύγκριση με εκείνες ενός φράγματος συμβατικής διατομής βαρύτητας (ανάντη όψη 1,4 Mpa αντί 2,4 Mpa).

- 10) Οι παραπάνω τιμές προέκυψαν από τη μελέτη δύο τύπων διατομών, μιας με κατακόρυφη ανάντη όψη και συμβατικό RCC και άλλης με συμμετρικές ανάντη και κατάντη όψεις, δηλαδή τύπου FSHD. Το ύψος των διατομών είναι περίπου 100 m. Η κατάντη κλίση του συμβατικού RCC ήταν 0,8 προς 1. Στην περίπτωση του FSHD οι δύο κλίσεις ανάντη και κατάντη ήταν 0,7 προς 1. Η μέση διατμητική τάση μειώθηκε στο FSHD από 0,63 MPa σε 0,36 MPa. Η γωνία 'φ' για διάφορες παραδοχές ανώσεως κυμάνθηκε από 14° έως 22° αντί 27° έως 42° στο συμβατικό RCC .
- 11) Η κατακόρυφη φόρτιση στην επιφάνεια θεμελίωσης είναι πρακτικά ομοιόμορφη και αμετάβλητη για όλες τις στάθμες του ταμειυτήρα. Αυτή είναι μία βασική διαφορά από την συμβατική διατομή βαρύτητας και πλεονεκτική για θεμελιώσεις σε βράχο χαμηλού μέτρου ελαστικότητας.
- 12) Επομένως όπου η επιφάνεια θεμελίωσης αποτελείται από μαλακό βράχο, ο τύπος διατομής FSHD επιτρέπει την κατασκευή ενός φράγματος βαρύτητας, ενώ ένα φράγμα με συμβατική διατομή δεν θα ήταν κατάλληλο.
- 13) Στον τύπο FSHD η στεγανότητα εξασφαλίζεται από την ανάντη πλάκα και όσο περισσότερο πορώδες είναι το σώμα του φράγματος τόσο καλύτερη είναι και η συμπεριφορά του. Η μέθοδος κατασκευής άλλωστε συναρτάται με τη σχετική υδατοπερατότητα. Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και ο διαχωρισμός των αδρανών (segregation) είναι επιτρεπτός.
- 14) Η παραμορφωσιμότητα του σκυροδέματος (RCC) μπορεί να είναι χαμηλότερη από εκείνη της βραχομάζας επί της οποίας εδράζεται. Χαμηλή ακαμψία (stiffness) των υλικών του FSHD είναι πλεονεκτικότερη στη περίπτωση μη ικανοποιητικών συνθηκών θεμελίωσης. Το φράγμα προσαρμόζεται στις συνθήκες θεμελίωσης εύκολα.
- 15) Οι θερμικές τάσεις στο FSHD είναι μικρότερες από ότι στα συμβατικά φράγματα RCC και έτσι δεν απαιτούνται αρμοί συστολής. Χαμηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο σημαίνει μικρή άνοδο θερμοκρασίας.
- 16) Μια ελάχιστη θλιπτική αντοχή είναι η μόνη απαίτηση για το υλικό συμπαγούς επίχωσης.
- 17) Η τοποθέτηση της συμπαγούς επίχωσης RCC μπορεί να γίνει κατά παρόμοιο τρόπο με το κλασικό RCC. Το πάχος των στρώσεων είναι συνήθως 300mm μετά τη συμπύκνωση.

Παρακάτω δίνεται μια τομή ενός συμμετρικού φράγματος σκληρού επιχώματος :



Σύμφωνα με την προκαταρκτική μελέτη για την κατασκευή του φράγματος σκληρού επιχώματος (Hardfill dam), ορίζεται ως άνω όριο κόκκων εδαφικού υλικού τα 76mm.

Οι φυσικές αποθέσεις της ευρύτερης περιοχής κατάντη του έργου θα αποτελέσουν την πηγή αδρανών. Η μόνη επεξεργασία που είναι δυνατό να υποστεί το υλικό είναι το πλύσιμο. Συνολικά υπολογίζεται ότι για την κατασκευή του φράγματος θα χρειαστούν περίπου 400.000 m³ αδρανών. Η έδραση του φράγματος θα γίνει από την μια άκρη σε ψαμμίτη ενώ από την άλλη σε φλύσχη.

Πρόκειται για ένα σχετικά μικρό φράγμα, το οποίο κατασκευάζεται κυρίως για τις αρδευτικές ανάγκες της περιοχής. Το τελικό ύψος του θα κυμαίνεται μεταξύ των 55 – 60m ενώ το ειδικό του βάρος θα είναι περίπου 2,2 gr/cm³. Η επιθυμητή αντοχή του μίγματος τέφρας και αδρανών υπολογίζεται στα 4 - 5 MPa. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η μέγιστη κατακόρυφη τάση ενός φράγματος ύψους 100m δεν ξεπερνά το 1,5 MPa είναι εύκολα αντιληπτό ότι μια τέτοια τιμή μονοαξονικής θλίψης εξασφαλίζει συντελεστή ασφαλείας κοντά στο 3.

Το υλικό θα τοποθετηθεί σε στρώσεις των 0,3 m, χωρίς διακοπή εργασιών και αφού πραγματοποιηθεί συμπίκνωση με τα κατάλληλα τεχνικά μέσα. Σημαντική παράμετρος, η οποία θα εξετασθεί διεξοδικά, κατά τους εργαστηριακούς ελέγχους, είναι η διαπερατότητα του μίγματος αφού δεν προβλέπεται η κατασκευή ανάντη πλάκας σκυροδέματος μικρής διαπερατότητας. Αντί αυτής θα τοποθετηθεί γεωμεμβράνη μέτριας διαπερατότητας, της οποίας το τμήμα που θα βρίσκεται πάνω από το νερό θα καλυφθεί με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα λόγω της ευπάθειάς της.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ

Αρχικά θα μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού ως σημείο αναφοράς ώστε μετά την προσθήκη Ι.Τ. να σημειώσουμε τη μεταβολή τους. Οι εξής εργαστηριακοί έλεγχοι θα διεξαχθούν :

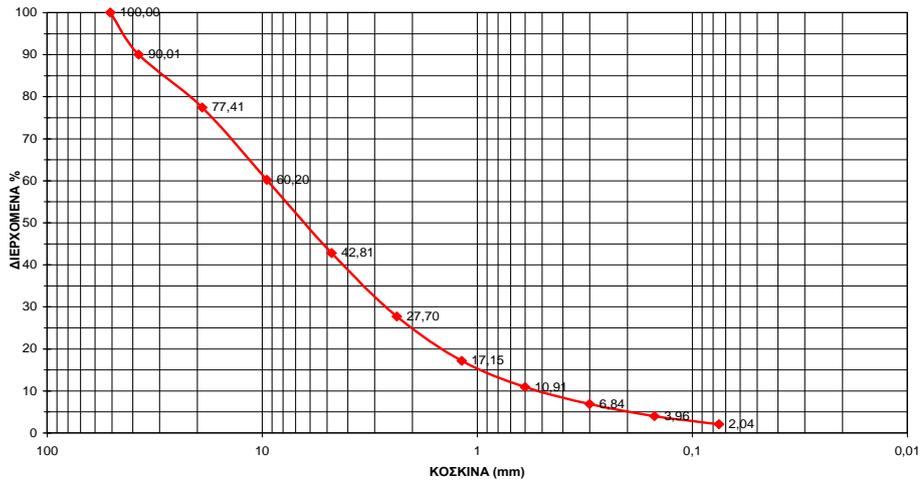
1. κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα (ASTM D421-D422)
2. κοκκομετρική ανάλυση με υδρόμετρο (ASTM D421-D422)
3. όρια Atteberg (ASTM D4318)
4. δοκιμή CBR (ASTM D1883-87)
5. Modified Proctor (ASTM D698-78)
6. χημική ανάλυση
7. ποσοστό οργανικών
8. αντοχή σε (ανεμπόδιστη) θλίψη (ASTM D2166-85)
9. αντοχή σε εφελκυσμό (ASTM D3080-90)
10. πυκνότητα εδάφους

Επίσης θα διεξαχθούν και εργαστηριακοί έλεγχοι για τη τέφρα ώστε να γίνει η κατάταξη της. Για την τέφρα θα γίνουν οι εξής έλεγχοι :

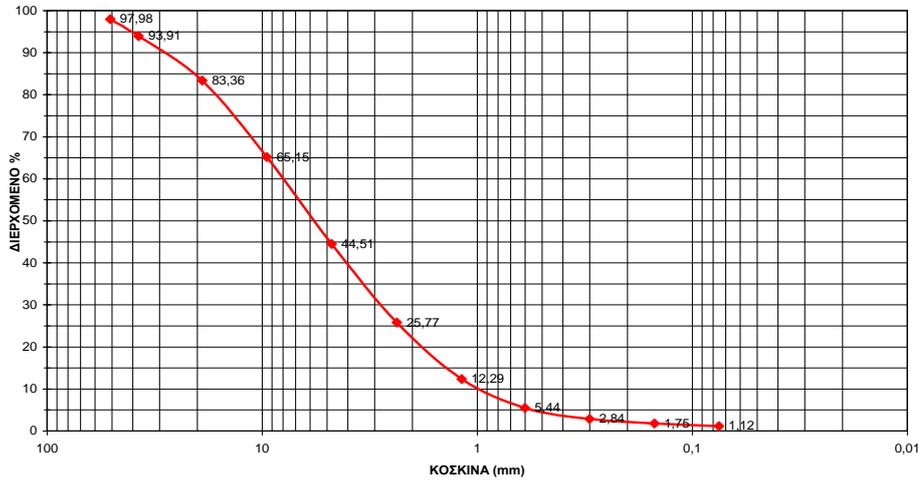
1. χημική σύσταση
2. λεπτότητα
3. δραστικότητα τέφρας με pozzalanicity index

Μέχρι σήμερα έχει ολοκληρωθεί μόνο η κοκκομετρική ανάλυση του δείγματος. Μετά από τετραμερισμό τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε φούρνο στους 105 C° για 24 ώρες και τοποθετήθηκαν στα κόσκινα για κοκκομετρική ανάλυση. Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής : 3in, 2in, 1κ 1/2in, 3/4in, 3/8in, N_o 4, N_o 8, N_o 16, N_o 30, N_o 50, N_o 100, N_o 200(ASTM).Οι κοκκομετρικές καμπύλες των τριών εκσκαφών παρατίθενται παρακάτω:

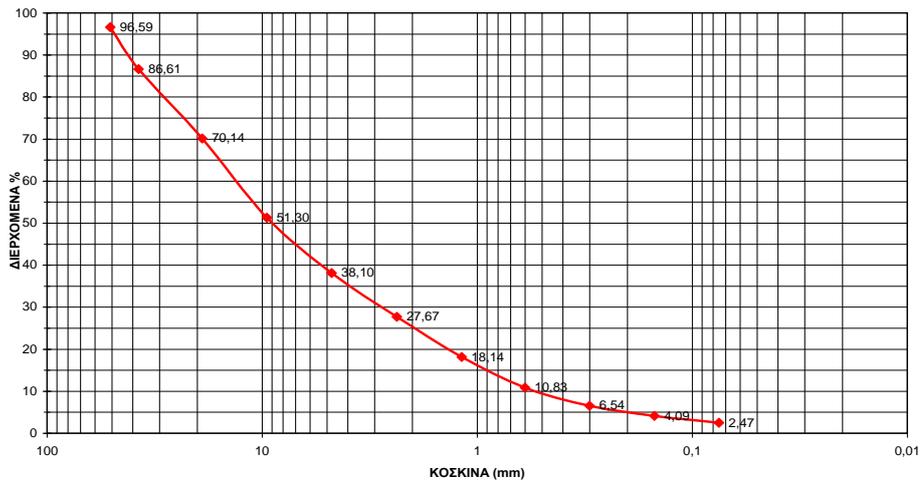
ΔΕΙΓΜΑ 1



ΔΕΙΓΜΑ 5-6



ΔΕΙΓΜΑ 7-8



ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- 1) Ν. Μουτάφης, Μελέτη φράγματος σκληρού επιχώματος περιοχής Άσσου, Ν. Άρτας
- 2) Πρακτικά 1^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Μεγάλων Φραγμάτων. ΤΕΕ & Περιφερειακό Τμήμα Κεντρικής και Δυτικής Θεσσαλίας, Λάρισα, 13-15 Νοεμβρίου 2008.
- 3) Πρακτικά ημερίδας για τη «Βελτίωση Εδάφους Με Χημικά Πρόσθετα» στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ «Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη», Θεσσαλονίκη, 10 Οκτωβρίου 2000.
- 4) Ιστοσελίδα, www.flyash.gr
- 5) Ιστοσελίδα, www.enipar.org
- 6) Ιστοσελίδα, www.ecotec.gr
- 7) K.H.Head, Manual of soil laboratory testing
- 8) Joseph E. Bowles, Engineering of soils and their measurement
- 9) P.Novak, A.I.B Moffat, Hydraulic structures
- 10) Ι.Στεφανάκος, Συμμετρικά φράγματα RCC συμπαγούς επίχωσης
- 11) J. Linard The safest dam

Μελέτη μιγμάτων ακατέργαστης τέφρας και εδαφικών υλικών

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Α.Π.Θ.

Διπλωματική εργασία σε εξέλιξη

Σ.Βαντσιώτης, Ε.Καλομοίρη, Κ.Παπαθανασίου

Τελειόφοιτοι φοιτητές Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.

Λέξεις κλειδιά : ασβεστούχος ιπτάμενη τέφρα (ακατέργαστη), τσιμέντο, υδράσβεστος, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε κάμψη, δείκτης δραστηριότητας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη εδαφικών μιγμάτων με ακατέργαστη τέφρα και συγκεκριμένα δύο ποιοτήτων ιπτάμενης τέφρας που προέρχονται από τα Α/Σ Αμυνταίου και Καρδιάς. Σε πρώτο στάδιο έγινε η αξιολόγηση των τεφρών ως συνδετικών κονιών και στη συνέχεια θα μελετηθούν μίγματα με δύο τύπους εδάφους, ένα αμμώδες και ένα αργιλώδες, προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο ποσοστό προσθήκης τέφρας κάθε τύπου και η επιρροή των χαρακτηριστικών των τεφρών στη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων του εδάφους. Θα γίνουν μετρήσεις της μέγιστης πυκνότητας Proctor (EN 13286-2), του CBR (ASTM E105-86) και της σταθερότητας όγκου των συμπιεσμένων δοκιμίων. Περαιτέρω θα μετρηθεί η διαβρωσιμότητα των σταθεροποιημένων εδαφικών υλικών με τέφρα.

A study on the mixture of fly ash and ground materials

S.Vantsiotis, E.Kalomoiri, K.Papathanasiou

Laboratory of Building Materials, A.U.TH

Keywords: high calcium fly ash, cement, lime, compressive strength, flexural strength, pozzolanicity index

ABSTRACT: The scope of this paper is to study soil mixtures with unprocessed fly ash and, in particular, two different quality fly ashes coming from the Amyntaio and Kardia Power Stations. Firstly, valorisation of the fly ashes as binders was carried out and at the next stage, mixtures of the fly ashes with two types of soil, sandy and argillaceous, will be made in order to find the optimum percentage of fly ash addition of each type and the influence of the fly ash properties at the characteristics of each soil type. Proctor and CBR tests will be carried out according to EN 13286-2 and ASTM E105-86, respectively, as well as the volume stability of the produced specimens will be measured. Furthermore, the resistance of the fly ash stabilized soils to corrosion will be also measured,

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα παραπροϊόν που παράγεται από τα λιγνιτικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος της ΔΕΗ. Παρά τις μεγάλες ποσότητες που παράγονται σε

ετησία βάση μόνο ένα μικρό ποσοστό αυτών αξιοποιείται, ενώ το υπόλοιπο εναποτίθεται στα λιγνιτωρυχεία με καταστροφικές συνέπειες για το περιβάλλον (Τσίμας & Μουτσάτσου, 2005). Η ποιότητα της ελληνικής τέφρας την καθιστά λόγω της ανομοιογένειας, λεπτότητας, υψηλών τιμών οξειδίου του ασβεστίου (CaO) και ενίοτε θειικών (SO₃) λιγότερο αξιοποιήσιμη σε σχέση με τις ευρωπαϊκές ιπτάμενες τέφρες. Για την άρση των προβλημάτων αυτών, με γνώμονα την αύξηση του ποσοστού αξιοποίησης των ελληνικών ιπτάμενων τεφρών έχει θεσπιστεί η «Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή» (2006).

Λόγω των θετικών αποτελεσμάτων που στην πράξη απέδειξαν οι ποικίλες έρευνες και εφαρμογές, οι ελληνικές ιπτάμενες τέφρες βρίσκουν πεδίο εφαρμογής σε μαζικές κατασκευές (τοίχοι αντιστήριξης, φράγματα), δύσκαμπτα οδοστρώματα, πίστες αεροδρομίων, διαχωριστικά δρόμων New Jersey, διαμόρφωση και κοιτοστρώσεις γηπέδων, προϊόντα σκυροδέματος (τριγωνικές τάφροι, στραγγιστήρια, κράσπεδα, κυβόλιθοι, πλάκες πεζοδρομίου, άοπλοι τσιμεντοσωλήνες), εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για επισκευές και σταθεροποίηση σηράγγων (Parayianni, 2001).

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συνεισφορά της IT στην σταθεροποίηση εδαφικών υλικών στην Οδοποιία (Gokca, 2001). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο υλικό στην κατασκευή υποβάσεων ή βάσεων των οδοστρωμάτων, είτε με την προσθήκη μικρού ποσοστού υδρασβέστου ή τσιμέντου, είτε και αυτούσια ανάλογα με την χημική της σύσταση. Επίσης, λόγω μικρού ειδικού βάρους μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή επιχωμάτων πάνω σε συμπίεστά εδάφη γιατί επιφέρει σημαντική μείωση των φορτιών που μεταβιβάζονται στην επιφάνεια εδράσεως των επιχωμάτων.

Πολλές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί κατά το παρελθόν όσον αφορά τη σταθεροποίηση εδαφικών υλικών με χρήση ιπτάμενης τέφρας. Πιο συγκεκριμένα, οι Μ. Μαρσέλλος, Σ. Χριστούλας, Σ.Κόλιας (2000) στα πλαίσια εργαστηριακών και εργοταξιακών δοκιμών χρησιμοποίησαν δείγματα IT Πτολεμαΐδας και Μεγαλόπολης σε συνεργασία με διάφορα εδαφικά υλικά. Τα εργαστηριακά αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη IT μειώνει το δείκτη πλαστικότητας τους PI (μέχρι και μηδενισμού του), αυξάνει το όριο πλαστικότητας τους PL και μπορεί να βελτιώσει την κοκκομετρική διαβάθμιση υλικών που στερούνται λεπτόκοκκου υλικού. Η ανάμιξη IT με διάφορα υλικά μειώνει την τιμή της μέγιστης ξηρής πυκνότητας και αυξάνει την βέλτιστη υγρασία τους κατά τη δοκιμή συμπίκνωσης. Η χρήση μίγματος IT Μεγαλόπολης και μικρών ποσοστών τσιμέντου ή υδρασβέστου βελτιώνει τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών αυτών. Η IT Πτολεμαΐδας αναπτύσσει πολύ υψηλές αντοχές σε θλίψη χωρίς καμία επεξεργασία (αυτούσια) (Parayianni et al, 2008).

Σε έρευνα που πραγματοποίησαν οι Κόλιας & Καραχάλιος (2005) χρησιμοποιώντας IT Καρδιάς, με υψηλά ποσοστά οξειδίου του ασβεστίου (CaO) και πυριτίου (SiO₂), σε συνεργασία με δείγματα αργιλικών εδαφών μέσης και μεγάλης πλαστικότητας κατέληξαν ότι η αύξηση του πάχους της σταθεροποιημένης στρώσης έχει ως συνέπεια τη μείωση των τάσεων και παραμορφώσεων στον πυθμένα της σταθεροποιημένης στρώσης. Επιπλέον, υπάρχει δυνατότητα βελτίωσης των ορίων Atterberg, αύξησης της αντοχής σε θλίψη και εφελκυσμό, του μέτρου ελαστικότητας, καθώς και της τιμής CBR.

Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η χρησιμοποίηση IT υψηλής περιεκτικότητας σε CaO παρέχει σημαντικές δυνατότητες σταθεροποίησης εδαφικών υλικών και χρησιμοποίησης τους, ανάλογα με το είδος του οδοστρώματος, ως βελτιωμένων στρώσεων έδρασης, υπόβασης, η και βάσης. Ιδιαίτερα επισημαίνεται η οικονομική ωφέλεια που μπορεί να έχει η χρησιμοποίηση σταθεροποιημένων με IT στρώσεων έδρασης οδοστρωμάτων αυτοκινητοδρόμων.

Σκοπός της έρευνας αυτής είναι η προσπάθεια ένταξης των IT Αμυνταίου και Καρδιάς στην ισχύουσα «Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή». Πρόκειται να χρησιμοποιηθούν δυο δείγματα εδαφικών υλικών, ένα αργιλικό και ένα αμμώδες, αναμεμιγμένα με τις προαναφερθείσες IT σε περιεχόμενα ποσοστά 7% και 10%. Τα μίγματα αυτά θα υποβληθούν σε δοκιμή CBR με

σκοπό τον προσδιορισμό της φέρουσας ικανότητας τους όταν συμπυκνωθούν στο εργαστήριο στη βέλτιστη υγρασία. Οι δυο βασικές παράμετροι για την κατασκευή των δοκιμών θα προσδιοριστούν από την πρότυπη δοκιμή συμπίκνωσης – Standard Proctor.

Προκειμένου να οδηγηθούμε σε ασφαλή συμπεράσματα, βασική προϋπόθεση είναι η αξιολόγηση των ΙΤ ως συνδετικών κονιών και συγκεκριμένα να βρεθεί ο πουζολανικός και υδραυλικός χαρακτήρας του υλικού. Για το λόγω αυτό πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από ελέγχους και δοκιμές. Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν είναι:

- Χημική σύσταση
- Λεπτότητα
- Υγρασία
- Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας
- Αντοχή σε κάμψη
- Αντοχή σε θλίψη
- Δείκτης δραστηκότητας

Μέρος των αποτελεσμάτων της ευρύτερης εργαστηριακής έρευνας παρατίθενται παρακάτω.

ΥΛΙΚΑ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης αυτής είναι:

Ιπτάμενη τέφρα

Χρησιμοποιήθηκαν δυο δείγματα ακατέργαστης ιπτάμενης τέφρας, η συλλογή των οποίων έγινε από τους Α/Σ Αμυνταίου και Α/Σ Καρδιάς. Τα δείγματα αυτά αναμίχθηκαν καλά ώστε τελικά να προκύψουν δυο ομογενή υλικά που στο εξής θα καλούνται ιπτάμενη τέφρα Ι και ιπτάμενη τέφρα ΙΙ. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των δυο υλικών είναι η απουσία υγρασίας (ξηρό δείγμα) καθώς και υψηλή περιεκτικότητα σε άσβεστο. Τέλος τα συγκρατούμενα ποσοστά τέφρας στο κόσκινο των 45μm (R₄₅) που προέκυψαν μετά από έλεγχο σύμφωνα με το πρότυπο EN196-6 είναι 50,53% και 37,50%, ενώ τα ποσοστά των θεικών SO₃ είναι < 7% και < 5% αντίστοιχα. Με βάση την Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή η ΙΤ Ι δεν εντάσσεται σε καμία από τις δύο κατηγορίες, σύμφωνα με τον Πίνακα 1, λόγω του υψηλού ποσοστού συγκρατούμενων R₄₅, ενώ η ΙΤ ΙΙ χαρακτηρίζεται ως ΕΙΤ1.

Πίνακας 1: Κατηγορίες Ελληνικών Ιπτάμενων Τεφρών

ΙΤ	R ₄₅ %	SO ₃ %	CaO %
ΕΙΤ1	≤ 45	≤ 7	-
ΕΙΤ2	≤ 30	≤ 5	≤ 3

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Υλικά

Χρησιμοποιήθηκε πρότυπη άμμος για τον έλεγχο του δείκτη ποζολανικότητας, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς, και τσιμέντο τύπου CEM Ι42,5. Για τον έλεγχο της ποζολανικότητας με υδράσβεστο κατά ASTM C593-95 χρησιμοποιήθηκε υδράσβεστος σε μορφή κόνιας.

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Κονιάματα τσιμέντου

Η διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων έγινε με βάση το πρότυπο EN 196-1 και περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια: α) καθορισμός των αναγκαίων ποσοτήτων των υλικών και ανάμειξη αυτών (νερό 225g, πρότυπη άμμος 1350g, τσιμέντο 450g), β) προσδιορισμός της εξάπλωσης του κονιάματος με την μέθοδο flow table, γ) για την παρασκευή των πρισματικών δοκιμίων διαστάσεων 40x40x160mm χρησιμοποιήθηκαν μήτρες 3 διαμερισμάτων, δ) μετά την πάροδο 24 ωρών τα δοκίμια ξεκαλουπώθηκαν και διατηρήθηκαν μέχρι την θραύση τους σε θάλαμο συντήρησης όπου οι συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας είναι σταθερές (RH = 91-95%, T = 20-25 °C). Οι δοκιμές έγιναν σε ηλικίες 3,7 και 28 ημερών. Τα παραπάνω χρονικά όρια αρχίζουν ευθύς αμέσως μετά την παρασκευή των μειγμάτων.

Κονιάματα τσιμέντου – τέφρας

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι όμοια με την παραπάνω με την μόνη διαφορά ότι αντικαταστάθηκε το 25% του τσιμέντου από την τέφρα. και επαναπροσδιορίστηκε η ποσότητα του νερού γίνεται έτσι ώστε να πετύχουμε ίση εξάπλωση με αυτή των κονιαμάτων του τσιμέντου (15,5-1,65cm). Οι δοκιμές έγιναν σε ηλικίες 3,7 και 28 ημερών. Τα παραπάνω χρονικά όρια αρχίζουν ευθύς αμέσως μετά την παρασκευή των μειγμάτων.

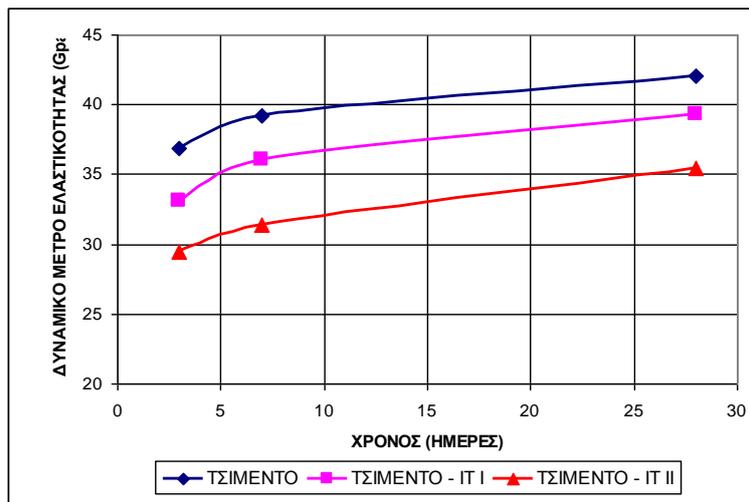
Κονιάματα υδράσβεστου – τέφρας

Η διαδικασία σύνθεσης του κονιάματος έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C593-95 και διαφοροποιείται ως προς την δημιουργία κονιαμάτων τσιμέντου στα εξής σημεία: α) προσδιορισμός της απαιτούμενης ποσότητας νερού έτσι ώστε να επιτευχθεί εξάπλωση 16,5-17,5cm (άμμος 1350g, υδράσβεστος 164g, τέφρα 328g), β) ανάδευση της ιπτάμενης τέφρας με την υδράσβεστο έτσι ώστε να προκύψει ένα ομοιογενές μείγμα το οποίο αφήνεται για 1min στον αναδευτήρα μαζί με την απαιτούμενη ποσότητα νερού, γ) συντήρηση των δοκιμίων μέχρι της 7^{ης} ημέρας ωρίμανσης σε κλίβανο στους 55 °C παρουσία υγρασίας. Οι δοκιμές έγιναν σε ηλικία 7 ημερών. Τα παραπάνω χρονικά όρια αρχίζουν ευθύς αμέσως μετά την παρασκευή των μειγμάτων.

ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ

Δοκιμή τσιμέντου – ιπτάμενης τέφρας

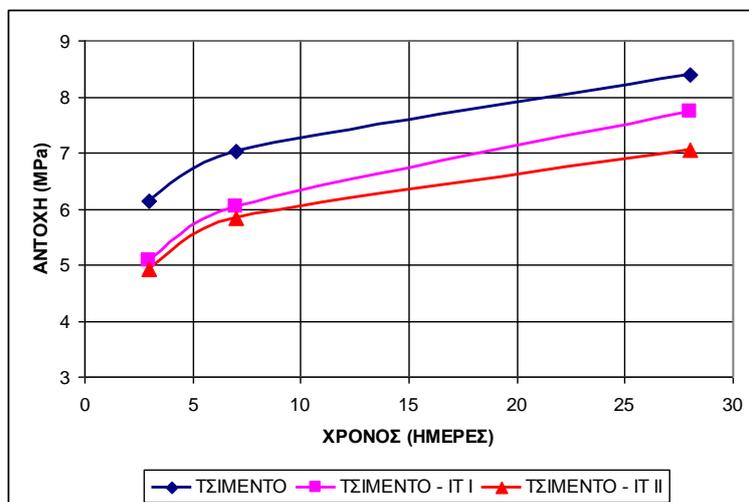
Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας



Σχ. 1: Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

Κάμψη

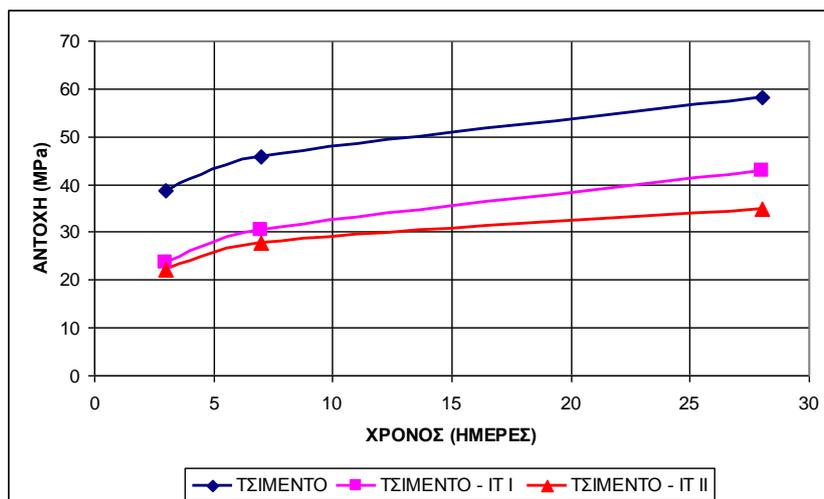
Η δοκιμή σε κάμψη έγινε σε πρισματικά δοκίμια 40x40x160 mm με ποσοστό IT 25% κ.β. ξηρού υλικού για κονιάματα τσιμέντου – τέφρας σε ηλικίες 3, 7, 28 ημερών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Εξετάστηκε επίσης η αντοχή δοκιμών παρασκευασμένα από κονίαμα αποκλειστικά με τσιμέντο τύπου CEM I 42,5.



Σχ. 2: Αντοχή σε κάμψη

Μονοαξονική θλίψη

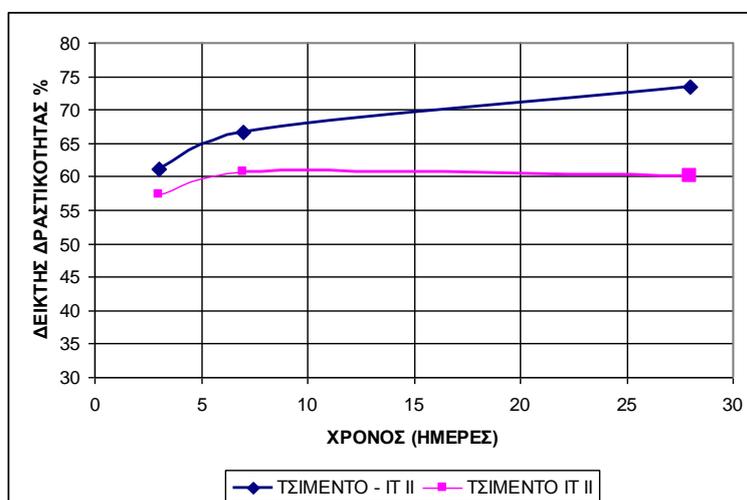
Τα εναπομείναντα πρισματικά δοκίμια από τον έλεγχο της κάμψης με θλιβόμενη επιφάνεια 40x60(mm), υποβλήθηκαν σε έλεγχο αντοχής σε θλίψη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.



Σχ. 3: Αντοχή σε θλίψη

Δείκτης δραστικότητας της τέφρας

Προκειμένου να προσδιοριστεί η πουζολανικότητα ΙΤ υπολογίστηκε ο Δείκτης Δραστικότητας της ως ποσοστό (%) της θλιπτικής αντοχής τυπικών πρισματικών δοκιμίων κονιάματος παρασκευασμένου με κονία αποτελούμενη κατά 75% από τσιμέντο δοκιμής και κατά 25% από ΙΤ κ.β., προς την θλιπτική αντοχή αντίστοιχων δοκιμίων παρασκευασμένου αποκλειστικά με τσιμέντο δοκιμής, δοκιμασμένων στην ίδια ηλικία.



Σχ. 4: Δείκτης Δραστικότητας

Δοκιμή υδράσβεστου – ιπτάμενης τέφρας

Οι έλεγχοι σε θλίψη και κάμψη έγιναν σε δοκίμια ηλικίας 7 ημερών. Η πρώτη σύνθεση θα καλείται ΥΔ-ΙΤ Ι ενώ η δεύτερη ΥΔ-ΙΤ ΙΙ και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Αντοχή σε κάμψη και θλίψη

Σύνθεση	Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Αντοχή σε θλίψη (MPa)
ΥΔ-ΙΤ Ι	2,61	9,86
ΥΔ-ΙΤ ΙΙ	1,18	4,95

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από το μέχρι τώρα έλεγχο φαίνεται ότι όσον αφορά τους δείκτες ποζολανικότητας, ο τύπος Ι –που δεν εμπίπτει στην κατηγορία ΕΙΤ1 λόγω υψηλότερου R_{45} – αναπτύσσει αποδεκτή τιμή δείκτη ποζολανικότητας, ενώ ο τύπος τέφρας ΙΙ είναι χαμηλότερου δείκτη ποζολανικότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Τσίμας, Σ. & Μουτσάτσου, Α. (2005). Διαχείριση ιπτάμενης τέφρας ΔΕΗ. Ουτοπία ή πραγματικότητα; *Πρακτικά 1^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση*. Επιμέλεια έκδοσης Παπαγιάννη, Ι. & Τσίμας Σ., 24-26 Νοεμβρίου 2005, Θεσσαλονίκη: ΕΒΙΠΑΡ, σελ 431-438.

Εθνική Τεχνική Προδιαγραφή / Ελληνικές Ιπτάμενες Τέφρες, Αθήνα Ιούνιος 2006

BS EN 196-1: 1995 – Methods of testing cement

ASTM C593-95 – Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime

Σ.Κόλλιας, Α.Καραχάλιος, 2005 Σταθεροποίηση αργλικών εδαφικών υλικών με ασβεστόχο ιπτάμενη τέφρα με ή και χωρίς τσιμέντο. 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ε.ΒΙ.ΠΑΡ. Θεσσαλονίκη 24-26 Νοεμβρίου 2005

Ν.Μαρσέλλος, Σ. Χριστούλας, Σ.Κόλλιας, (2000) Χρήση της ιπτάμενης τέφρας στην Οδοποιία. Ημερίδα : Βελτίωση εδάφους με χημικά πρόσθετα. Θεσσαλονίκη 10 Οκτωβρίου 2000

Papayianni, I. (2001). High calcium fly ash applications in concrete construction. *Proceedings of the Seventh CANMET International Conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete*. 22nd-27th July 2001, Chennai (Madras), India.

Cokca, E. (2001). Use of class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 7, pp 568-573.

Papayianni, I., Anastasiou, E., Papachristoforou, M. (2008). Testing calcareous fly ash for hydraulically bound mixtures and previous Greek experience. *Proceedings of the International Conference EuroCoalAsh 2008*, edited by T. Szczygielski, Warsaw, pp 237-249.

Η σωστή διαχείριση των ιπτάμενων τεφρών ως απαραίτητη προϋπόθεση για την διεύρυνση του ποσοστού αξιοποίησης των

Τσίμας Σ.

*Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Ηρώων
Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Τ.Κ. 157 73, Αθήνα, ΕΒΙΠΑΡ*

Λέξεις Κλειδιά: Ιπτάμενες Τέφρες,, Διαχείριση ιπταμένων τεφρών, ποιοτικά χαρακτηριστικά

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Είναι δεδομένο ότι οι Ελληνικές Ιπτάμενες τέφρες λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών τους εμφανίζουν σημαντικές ποιοτικές διαφοροποιήσεις όχι μόνο μεταξύ Βορείου και Νοτίου πεδίου ή μεταξύ των διαφορετικών ΑΗΣ αλλά ακόμα μεταξύ των μονάδων ενός ΑΗΣ ή τέλος υπάρχουν διαφοροποιήσεις στην ίδια μονάδα, σε συνάρτηση με τον χρόνο, λόγω διαφοροποίησης της ποιότητας του τροφοδοτούμενου λιγνίτη. Μέχρι στιγμής οι τέφρες συλλέγονται ανά μονάδα ΑΗΣ χωρίς να γίνει προσπάθεια διαχωρισμού τους με βάση καίρια ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως είναι πχ η περιεκτικότητα τους σε SO₃ ή το CaOf, η οποία θα διευκόλυνε την περαιτέρω κατεργασία τους. Την αναγκαιότητα του διαχωρισμού καθιστά πιο επιτακτική η ύπαρξη εφαρμογών συμπληρωματικών των διαφορετικών ποιοτήτων των τεφρών. Στο πλαίσιο της εργασίας γίνεται και μία ανασκόπηση των υφιστάμενων εργαλείων για μία αποτελεσματική διαχείριση των ιπταμένων τεφρών.

The management of high calcium fly ashes as the requisite condition for the extension of their uses

Tsimas S.

*National Technical University of Athens, School of Chemical Engineering
EVIPAR Industrial By-Products Research and Development Association*

Keyword: Fly ashes, management of, intrinsic characteristics of

ABSTRACT: Hellenic fly ashes which in their majority show different quality characteristics are stored, without any classification, in silos (one for each unit) before their limited evaluation. The extension of their uses meets serious problems mainly due to their inhomogeneity, eventhough are known applications which demand ashes with different characteristics. So large quantities of them either due to the fact of non-conformity with the existing standards or due to their overproduction, are dumped causing serious problems to the environment. Available managerial tools aiming to overcome these problems and to increase their application rate are discussed in this paper.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΜΕΡΙΚΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Οι ιπτάμενες τέφρες (ΙΤ) είναι το σημαντικότερο παραπροϊόν από την καύση των ορυκτών ανθράκων (Coal Combustion Products – CCP) και σε επίπεδο ΕΕ καλύπτουν περίπου τα 2/3 της συνολικής παραγωγής των. Σύμφωνα με στοιχεία της ECOBA (<http://www.ecoba.com>, 2009) για την Ευρώπη των 15 μελών η παραγωγή αυτή εκτιμάται σε 43 εκατ. τόνους και περίπου ισομοιράζεται στις ΙΤ που προέρχονται από λιθάνθρακες (LCFA) (~21εκατ. τόνοι) και στις ΙΤ που προέρχονται από την καύση λιγνιτών (HCFA) (~22 εκατ. τόνοι). Το ποσοστό αξιοποίησης για τους δύο τύπους ΙΤ στον ευρύτερο κατασκευαστικό τομέα, σύμφωνα με τα ίδια στοιχεία, έχει φθάσει το 48%. Η βασική διαφορά τους είναι ότι οι πρώτες, σε αντίθεση με τις δεύτερες, καλύπτονται από τις προδιαγραφές του EN 450-1 καθόσον έχουν δραστικό CaO, ελCaO και SO₃ μικρότερα από τα αντίστοιχα όρια που είναι 10%, 2,5% και 3%. Η πλειοψηφία των HCFA δεν καλύπτονται από το EN 450-1 καθόσον έχουν είτε ελCaO περισσότερο από 2,5% είτε έχουν θειικά περισσότερα από 3%. Επομένως η εικόνα που παρουσιάζεται στην Ευρώπη όσον αφορά στην αξιοποίηση είναι απατηλή γιατί το συνολικό 48% αντιστοιχεί σε 78% αξιοποίηση για την LCFA και μόνο 18% για την HCFA. Από τα 22εκατ. τόνους της HCFA, η Ελλάδα συμβάλει περίπου στην μισή Ευρωπαϊκή παραγωγή, αλλά ο βαθμός αξιοποίησης των Ελληνικών τεφρών που είναι στο 10% (στα σύνθετα τσιμέντα), υπολείπεται του Ευρωπαϊκού. Σημαντική Ελληνική ιδιαιτερότητα αποτελεί επίσης η διαπίστωση ότι μόνο στην Ελλάδα το σύνολο των Ιπτάμενων τεφρών ανήκει στην κατηγορία HCFA. Οι περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες είτε διαθέτουν μόνο LCFA είτε διαθέτουν και τους δύο τύπους. Οπότε, αυτονόητα, στρέφουν το ενδιαφέρον τους και εστιάζουν πολύ περισσότερο τις προσπάθειές τους στην αξιοποίηση, μέσω του EN 450-1, των LCFA. Το θέμα είναι τι κάνει η Ελλάδα;

2. ΟΙ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΤΕΦΡΕΣ ΥΨΗΛΟΥ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ

Είναι γνωστό ότι οι προσπάθειες (και οι φωνές) που έχουν ενταθεί τα τελευταία χρόνια δεν είναι ουτοπικές, δεν αποβλέπουν μόνο στα αδιαμφισβήτητα περιβαλλοντικά οφέλη (Tsimas et. al., 2007) και δεν διακατέχονται από σοβινιστική θεώρηση. Ο ελληνικός επιστημονικός και τεχνικός κόσμος δεν θα ήταν τόσο επίμονος αν δεν υπήρχαν τα ευρήματα πλειάδας σημαντικών Ελλήνων αλλά και ξένων ερευνητών όπου καταδεικνύονται τα αδιαμφισβήτητα πλεονεκτήματα των Ιπταμένων τεφρών στον χώρο των δομικών υλικών και της οδοποιίας. Έχει αποδειχθεί ότι οι υψηλού ασβεστίου ιπτάμενες τέφρες (HCFA) στις οποίες υπάγονται οι Ελληνικές έχουν, υπό προϋποθέσεις, θετική συνεισφορά στα σκυροδέματα, στα οποία θα εφαρμοσθούν, καθόσον βελτιώνουν σε μεγάλο βαθμό πολλές από τις ιδιότητες τους, όπως είναι η ανάπτυξη αντοχών, ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ενυδάτωσης, η ανθεκτικότητα των κατασκευών κλπ.(Parayianni, 1986). Από τις μελέτες αυτές έχει προκύψει ότι οι τέφρες, ανάλογα με την χρήση τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως έχουν (ακατέργαστες), σε συγκεκριμένες εφαρμογές, είτε (σε σημαντικά μεγαλύτερο ποσοστό) μετά από κατεργασία (κατεργασμένες) που γίνεται με σκοπό να εξαλείψει τους αρνητικούς παράγοντες. Ειδικά για την Ελλάδα εκτός από την υπερπεντηκονταετή ερευνητική εμπειρία χρήσης των ελληνικών τεφρών στο σκυρόδεμα, έχουν γίνει επιτυχείς πιλοτικές εφαρμογές στην κατασκευή οδοστρωμάτων και προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος. Κορωνίδα όλων αυτών των εφαρμογών αποτέλεσε η κατασκευή του υδροηλεκτρικού φράγματος Πλατανόβρυσης

της ΔΕΗ, στο οποίο το 80% των συνδετικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για το κυρίως σώμα του φράγματος ήταν ειδικών προδιαγραφών τέφρα Πτολεμαΐδας. Η κατασκευή του φράγματος αυτού συνιστά την πρώτη αξιολογή εφαρμογή με απευθείας χρήση ΙΤ σε δομικό έργο και είναι σπουδαίας σημασίας για την εθνική οικονομία. (Κραβαρίτης Α., κ. ά., 1996,)

Με εφελτήριο αυτή την σημαντική εμπειρία, σε παλαιότερες μελέτες και σε προσπάθεια αύξησης του ποσοστού αξιοποίησης των Ελληνικών τεφρών, είχαν εντοπισθεί οι παρακάτω τομείς οι οποίοι και έπρεπε να αντιμετωπισθούν

- οι εγγενείς παράγοντες οι οποίοι συναρτώνται άμεσα με την ποιότητα της τέφρας,
- η μη ύπαρξη προδιαγραφών για την ποιότητα των Ελληνικών Τεφρών
- η μη ύπαρξη πολιτικής βούλησης από πλευράς υπευθύνων (κυρίως ΔΕΗ ΑΕ) για την δημιουργία ενός φορέα που θα είχε ως αποκλειστικό αντικείμενο δραστηριοτήτων την διαχείριση της τέφρας.

2.1 Τα εγγενή χαρακτηριστικά ως στοιχεία της ποιότητας της τέφρας

Ο επιστημονικός κόσμος της χώρας που δραστηριοποιείται προς την κατεύθυνση αυτή έχει εντοπίσει εδώ και πολλά χρόνια τους εγγενείς παράγοντες που περιοδικά υποβαθμίζουν την ποιότητα της Ελληνικής τέφρας και έχει βρει φθηνές και επιτυχείς λύσεις, μέσα από την κατάλληλη κατεργασία, για την υπερπήδηση των προβλημάτων και την περαιτέρω αξιοποίηση. Έτσι, πέραν των χρήσεων που βρίσκει η τέφρα ως έχει (ακατέργαστη τέφρα), προκειμένου για προσθήκη στο σκυρόδεμα, τα εγγενή χαρακτηριστικά των Ελληνικών ΙΤ συνοπτικά, είναι (Τσίμας Σ. κ. ά., 1999): i) *Η Ανομοιογένεια*: στην φυσική, χημική, και ορυκτολογική σύσταση λόγω διαφορετικής προέλευσης λιγνίτη, συνθηκών καύσης, και μέσων συλλογής, ii) *Η Λεπτότητα*: Η ΙΤ και κυρίως η προερχόμενη από τους ΑΗΣ Μεγαλόπολης, είναι σχετικά χονδρόκοκη, παρουσιάζοντας έτσι χαμηλή ενεργότητα. Επιπλέον το χονδρόκοκκο υλικό περιέχει υψηλότερα ποσοστά άκαυστου άνθρακα που προκαλεί διογκώσεις στην κατασκευή, iii) *Το Υψηλό ποσοστό ελεύθερου CaO*: Αυτό προκαλεί προβλήματα διογκώσεων και απότομης έκλυσης θερμότητας που οδηγούν σε ρηγμάτωση της κατασκευής. Το πρόβλημα αυτό απαντάται ιδιαίτερα στις τέφρες περιοχής Πτολεμαΐδας και iv) *Το Υψηλό ποσοστό θεικών*: Αυτά δημιουργούν προβλήματα ύστερης διόγκωσης.

Για την αντιμετώπιση των εγγενών προβλημάτων που προαναφέρθηκαν, έχουν αναπτυχθεί από τους Έλληνες επιστήμονες και τεχνικούς δύο σημαντικά εργαλεία, όπως είναι: i) ο μύλος άλεσης-κατεργασίας με ταυτόχρονη μερική ενυδάτωση. Με το εργαλείο αυτό αντιμετωπίζονται επιτυχώς τα προβλήματα της λεπτότητας (ανάγκη για συμπληρωματική άλεση) και του υψηλού ποσοστού ελεύθερου CaO και ii) το σύστημα προεπιλογής των τεφρών με το οποίο αντιμετωπίζεται τα άλλα δύο επισημανθέντα προβλήματα της ακατέργαστης τέφρας δηλαδή το πρόβλημα της ανομοιογένειας καθώς και αυτό του υψηλού ποσοστού θεικών. Για την προαναφερθείσα κατασκευή του φράγματος άλλωστε έγινε συνδυασμένη εφαρμογή και των δύο κριτηρίων για την αντιμετώπιση των προβλημάτων της τέφρας

Η ανάπτυξη παρεμφερών συστημάτων κατεργασίας προβλέπεται σε πανευρωπαϊκό επίπεδο τόσο στο πλαίσιο του EN 450-1 όσο και σε ισχύουσες Εθνικές προδιαγραφές. Ήδη η αναθεωρημένη έκδοση του EN 450-1 καλύπτει και τέφρες που προέρχονται από μονάδες που περιλαμβάνουν διεργασίες όπως κοκκομετρική ταξινόμηση, επιλογή ξήρανση, ανάμιξη, άλεση και μείωση του άκαυστου άνθρακα. (Berg W. V., 2006).

2.2 Οι Ελληνικές Τεχνικές Προδιαγραφές για της Τέφρα (ΦΕΚ 551/18-4-2007)

Η μη ύπαρξη μέχρι σήμερα Εθνικών Τεχνικών Προδιαγραφών για τις Ελληνικές Ιπτάμενες τέφρες αποτελούσε αποτρεπτικό παράγοντα για την διεύρυνση των χρήσεων των. Ο τεχνικός κόσμος της χώρας μέχρι πρότινος ευρίσκετο με τα χέρια δεμένα καθώς δεν είχε την κάλυψη από την Πολιτεία για την χρησιμοποίηση ενός συμπληρωματικού με το τσιμέντο (το οποίο παραμένει αναντικατάστατο) δομικού υλικού το οποίο παράλληλα με την θετική του συμβολή σε ορισμένες ιδιότητες του σκυροδέματος, οδηγεί και σε μείωση του κόστους ορισμένων τεχνικών έργων. Προς τούτο ομάδα Ελλήνων επιστημόνων σε σειρά διαδοχικών ομάδων εργασίας (στις οποίες συμμετείχαν φορείς τόσο από τον επιστημονικό όσο και από τον κατασκευαστικό χώρο) με πρωτοβουλία του ΤΕΕ και ιδιαίτερα του Τμήματος του της Δυτικής Μακεδονίας, επεξεργάστηκε σχέδιο Τεχνικών Προδιαγραφών το οποίο στις 18/4/2007 εγκρίθηκε και δημοσιεύθηκε στο ΦΕΚ 551 και μετά από μία αρχική περίοδο 6 μηνών, είναι σε ισχύ από τις 18/10/2007, (ΦΕΚ 551, 1997). Στο ΦΕΚ προδιαγράφονται οι παρακάτω δύο κατηγορίες τεφρών οι οποίες θα χρησιμοποιούνται μόνο σε εφαρμογές αόπλου σκυροδέματος, καθώς επίσης σε κονιάματα και ενέματα:

ι) *ET1 που είναι ακατέργαστη τέφρα με $R_{45} < 45\%$ και $SO_3 < 7\%$.* Στην κατηγορία EIT1, συμπεριλαμβάνονται οι ΙΤ που διατίθενται όπως συλλέγονται ή με στοιχειώδη ομογενοποίηση επιλεκτικά συλλεγόμενου υλικού, για τις οποίες μπορεί να καθορισθούν όρια ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση. Τέτοια όρια μπορούν να καθορίζονται στις Προδιαγραφές που αφορούν τη συγκεκριμένη χρήση, όπως π.χ. χρήση ΙΤ στην κατασκευή οδοστρωμάτων στην οδοποιία. Στην περίπτωση αυτή οι απαιτήσεις ανάπτυξης αντοχής είναι μικρές: Χαρακτηριστικό πεδίο εφαρμογής, η ανάμιξη ΙΤ και εδαφικού υλικού για υπόβαση οδοστρωμάτων.

ιι) *ET2 που είναι κατεργασμένη τέφρα με $R_{45} < 30\%$, $SO_3 < 5\%$ και $CaO_f < 3\%$.* Στην κατηγορία EIT2 συμπεριλαμβάνονται οι ΙΤ που είναι δυνατό να υποκαταστήσουν ποσοστό τσιμέντου CEM I στο σκυρόδεμα φερουσών άοπλων κατασκευών. Για την παραγωγή κατεργασμένης τέφρας απαιτείται σύστημα ομογενοποίησης, άλεσης/υδρόλυσης και ποιοτικού ελέγχου ώστε να αποδίδεται ένα υλικό που να εμπίπτει στις διατάξεις της Προδιαγραφής αυτής. Αυτό προϋποθέτει ότι η τροφοδοσία του συστήματος άλεσης υδρόλυσης θα γίνεται με ένα προεπιλεγμένο υλικό με ιδιότητες εντός ορίων (max or min).

Στο δεύτερο μέρος της προδιαγραφής, υπό μορφή οκτώ παραρτημάτων, αναφέρονται όλες οι λεπτομέρειες για τις μεθοδολογίες προσδιορισμού της χημικής σύστασης των ιπταμένων τεφρών με υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο. Θα πρέπει να τονισθεί ότι λόγω των ιδιαιτεροτήτων των ιπταμένων τεφρών αυτής της κατηγορίας, δεν εφαρμόστηκαν αυτούσιες οι μεθοδολογίες που ακολουθούνται για τις χαμηλού ασβεστίου τέφρες, αλλά έγινε

επιστημονική προσαρμογή μετά από σειρά εργαστηριακών δοκιμών. Τα παραρτήματα αυτά εκτός από τα κομβικά στοιχεία όπως είναι τα SO_3 , CaO_f και η απώλεια πύρωσης, αναφέρονται και σε μεθοδολογίες προσδιορισμού και των υπόλοιπων χημικών χαρακτηριστικών των ιπταμένων τεφρών στις οποίες περιλαμβάνονται και ο προσδιορισμός του ενεργού πυριτίου.

3. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΙΠΤΑΜΕΝΩΝ ΤΕΦΡΩΝ ΣΤΟ ΝΕΟ ΦΕΚ

Δεδομένων των εξής:

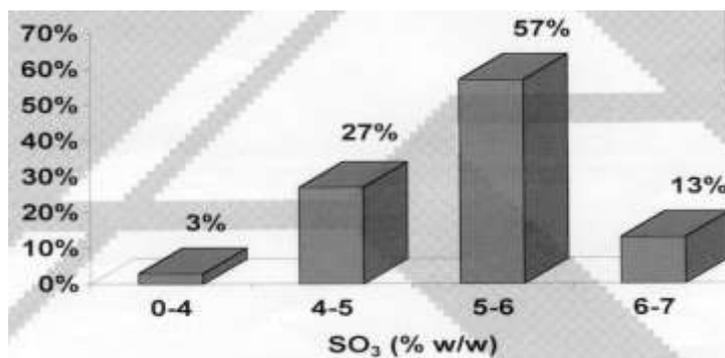
i) ο μύλος άλεσης έχει την ευελιξία να ανταποκριθεί τόσο σε απαιτήσεις διαφόρων τελικών λεπτοτήτων, όσο και σε ποιοτικές διαφοροποιήσεις σχετικά με την τελική τιμή του CaO_f σε συνάρτηση βέβαια με την αρχική του,

ii) ο μύλος δεν επιφέρει καμιά μείωση στην τιμή των θεικών τα οποία παραμένουν τα ίδια μεταξύ εισόδου και εξόδου του μύλου,

iii) χαρακτηριστική ιδιότητα των τεφρών είναι η ανομοιογένεια (μεταξύ διαφορετικών ΑΗΣ ή/και μονάδων του αυτού ΑΗΣ) που οφείλεται όχι μόνο στην ποιότητα των λιγνιτών αλλά και στις λειτουργικές συνθήκες που επικρατούν στους λέβητες των επιμέρους μονάδων,

μία επιτυχημένη συμμόρφωση και των δύο προβλεπόμενων τύπων ET1 και ET2, με τις απαιτήσεις που θέτει η Ελληνική Τεχνική Προδιαγραφή, προϋποθέτει ένα σύστημα σωστής προεπιλογής τους, μέσω του ελέγχου ανά τακτά χρονικά διαστήματα των βασικών χημικών τους χαρακτηριστικών. Άμεσος στόχος τέτοιων συστημάτων είναι να εντοπισθούν και να απομακρυνθούν ποιότητες τεφρών που έχουν είτε πολύ υψηλό CaO_f είτε κυρίως υψηλές τιμές SO_3 που όπως επισημάνθηκε θα δημιουργήσουν προβλήματα στα σκυροδέματα που θα εφαρμοσθούν. Με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε κατά την διάρκεια κατασκευής του φράγματος η προεπιλογή στηρίζεται σε τρεις διακριτές ενέργειες: 1) εγκατάσταση συστημάτων συνεχούς δειγματοληψίας της τέφρας μετά την καύση της και πριν την συγκέντρωση της στα σιλό αποθήκευσης τέφρας, 2) προσδιορισμό, με σύγχρονες αναλυτικές τεχνικές, ακόμα και *in situ*, των περιεχομένων CaO_f και SO_3 και 3) συλλογή και ανάμειξη των κατάλληλων ποιοτήτων τεφρών. Με την προεπιλογή επιτυγχάνεται η συγκέντρωση και φύλαξη των κατάλληλων ποιοτήτων τεφρών διότι, όπως προαναφέρθηκε, χαρακτηριστική ιδιότητα των τεφρών είναι η ανομοιογένεια. (Tsimas et al., 2008)

Καίτοι η εικόνα της μεταβολής ποιότητας της τέφρας σε συνάρτηση με το χρόνο ποικίλει, εν τούτοις είναι χαρακτηριστική η εικόνα που υπάρχει μέσα από ένα δείγμα 18.000 μετρήσεων SO_3 σε ΙΤ που προερχόταν ως επί το πλείστον από την 4^η μονάδα του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν κατά την διάρκεια της κατασκευής του φράγματος 10/95-4/97. Το 30% των δειγμάτων τέφρας, έδειξαν τιμές SO_3 μεγαλύτερες του 7% και ως εκ τούτου δεν οδηγήθηκαν για άλεση και περαιτέρω κατεργασία στον μύλο. Η κατανομή του υπόλοιπου 70% φαίνεται στο σχήμα 1. Παρατηρείται λοιπόν ότι το 70 % από αυτή τη ποσότητα είχε τιμές μεταξύ 5 και 7% και βάσει των Ελληνικών προδιαγραφών θα εντασσόταν στην ET1, ενώ το 30% είχε τιμές $SO_3 < 5\%$ και επομένως θα ανήκε στην ET2.



Σχήμα 1. Κατανομή SO₃ προεπιλεγμένων τεφρών

Τελικώς επομένως προκύπτει ότι από το σύνολο της εξετασθείσας ΙΤ το:

30% δεν συμμορφώνεται με το ΦΕΚ 551

50% (0.7X70%) δίνει τέφρα ET1

20% δίνει τέφρα ET2

Η εικόνα βεβαίως είναι ενδεικτική, καθόσον αναφέρεται σε μία μονάδα, ενός ΑΗΣ και σε μία παλαιότερη χρονική περίοδο. Υποδηλώνει πάντως ότι μέσα από ένα έλεγχο (όχι τόσο επισταμένο όπως κατά την διάρκεια της κατασκευής του φράγματος), εντοπίζονται εύκολα οι ποσότητες εκείνες των τεφρών που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν περισσότερο εντασσόμενες στις Ελληνικές Τεχνικές Προδιαγραφές.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Προκειμένου να συμμορφώνονται με τις ισχύουσες προδιαγραφές ώστε να αυξηθεί το ποσοστό αξιοποίησης τους στον κατασκευαστικό τομέα, οι Ιπτάμενες τέφρες στις περισσότερες περιπτώσεις πρέπει να υποστούν την κατάλληλα κατεργασία. Δεδομένου ότι τα βασικά χημικά χαρακτηριστικά των Ελληνικών ΙΤ κυμαίνονται πολλές φορές γύρω από τα κρίσιμα όρια που θέτουν οι προδιαγραφές, είναι πολύ χρήσιμη η εγκατάσταση ενός συστήματος προεπιλογής των τεφρών πριν την κύρια κατεργασία. Με το σύστημα αυτό θα γίνει η ορθολογικότερη διαχείριση των διατιθέμενων ποσοτήτων και θα διαχωριστούν οι ποιότητες εκείνες που έχουν αποδεκτά ποιοτικά χαρακτηριστικά και κυρίως αποδεκτά θειικά.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

<http://www.ecoba.com/ecobaccps.html>, ECOBA Statistics on Production and Utilization of CCPs in Europe.

Berg W. v., Feuerborn H-J, "Lignite fly ash in Europe-Properties and Use, Proceedings of the International Seminar 'Processing and Usage of High Calcium Fly ash", Belchatow Poland 2006, p. 29-38

Kravaritis A, Tsimas S, Moutsatsou A, Tsiknakou Y, "Utilization of Fly Ash for Construction of Dams by RCC Method", Proc. Power-Gen '96, Europe, Vol. 1, 1996, p. 833-858

Papayianni I., "Strength and Bond Data for Greek High-Lime Fly Ash Concrete", ACI-SP-91, Editor V. M. Malhotra, Volume 1, Detroit 1986, 367-386.

Tsimas S., Moutsatsou-Tsima A., "Upgrade of high calcium Hellenic Fly Ashes for their use in concrete", International Conference: *Creating with concrete* Vol: Modern concrete materials: binders, additions and admixtures, Dundee, UK, (1999), 159-165.

Tsimas S., Moutsatsou A., Antiohos S., The use of industrial byproducts in cement and concrete as a key to promote sustainability in the construction sector", TCMB 3rd International Symposium, May 2007, Istanbul, Turkey.

Tsimas S., Vardaka G., Zervaki M., "The preselection of high calcium fly ashes as the first step for their further evaluation", EuroCoalAsh, Warsaw (2008), pp249-256

ΦΕΚ551, Τεύχος Β, Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές, «Ελληνικές Ιπτάμενες Τέφρες» Αθήνα 18/4/2007.