

Αξιοποίηση τέφρας φλοιού ρυζιού στη παραγωγή κονιαμάτων & σκυροδέματος υψηλής ανθεκτικότητας και χαμηλού περιβαλλοντικού κόστους

Λ. Λίτος¹, Α. Πιστιόλας¹, Κ. Πιστιόλας¹, J. Sousa-Coutinho², Τ.Γ. Τάπαλη³, Ε.Γ. Παπαδάκης³

¹ ΕΥ.ΓΕ. Πιστιόλας Α.Ε., Αγρίνιο

² Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP), Porto, Portugal

³ Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών Πόρων, Πανεπιστήμιο Δυτικής Ελλάδας, Γ. Σεφέρη 2, 30100 Αγρίνιο

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στη παρούσα εργασία δίνονται αποτελέσματα χρήσης Ελληνικής τέφρας φλοιού ρυζιού (RHA) σε διάφορους τύπους κονιαμάτων και σκυροδέματος, κατόπιν αναβάθμισης της παραγωγής, και ελεγχόμενης άλεσης του υλικού. Μέσω κατάλληλων δοκιμών εξετάζεται η επίδραση της RHA στη μελέτη σύνθεσης, στη μηχανική συμπεριφορά και την ανθεκτικότητα έναντι δράσης χλωριόντων. Επιπλέον, υπολογίζονται οι συντελεστές αποδοτικότητας (k-values) για κάθε σύστημα που αξιολογήθηκε. Όπως προκύπτει η χρήση αναβαθμισμένης και αλεσμένης RHA οδηγεί σε συστήματα υψηλής αντοχής και ανθεκτικότητας. Τέλος, για την επίτευξη ισοδύναμης τεχνικής επάρκειας, προσεγγίζεται η μείωση του περιβαλλοντικού κόστους μέσω ανάλυσης ολικού κύκλου ζωής.

Exploitation of rice husk ash in the production of mortar & concrete of high durability and low environmental cost

L. Litos¹, A. Pistiolas¹, K. Pistiolas¹, J. Sousa-Coutinho², T.G. Tapali³, V.G. Papadakis³

¹ EV.GE. Pistiolas SA, Agrinio, Greece

² Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP), Porto, Portugal

³ Department of Environmental and Natural Resources Management, University of Western Greece, 2 Seferi str., 30100 Agrinio, Greece

Key words: Rice Husk Ash, Blended cements, Concrete, Durability, Sustainability.

ABSTRACT: In this study results from using Greek Rice Husk Ash (RHA) in various types of mortars and concrete are given, after production upgrading and controlled grinding of the material. The influence of RHA on compositional parameters, mechanical behavior and durability against chloride attack is examined with proper testing. Moreover, efficiency factors (k-values) are estimated for each system evaluated. As observed, the use of upgraded and milled RHA leads to systems of high strength and durability. Finally, for the achievement of equivalent technical behavior, the reduction of environmental cost is approached by a total life-cycle analysis.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Καθώς τα τελευταία χρόνια εντείνεται ολοένα και περισσότερο το ενδιαφέρον για τις περιβαλλοντικές επιδράσεις της κατασκευαστικής βιομηχανίας προκύπτει έντονα η ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση των θεμάτων που αφορούν στη βιώσιμη δόμηση. Τα κτίρια μέσω της κατασκευής, της χρήσης και της κατεδάφισής τους, καταναλώνουν περίπου το 50% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης και συμμετέχουν στις εκπομπές CO₂ που εκλύονται στην ατμόσφαιρα σε ποσοστό που αγγίζει επίσης το 50% (Dimoudi & Tombra, 2008). Η βιομηχανία σκυροδέματος έχει ένα τεράστιο ενεργειακό αποτύπωμα, γεγονός το οποίο επιβάλλει άμεσες αποφάσεις για τη βελτίωση της κατάστασης.

Ένα άλλο επίσης σημαντικό θέμα που αντιμετωπίζει η κατασκευαστική κοινότητα είναι τα έντονα προβλήματα ανθεκτικότητας των κατασκευών σε διάρκεια, θέμα με σημαντικές τεχνικές & περιβαλλοντικές διαστάσεις. Η πλειονότητα των περιπτώσεων φθοράς σκυροδέματος σχετίζεται με την διάβρωση του οπλισμού, η οποία κυρίως οφείλεται σε ενανθράκωση ή διείδυση χλωριόντων (Basheer et al., 1996, Thompson & Lankard, 1997). Από την άλλη πλευρά, είναι πλέον κοινός τόπος (Mehta, 1998, Berry & Malhotra, 1987) ότι η βιώσιμη ανάπτυξη των βιομηχανιών τσιμέντου και σκυροδέματος μπορεί να επιτευχθεί με μεγιστοποίηση της χρήσης ποζολανικών και υδραυλικών παραπροϊόντων (*supplementary cementing materials: SCM*), όπως τέφρα, σκωρία, κλπ., παραγόμενων σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς και μεταλλουργικές βιομηχανίες.

Η τέφρα φλοιών ρυζιού (ΤΦΡ ή rice husk ash: RHA) είναι το στερεό υπόλοιπο της καύσης των φλοιών ρυζιού, διεργασία η οποία γίνεται από τη 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% (Papadakis, Antiohos & Tsimas, 2002).

2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ RHA

2.1 Έρευνα ενσωμάτωσης της RHA σε μίγματα κονιαμάτων & σκυροδέματος

Στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος πραγματοποιήθηκαν δύο μελέτες προκειμένου να εξεταστεί η χρήση της τέφρας φλοιού ρυζιού στην παραγωγή κονιαμάτων (Sousa-Coutinho & Papadakis, 2011). Στην πρώτη μελέτη παρήχθησαν κονιάματα με αντικατάσταση του τσιμέντου (CEM I) σε ποσοστά 10% και 15% από δύο διαφορετικούς τύπους RHA προερχόμενους από Ευρωπαϊκή βιομηχανία, με τις ονομασίες Α και Θ, καθώς και ένα κονίαμα με 10% αντικατάσταση τσιμέντου από πυριτική παιπάλη του εμπορίου. Σε όλα τα κονιάματα με τον ίδιο λόγο νερού/συνδετικού υλικού προστέθηκε μια δόση υπερρευστοποιητή ώστε να παρουσιάσουν αντίστοιχη εργασιμότητα. Στην πρώτη μελέτη, η λεπτότητα της RHA παρουσίασε μια μέση διάμετρο σωματιδίου λίγο μεγαλύτερη από το τσιμέντο (65-70 μm για την RHA σε σύγκριση με 20 μm για το τσιμέντο). Σε μια δεύτερη μελέτη χρησιμοποιήθηκε RHA (τύπου Α) πολύ λεπτά αλεσμένη (με μέσο μέγεθος σωματιδίου 6 μm) όπου το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου ήταν 10% και 20%.

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για την μέτρηση της αντοχής, της τριχοειδούς ρόφησης, της διείδυσης χλωριόντων, της επιταχυνόμενης ενανθράκωσης και της ηλεκτρικής αντίστασης. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή κονιαμάτων ήταν νερό βρύσης, τσιμέντο τύπου CEM I 42,5 R, πυριτική παιπάλη εμπορικά διαθέσιμη καθώς και δύο πειραματικοί τύποι τέφρας φλοιού ρυζιού Α και Θ, υπερρευστοποιητής και πρότυπη άμμος CEN. Οι χημικές αναλύσεις φαίνονται στον Πίνακα 1 με παράλληλη βιβλιογραφική σύγκριση.

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση τσιμέντου RHA Α και RHA Θ και αποτελέσματα για RHA από άλλους συγγραφείς [Umamaheswaran & Batra 2008; Mehta 1994]

	cement	RHA Α	RHA Θ	RHA	RHA
		FEUP:	FEUP:	Umamaheswaran & Batra 2008	Mehta 1994
<i>LOI</i> [%]	2.85	6.34	6.30	0.80	3-18
<i>total SiO₂</i> [%]	20.41	89.05	86.50	93.52	80-95
<i>reactive SiO₂</i> [%]	-	81.43	78.64	-	-
<i>Al₂O₃</i> [%]	4.74	1.73	2.70	0.01	-
<i>Fe₂O₃</i> [%]	3.08	1.31	0.00	0.51	-
<i>CaO</i> [%]	62.28	3.05	4.40	0.68	-
<i>MgO</i> [%]	1.90	2.15	1.97	-	-
<i>free CaO</i> [%]	1.01	0.46	0.0	-	-
<i>K₂O</i> [%]	-	-	-	-	1-2

Reactive SiO₂ determined by EN -197-1

Παρήχθησαν δείγματα κονιαμάτων με τις αναλογίες μίγματος που φαίνονται στον Πίνακα 2, σύμφωνα με το EN 196-1 [1996], αφού αξιολογήθηκε η εργασιμότητα, η οποία μετρήθηκε σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφεται στο ASTM C230 [2003] και ASTM 1437 [2001]. Η εργασιμότητα του κονιάματος ελέγχου (CTL) χρησιμοποιήθηκε ως εργασιμότητα στόχου και επίσης προστέθηκε υπερρευστοποιητής ώστε να αποκτηθεί η αντίστοιχη εργασιμότητα ($\pm 10\text{mm}$) για όλους τους τύπους κονιάματος.

Πίνακας 2. Αναλογίες μίγματος και εργασιμότητα

	<i>CTL</i>	<i>SF_{10%}</i>	<i>A_{10%}</i>	<i>A_{15%}</i>	<i>Θ_{10%}</i>	<i>Θ_{15%}</i>
Άμμος (g)	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Τσιμέντο (g)	450	405	405	382.5	405	382.5
Τέφρα (g)	0	45	45	67.5	45	67.5
Νερό (g)	225	225	225	225	225	225
Υπερρευστοποιητής(g)	0	3.4	1.2	2.2	1.2	2.2
Εργασιμότητα (mm)	210.2	210.1	204.4	209.6	203.3	206.1

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα σχετικά με την αντοχή σ, 7, 28 και 90 ημερών, τα αποτελέσματα απορροφητικότητας S, την αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων D, την αντίσταση σε 56 ημέρες και τα αποτελέσματα ενανθράκωσης για κάθε τύπο κονιάματος. Όλα αυτά τα αποτελέσματα αναφέρονται στην κανονική μορφή άλεσης της RHA. Και οι δύο τύποι κονιάματος που περιλαμβάνουν RHA με ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου 10% και 15% παρουσίασαν χειρότερη συμπεριφορά από το κονίαμα ελέγχου σχετικά με την αντοχή, την αντίσταση σε διείσδυση χλωριόντων και την αντίσταση σε ενανθράκωση. Παρά το γεγονός ότι όλα τα δείγματα κονιάματος με RHA παρουσίασαν μείωση της θλιπτικής αντοχής (10% και 9% αντίστοιχα), τα δείγματα με 15% RHA παρουσίασαν μεγαλύτερα βάρη ενανθράκωσης (89% αύξηση) από τα δείγματα με ποσοστό 10% (17% έως 33% αύξηση).

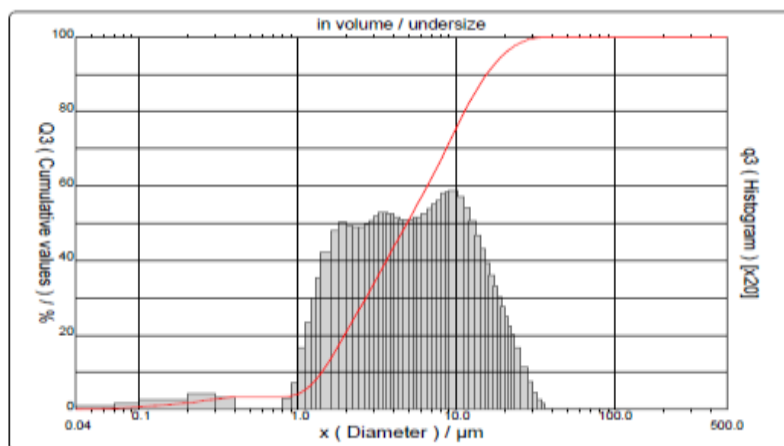
Σε ότι αφορά την αντίσταση τα δοκίμια με 15% RHA παρουσίασαν μια αύξηση σε σχέση με το δείγμα ελέγχου (9% και 15% για την RHA τύπου Α και Θ αντίστοιχα), ενώ τα δείγματα με 10% RHA παρουσίασαν μειωμένη αντίσταση (16% μέγιστη μείωση για την RHA τύπου Θ). Σχετικά με την απορροφητικότητα παρατηρήθηκε αύξηση της απόδοσης με την αντικατάσταση (65% αύξηση σημειώθηκε σε δείγματα με ενσωματωμένη RHA τύπου Θ σε ποσοστό 15%).

Πίνακας 3. Αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών και δοκιμών ενανθράκωσης καθώς και ενίσχυση με χρήση της RHA (κανονική άλεση)

Αποτελέσματα και ενίσχυση	CTL	A _{10%}	A _{15%}	Θ _{10%}	Θ _{15%}	SF _{10%}	
σ_{7d} (Mpa)	Αποτ.	38.7	37.1	37.5	38.6	37.1	48.7
	Μετ.		-4%	-3%	0%	-4%	26%
σ_{28d} (Mpa)	Αποτ.	48.0	42.5	42.9	44.6	42.6	58.8
	Μετ.		-11%	-11%	-7%	-11%	22%
σ_{90d} (Mpa)	Αποτ.	53.3	48.4	49.0	49.1	47.7	58.0
	Μετ.		-9%	-8%	-8%	-11%	9%
S (mg/(mm ² .min ^{1/2}))	Αποτ.	0.1510	0.1233	0.0653	0.1023	0.0533	0.0883
	Μετ.		18%	57%	32%	65%	42%
D_{ns} ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Αποτ.	15.31	16.32	17.62	17.24	16.59	2.44
	Μετ.		-7%	-15%	-13%	-8%	84%
Ενανθράκωση (mm)	Αποτ.	3.0	3.5	5.7	4.0	5.7	4.8
	Μετ.		-17%	-89%	-33%	-89%	-61%
Αντίσταση (Ω.m)	Αποτ.	53.7	48.6	58.4	44.9	61.8	279.5
	Μετ.		-9%	9%	-16%	15%	420%

Μεταβολή: (Μετ.)=(Αποτ._{RHA}-Αποτ._{CTL})/Αποτ._{CTL}

Στον Πίνακα 4 φαίνονται τα αποτελέσματα για την αντοχή και τις δοκιμές χλωριόντων στο σκυρόδεμα στα πλαίσια της δεύτερης μελέτης, όπου χρησιμοποιήθηκε SRHA (Superfine RHA), δηλαδή RHA (τύπου Α) η οποία είχε αλεστεί προηγουμένως πολύ λεπτά (Σχήμα 1). Το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου στο σκυρόδεμα ήταν στην περίπτωση αυτή 10 και 20%.



d(0,1): 1.41 μm
d(0,5): 4.85 μm
d(0,9): 15.43 μm

Σχήμα 1. Καμπύλη κατανομής μεγέθους σωματιδίων για SRHA

Στις 7 ημέρες η θλιπτική αντοχή ήταν παρόμοια με αυτή των δειγμάτων ελέγχου (1% αύξηση για ποσοστό 10% και 20% RHA), ενώ στις 28 ημέρες η αντοχή αυξήθηκε ελαφρώς μέχρι και 7% για τα δείγματα με 10% RHA. Η πολύ λεπτά αλεσμένη RHA (Superfine RHA-SRHA) συμπεριφέρεται γενικά πολύ καλύτερα από το τσιμέντο ακόμα και για ποσοστό αντικατάστασης 20%. Επιπλέον, στα πλαίσια της δεύτερης μελέτης, αξιολογήθηκε η αντίσταση σε χλωριόντα του κονιάματος με ενσωματωμένη SRHA, σύμφωνα με τη μέθοδο δοκιμής ASTM επιταχυνόμενης διείσδυσης. Τα δείγματα πριν τη δοκιμή, βυθίστηκαν σε κορεσμένο διάλυμα $\text{Ca}(\text{OH})_2$ για μια περίοδο 55 ημερών. Αυτό το χρονικό διάστημα θεωρείται αρκετό προκειμένου να επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό επίπεδο ενυδάτωσης του τσιμέντου καθώς και ποζολανικών αντιδράσεων της τέφρας που χρησιμοποιήθηκε. Η συνολική πολύ καλή συμπεριφορά των δειγμάτων που εξετάστηκαν (σε σχέση με το δείγμα ελέγχου) παρουσιάζεται στον Πίνακα 4, όπου δίνονται οι τιμές του φορτίου που πέρασε δια μέσου των δειγμάτων και για τα δυο επίπεδα SRHA που χρησιμοποιήθηκε.

Προφανώς, η μηχανική άλεση οδήγησε στον σχηματισμό μικρότερου μεγέθους κόκκων από του τσιμέντου. Η χρήση ποζολανικής τέφρας μειώνει το πορώδες και κατ' επέκταση την διαπερατότητα του τελικού προϊόντος Σύμφωνα με την επίσημη κατάταξη κατά ASTM C1202 (Πίνακας 4) το κονίαμα με SRHA παρουσιάζει χαμηλή διαπερατότητα στην διείσδυση χλωριόντων σε αντίθεση με το συμβατικό κονίαμα όπου η διαπερατότητα που παρατηρήθηκε είναι ενδιάμεσης τάξης μεγέθους.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών και ηλεκτρικού φορτίου για σκυρόδεμα με εξαιρετικά λεπτή SRHA

	Σκυρόδεμα ελέγχου (control)	10% SRHA	20% SRHA
Θλιπτική αντοχή, 7 d	38.7	39.2	38.9
Θλιπτική αντοχή, 28 d	48.0	51.2	50.2
Φορτίο που πέρασε (Coulombs)	2719	2569	864
Κατηγορία διαπερατότητας (ASTM)	Μέτρια	Μέτρια	Πολύ χαμηλή

2.2 Αποτελέσματα αξιολόγησης της RHA με χρήση του λογισμικού EUCON

Προκειμένου να αξιολογηθεί περαιτέρω η χρήση της RHA στο σκυρόδεμα πραγματοποιήθηκε μελέτη κατά την οποία χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό σχεδιασμού συνθέσεων σκυροδέματος και προβλέψεων ιδιοτήτων του, επιχειρήθηκε μια ποσοτική συγκριτική αξιολόγηση διαφόρων βιομηχανικών παραπροϊόντων σαν πρόσθετα σκυροδέματος ως προς:

- την αντοχή σκυροδέματος
- την ενανθράκωση σκυροδέματος και τη διάβρωση του οπλισμού
- την διείσδυση χλωριόντων και τη διάβρωση του οπλισμού
- το οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος της κατασκευής.

Με τη χρήση του λογισμικού EUCON [Papadakis & Efstathiou, 2012] διεξήχθη μια παραμετρική ανάλυση σχετικά με την επίδραση του είδους και της ποσότητας προσθήκης SCM σε σκυρόδεμα. Μία σταθερή μονάδα όγκου (1 m^3) σκυροδέματος επιλέχθηκε ως κοινή βάση σύγκρισης. Όταν ένα SCM προστίθεται σε αυτήν την μονάδα τότε ίσος όγκος από ένα άλλο υλικό, είτε τσιμέντο είτε αδρανή, αφαιρείται ώστε να διατηρείται σταθερός ο συνολικός

όγκος. Η περιεκτικότητα σε νερό, $W = 150 \text{ kg/m}^3$, έμεινε πάντα σταθερή σε όλες τις συνθέσεις. Ως βάση σύγκρισης (σκυρόδεμα αναφοράς) θεωρείται ένα σκυρόδεμα με περιεκτικότητα $C = 300 \text{ kg/m}^3$ σε τσιμέντο τύπου CEM I 42,5N, με περιεκτικότητα σε νερό $W = 150 \text{ kg/m}^3$, με θραυστά, ασβεστολιθικά αδρανή μέγιστου κόκκου 31.5 mm, χωρίς πρόσθετα, και με περιεκτικότητα σε παγιδευμένο αέρα 1.5%. Εξετάστηκαν διάφορα μίγματα σχεδιασμού όπου κάθε φορά έγινε προσθήκη ιπτάμενης τέφρας (FA – υψηλού ασβεστίου), τέφρας φλοιού ρυζιού (RHA) και ενός μίγματος με 50% FA και 50% RHA (ως πρόσθετα τύπου II κατά EN-206) προς αντικατάσταση τσιμέντου και αδρανών. Έγινε αντικατάσταση του τσιμέντου του δοκιμίου ελέγχου σε ποσοστό 10, 20 και 30% ενώ η περιεκτικότητα σε νερό παρέμεινε σταθερή για όλα τα δείγματα. Η διαμόρφωση των μιγμάτων σχεδιασμού και τα εκτιμώμενα αποτελέσματα αντοχής & ανθεκτικότητας δίνονται στον Πίνακα 5.

Με βάση τις αναλογίες των συστατικών του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, υπολογίστηκε το συνολικό περιβαλλοντικό κόστος κάθε σκυροδέματος (Πίνακας 6). Για λόγους σύγκρισης, ο Πίνακας 6 παρουσιάζει τους δείκτες ανθεκτικότητας (βάθος ενανθράκωσης “ x_c ” και απαιτούμενο πάχος επικάλυψης σκυροδέματος ικανό να αντέξει έκθεση σε χλωριόντα 50 χρόνια χωρίς διάβρωση οπλισμού “ c_{50} ”) καθώς και μια εκτίμηση του οικονομικού κόστους για κάθε μίγμα, βάσει των επιμέρους τιμών των πρώτων υλών.

Στο Σχήμα 2 δίνεται μια συγκριτική αξιολόγηση των δεικτών ανθεκτικότητας, των τεχνικών χαρακτηριστικών και του οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους, για κάθε τύπο SCM που χρησιμοποιήθηκε. Σε συνολική βάση προκύπτει ότι το μίγμα της RHA και FA παρουσίασε την πιο ισορροπημένη συμπεριφορά.

Συγκεκριμένα, με την προσθήκη RHA και FA σε ποσοστό 20% παρατηρήθηκε αύξηση της θλιπτικής αντοχής κατά 5.2% (ίδιο ποσοστό αύξησης όπως και στην περίπτωση προσθήκης FA) και μείωση του δείκτη “ c_{50} ” κατά 55.2% (σε σύγκριση με ποσοστό μείωσης 27.6% όταν χρησιμοποιήθηκε η FA), με αποτέλεσμα την μείωση των συσχετιζόμενων εκπομπών CO_2 συνολικά κατά 19.2%. Παρόλα αυτά για μεγαλύτερα ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου (30%) η FA αποδείχτηκε περισσότερο αποτελεσματική καθότι οδήγησε σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος κατά 7.6% και σε μείωση του πάχους επικάλυψης σκυροδέματος ικανό να αντέξει έκθεση σε χλωριόντα 50 χρόνια καθώς και του συσχετιζόμενου περιβαλλοντικού κόστους σε ποσοστό 20.7% και 28.7% αντίστοιχα. Συνεπώς, για ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου ανάλογης τάξεως η RHA και το μίγμα RHA/FA δεν παρουσιάζουν τόσο καλή συμπεριφορά όσο η FA.

Σε ότι αφορά την εκτίμηση της διάρκειας ζωής η FA, η RHA και ο συνδυασμός τους, μείωσαν σημαντικά τα βάθη ενανθράκωσης, σε σύγκριση με το μίγμα ελέγχου όταν χρησιμοποιήθηκαν προς αντικατάσταση αδρανών. Στο ίδιο συμπέρασμα άλλωστε έχουν καταλήξει και άλλοι ερευνητές. (Khunthingkeaw et al. 2006, Valcuende & Parra, 2010). Όταν όμως τα προαναφερθέντα υλικά χρησιμοποιήθηκαν ως αντικαταστάτες του τσιμέντου παρατηρήθηκαν μεγαλύτερα βάθη ενανθράκωσης συγκριτικά με το δείγμα ελέγχου.

Συνολικά λοιπόν λαμβάνοντας υπόψη το περιβαλλοντικό και οικονομικό κόστος, όπως εκτιμήθηκαν στην μελέτη αυτή (Πίνακας 6), σχηματίστηκε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα των ιδιοτήτων και των επιδράσεων για κάθε συγκεκριμένο μίγμα (Σχήμα 2). Συνεπώς, με ανάλογο τρόπο προσφέρεται η δυνατότητα στον εκάστοτε μελετητή να πετύχει την καλύτερη δυνατή λύση ανάλογα πάντα με τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης περίπτωσης (Σχήμα 3).

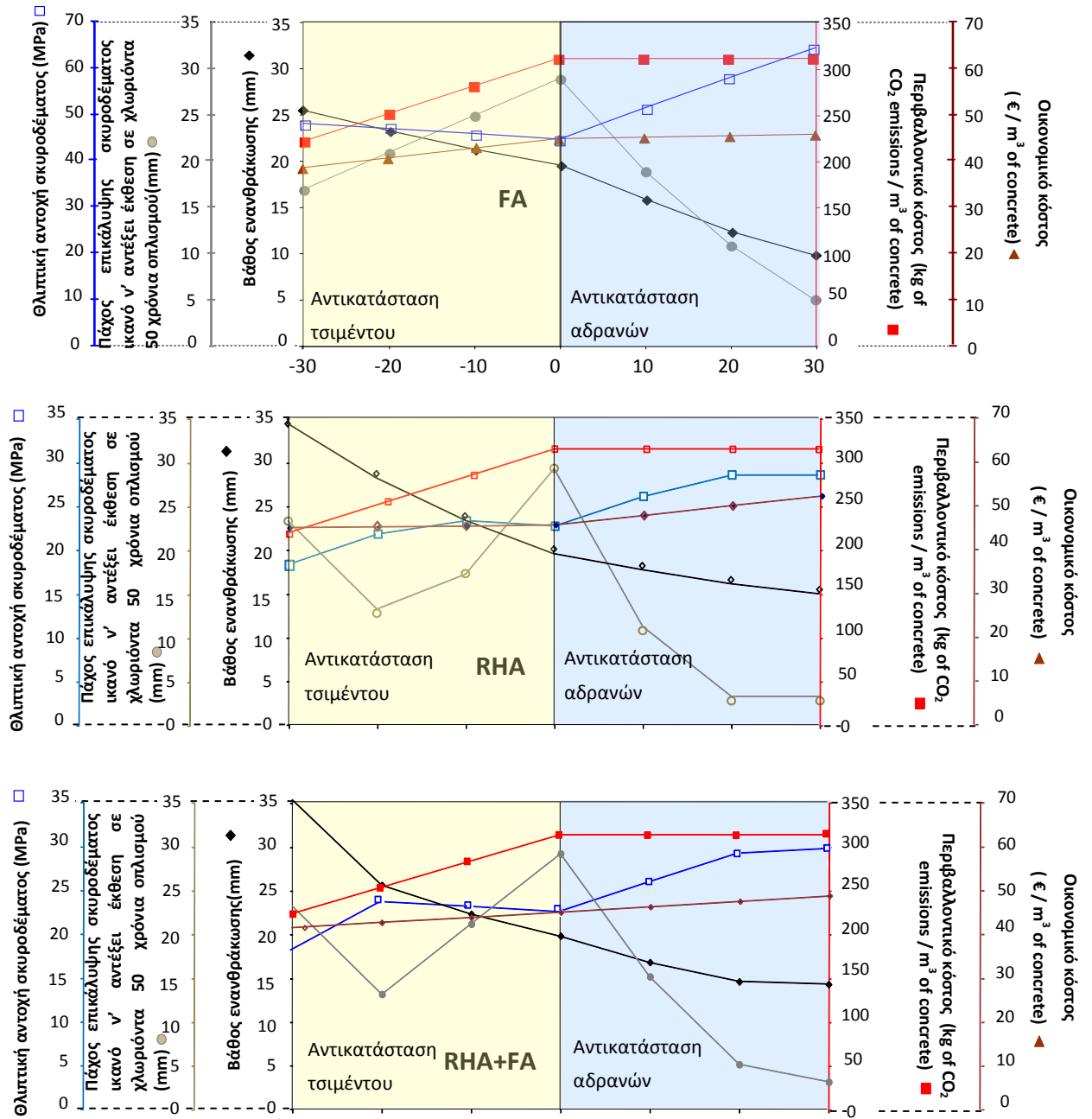
Πίνακας 5. Σχεδιασμός μίγματος και πρόβλεψη αντοχής και ανθεκτικότητας*

Τύπος SCM	SCM (%)	C	W	w/c	A	FA	RHA	f _c	Γ _{FA}	Γ _{RHA}	x _c	c ₅₀
	0	300	150	0.5	1925	-	-	44.6	-	-	19.6	29
FA	<i>Ως αντικαταστάτης αδρανών</i>											
	10	300	150	0.50	1896	30	-	51.4	1	-	15.9	19
	20	300	150	0.50	1866	60	-	58.0	1	-	12.4	11
	30	300	150	0.50	1837	90	-	64.4	1	-	9.8	5
	<i>Ως αντικαταστάτης τσιμέντου</i>											
	-10	270	150	0.56	1920	30	-	45.8	1	-	21.3	25
	-20	240	150	0.63	1916	60	-	46.9	1	-	23.3	21
	-30	210	150	0.71	1911	90	-	48.0	1	-	25.5	17
RHA	<i>Ως αντικαταστάτης αδρανών</i>											
	10	300	150	0.5	1890	-	30	51.4	-	1	17.7	11
	20	300	150	0.5	1856	-	60	56.3	-	0.87	16.1	3
	30	300	150	0.5	1821	-	90	56.3	-	0.58	15.0	3
	<i>Ως αντικαταστάτης τσιμέντου</i>											
	-10	270	150	0,556	1915	-	30	45.8	-	1	23.4	17
	-20	240	150	0,625	1905	-	60	42.8	-	0.7	28.2	13
	-30	210	150	0,714	1895	-	90	35.9	-	0.41	34.4	23
	<i>Ως αντικαταστάτης αδρανών</i>											
	10	300	150	0,5	1893	15	15	51.4	1	1	16.6	15
	20	300	150	0,5	1861	30	30	58.0	1	1	14.4	5
	30	300	150	0,5	1829	45	45	59.1	0,45	1	14.1	3
FA+RHA	<i>Ως αντικαταστάτης τσιμέντου</i>											
	-10	270	150	0,556	1918	15	15	45.8	1	1	22.1	21
	-20	240	150	0,625	1910	30	30	46.9	1	1	25.4	13
	-30	210	150	0,714	1903	45	45	35.9	0	0.82	35.1	23

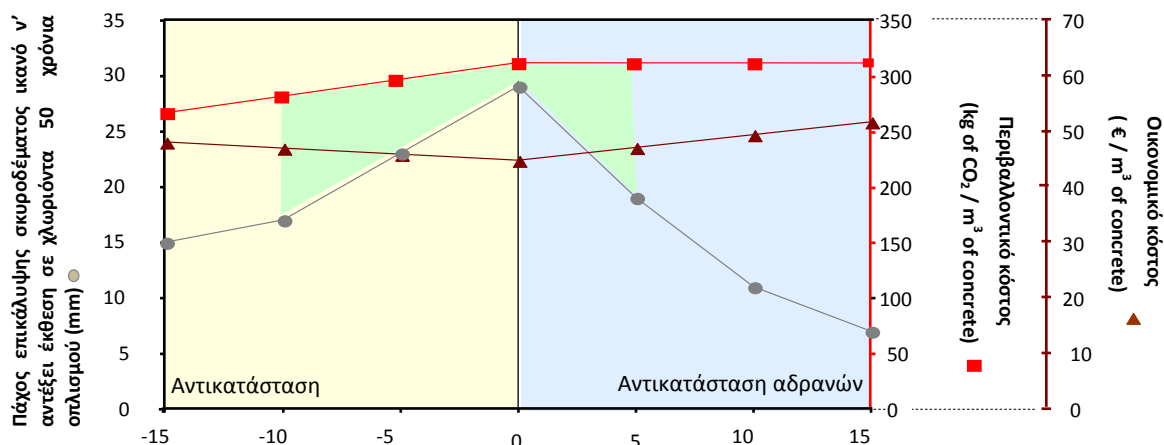
*C, W, A, περιεκτικότητα σε τσιμέντο, αδρανή και νερό (kg/m³), W/C λόγος νερού/τσιμέντου, FA περιεκτικότητα σε ιπτάμενη τέφρα υψηλού ασβεστίου (kg/m³), RHA περιεκτικότητα σε τέφρα φλοιού ρυζιού (kg/m³), f_c θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (MPa), Γ_{FA}, Γ_{RHA} ο βαθμός αντίδρασης FA & RHA, x_c βάθος ενανθράκωσης (mm), c₅₀ πάχος επικάλυψης σκυροδέματος ικανό ν' αντέξει έκθεση σε χλωριόντα 50 χρόνια χωρίς διάβρωση οπλισμού (mm), E_c το περιβαλλοντικό κόστος (kg CO₂/m³) και P_c το οικονομικό κόστος (ευρώ/m³).

Πίνακας 6. Σχεδιασμός μίγματος και εκτίμηση οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους*

Τύπος SCM	SCM (%)	C	W	w/c	A	FA	RHA	x _c	c ₅₀	E _c	P _c
	0	300	150	0.5	1925	-	-	19.6	29	311.47	44.76
FA	<i>Ως αντικαταστάτης αδρανών</i>										
	10	300	150	0.50	1896	30	-	15.9	19	311.56	45.07
	20	300	150	0.50	1866	60	-	12.4	11	311.64	45.38
	30	300	150	0.50	1837	90	-	9.8	5	311.72	45.70
	<i>Ως αντικαταστάτης τσιμέντου</i>										
	-10	270	150	0.56	1920	30	-	21.3	25	281.70	42.66
	-20	240	150	0.63	1916	60	-	23.3	21	251.94	40.56
	-30	210	150	0.71	1911	90	-	25.5	17	222.16	38.47
RHA	<i>Ως αντικαταστάτης αδρανών</i>										
	10	300	150	0.5	1890	-	30	17.7	11	311.30	46.96
	20	300	150	0.5	1856	-	60	16.1	3	311.13	49.17
	30	300	150	0.5	1821	-	90	15.0	3	310.95	51.37
	<i>Ως αντικαταστάτης τσιμέντου</i>										
	-10	270	150	0,556	1915	-	30	23.4	17	281.45	44.55
	-20	240	150	0,625	1905	-	60	28.2	13	251.42	44.34
	-30	210	150	0,714	1895	-	90	34.4	23	221.39	44.14
FA + RHA	<i>Ως αντικαταστάτης αδρανών</i>										
	10	300	150	0,5	1893	15	15	16.6	15	311.43	46.02
	20	300	150	0,5	1861	30	30	14.4	5	311.38	47.28
	30	300	150	0,5	1829	45	45	14.1	3	311.34	48.54
	<i>Ως αντικαταστάτης τσιμέντου</i>										
	-10	270	150	0,556	1918	15	15	22.1	21	281.58	43.61
	-20	240	150	0,625	1910	30	30	25.4	13	251.67	42.45
	-30	210	150	0,714	1903	45	45	35.1	23	221.78	41.30



Σχημα 2. Δείκτες αντοχής, ανθεκτικότητας και κόστους για μίγματα SCM



Σχήμα 3. Περιοχή βιώσιμου και ανθεκτικού σχεδιασμού (βέλτιστης λύσης) με ενσωμάτωση υλικών SCM

2.3 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 περιλαμβάνει την έννοια του συντελεστή k :

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

όπου P είναι η περιεκτικότητα SCM στο σκυρόδεμα (kg/m^3). Χρησιμοποιώντας τις μέσες μετρηθείσες τιμές αντοχής για το δοκίμιο αναφοράς, το a υπολογίστηκε ως 1.06, 0.8, 0.5 και 0.3, για 2, 7, 28, και 90 ημέρες, αντίστοιχα.

Κατά συνέπεια, ο υπολογισμός του συντελεστή ενεργότητας συνεισφέρει στο σχηματισμό μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας για τις δυνατότητες αξιοποίησης της RHA. Έχει ήδη πραγματοποιηθεί η εκτίμηση του συντελεστή αυτού βάσει αποτελεσμάτων δοκιμών στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι ελληνικής τέφρας φλοιού ρυζιού από τα εργοστάσια παραγωγής ρυζιού στη Θεσσαλονίκη και το Αγρίνιο (RHA8 και RHA12). Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει τις βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες των δειγμάτων αυτών. Δίνονται το SiO_2 (re) δηλαδή το ενεργό SiO_2 όπως αυτό προσδιορίστηκε κατά EN450-1, το IR: το αδιάλυτο υπόλειμμα (EN450-1), η GC: η περιεκτικότητα υαλώδους φάσης (κατά RILEM TC FAB67) και το SG: το ειδικό βάρος.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1) και τις πειραματικές τιμές αντοχής, οι συντελεστές ενεργότητας k για RHA8 και RHA12 υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται στον Πίνακα 8. Επιπλέον, γίνεται η σύγκριση τους με τους αντίστοιχους συντελεστές αποδοτικότητας (k -values) της ιπτάμενης τέφρας και πυριτικής παιπάλης, όπως προέκυψαν από προηγούμενες μελέτες.

Πινάκας 7. Φυσικοχημικές ιδιότητες α' υλών

	C	RHA8	RHA12
SiO ₂	20.28	89.46	93.15
SiO ₂ (re)	-	52.40	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	0.20	1.62	0.82
ZnO	-	<0.001	<0.001
MnO	-	0.12	0.08
CuO	-	0.04	0.10
LOI	2.31	4.06	5.61
.....			
IR	0.18	41.33	36.29
GC	-	58.67	63.71
SG	3.13	2.16	2.18

Σύμφωνα λοιπόν με τον Πίνακα 8, 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 χειρότερη από την πυριτική παιπάλη (silica fume, SF, όπου k=2.5-3).

Πινάκας 8. Συντελεστές ενεργότητας (k-values) για διάφορα δευτερεύοντα υδραυλικά υλικά

	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 (Papadakis & Tsimas, 2002, Papadakis et. al., 2002): FL: ιπτάμενη τέφρα ανθρακίτη – χαμηλού ασβεστίου. SF: πυριτική παιπάλη -silica fume.

3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια πειραματικών μελετών ερευνητικού προγράμματος επιχειρήθηκε η αξιολόγηση της δραστηριότητας της RHA ως συνάρτηση της άλεσης. Εξετάστηκαν δυο τύποι RHA με διαφορετικό ποσοστό ενεργού πυριτίου και λεπτότητας, ώστε να διερευνηθεί καλύτερα η φύση του υλικού αυτού. Στην περίπτωση χρήσης τέφρας κανονικής άλεσης τα αποτελέσματα

που προέκυψαν από τις δοκιμές δεν ήταν καθόλου ικανοποιητικά. Αντίθετα, τα δείγματα με ενσωματωμένη RHA πολύ λεπτά αλεσμένη (SRHA) παρουσίασαν εξαιρετικά καλή συμπεριφορά, οπότε προκύπτει το συμπέρασμα ότι η λεπτότητα αποτελεί θέμα υψηλής προτεραιότητας όταν η RHA χρησιμοποιείται ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου.

Στην προσέγγιση που έγινε μέσω του λογισμικού EUCON το μίγμα RHA και FA αποδείχτηκε ως το πιο πολλά υποσχόμενο SCM υλικό για ποσοστό αντικατάστασης μέχρι και 20% ώστε να παρέχει μια περιβαλλοντικά φιλική και ταυτόχρονα ανθεκτική λύση. Παρόλα αυτά, για μεγαλύτερα ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου (30%), η RHA δεν αποδείχτηκε τόσο αποτελεσματική συνολικά όσο η FA.

Επιπλέον, υπολογίστηκαν οι συντελεστές ενεργότητας k για την RHA προκειμένου να αξιολογηθεί καλύτερα η χρησιμότητα της, η τιμή των οποίων κυμαίνεται γύρω στο 0.8 στις 28 ημέρες

Η βιώσιμη κατασκευή με νέο οικολογικό χαρακτήρα είναι δυνατόν να προσφέρει υψηλότερη ανθεκτικότητα, αλλά και χαμηλότερο οικονομικό κόστος. Φυσικά, οι κυβερνήσεις θα πρέπει να αναλάβουν το δικό τους μερίδιο ευθύνης, παρέχοντας κατάλληλα νομοθετικά και οικονομικά κίνητρα στους κατασκευαστές και χρήστες αλλά και ενθαρρύνοντας τους να εφαρμόσουν νέες και περισσότερο «πράσινες» τεχνολογίες. Είναι πλέον επιτακτική η ανάγκη για μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των κατασκευών και κατ' επέκταση η επιστημονική κοινότητα θα πρέπει να κινηθεί προς αυτήν την κατεύθυνση προωθώντας τη χρήση συμπληρωματικών υδραυλικών υλικών (SCM) όπως η τέφρα φλοιού ρυζιού (RHA). Η μεγιστοποίηση της χρήσης των υλικών αυτών θα βοηθήσει σημαντικά στην βιώσιμη ανάπτυξη του τομέα δομικών έργων, μειώνοντας παράλληλα το ολικό περιβαλλοντικό κόστος κατασκευής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θέλουν να ευχαριστήσουν την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία για την Καινοτομία & την Ανταγωνιστικότητα (EACI) για την οικονομική υποστήριξη μέσω από το Πρόγραμμα ECO-INNOVATION - έργο PYRICEii.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Basheer, P.A.M., Chidiac, S.E. & Long, A.E. (1996). Predictive Models for Deterioration of Concrete Structures. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 10, pp 27.

Berry, E.E. & Malhotra, V.M. (1987). Fly Ash in Concrete, in: *Supplementary Cementing Materials for Concrete*, Ed. V.M. Malhotra, CANMET SP-86-8E, pp 35, Ottawa.

Dimoudi, A. & Tombra, C. (2008). Energy and environmental indicators related to construction of office buildings. *Resources, Conservation and Recycling*, 53, pp 86-95

Khunthingkeaw, J., Tangtermisirikul, S. & Leelawat, T. (2006). A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. *Const. Build. Mater.*, Vol 20, pp 744-753.

Mehta, P.K. (1994) Mineral admixtures for concrete - an overview of recent developments, Proc of Engineering Foundation Conference: Advances in Cement and Concrete, Durham, ASCE.

Mehta, P.K. (1998). Role of Pozzolanic and Cementitious Material in Sustainable Development of the Concrete Industry. *Proceedings of the 6th International Conference on*

the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Bangkok, ACI SP-178, pp 1.

Papadakis, V.G. and M.P. Efstathiou (2012). *EUCON: A Software Package for Estimation of Concrete Service Life*, AEIPLUS, Patras.

Papadakis, V.G. & Tsimas, S. (2002) Supplementary Cementing Materials in Concrete - Part I: Efficiency and Design. *Cement and Concrete Research*, **32**(10), pp 1525-1532.

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**(10), pp 1533-8.

Sousa-Coutinho, J. & Papadakis, V.G. (2011). Rice Husk Ash - Importance of Fineness for its Use as a Pozzolanic and Chloride-Resistant Material, *Proceedings of the 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Porto, Portugal, April 12-15, 2011.

Thompson, N.G. & Lankard, D.R. (1997). *Improved Concretes for Corrosion Resistance*, Geogtown Pike, McLean VA, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-96-207.

Valcuende, M. & Parra, C. (2010). Natural carbonation of self-compacting concretes, *Const. Build. Mater.*, Vol 24, pp 848–853, 2010.

Umamaheswaran, K. & Batra, V.S. 2007, 'Physicochemical characterization of Indian biomass ashes', *Fuel*, **87**, 628-638.