

ΜΕΛΕΤΗ ΕΨΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΦΑΡΙΝΑΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΑ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΑ

Χ.-Τ. Γκαλμπένης, Α. Μιχαλίτση, Σ. Τσίμας

*Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη
Ζωγράφου, Τ.Κ. 15773*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η δυνατότητα αξιοποίησης οικοδομικών απορριμμάτων στη βιομηχανία τσιμέντου, ως υποκατάστατων των φυσικών πρώτων υλών. Για τον σκοπό αυτό ένα δείγμα αναφοράς (βιομηχανική φαρίνα) και πέντε τροποποιημένα δείγματα που περιέχουν οικοδομικά απορρίμματα σε ποσοστό 20, 40, 60, 80 και 100%, παρασκευάστηκαν και υποβλήθηκαν σε θερμική κατεργασία σε διάφορες θερμοκρασίες από 1000°C έως 1450°C. Η επίδραση των οικοδομικών απορριμμάτων στην εψησιμότητα των διαφόρων συνθέσεων αποτιμήθηκε με βάση το ποσοστό της ελευθέρως ασβέστου (fCaO) που παρέμενε στα δείγματα με το πέρας της θερμικής κατεργασίας καθώς και από τον υπολογισμό των δεικτών εψησιμότητας. Τα προϊόντα της έψησης στους 1450°C (κλίνκερ) εξετάστηκαν ως προς την ορυκτολογική τους σύσταση με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD). Τα αποτελέσματα της ανωτέρω μελέτης κατέδειξαν ότι η προσθήκη των οικοδομικών απορριμμάτων συμβάλλει στην βελτίωση της εψησιμότητας των διαφόρων συνθέσεων της φαρίνας του τσιμέντου ενώ τόσο η δομή όσο και οι ιδιότητες των παραγόμενων κλίνκερ δεν διαφοροποιούνται σε σχέση με το κλίνκερ που προκύπτει από την βιομηχανική φαρίνα.

Λέξεις κλειδιά: φαρίνα τσιμέντου, ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος, ανακυκλωμένα αδρανή τοιχοποιίας, μελέτη εψησιμότητας, κλίνκερ τσιμέντου

BURNABILITY STUDY OF CEMENT RAW MEAL INCORPORATING CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTES

C.-T. Galbenis, A. Michalitsi, S. Tsimas

*School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Heroon Polytechniou 9,
Zografou Campus, GR-15773*

ABSTRACT: The aim of the present study is the exploitation of Construction and Demolition (C&D) wastes in cement industry, as substitutes of natural raw materials. For that purpose, one reference cement raw meal obtained from the cement industry, and five modified mixtures which contained C&D wastes in a percentage of 20, 40, 60, 80 and 100%, were prepared and sintered at various temperatures from 1000°C to 1450°C. The effect on the reactivity of the generated mixtures, was evaluated on the basis of the free lime content (fCaO) in the mixtures sintered at the above temperatures as well as of the burnability capacities determination. The produced clinkers sintered at 1450°C were examined by means of mineralogical analysis (XRD). The results of the above study indicated that the addition of C&D wastes contribute to the butnability improvement of all modified raw meals while the formation and the properties of the produced clinkers are not varied relative to the reference sample.

Keywords: cement raw meal, recycled concrete aggregates, recycled masonry aggregates, burnability study, clinker cement

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα οικοδομικά απορρίμματα 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 [1,2]. 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 [1]. Ο κύριος όγκος των οικοδομικών απορριμμάτων αποτελείται από σκυρόδεμα, υλικά τοιχοποιίας (τούβλα, κονιάματα), άσφαλτο, γυαλί, ξύλο, πλαστικό, χάλυβα, αλουμίνιο κλπ [2,3]. Τα υλικά αυτά είναι ανακυκλώσιμα και επομένως μπορούν να οδηγηθούν σε μονάδες ανακύκλωσης παρέχοντας νέα εκμεταλλεύσιμα δομικά υλικά.

Από την άλλη πλευρά, το ενδιαφέρον των τσιμεντοβιομηχανιών στη χρήση εναλλακτικών υλικών για αντικατάσταση μέρους των συμβατικών πρώτων υλών ολοένα και αυξάνεται. Διάφορες εναλλακτικές πρώτες ύλες, κυρίως παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών, έχουν προταθεί για τον ανωτέρω σκοπό. Σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα [4,5,6], 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.

Σημείο προβληματισμού της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η δυνατότητα αξιοποίησης των οικοδομικών απορριμμάτων, ως υποκατάστατων των φυσικών πρώτων υλών, στη βιομηχανία τσιμέντου. Έμφαση δόθηκε στον χημικό και ορυκτολογικό χαρακτηρισμό και στον προσδιορισμό των κατάλληλων αναλογιών ανάμιξης των πρώτων υλών. Ακολούθησε μελέτη ενησιμότητας των προκυπτουσών συνθέσεων φαρίνας στη θερμοκρασιακή περιοχή από 1000°C έως 1450°C ενώ μελετήθηκε η δομή των παραγόμενων κλίνκερ (1450°C) προκειμένου να διασφαλιστεί η ολοκλήρωση της διαδικασίας της έψησης.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

Πρώτες ύλες και μέθοδοι προσδιορισμού της σύστασής τους

Τα οικοδομικά απορρίμματα που μελετήθηκαν είναι τα Ανακυκλωμένα Αδρανή Σκυροδέματος (ΑΑΣ) και τα Ανακυκλωμένα Αδρανή Τοιχοποιίας (ΑΑΤ), που προέρχονται από εργασίες κατεδάφισης κτιρίων. Η συλλογή των ΑΑΣ και ΑΑΤ έγινε από μονάδα ανακύκλωσης αδρανών υλικών με έδρα το Σχιστό Κορυδαλλού. Τα ΑΑΣ συλλέχθηκαν στο κλάσμα 0-8mm ενώ το κλάσμα συλλογής των ΑΑΤ ήταν >32mm. Επίσης συλλέχθηκε επαρκής ποσότητα φαρίνας τσιμέντου από γνωστή ελληνική τσιμεντοβιομηχανία. Η Βιομηχανική Φαρίνα (ΒΦ) παρουσίασε υπόλειμμα στο κόσκινο των 90μm περίπου 12%. Για την επίτευξη των επόμενων βημάτων της παρούσας εργασίας (προσδιορισμός σύστασης πρώτων υλών και συνθέσεων φαρίνας τσιμέντου), επαρκής ποσότητα ΑΑΣ και ΑΑΤ

λειοτριβήθηκε σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο τύπου Bond, προκειμένου να αποκτήσουν ενιαία λεπτότητα με την ΒΦ.

Για τον προσδιορισμό της σύστασης των πρώτων υλών πραγματοποιήθηκε χημική και ορυκτολογική ανάλυση. Η χημική ανάλυση έγινε με τη βοήθεια φασματοφωτόμετρου φθορισμού ακτίνων Χ (X-Ray Fluorescence - XRF) ενώ για τον εντοπισμό των κύριων ορυκτολογικών φάσεων σε κρυσταλλική μορφή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της περίθλασης με ακτίνες Χ (X-Ray Diffraction - XRD).

Προσδιορισμός συνθέσεων φαρίνας τσιμέντου

Για τον προσδιορισμό των αναλογιών ανάμιξης της ΒΦ με τα ΑΑΣ και τα ΑΑΤ, τηρήθηκαν όλοι οι προβλεπόμενοι περιορισμοί που τίθενται από του κύριους δείκτες (Πυριτικός δείκτης - Sm, Αργιλικός Δείκτης - Am, Βαθμός κορεσμού σε άσβεστο - LSF, και Υδραυλικός δείκτης - Hm) των πρώτων υλών και από την ορυκτολογική σύσταση των παραγόμενων κλίνκερ με βάση τους τύπους του Bogue. Ο προσδιορισμός των συνθέσεων των πρώτων υλών έγινε με τη βοήθεια υπολογιστικού προγράμματος με σκοπό την παραγωγή τελικών προϊόντων (κλίνκερ) με τη μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία.

Η παρούσα μελέτη προέβλεπε την εργαστηριακή παρασκευή πέντε συνθέσεων φαρίνας τσιμέντου. Η ΒΦ αποτέλεσε την φαρίνα αναφοράς για τις υπόλοιπες συνθέσεις (Φ1, Φ2, Φ3, Φ4, Φ5), οι οποίες περιείχαν οικοδομικά απορρίμματα σε ποσοστό 20, 40, 60, 80 και 100% αντίστοιχα. Για την παρασκευή όλων των συνθέσεων, οι πρώτες ύλες αναμίχθηκαν προς πλήρη ομογενοποίησή τους σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο. Ο έλεγχος της ομοιογένειας του μίγματος των πρώτων υλών, πραγματοποιήθηκε με την συνήθη μέθοδο δειγματοληψίας κόνεων (1gr) και υπολογισμό της απώλειας πύρωσής τους στους 1000°C για μία ώρα. Με το πέρας της διαδικασίας ομογενοποίησης, το υπόλειμμα στα 90μm όλων των συνθέσεων (συμπεριλαμβανομένης και της ΒΦ) παρέμεινε ενιαίο (περίπου 7%).

Μελέτη εψησιμότητας και παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου

Η μελέτη εψησιμότητας των προκυπτουσών συνθέσεων περιελάμβανε την θερμική τους κατεργασία στις ακόλουθες θερμοκρασίες: 1000°C, 1100°C, 1200°C, 1300°C, 1350°C, 1400°C και 1450°C. Πριν την έψηση, όλες οι φαρίνες μορφοποιήθηκαν με τη προσθήκη απιονισμένου νερού σε σφαιρίδια διαμέτρου μέχρι 2cm και ξηράνθηκαν στους 105°C για 24h. Οι μορφοποιημένες φαρίνες τοποθετήθηκαν σε κάψες από λευκόχρυσο (Pt) και εισήχθησαν σε προγραμματιζόμενο φούρνο υψηλών θερμοκρασιών στην επιθυμητή θερμοκρασία για 45min ώστε να διασφαλιστεί η ολοκλήρωση της έψησης. Με το πέρας των 45min, τα δείγματα εξήλθαν από τον φούρνο και ψύχθηκαν ταχέως με τη βοήθεια ψυχρού ρεύματος από μηχανικό ανεμιστήρα για την αποφυγή σχηματισμού ανεπιθύμητων ορυκτολογικών φάσεων (γ -C₂S).

Η αποτίμηση της εψησιμότητας έγινε με βάση το ποσοστό της ελεύθερας ασβέστου (fCaO) που δεν αντέδρασε με κάποια από τα ορυκτολογικά συστατικά των παραγόμενων προϊόντων στις ανωτέρω θερμοκρασίες έψησης. Ο προσδιορισμός του fCaO έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 114-03. Από τι μετρούμενες τιμές fCaO έγινε εξαγωγή των δεικτών εψησιμότητας (Burnability Capacity - BC) σύμφωνα με τις σχέσεις (1), (2), και (3) [6]:

$$BC_1 = \frac{600}{C} \quad (1)$$

$$C = fCaO_{1000^\circ C} + 2fCaO_{1100^\circ C} + 2fCaO_{1200^\circ C} + 3fCaO_{1300^\circ C} + 4fCaO_{1350^\circ C} + 4fCaO_{1400^\circ C} + 2fCaO_{1450^\circ C} \quad (2)$$

$$BC_2 = \frac{3,75g(fCaO_{1350^{\circ}C} + fCaO_{1400^{\circ}C} + 2fCaO_{1450^{\circ}C})}{\sqrt[4]{fCaO_{1350^{\circ}C}}} \quad (3)$$

Τέλος, για να διασφαλιστεί η ολοκλήρωση της έψησης, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διερεύνηση της δομής των προϊόντων έψησης στους 1450°C (παραγόμενα κλίνκερ), η οποία έγινε με περίθλαση ακτίνων X (XRD).

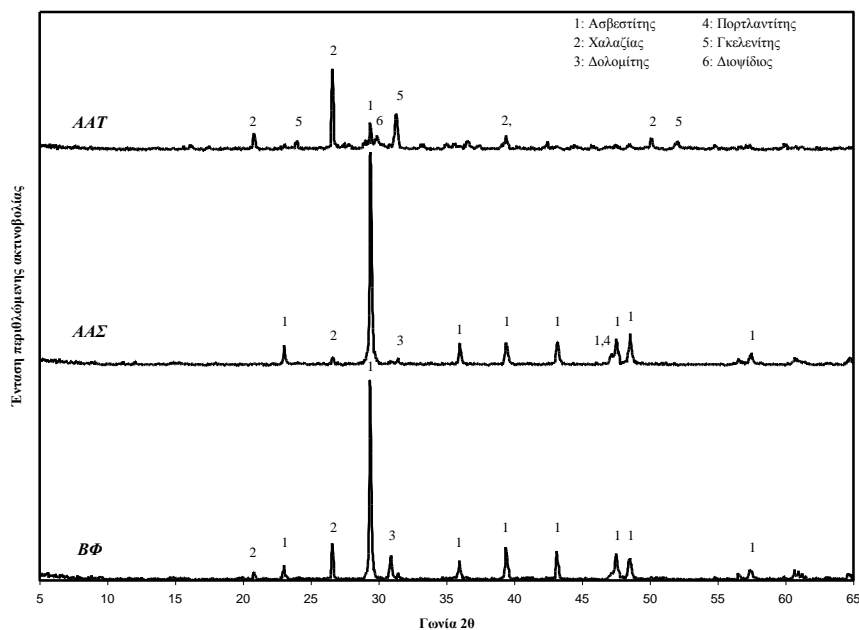
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Χημική και ορυκτολογική σύσταση πρώτων υλών

Τα αποτελέσματα των χημικών και ορυκτολογικών αναλύσεων των δειγμάτων ΑΑΣ, ΑΑΤ και ΒΦ παρατίθενται στον Πίνακα 1 και στο Σχήμα 1 αντίστοιχα.

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

Συστατικό	ΑΑΣ	ΑΑΤ	ΒΦ
SiO ₂	4,78	44,59	13,55
Al ₂ O ₃	1,32	9,70	3,31
Fe ₂ O ₃	0,67	4,58	2,55
CaO	46,19	26,77	41,95
MgO	1,29	2,31	1,98
K ₂ O	0,11	0	0,41
Απώλεια Πύρωσης	40,36	9,14	35,12



Σχήμα 1. Ακτινοδιάγραμμα XRD δειγμάτων ΑΑΣ, ΑΑΤ και ΒΦ

Από την χημική και ορυκτολογική ανάλυση των εξεταζόμενων πρώτων υλών, καταδεικνύεται η χαρακτηριστική ομοιότητα της σύστασης των ΑΑΣ και ΑΑΤ με την σύσταση της ΒΦ. Η ασβεστολιθική και πυριτική, κατά βάση, προέλευση των ΑΑΣ και ΑΑΤ αντίστοιχα, βρίσκεται σε πλήρη ταύτιση με την σύσταση της ΒΦ. Άλλωστε, αυτή η ομοιότητα αποτέλεσε και το πρωταρχικό κριτήριο για την εισαγωγή των συγκεκριμένων υλικών στο μίγμα των πρώτων υλών για την παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου.

Αξιολόγηση υπολογιστικού προσδιορισμού συνθέσεων φαρίνας

Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού προσδιορισμού α) των αναλογιών ανάμιξης των πρώτων υλών, β) των κύριων δεικτών των πρώτων υλών και γ) της ορυκτολογικής σύστασης κατά Bogue των παραγόμενων κλίνκερ, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 που ακολουθεί:

Πίνακας 2. Υπολογιστικός προσδιορισμός αναλογιών ανάμιξης και τιμών κύριων δεικτών πρώτων υλών καθώς και ορυκτολογικής σύστασης κατά Bogue των παραγόμενων κλίνκερ.

Συνθέσεις φαρίνας τσιμέντου	Αναλογία ανάμιξης πρώτων υλών (% κ.β.)			Κύριοι δείκτες πρώτων υλών				Ορυκτολογική σύσταση κλίνκερ κατά Bogue (% κ.β.)			
	ΒΦ	ΑΑΣ	ΑΑΤ	LSF	Sm	Am	Hm	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
ΒΦ	100	0	0	0.96	2,31	1,3	2,16	65,01	11,21	6,91	12,03
Φ1	80	15	5	0.95	2,41	1,41	2,15	61,38	14,74	7,44	11,14
Φ2	60	31	9	0.96	2,51	1,52	2,2	64,94	11,40	7,76	10,12
Φ3	40	46	14	0.95	2,64	1,67	2,18	61,32	14,91	8,28	9,23
Φ4	20	62	18	0.97	2,75	1,84	2,24	64,86	11,58	8,60	8,21
Φ5	0	77	23	0.95	2,89	2,07	2,22	61,25	15,09	9,12	7,33

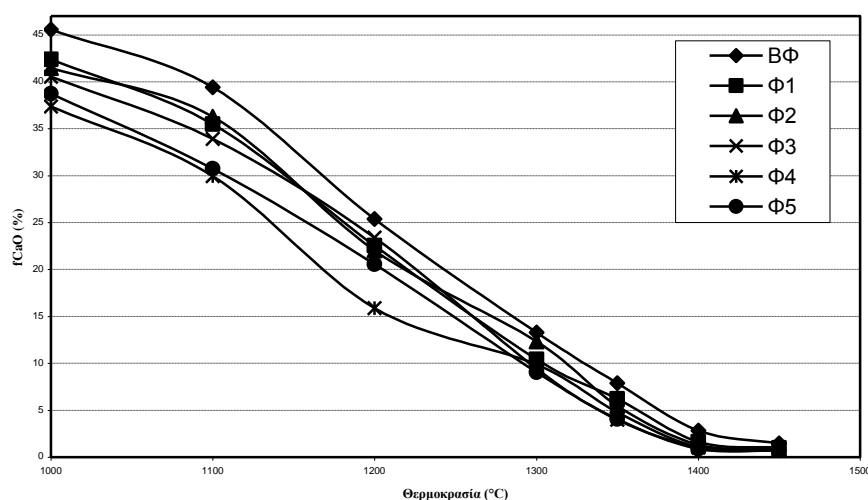
Όπως προκύπτει από την αξιολόγηση του Πίνακα 2, το ποσοστό της υποκατάστασης της ΒΦ από τα ανακυκλωμένα αδρανή δύναται να είναι ακόμη και 100%. Αναφορικά με τους κύριους δείκτες των πρώτων υλών, η τιμή του δείκτη LSF σχεδιάστηκε έτσι ώστε να παραμένει σταθερή σε όλες τις συνθέσεις καθώς καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την ποιότητα του κλίνκερ που προκύπτει από την διαδικασία έψησης της φαρίνας. Οι τιμές των δεικτών Sm και Am αυξάνονται με την αύξηση του ποσοστού υποκατάστασης της ΒΦ, ενώ ο δείκτης Hm παραμένει σταθερός. Σε κάθε περίπτωση οι τιμές όλων των δεικτών παραμένουν εντός των συνήθων ορίων τους. Σε σχέση με την ορυκτολογική σύσταση κατά Bogue του παραγόμενου κλίνκερ, παρατηρήθηκε ότι τα ποσοστά των C₃S και C₂S αυξομειώνονται δυσανάλογα, με το άθροισμα τους να παραμένει σχεδόν σταθερό. Το ποσοστό των C₃A και C₄AF αυξάνεται και μειώνεται αντίστοιχα, με την αύξηση του ποσοστού υποκατάστασης της ΒΦ. Τα διαστήματα τιμών των ορυκτολογικής φάσεων του κλίνκερ κρίνονται αποδεκτά σε κάθε περίπτωση.

Αποτίμηση εψησιμότητας και μελέτη δομής κλίνκερ

Στον Πίνακα 3 δίνονται οι τιμές του fCaO που προσδιορίστηκαν στις προβλεπόμενες θερμοκρασίες έψησης καθώς και οι υπολογισθέντες δείκτες εψησιμότητας για το σύνολο των συνθέσεων που εξετάστηκαν. Στο Σχήμα 2 αποδίδονται διαγραμματικά μερικά από τα δεδομένα του Πίνακα 3.

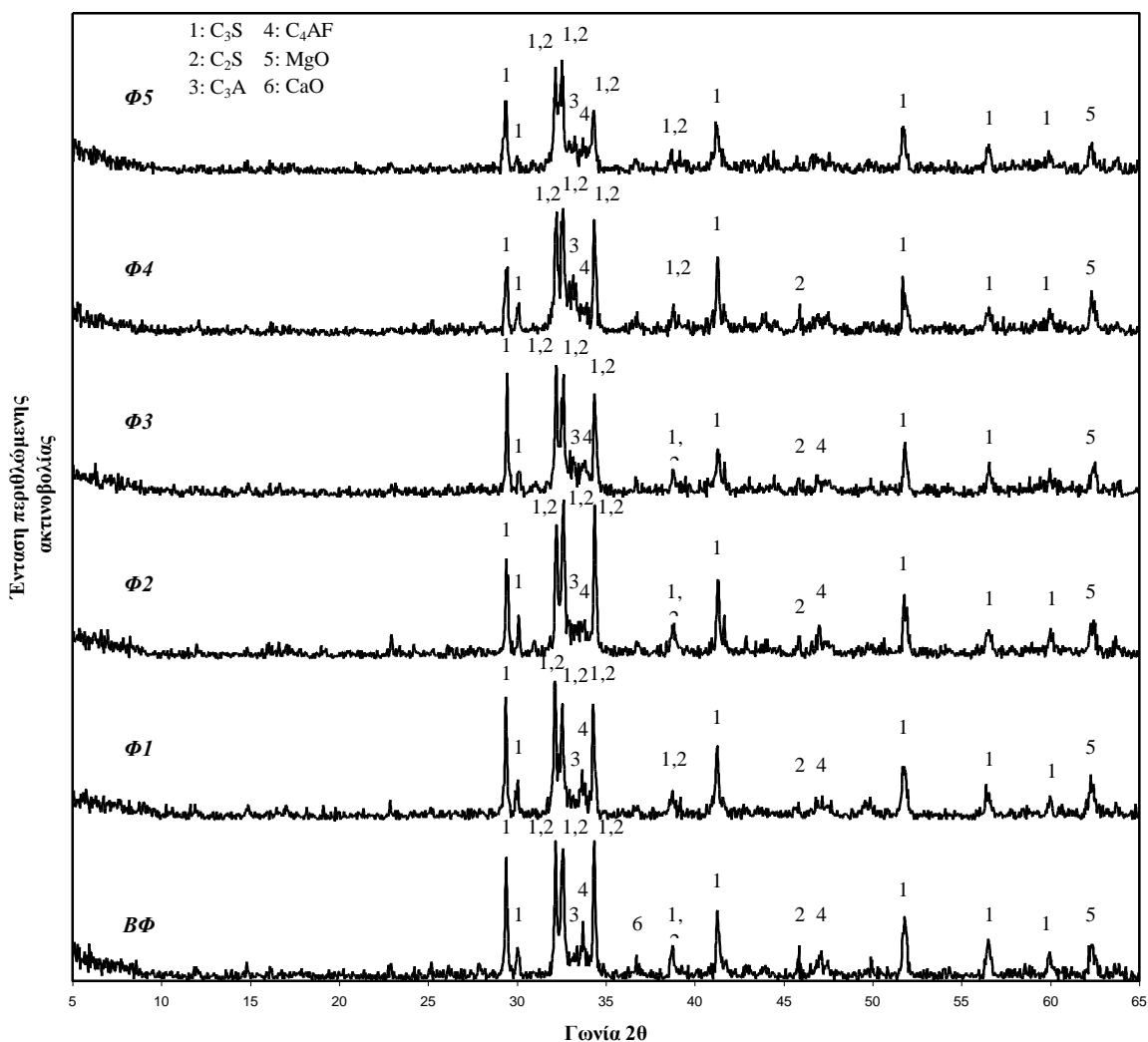
Πίνακας 3. Τιμές fCaO (%) και δεικτών εψησιμότητας

Συνθέσεις φαρίνας τσιμέντου	fCaO (%)							BC ₁	BC ₂
	Θερμοκρασία (°C)								
	1450	1400	1350	1300	1200	1100	1000		
ΒΦ	1,469	2,845	7,905	13,302	25,375	39,42	45,57	2,30	25,97
Φ1	0,986	1,637	6,206	10,428	22,56	35,478	42,38	2,69	23,72
Φ2	0,817	1,324	5,475	12,341	22,036	36,266	41,469	2,68	23,10
Φ3	0,677	1,073	4,004	9,421	23,387	33,901	40,557	2,93	24,09
Φ4	0,733	1,072	4,792	9,882	15,881	29,96	37,367	3,27	22,94
Φ5	0,705	0,875	4,058	9,05	20,557	30,747	38,734	3,16	23,45



Σχήμα 2. Τιμές fCaO σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία έψησης των εξεταζόμενων συνθέσεων

Από τα δεδομένα του Πίνακα 3 και του Σχήματος 2 προκύπτει ότι σε κάθε περίπτωση η εισαγωγή των εξεταζόμενων οικοδομικών απορριμμάτων στη ΒΦ βελτιώνει την έψηση σε σχέση με την έψηση της ΒΦ. Η μείωση των τιμών του fCaO σε όλες τις θερμοκρασίες είναι αξιοσημείωτη για το σύνολο των συνθέσεων. Ο δείκτης BC₁, που καλύπτει την πορεία της έψησης σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (1000-1450°C), εμφανίζεται σε όλες τις φαρίνες αισθητά μεγαλύτερος σε σχέση με τη ΒΦ, γεγονός που υποδηλώνει την βελτίωση της εψησιμότητας σε κάθε περίπτωση. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και από τις τιμές του δείκτη BC₂, που λαμβάνει υπόψη την πορεία έψησης στις υψηλές θερμοκρασίες (1350-1450°C), όπου παρατηρείται μείωση της τιμής του σε κάθε περίπτωση σε σχέση με τη ΒΦ. Μία πιθανή εξήγηση αναφορικά με την βελτίωση της εψησιμότητας που επιτυγχάνεται με την εισαγωγή των ΑΑΣ και ΑΑΤ στο μίγμα των πρώτων υλών, είναι ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή συνίστανται από υλικά, όπως τούβλα και τσιμέντο, τα οποία έχουν ήδη υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες και επομένως δεν απαιτούν περισσότερη ενέργεια σε αυτές τις θερμοκρασίες. Το τελευταίο στάδιο αυτής της εργασίας προέβλεπε την μελέτη της δομής των παραγόμενων προϊόντων έψησης στους 1450°C (κλίνκερ) προκειμένου να διασφαλιστεί η διαδικασία ολοκλήρωσης της έψησης. Η δομή των παραγόμενων κλίνκερ μελετήθηκε με XRD και τα αποτελέσματα εμφανίζονται στα ακτινοδιαγράμματα του Σχήματος 3 που ακολουθεί.



Σχήμα 3. Ακτινοδιαγράμματα κλίνκερ τσιμέντου

Από τα ανωτέρω ακτινοδιαγράμματα, παρατηρείται ότι σε όλες τις συνθέσεις οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις (C₃S, C₂S, C₃A και C₄AF) των παραγόμενων κλίνκερ έχουν σχηματιστεί πλήρως. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η προσθήκη των ΑΑΣ και ΑΑΤ δεν επηρεάζει την ορυκτολογική σύσταση των προκυπτουσών κλίνκερ. Επιπρόσθετα, πιστοποιείται η ολοκλήρωση της έψησης στο σύνολο των δειγμάτων. Τα αποτελέσματα της μελέτης εψησιμότητας βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με τον ορυκτολογικό χαρακτηρισμό των κλίνκερ αναφορικά με την παρουσία του fCaO. Συγκεκριμένα, υψηλότερες κορυφές CaO παρατηρούνται στο δείγμα που προέρχεται από την ΒΦ σε σχέση με τα δείγματα που προέρχονται από την υποκατάσταση της ΒΦ από ΑΑΣ και ΑΑΤ.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η πιθανή αξιοποίηση των οικοδομικών απορριμμάτων στη βιομηχανία τσιμέντου, ως υποκατάστατων των φυσικών πρώτων υλών. Τα βασικότερα συμπεράσματα που εξάγονται συνοψίζονται στα ακόλουθα σημεία:

- ✓ Η ασβεστολιθική και πυριτική σύσταση των δειγμάτων ΑΑΣ και ΑΑΤ βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με την σύσταση των φυσικών πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τσιμέντου. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την συμβατότητα των υπο εξέταση υλικών στο μίγμα των πρώτων υλών.
- ✓ Από τον υπολογιστικό προσδιορισμό των αναλογιών ανάμιξης των ΑΑΣ και ΑΑΤ με τη ΒΦ προέκυψε ότι τα εξεταζόμενα υλικά θα μπορούσαν να υποκαταστήσουν την ΒΦ ακόμη και σε ποσοστό 100%. Σε κάθε περίπτωση τόσο οι τιμές των κύριων δεικτών των πρώτων υλών όσο και η ορυκτολογική σύσταση κατά Bogue των προκυπτουσών κλίνκερ βρίσκονται εντός των συνήθων ορίων τους.
- ✓ Η μελέτη εψησιμότητας κατέδειξε την βελτίωση της εψησιμότητας όλων των συνθέσεων που περιείχαν τα οικοδομικά απορρίμματα σε σχέση με τη ΒΦ. Σε όλες τις προβλεπόμενες θερμοκρασίες έψησης, οι τιμές του fCaO ήταν αισθητά μικρότερες για όλες τις συνθέσεις.
- ✓ Η βελτίωση της έψησης στις συνθέσεις που περιείχαν οικοδομικά απορρίμματα επιβεβαιώθηκε και από την εξαγωγή των δεικτών εψησιμότητας (BC₁, BC₂).
- ✓ Η ολοκλήρωση της διαδικασίας της έψησης διασφαλίστηκε από τον πλήρη σχηματισμό των κύριων ορυκτολογικών φάσεων (C₃S, C₂S, C₃A και C₄AF) των προϊόντων έψησης στους 1450°C (κλίνκερ). Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι η προσθήκη ΑΑΣ και ΑΑΤ δεν επηρεάζει την δομή των παραγόμενων κλίνκερ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος «ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ Ι: Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο» (ΕΠΕΑΕΚ ΙΙ), το οποίο συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (75%) και από Εθνικούς Πόρους (25%).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Symonds Group Ltd (1999) “Construction and Demolition management practices and their economic impacts”, Brussels.
2. Fatta D., A. Papadopoulos, E. Avramikos, E. Sgourou, K. Moustakas, F. Kourmoussis, A. Mentzis and M. Loizidou (2003) “Generation and management of Construction and Demolition waste in Greece - An existing challenge”, Resources, Conservation and Recycling, Volume 40, pp81-91.
3. Oikonomou N. (2004) “Recycled concrete aggregates”, Cement and Concrete Composites, Volume 27, pp. 315-318.
4. J.I. Bhatti, F. MacGrecor Miller, S.H. Kosmatka, Innovations in Portland Cement Manufacturing, Portland Cement Association, USA.

5. P.E Tsakiridis, S. Agatzini-Leonardou and P. Oustadakis (2004) "Red mud addition in the raw meal for the production Portland cement clinker", *Journal of Hazardous Materials*, Volume 116, pp.103-110.
6. G. Kakali, S.Tsivilis, K.Kolovos, K. Choupa, T.Perraki, M. Perraki, M. Stamatakis and Gh. Vasilatos (2003) "Use of secondary mineralizing raw materials in cement production. The case study of stibnite ore", *Materials Letters*, Volume 57, pp.3117-3123.