

## Ελληνικές υγρές τέφρες: παρούσα κατάσταση και προοπτικές αξιοποίησης

**Μαρία Μυρτώ Δαρδαβίλα, Μόνικα Ζερβάκη, Σταμάτης Τσίμας**

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

*Λέξεις κλειδιά:* Υγρή Τέφρα, Δομικά Υλικά, Φαρίνα Τσιμέντου, Ποζολανικό Υλικό.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στην παρούσα εργασία μελετάται η αξιοποίηση της υγρής τέφρας που προέρχεται από τον πυθμένα των λεβήτων καύσης λιγνίτη των ΑΗΣ. Μέχρι στιγμής το μεγαλύτερο ποσοστό της υγρής τέφρας (ΥΤ) δεν αξιοποιείται σε κάποια βιομηχανική εφαρμογή στην χώρα μας. Αντιθέτως, παγκοσμίως η ΥΤ βρίσκει αρκετές εφαρμογές με ενδεικτικά πεδία αξιοποίησης αυτά της οδοποιίας, της αντιρρυπαντικής τεχνολογίας υδάτων και της παραγωγής σκυροδέματος. Η παρούσα μελέτη ασχολείται, σε προκαταρκτικό στάδιο, με τη δυνατότητα χρήσης των ελληνικών υγρών τεφρών ως: i) συστατικό φαρίνας για παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου και ii) ποζολανικό υλικό για την παραγωγή σύνθετων συστημάτων τσιμέντου. Προκύπτει ότι οι ΥΤ και ιδίως αυτές της Μεγαλόπολης αφενός μεν έχουν ποζολανική συμπεριφορά και μπορούν να προστεθούν έως κάποιο ποσοστό στα σύνθετα τσιμέντα, αφετέρου μπορούν επίσης έως ένα οριακό ποσοστό να αντικαταστήσουν τις πρώτες ύλες και να δώσουν κλίνκερ αποδεκτής ποιότητας.

## Hellenic bottom ash: the present status and utilization perspectives

**Maria Myrto Dardavila, Monika Zervaki, Stamatis Tsimas**

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

*Keywords:* Bottom ashes, construction materials, cement raw meal, pozzolanic material.

**ABSTRACT:** In this study, the utilization of bottom ash (BA) from lignite-fired power plants is studied. So far in Greece most of the amount produced is used for filling worked-out opencast lignite mines since there is no industrial application for BAs. Nevertheless, it is concluded that various different utilities of bottom ash worldwide are met. Some fields of its utilization are referred, such as road construction, antipollution technology of water, and concrete fabrication. This study deals, in a preliminary stage, with the possibility of utilization of Greek BAs as i) raw materials in the cement raw meal for clinker production and ii) pozzolanic materials for the production of blended cement. The first conclusion of the study is that BAs, and especially those from Megalopoli, have pozzolanic behavior and can be used as supplementary cementing materials, as well as raw materials giving clinker of acceptable quality.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υγρή τέφρα (YT) είναι το βιομηχανικό παραπροϊόν των ΑΗΣ που προκύπτει κατά την καύση όταν κάποια ανόργανα ορυκτά συστατικά του καυσίμου τήκονται, συσσωματώνονται και μέσω της βαρύτητας καταλήγουν στον πυθμένα του λέβητα. Από εκεί συλλέγεται η υγρή τέφρα ή τέφρα πυθμένα η οποία έχει παρόμοια χημική σύσταση με την ιπτάμενη τέφρα, δηλαδή περιέχει κυρίως οξειδία του πυριτίου, του σιδήρου, του αργιλίου και του ασβεστίου. Οι YT διαφοροποιούνται έντονα μεταξύ τους όσον αφορά στη χημική και ορυκτολογική τους σύσταση και ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει τα χαρακτηριστικά τους είναι το καύσιμο από το οποίο προέρχονται. Στην Ελλάδα παράγονται λιγνιτικές YT, το κύριο χαρακτηριστικό των οποίων είναι το υψηλό ποσοστό σε CaO.

Στη χώρα μας εκτιμάται ότι ετησίως παράγονται περίπου 700.000 τόνοι YT οι οποίοι στο σύνολό τους απορροφώνται από την ΔΕΗ είτε για επιχωματώσεις και αποκαταστάσεις παλαιών ορυχείων της ΔΕΗ (70%) είτε για γενικά μηχανικά γεμίσματα και ως υλικό πλήρωσης σε δομικές εφαρμογές (25%), (Ecoba Working Group, 2007). Προκύπτει επομένως το συμπέρασμα ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της ποσότητας YT που παράγεται επιστρέφει στο περιβάλλον χωρίς καμία κατεργασία και ότι δεν υπάρχει αξιοποίηση της YT είτε στον τομέα των δομικών υλικών ή σε κάποια άλλη βιομηχανική εφαρμογή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται με μορφή σύντομης βιβλιογραφικής ανασκόπησης ενδεικτικές χρήσεις των YT στο εξωτερικό.

### *1.1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση των χρήσεων της YT*

Ο βασικότερος τομέας αξιοποίησης υγρών τεφρών, στον οποίο βρίσκουν εφαρμογή στις ΗΠΑ αλλά και σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες (Ολλανδία, Δανία) είναι ο τομέας της οδοποιίας. Οι YT έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς ως συστατικά της οδοποιίας δίνοντας καλά αποτελέσματα, (<http://www.tfhrc.gov>).

Συγκεκριμένα έχουν χρησιμοποιηθεί:

- Ως αδρανή στο σκυρόδεμα ασφάλτου σε συνδυασμό με άλλα αδρανή. Για τη χρήση αυτή η YT μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει, χωρίς καμία διαδικασία ελάττωσης μεγέθους, με μόνη προϋπόθεση να μην περιέχει ενώσεις του σιδήρου.
- Ως λεπτόκοκκα αδρανή στη βάση οδοστρώματος. Για τη χρήση αυτή απαιτείται άλεση και κοσκίνισμα της τέφρας για απομάκρυνση των χονδρόκοκκων.
- Σε μίγμα με τσιμεντοειδή υλικά (τσιμέντο Πόρτλαντ, σκωρία καμίνου, ποζολάνες με ενεργοποιητές) ως σταθεροποιητές βάσης. Για τη χρήση αυτή απαιτείται άλεση καθώς και ένα βέλτιστο ποσοστό υγρασίας (12-24%).
- Ως αδρανή στα ρευστά γεμίσματα.

Ακόμη έχουν χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές στον τομέα των δομικών υλικών, όπως:

- Ως αδρανές σε κυβόλιθους σκυροδέματος, σε μεγάλα ποσοστά. Δεν χρειάζονται διαδικασίες ελάττωσης μεγέθους για αυτήν την εφαρμογή, ενώ το σκυρόδεμα που προκύπτει έχει βελτιωμένες αντοχές λόγω των υδραυλικών ιδιοτήτων της τέφρας (Aggarwal et al., 2007).
- Ως ποζολανικά υλικά που αντικαθιστούν μέρος του κλίνκερ στην τελική άλεση του τσιμέντου. Οι YT πρέπει να στερεοποιηθούν για αυτήν τη χρήση (Demirda et al., 1999).
- Ως αδρανή σε αερακτικό σκυρόδεμα, όπου γίνεται χρήση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της τέφρας (μικρό ειδικό βάρος, μεγάλο πορώδες). Και σε αυτήν την εφαρμογή οι YT αντικαθιστούν μεγάλο μέρος της άμμου, (Torcu et al., 2007).

Επιπροσθέτως οι ολοένα αυστηρότεροι περιβαλλοντικοί κανονισμοί, έχουν αποτελέσει έναυσμα για τη μελέτη της χρήσης της λιγνιτικής YT στον τομέα της αντιρρυπαντικής τεχνολογίας. Σε αυτή την κατεύθυνση οι λιγνιτικές YT συχνά χρησιμοποιούνται ως απορροφητικά υλικά διαφόρων ειδών ρυπαντών, οργανικών και ανόργανων, ειδικά στην αντιρρυπαντική τεχνολογία του νερού. Πιο συγκεκριμένα:

- Έχει μελετηθεί η δυνατότητα κατακράτησης φωσφορικών ιόντων από υδατικά διαλύματα εκ μέρους των λιγνιτικών YT, καθώς και συσχέτιση αυτής της δυνατότητας με τις φυσικές και χημικές ιδιότητές τους. Ιδιαίτερη σημασία έχει η διερεύνηση του μηχανισμού που διέπει τη διεργασία απορρόφησης των φωσφορικών ιόντων (Yan et al., 2007).
- Έχουν χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα για την απομάκρυνση διαφορετικών ειδών βαφών από υδατικά διαλύματα. Η δυνατότητα προσρόφησης των βαφών αυτών από τις YT δεν εξαρτάται μόνο από την πορώδη επιφανειακή τους δομή, αλλά και από τη χημική τους δομή (Dincer et al., 2007a). Παράμετροι που επηρεάζουν είναι: ο χρόνος επαφής των YT με τις βαφές, το pH του διαλύματος, και η αρχική συγκέντρωση των βαφών στο υδατικό διάλυμα (Dincer et al., 2007b).
- Έχει μελετηθεί η δυνατότητα που έχουν οι YT να προσροφούν οργανικούς ρυπαντές από υδατικά λύματα, όπως από λύματα που προκύπτουν από διεργασίες παραγωγής χαρτιού και κοκ. Η ελάττωση του μεγέθους των σωματιδίων της YT οδηγεί σε αποτελεσματικότερη προσρόφηση των εν λόγω οργανικών ρυπαντών (Sun et al., 2008).

Μία ακόμα ενδιαφέρουσα χρήση των λιγνιτικών YT είναι στον τομέα των λιπασμάτων. Λόγω της πορώδους δομής τους και της σημαντικής διαπερατότητάς τους, μπορούν δυνητικά να μεταφέρουν θρεπτικά συστατικά στα φυτά, και με αυτό τον τρόπο να βελτιώσουν την ποιότητα του εδάφους στο οποίο προσθέτονται. Ως εκ τούτου, έχουν χρησιμοποιηθεί ως φορείς φωσφόρου σε καλλιέργειες φυτών αφού προηγουμένως έχουν υποστεί την κατάλληλη κατεργασία ώστε να απορροφήσουν τον εν λόγω φώσφορο (Junfeng et al., 2008).

Στην παρούσα μελέτη διερευνάται η προσθήκη της YT σε δύο διαφορετικά στάδια της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου, όπως είναι i) η σύνθεση της φαρίνας τσιμέντου και ii) η τελική άλεση του τσιμέντου. Μελετάται δηλαδή, σε προκαταρκτικό στάδιο, η δυνατότητα χρήσης YT στη βιομηχανία τσιμέντου είτε ως πρώτη ύλη για παρασκευή κλίνκερ είτε ως ποζολανικού υλικού για παρασκευή τσιμέντων τύπου CEM II.

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Λήφθηκαν YT από τρεις ΑΗΣ (Μεγαλόπολης, Μελίτης και Πτολεμαΐδας), με επιδίωξη την κατά το δυνατόν διαφοροποίηση τους στα κύρια χαρακτηριστικά τους.

Στη συνέχεια η σειρά των πειραμάτων χωρίστηκε σε δύο μέρη. Για την διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης YT ως πρώτων υλών έγινε η σύνθεση των φαρινών (με YT Μεγαλόπολης και Μελίτης) και η έψηση των φαρινών που συμπληρώνεται από την αντίστοιχη μελέτη εψησιμότητας. Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι σε αυτήν την σειρά πειραμάτων δεν χρησιμοποιήθηκε η YT Πτολεμαΐδας καθόσον εμφάνισε πολύ υψηλές τιμές LOI και σε προκαταρκτικές εψήσεις έδειξε αποσάθρωση των προκυπτόντων κλίνκερ. Για την μελέτη της ποζολανικής δράσης των YT έγινε η σύνθεση των σύνθετων συστημάτων τσιμέντου με τσιμέντο CEM I 42,5N και YT σε διάφορα ποσοστά υποκατάστασης και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός των θλιπτικών αντοχών και μελέτη ενυδάτωσης.

### 2.1. Χαρακτηρισμός υγρών τεφρών

Χρησιμοποιήθηκαν YT και από τους τρεις ΑΗΣ, η χημική ανάλυση των οποίων φαίνεται στον πίνακα 1 που ακολουθεί. Φαίνεται αρχικά η διαφοροποίηση των τριών YT, ειδικά όσον αφορά στον λόγο  $\text{CaO/SiO}_2$ , ο οποίος κυμαίνεται από 0,14 για την YT Μελίτης έως 0,85 για την YT Πτολεμαΐδας, ενώ για την YT Μεγαλόπολης ο λόγος είναι 0,59. Για τις YT δεν υπάρχει συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση όπως ισχύει για τις ιπτάμενες τέφρες όπου είναι γνωστό ότι όταν  $\text{CaO/SiO}_2 < 0,3$  ή  $\text{CaO} < 10\%$  οι τέφρες χαρακτηρίζονται ως χαμηλού ασβεστίου ή αργιλοπυριτικές. Έτσι, εφαρμόζοντας το παραπάνω κριτήριο και για τις YT, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι YT Μεγαλόπολης και Πτολεμαΐδας μπορούν να χαρακτηριστούν, ως υψηλού ασβεστίου ή ασβεστούχες, ενώ η YT Μελίτης ως χαμηλού ασβεστίου ή αργιλοπυριτική.

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση υγρών τεφρών

% Οξείδιο	YT Μεγαλόπολης	YT Μελίτης	YT Πτολεμαΐδας
$\text{SiO}_2$	41,69	48,63	19,52
$\text{Al}_2\text{O}_3$	14,07	21,62	11,30
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	8,47	7,29	2,66
CaO	24,56	6,83	16,62
MgO	4,10	2,75	2,43
$\text{K}_2\text{O}$	1,79	2,97	0,53
$\text{SO}_3$	4,31	2,78	2,89
LOI	7,55	5,34	43,8

Ο χαρακτηρισμός των YT ολοκληρώθηκε με ορυκτολογική ανάλυση με την μέθοδο περίθλασης ακτίνων X (XRD) και με θερμική βαρυτομετρική ανάλυση με θερμοζυγό (TG-DTG). Όσον αφορά την ορυκτολογική σύσταση των YT, όλες περιέχουν χαλαζία ( $\text{SiO}_2$ ), οι YT Μεγαλόπολης και Μελίτης περιέχουν αιματίτη ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) και οξείδιο του αλουμινίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ενώ στην περίπτωση του ασβεστίου υπάρχει διαφοροποίηση καθόσον η YT Μεγαλόπολης περιέχει οξείδιο του ασβεστίου

(CaO), η YT Μελίτης περιέχει αραγωνίτη (CaCO<sub>3</sub>) και δολομίτη (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) και η YT Πτολεμαΐδας περιέχει ασβεστίτη (CaCO<sub>3</sub>). Με τις μετρήσεις στο θερμοζυγό επιβεβαιώθηκε η παρουσία CaCO<sub>3</sub> σε όλα τα δείγματα των τεφρών.

Ακολούθησε ξήρανση και άλεση στην επιθυμητή λεπτότητα (υπόλειμμα 15% στο κόσκινο των 90μm) και των τριών YT.

## 2.2. Σύνθεση φαρινών

Για την σύνθεση των φαρινών χρησιμοποιήθηκαν οι φυσικές πρώτες ύλες της τσιμεντοβιομηχανίας. Ο υπολογισμός της σύνθεσης των δύο φαρινών που περιέχουν YT καθώς και μίας φαρίνας αναφοράς έγινε με βάση τους δείκτες που υπολογίζονται από τις σχέσεις 1-4.

$$LSF = C / (2,8S + 1,18A + 0,65F) = 0,96 \quad (1)$$

$$Sm = S / (A + F) = 2,3 \quad (2)$$

$$Am = A / F = 1,7 \quad (3)$$

$$Hm = C / (S + A + F) = 2,16 \quad (4)$$

όπου *C*, *S*, *A* και *F* οι % περιεκτικότητες των CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> αντίστοιχα στη φαρίνα.

Με την προϋπόθεση να έχουν οι δείκτες τις συγκεκριμένες τιμές που φαίνονται στις εξισώσεις, 1-4 παράχθηκαν οι συνθέσεις φαρινών με το μέγιστο δυνατό ποσοστό υποκατάστασης από YT. Οι συνθέσεις που προέκυψαν φαίνονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2. Συνθέσεις φαρινών (%κ.β. των επιμέρους πρώτων υλών)

Πρώτη ύλη	Φαρίνα αναφοράς	Φαρίνα με YT Μεγαλόπολης	Φαρίνα με YT Μελίτης
Ασβεστόλιθος	70,6	68,9	75,0
Σχίστης	25,6	0,2	-
Ερυθρά Ιλύς	0,6	-	-
Βωξίτης	3,2	0,4	-
Πυριτική Άμμος	-	3,5	6,0
Καλαμίνα	-	-	0,9
Υγρή Τέφρα	-	27,0	18,1

## 2.3. Έψηση φαρινών – Μελέτη εμψιμότητας

Οι τρεις φαρίνες που παράχθηκαν ψήθηκαν σε ένα εύρος θερμοκρασιών από τους 1000 °C έως τους 1450 °C και ακολούθησε ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας των προϊόντων έψησης σε ελευθέρω ασβεστο (fCaO). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3. Περιεκτικότητα % κ.β. των προϊόντων έψησης fCaO

Συνθέσεις Φαρίνας	Θερμοκρασία (°C)						
	1450	1400	1350	1300	1200	1100	1000
Φαρίνα αναφοράς	1,13	1,72	4,88	10,05	31,34	39,25	41,77
Φαρίνα με YT Μεγαλόπολης	0,93	1,69	6,52	10,23	20,57	38,92	36,88
Φαρίνα με YT Μελίτης	1,19	1,97	6,87	12,61	27,08	41,79	34,92

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα έγινε η εξαγωγή των δεικτών εψησιμότητας BC<sub>1</sub> και BC<sub>2</sub>. Η μελέτη εψησιμότητας ολοκληρώθηκε με θερμική βαρυτομετρική ανάλυση σε θερμοζυγό (TG-sDTA) που έγινε για κάθε φαρίνα με σκοπό να προσδιοριστεί το ποσοστό του αποδεσμευόμενου CO<sub>2</sub> κατά την έψηση της κάθε φαρίνας καθώς και η % κ.β. περιεκτικότητα των φαρινών σε CaCO<sub>3</sub>. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν εμφανίζονται στον πίνακα 4.

Πίνακας 4. Δείκτες εψησιμότητας των φαρινών, ποσοστό CaCO<sub>3</sub> και CO<sub>2</sub> στις φαρίνες και θερμοκρασιακό peak της διάσπασης του CaCO<sub>3</sub>

Συνθέσεις Φαρίνας	Τιμές δεικτών εψησιμότητας		%κ.β.	%κ.β.	Θερμοκρασιακό peak(°C)
	BC <sub>1</sub>	BC <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	
Φαρίνα αναφοράς	2,48	22,35	33,25	75,57	829,26
Φαρίνα Μεγαλόπολης	2,71	23,63	31,81	72,30	817,66
Φαρίνα Μελίτης	2,42	25,99	33,71	76,62	824,07

Σε γενικές γραμμές προκύπτει ως συμπέρασμα ότι κατά κύριο λόγο η φαρίνα με YT Μεγαλόπολης εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά εψησιμότητας από την φαρίνα αναφοράς, ενώ τα ίδια συμπεράσματα δεν μπορούν να εξαχθούν για την φαρίνα με YT Μελίτης. Συγκεκριμένα, όσον αφορά το μεγαλύτερο μέρος του εύρους των θερμοκρασιών, η φαρίνα με YT Μεγαλόπολης περιέχει μικρότερα ποσοστά ελευθέρως ασβέστου από την φαρίνα αναφοράς, ενώ η φαρίνα με YT Μελίτης μεγαλύτερα. Έτσι, λογικά προκύπτει ο δείκτης BC<sub>1</sub> μεγαλύτερος για την φαρίνα Μεγαλόπολης και μικρότερος για την φαρίνα Μελίτης. Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και από την θερμική βαρυτομετρική ανάλυση στο θερμοζυγό, όπου η φαρίνα Μεγαλόπολης εμφανίζει μικρότερα ποσοστά περιεκτικότητας σε CO<sub>2</sub> και CaCO<sub>3</sub> και χαμηλότερο θερμοκρασιακό peak από την φαρίνα αναφοράς και την φαρίνα Μελίτης.

Τα παραπάνω συμπεράσματα προκύπτουν και λογικά από το γεγονός ότι στις συνθέσεις φαρίνας που προέκυψαν (κεφ.2.2) η YT Μεγαλόπολης αντικαθιστά ένα ποσοστό του ασβεστόλιθου (σε σχέση με τη φαρίνα αναφοράς), ενώ για να επιτευχθεί το μέγιστο ποσοστό υποκατάστασης των πρώτων υλών από YT Μελίτης στην αντίστοιχη φαρίνα, έπρεπε το ποσοστό ασβεστόλιθου να αυξηθεί από 70% σε 75%.

Συνοψίζοντας, μπορεί να εξαχθεί το γενικό συμπέρασμα ότι η ασβεστόχος YT (Μεγαλόπολης) έδωσε καλύτερα αποτελέσματα ως συστατικό της φαρίνας σε σχέση με την αργιλοπυριτική YT (Μελίτης).

#### 2.4. Σύνθεση μιγμάτων τσιμέντου και προσδιορισμός θλιπτικών αντοχών και μελέτη ενυδάτωσης

Για την διερεύνηση της ποζολανικής δράσης των ΥΤ που μελετώνται στην παρούσα εργασία συντέθηκαν εννέα (9) μίγματα σύνθετων τσιμέντων. Τα μίγματα αυτά ήταν τρία για κάθε τέφρα (Μεγαλόπολης, Μελίτης και Πτολεμαΐδα) σε διαφορετικά ποσοστά υποκατάστασης (10%, 20% και 30%) στο τσιμέντο Portland CEMI 42,5N καθώς και ένα τσιμέντο αναφοράς το οποίο ήταν επίσης Portland CEMI 42,5N.

Για τα 10 τσιμέντα πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός θλιπτικών αντοχών και τα αποτελέσματα (τόσο σε απόλυτες, όσο και σε σχετικές τιμές, με βάση το δείγμα αναφοράς) φαίνονται στον πίνακα 5. Στο Σχήμα 1, τέλος, προκειμένου να ερμηνευθούν τα αποτελέσματα, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα ακτινοδιαγράμματα των παστών τσιμέντου αναφοράς, Μεγαλόπολης και Πτολεμαΐδας μετά την διακοπή της ενυδάτωσης τους στις 28 ημέρες.

Πίνακας 5. Έλεγχος αντοχών σύνθετων συστημάτων τσιμέντου σε απόλυτες τιμές (MPa) και σε σχέση με το τσιμέντο αναφοράς (100)

Σύνθετο μίγμα τσιμέντου	Ηλικία				
	1ημέρα	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες	90 ημέρες
Αναφορά	13,0 (100)	22,5 (100)	37,5 (100)	53,0 (100)	63,0 (100)
10% Μεγαλόπολη	7,9 (61)	16,5 (73)	29,9 (80)	49,4 (93)	58,2 (92,4)
20% Μεγαλόπολη	7,6 (58)	15,4 (68)	27,9 (74)	45,1 (85)	55,1 (87,5)
30% Μεγαλόπολη	6,9 (53)	14,3 (64)	25,2 (67)	42,1 (79)	52,5 (83,3)
10% Μελίτη	7,4 (57)	15,9 (71)	30,0 (80)	48,7 (92)	56,2 (89,2)
20% Μελίτη	7,4 (57)	14,6 (65)	29,3 (88)	48,3 (91)	56,9 (90,3)
30% Μελίτη	7,4 (57)	14,1 (63)	27,0 (72)	44,4 (84)	57,8 (91,7)
10% Πτολεμαΐδα	9,0 (69)	18,8 (84)	33,9 (90)	51,4 (97)	56,0 (88,9)
20% Πτολεμαΐδα	8,1 (62)	16,7 (74)	32,5 (87)	48,7 (92)	57,3 (90,1)
30% Πτολεμαΐδα	7,4 (57)	15,1 (67)	28,2 (75)	44,8 (85)	53,3 (84,6)

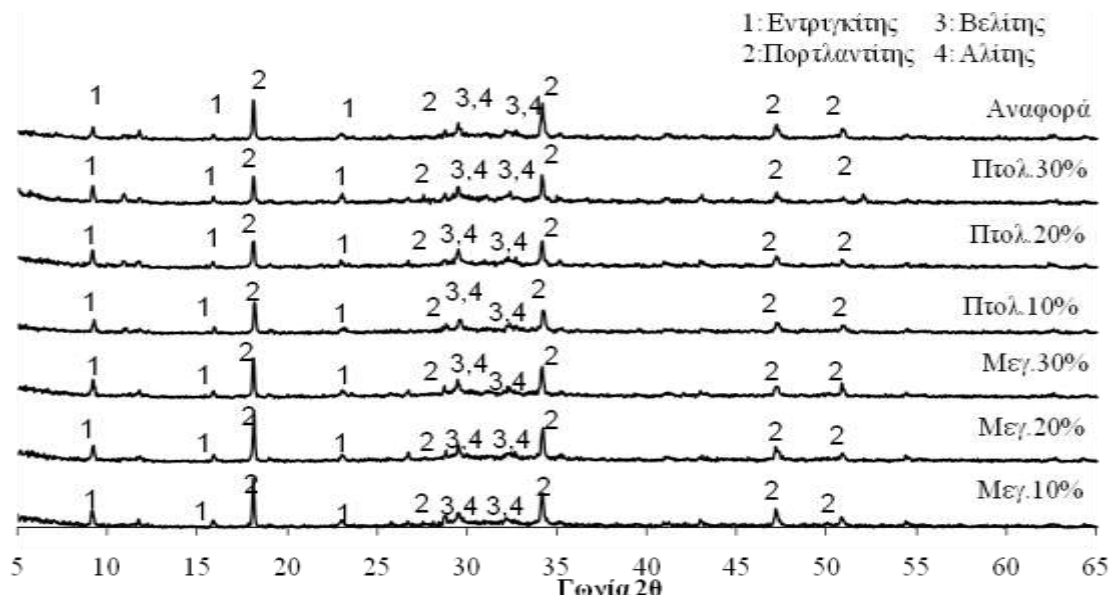
Αρχικώς από το σχήμα 1, όπου παρουσιάζονται τα ακτινοδιαγράμματα των παστών τσιμέντου των οποίων έχει διακοπεί η ενυδάτωση στις 28 ημέρες, πιστοποιείται ο σχηματισμός όλων των προβλεπόμενων φάσεων και μία σχεδόν ταύτιση των διαγραμμάτων των παστών με ΥΤ σε σχέση με αυτή του τσιμέντου αναφοράς.

Από την μελέτη των αποτελεσμάτων (πίνακας 5) προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα τόσο ως προς τις απόλυτες τιμές των αντοχών (και ιδίως στις ποσοστιαίες μονάδες που αυτές υπολειπόντουσαν των τσιμέντων αναφοράς) όσο και ως προς τον ρυθμό μεταβολής τους με τον χρόνο. Αναλυτικότερα προκύπτει ότι:

- Παρόλες τις μειωμένες τιμές αντοχών σε σχέση με το τσιμέντο αναφοράς, η αντικατάσταση (ακόμα και σε 30%) σχεδόν σε όλες τις ΥΤ οδήγησε σε τιμές αντοχών, στην ηλικία των 28 ημερών, μεγαλύτερες των 42,5N/mm<sup>2</sup> που είναι η ονομαστική αντοχή του τσιμέντου αναφοράς. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο ενθαρρυντικό συμπέρασμα ότι θα πρέπει να διερευνηθεί

περαιτέρω η δυνατότητα χρήσης YT για τσιμέντα κατηγορίας 32,5 και σε ειδικές περιπτώσεις εφαρμογής μειωμένων απαιτήσεων

- Η σταδιακή αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου με YT οδηγεί σε αναμενόμενη μείωση των αντοχών σε σχέση με το δείγμα αναφοράς στις μικρές ηλικίες (μέχρι και 28 ημέρες).
- Ως προς τον ρυθμό ανάπτυξης των αντοχών ενώ μέχρι την ηλικία των 28 ημερών παρατηρείται μία σχετική ποσοστιαία αύξηση σε όλα τα ποσοστά αντικατάστασης όλων των τεφρών, για το διάστημα 28-90 ημέρες παρατηρείται μία ανάσχεση της αύξησης που συνεχίζεται μόνο για τα μεγαλύτερα ποσοστά αντικατάστασης. Η παρατήρηση αυτή ερμηνεύεται σε συνδυασμό με το γεγονός ότι την καλύτερη συμπεριφορά στο διάστημα 28-90 ημερών δίνει η YT Μεγαλόπολης και θα πρέπει να αποδοθεί στο αναμενόμενο μεγαλύτερο ενεργό πυρίτιο της τέφρας αυτής στο οποίο αποδίδεται η βραδεία, ποζολανική αντίδραση.
- Έως τις 28 ημέρες παρατηρείται μία ελαφρά υπεροχή της τέφρας Πτολεμαΐδας και στα τρία ποσοστά αντικατάστασης χωρίς να υστερούν αισθητά και οι άλλες YT. Η εικόνα αυτή φαίνεται να αλλάζει σε μεγαλύτερες ηλικίες όπου με βάση τα μέχρι στιγμής αποτελέσματα αναμένεται σταδιακή υπεροχή της YT Μεγαλόπολης



Σχήμα 1. Ακτινοδιαγράμματα παστών τσιμέντου των οποίων έχει διακοπεί η ενυδάτωση στις 28 ημέρες

### 3. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Aggarwal P., Aggarwal Y., Gupta S.M., 2007, "Effect of bottom ash as replacement of fine aggregates in concrete", Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), Vol. 8, No. 1, pp.49-62
- Demirda A., Aslan A., 1999, "Evaluation of lignite combustion residues as cement additives", Cement and Concrete Research 29, pp.983-987



- Dincer A.R., Gunes Y., Karakaya N., Gunes E., 2007a, "Comparison of activated carbon and bottom ash for removal of reactive dye from aqueous solution", *Bioresource Technology* 98, pp.834-839
- Dincer A.R., Gunes Y., Karakaya N., 2007b, "Coal-based bottom ash (CBBA) waste material as adsorbent for removal of textile dyestuffs from aqueous solution", *Journal of Hazardous Materials* 141, pp.529-535
- Ecoba Working Group, 2007, Draft Report for High Calcium Ashes
- Junfeng S., Powell M. A., Hayden D. B., 2008, "Phosphorus Treated Coal Combustion Products (CCP-bottom ash) as an Agricultural Source of Phosphorus", *Earth Science Frontiers* 15(6), pp.112-117
- Sun W., Qu Y., Yu Q., Ni J., 2008, "Adsorption of organic pollutants from coking and papermaking wastewaters by bottom ash", *Journal of Hazardous Materials* 154, pp.595-601
- Topcu I.B., Kurama H., Karakurt C., 2007, "Utilization of Bottom Ash in Aerated Concrete Production", *Cement and Concrete World*, Vol. 12, No. 68, pp.56-65
- Yan J., Kirk D.W., Jia C.Q., Liu X., 2007, "Sorption of aqueous phosphorus onto bituminous and lignitous coal ashes", *Journal of Hazardous Materials* 148, pp.395-401
- [www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/cbabs1.htm](http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/cbabs1.htm)