

**4<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Πάτρα, Μάιος  
2003**

## **Υαλοθραύσμα και υαλοποιημένη ιπτάμενη τέφρα: δύο νέα συστατικά των δομικών υλικών**

**Α.Καραμπέρη, Α.Μουτσάτσου**

*Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ*

**Ε. Χανιωτάκης, Δ. Παπαγεωργίου**

*Τσιμέντα «Τιτάν» Α.Ε, Εργοστάσιο Καμαρίου*

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Υπό το πρίσμα της χρείας ανακύκλωσης των οικιακών και βιομηχανικών απορριμμάτων, η παρούσα μελέτη εστιάστηκε στην αξιοποίηση του λεπτοαλεσμένου υαλοθραύσματος σε προϊόντα τσιμέντου είτε ως κονία σε τσιμεντιτικά κονιάματα ή πάστες, είτε ως αδρανούς ή filler σε επιχρίσματα τσιμέντου. Ένας δεύτερος τομέας μελέτης ήταν η υαλοποίηση ενός βιομηχανικού παραπροϊόντος της Ιπτάμενης Τέφρας μετά την χρήση της ως απορρυπαντής βαρέων και τοξικών μετάλλων κατά την κατεργασία υγρών αποβλήτων. Από την πρώτη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων γίνεται φανερή η δυνατότητα της χρήσης της ως πρώτης ύλης για την κατασκευή υαλοκεραμικών.

### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η ανακύκλωση του υαλοθραύσματος καθίσταται όλο και πιο αναγκαία κυρίως εξαιτίας των Ευρωπαϊκών κανονισμών και τον καθορισμό των επιπέδων ανακύκλωσης των υλικών συσκευασίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του ανακυκλούμενου γυαλιού δεν πληρεί τις προδιαγραφές καθαρότητας για την επανάτηξή του στην υαλουργία και οι διατιθέμενες ποσότητες υαλοθραύσματος υπερβαίνουν τη ζήτηση. Το φαινόμενο αυτό θα επιδεινωθεί λόγω της προσαρμογής των ποσοστών ανακύκλωσης της Ελλάδας με τα Ευρωπαϊκά δεδομένα. Επομένως είναι φανερό ότι πρέπει να αναζητηθούν νέες εναλλακτικές μέθοδοι αξιοποίησης του έγχρωμου υαλοθραύσματος.

Μία από τις πιο σύγχρονες χρήσης του υαλοθραύσματος είναι η αξιοποίησή του στον τομέα των δομικών υλικών με πολλές εφαρμογές όπως ως αδρανούς στην άσφαλτο, διακοσμητικού αδρανούς, συνδετικού υλικού στα κεραμικά και τα τούβλα, αλλά και ως συστατικό των προϊόντων τσιμέντου[1]. Όσον αφορά την τελευταία εφαρμογή οι έρευνες κινήθηκαν στην χρήση του γυαλιού ως αδρανούς στο σκυρόδεμα, όμως τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά κυρίως λόγω της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης[2]. Παρόλα αυτά μετά από σειρά σύγχρονων μελετών αποδείχτηκε ότι ένας τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο είναι η χρήση λεπτοαλεσμένου υαλοθραύσματος σε βαθμό που να ενεργοποιείται η ποζολανική του δράση[3,4].

Βάση των παραπάνω παρατηρήσεων στην παρούσα μελέτη εκτιμήθηκε αρχικά η ποζολανική δράση του λεπτοαλεσμένου γυαλιού και στην συνέχεια έγινε μια συγκριτική μελέτη των τριών πιο κοινών χρωματισμών γυαλιού στην ελληνική αγορά σε κονιάματα και πάστες τσιμέντου.

Ένα νέο υλικό το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί όπως και το γυαλί ως υποκατάστατο του τσιμέντου είναι και το προϊόν που προκύπτει από την υαλοποίηση της ιπτάμενης τέφρας μετά την χρήση της ως απορρυπαντής βαρέων και τοξικών μετάλλων κατά την κατεργασία υγρών

αποβλήτων. Μετρήσεις της σκληρότητας, της πυκνότητας καθώς και εξέταση του υλικού με XRD, TG καταδεικνύουν ένα υλικό παρόμοιο με το γυαλί γεγονός που οδήγησε στην μελέτη της πιθανής αξιοποίησης του στο τσιμέντο[5]. Παρόλα αυτά διαφαίνεται ότι συστηματικότερη μελέτη των συνθηκών υαλοποίησης και των χρησιμοποιούμενων πρώτων υλών μπορεί να οδηγήσει στην παρασκευή προηγμένων υαλοκεραμικών[6].

Επιπρόσθετα, μελετήθηκε η χρήση του υαλοθραύσματος σε επιχρίσματα τοιχοποιίας ως αδρανούς ή ως filler και μετρήθηκαν οι ιδιότητες των νωπών επιχρισμάτων καθώς και η αντοχή τους σε κάμψη και θλίψη.

### **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**

Αρχικά εκτιμήθηκε η ποζολανική δράση των τριών κοινών χρωματισμών γυαλιού στην Ελληνική αγορά (καφέ, πράσινου, άσπρου) σύμφωνα με την μεθοδολογία Chapelle[7] και στην συνέχεια ετοιμάστηκαν κονιάματα τσιμέντου με αντικατάσταση του τσιμέντου από υαλόθραυσμα σε ποσοστό 25% και για τους τρεις χρωματισμούς αλλά και δοκίμα με πολυχρωματικό υαλόθραυσμα το οποίο περιείχε ίσα ποσοστά από κάθε χρωματισμό. Όμοια τέστ έγιναν και για την υαλοποιημένη ιπτάμενη τέφρα η οποία έχει προκύψει από θερμική κατέργασία στους 1450 °C για 2 ώρες με προσθήκη ανθρακικό νάτριο και διοξειδίου του πυριτίου σε αναλογίες ώστε να επιτευχθεί υαλοποίηση. Τα δοκίμια εξετάστηκαν με XRD (Siemens D5000 diffractometer, Cu K $\alpha$  radiation, Ni Filter), TG (Mettler TGA/SDTA851 $^{\circ}$ ), SEM(Philips XL30 ESEM). ώστε να εκτιμηθεί η ανάπτυξη των ενυδατωμένων φάσεων. Επιπλέον μετρήθηκε η αντοχή σε κάμψη των δοκιμίων (EN 196 Part I) το πορώδες των κονιαμάτων (Porosimeter 2000 Fisons Instruments)καθώς και η διαστολή λόγω της αλκαλοπυριτικής δράσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1260.

Στην συνέχεια ετοιμάστηκαν πάστες και κονιάματα τσιμέντου με αντικατάσταση του τσιμέντου από υαλόθραυσμα με κοκκομετρία μικρότερη από 90 $\mu$ m σε ποσοστά που κυμαίνονταν από 5-25% και για τους τρεις χρωματισμούς. Επιπρόσθετα προετοιμάστηκαν δοκίμια με 5% Ιπτάμενη τέφρα και 5% υαλόθραυσμα ώστε να εξακριβωθεί η πιθανή ενεργοποίηση του υαλοθραύσματος λόγω της παρουσίας της ΙΤ. Τα δοκίμια εξετάστηκαν με XRD, TG, SEM και επιπλέον στις πάστες τσιμέντου υπολογίστηκε το χημικά δεσμευμένο νερό[8] ώστε να μελετηθεί ο βαθμός ενυδατώσεως τους.

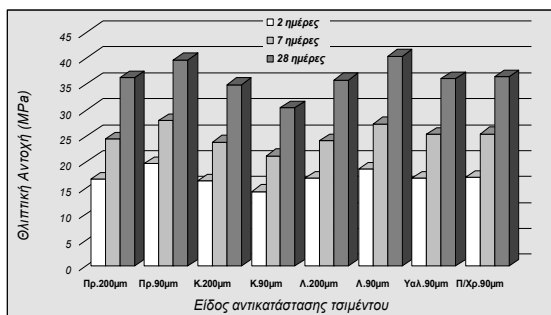
Όσον αφορά την εφαρμογή του γυαλιού στα επίχρισμα τοιχοποιίας, παρασκευάστηκε κοινό επίχρισμα από λευκό και φεό τσιμέντο με αντικατάσταση λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών αλλά και του φίλλερ από λευκό, καφέ και πράσινο υαλόθραυσμα σε αναλογίες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Σε αυτή τη σειρά δειγμάτων εκτός από μέτρηση των μηχανικών τους αντοχών εξετάστηκαν και οι ιδιότητες των νωπών κονιαμάτων και πιο συγκεκριμένα το συγκρατούμενο νερό (EN 1015-8), ο περιεχόμενος αέρας (EN 1015-7), το ειδικό βάρος (EN 1015-6) και η εξάπλωση (EN 1015-3).

### **ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

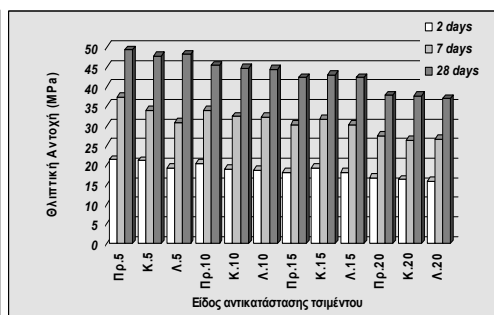
Από τα αποτελέσματα του τεστ Chapelle είναι φανερό ότι το λεπτοαλεσμένο υαλόθραυσμα είναι ποζολανικό υλικό, και ιδιαίτερα το πράσινο και το λευκό υαλόθραυσμα παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά από το καφέ υαλόθραυσμα και την υαλοποιημένη ιπτάμενη τέφρα. Το γεγονός αυτό πιστοποιείται και από τα αποτελέσματα των θλιπτικών αντοχών των κονιαμάτων με αντικατάσταση 25% με υαλόθραυσμα και επιπρόσθετα διαφαίνεται η υπεροχή του υαλοθραύσματος κάτω από τα 90 $\mu$ m (Διάγραμμα 1).

**Πίνακας 1:** Αποτελέσματα των αναλύσεων των επιχρισμάτων τοιχοποιίας

Σύνθεση επιχρίσματος (% κ.β.)		Άσπρο			Πράσινο			Καφέ		
Κωδικός σύνθεσης		GCFC	GCFE	GCFFi	GCGC	GCGF	GCGFi	GCAC	GCAF	GCAFi
Αδρανή	0.7-1.4mm	-	11	11	-	11	11	-	11	11
	0-0.7mm	57.5	-	57.5	57.5	-	57.5	57.5	-	57.5
Τσιμέντο		9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
Φύλλερ		13	13	-	13	13	-	13	13	-
Υδράσβεστος		9	9	9	9	9	9	9	9	9
Χημικά πρόσθετα		0.145	0.145	0.145	0.145	0.145	0.145	0.145	0.145	0.145
Υαλόθραυσμα 0.7-1,4mm		11	-	-	11	-	-	11	-	-
Υαλόθραυσμα 0-0.7mm		-	57.5	-	-	57.5	-	-	57.5	-
Υαλόθραυσμα		-	-	13	-	-	13	-	-	13
Απαιτούμενο νερό mL		495	505	505	495	505	500	490	510	500
Εξάπλωση cm		17.4	17.2	17.7	17.4	17.4	17.8	17.2	17.5	17.4
Συγκρατούμενο νερό %			86.5	89.82		84.65	88.64		86.06	86.14
Περιεχόμενος αέρας %		9.5	13.5	8.6	8.5	11	9	9.4	12	6.6
Ειδικό βάρος g/cm3		1.8	1.65	1.82	1.82	1.71	1.82	1.8	1.67	1.87
Θλιπτική αντοχή 7d (MPa)		0.6	0.7	0.9	0.9	0.9	0.6	0.9	0.6	0.9
Θλιπτική αντοχή 28d (MPa)		2.6	2.5	3.5	2.6	2.9	3.6	2.7	2.4	4.1
Θλιπτική αντοχή 90d (MPa)		2.9	3.6	3.8	2.7	3.8	4	2.7	2.7	4.7
Αντοχή σε κάμψη 7d (MPa)		0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4	0.6
Αντοχή σε κάμψη 28d (MPa)		1.1	1.3	1.5	1.1	1.3	1.5	1.1	1.2	1.6
Αντοχή σε κάμψη 90d (MPa)		1.1	1.1	1.6	0.9	1.4	1.5	0.9	1.3	1.7



**Διάγραμμα 1:** Θλιπτική Αντοχή των Κονιαμάτων (200, 90μm) για αντικατάσταση 25%



**Διάγραμμα 2:** Θλιπτική Αντοχή των κονιαμάτων για αντικαταστάσεις 5-20% (90μm).

Από την περαιτέρω μελέτη με των κονιαμάτων προκύπτει όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 2 ότι η μέγιστη αποδεκτή υποκατάσταση του τσιμέντου κυμαίνεται στο 15%.

Από την μελέτη των παστών συνεπάγονται όμοια αποτελέσματα. Άξια παρατήρησης είναι τα αποτελέσματα των παστών με μίγματα υαλοθραύσματος και ιπτάμενης τέφρας στα οποία παρουσιάζεται αύξηση των αντόχων σε σχέση με τα δοκίμια που περιέχουν μόνο υαλόθραυσμα. Το χημικά δεσμευμένο νερό των παστών αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου ενυδάτωσης και παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά για αντίστοιχες αντικαταστάσεις (Πίνακας 2).

**Πίνακας 2:** Αποτελέσματα του Χημικά Δεσμευμένου Νερού

Χημικά δεσμευμένο νερό (%)	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες
Πράσινο 5%	16.04094	17.58729	18.8583
Καφέ 5%	16.51574	17.08381	19.1265
Λευκό 5%	15.25535	17.40374	20.78833
Πράσινο 10%	19.22296	20.28238	22.36434
Καφέ 10%	19.0964	20.36352	22.36054
Λευκό 10%	18.68251	20.25376	22.14957
Πράσινο 5%+ΙΤΜεγαλόπολης 5%	19.27802	20.80193	22.32235
Καφέ 5%+ ΙΤΜεγαλόπολης 5%	19.46816	20.72055	22.22449
Λευκό 5%+ ΙΤΜεγαλόπολης 5%	19.55106	21.0818	22.31215

Ενθαρρυντικό είναι το γεγονός ότι σε όλες τις περιπτώσεις των κονιαμάτων με 25% αντικατάσταση τσιμέντου από υαλόθραυσμα (<90μm) δεν παρουσιάστηκε διαστολή λόγω της αλκαλοπυριτικής δράσης.

Η μελέτη της μικροδομής του υαλοθραύσματος υποδεικνύει ένα μικροπορώδες υλικό. Κατά την διάρκεια της ενυδάτωσης παρατηρείται μια μετακίνηση προς τους μικρότερους πόρους λόγω της δημιουργίας ενυδατωμένων φάσεων που συντελούν στην μείωση της πορώδους των δοκιμίων. Όλα τα δοκίμια έδειξαν παρόμοια συμπεριφορά η οποία διέφερε ελάχιστα από αυτή των δοκιμίων από αμιγές τσιμέντο.

Η χρήση του υαλοθραύσματος ως αδρανούς ή filler επέφερε ικανοποιητικά αποτελέσματα και ιδιαίτερα η χρήση του ως filler κατά την οποία παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση των αντοχών σε σχέση με τα επιχρίσματα με αμιγές τσιμέντο.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση του λεπτοαλεσμένου υαλοθραύσματος ως υποκαταστάτης του τσιμέντου μοιάζει εφικτή με μέγιστη αντικατάσταση μέχρι 15% παρουσιάζοντας υπεροχή το πράσινο και το λευκό υαλόθραυσμα. Ενθαρρυντικά παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της εφαρμογής του υαλοθραύσματος ως αδρανούς ή ως φίλλερ σε επιχρίσματα τοιχοποιίας με μόνο αρνητικό παράγοντα την μείωση της εργασιμότητας των νωπών επιχρισμάτων λόγω της παρουσίας του υαλοθραύσματος. Εν κατακλείδι, η αξιοποίηση του υαλοθραύσματος σε προϊόντα τσιμέντου μοιάζει εφικτή ιδιαίτερα για υλικά που προορίζονται για διακοσμητική χρήση.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Meyer, C., Egosi, N., Andela, C. Proc.Int.Symp. Recycling and Reuse of Glass Cullet, Dundee, (2001) p.179-188.
- [2] Polley, C., Cramer, S.M., and De la Cruz, R.V., J of Materials in Civil Engineering. **10**:201-211(1998)
- [3] Figg, J.W. Proc. Conf. Alkali-Aggregate reaction in concrete, Cape Town, South Africa, (1981).
- [4] Jin, W., Meyer, C., and Baxter, S., ACI Materials Journal. **97**: 208-213 (2000).
- [5] Moutsatsou, A., Chaniotakis, E., Papageorgiou, D., Karamberi, A. Int. Cong. Rec'2002, Geneva (2002)
- [6] Moutsatsou, A.K., Karamberi, A., Skotaras, J. Proc. Int. Symp. Recycling and Reuse of Glass Cullet, Dundee (2001) p.239-247
- [7] Largent, R. Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 93, Ref. 2143 (1978) p. 61-65
- [8] Zhang, M.Y., Sun, W., Yan, H.D.J Cement and Concrete Composites, **22**: 445-452 (2000).