

**Προϊόντα αλκαλικώς ενεργοποιημένης ιπτάμενης τέφρας  
με αδρανή υαλοθραύσματος**  
Products of alkali-activated calcareous fly ash and glass  
cullet

Ιωάννα ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΗ<sup>1</sup>, Σταυρούλα ΚΟΝΟΠΙΣΗ<sup>2</sup>, Φωτεινή ΚΕΣΙΚΙΔΟΥ<sup>3</sup>

Λέξεις κλειδιά: ιπτάμενη τέφρα, υαλόθραυσμα, αλκαλική  
ενεργοποίηση Keywords: fly ash, glass cullet, alkali-activation

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ** :Ο γεωπολυμερισμός αποτελεί έναν υποσχόμενο κλάδο της έρευνας που ασχολείται με τη χρήση στερεών αποβλήτων και παραπροϊόντων πλούσιων σε αργίλιο και πυρίτιο (όπως η ιπτάμενη τέφρα, το ανακυκλωμένο γυαλί κλπ), τα οποία μετατρέπει σε χρήσιμα προϊόντα μέσω της διαδικασίας της αλκαλικής ενεργοποίησης και της θέρμανσης. Η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο και προέρχεται από τον ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου. Παρασκευάστηκαν κονιάματα με βάση την ιπτάμενη τέφρα και με μερική αντικατάσταση της άμμου από αδρανή ανακυκλωμένου υαλοθραύσματος. Δοκίμια διαστάσεων (40x40x160 mm) ελέγχθηκαν πειραματικά ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους και με βάση τις καλύτερες συνθέσεις παρασκευάστηκαν πλακίδια διαστάσεων (200x200x25mm). Οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν στα πρισματικά δοκίμια περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό καμπτικής και θλιπτικής αντοχής, το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας και το πορώδες σε ηλικίες 7, 28 και 90 ημερών καθώς και τη μεταβολή όγκου για τις πρώτες 28 ημέρες. Έγινε επίσης παρατήρηση της μικροδομής με σαρωτικό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) σε ηλικία 28 ημερών. Τέλος, τα πλακίδια ελέγχθησαν σε σχέση με την αντίστασή τους σε τριβή, την αντοχή σε κρούση, την καμπτική αντοχή και τα φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά τους.

---

<sup>1</sup> Ομότιμη Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, [papayian@civil.auth.gr](mailto:papayian@civil.auth.gr)

<sup>2</sup> Χημικός MSc, Υποψήφια Διδάκτωρ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, [konopisi@civil.auth.gr](mailto:konopisi@civil.auth.gr)

<sup>3</sup> Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφια Διδάκτωρ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, [foteinkg@civil.auth.gr](mailto:foteinkg@civil.auth.gr)

**ABSTRACT** :Geopolymerisation comprises a promising field of research, which deals with the rich in aluminosilicates solid wastes and by-products (such as fly ash, recycled glass cullet), which are converted into useful products via alkaline activation process and heat curing. The fly ash used in this study is a calcareous one, which is the only type produced in Greece from the combustion of lignite. In this paper, mixtures of fly ash with glass cullet, deriving from windshields, are investigated and in particular, the mechanical characteristics and physical properties of colored mixtures that may be used for the manufacture of precast products. Four trial mixes were studied experimentally, by forming prismatic (40x40x160 mm) specimens and small slabs (200x200x25mm). The tests of the prismatic specimens include the determination of the compressive and flexural strength, the elastic properties and the porosity at 7-d, 28-d and 90-d age. Volume deformation measurements were also carried out at 28-d age. The mechanism of strength development was monitored by using SEM microscopy, X-ray diffractometer and FTIR spectroscopy. The small slabs were tested in relation to their resistance to abrasion, impact strength, flexural strength and physico-chemical properties.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα οφέλη από την αντικατάσταση μέρους του κλίνκερ τσιμέντου με συμπληρωματικά υλικά είναι ευρέως γνωστά για την προστασία της οικονομίας και του περιβάλλοντος (Glavind, Mathiesen, Nielsen, 2005) κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους των παραπροϊόντων, τα οποία συμπληρώνουν το κλίνκερ τσιμέντου που παράγεται από μια ενεργοβόρα διαδικασία (Duxson et al, 2007). Τις τελευταίες δεκαετίες, αναπτύχθηκε από τον Davidovits (1991) η ενεργοποίηση με αλκάλια φυσικών αργιλοπυριτικών υλικών παρασκευάζοντας προϊόντα με πολύ καλές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, τα γεωπολυμερή. Στη συνέχεια πολλοί ερευνητές παρουσίασαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της αλκαλικής ενεργοποίησης και σε τεχνητές κονίες όπως οι ιπτάμενες τέφρες και οι σκωρίες ακόμη και σε αυτές με υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο (Provis, van Deventer, 2013) (Provis, 2014) (Palomo et al, 2011) (Chindaprasirt et al, 2012). Τα γεωπολυμερή είναι ανόργανα πολυμερή υλικά και περιλαμβάνουν τη χημική αντίδραση οξειδίων αργιλίου-πυριτίου με αλκάλια που δίνουν πολυμερείς δεσμούς Si-O-Al (Davidovits, 1991). Τα τελικά προϊόντα αποκτούν πολύ καλές μηχανικές και φυσικοχημικές ιδιότητες που θα μπορούσαν να βρουν εφαρμογές στην κατασκευή.

Όπως είναι γνωστό, η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα στερεό παραπροϊόν που προέρχεται από την καύση του λιγνίτη. Χωρίζεται σε κατηγορία F - χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο και κατηγορία C - υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο σύμφωνα με το ASTM C618. Η κατηγορία C περιέχει συχνά οξείδια του αργιλίου και του πυριτίου, εκτός από άλλες ενώσεις, και παρουσιάζει τόσο ποζολανικές όσο και τσιμεντοειδείς ιδιότητες (Malhotra, 2002). Ειδικά από την καύση λιγνίτη, περιέχει συνήθως περισσότερο από 10% CaO, χαμηλότερη

περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου και αργιλίου, σε σύγκριση με αυτήν κατηγορίας F, αλλά περιέχει επίσης υψηλότερες ποσότητες θεικών αλάτων κυρίως με τη μορφή θεικού νατρίου (Malhotra, 2002).

Η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιείται σε αυτήν την έρευνα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ασβεστόχα ιπτάμενη τέφρα λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς της σε ασβέστιο και ελεύθερο ασβέστιο. Σκοπός αυτής της έρευνας ήταν να εξεταστεί η επάρκεια της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας και η πιθανή χρήση της, μέσω του μηχανισμού της αλκαλικής ενεργοποίησης, σε προκατασκευασμένα υλικά (Papaïanni, 2012). Η προσθήκη ανακυκλωμένου γυαλιού, που προέρχεται από παρμπρίζ, είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό που εξετάστηκε ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά και την αισθητική του αξία.. Τέλος, παράχθηκαν και ελέγχθηκαν πλακίδια σύμφωνα με τα σχετικά Ευρωπαϊκά Πρότυπα.

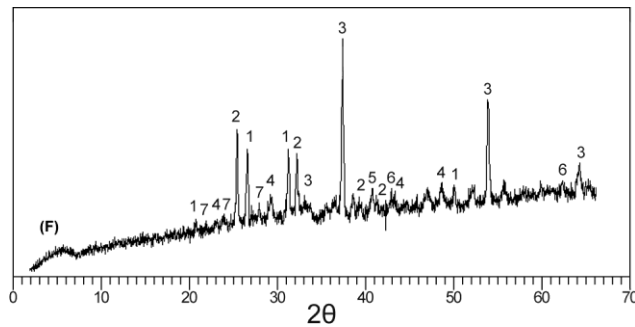
## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι εξής: Ιπτάμενη τέφρα (F) από τον ΑΗΣ Αγίου Δημητρίου στη βόρεια Ελλάδα, πρότυπη άμμος και ανακυκλωμένο γυαλί (G) που προέρχεται από παρμπρίζ αυτοκινήτων, υδροξείδιο του νατρίου, πυριτικό νάτριο, ρευστοποιητής, χρωστικές ουσίες και νερό. Η χημική σύνθεση της ιπτάμενης τέφρας (F) και του γυαλιού (G) που προσδιορίζονται με φασματομετρία ατομικής απορρόφησης, AAS, σύμφωνα με το πρότυπο EN 451-1, παρατίθενται στον πίνακα 1.

**Πίνακας 1.** Χημική ανάλυση ιπτάμενης τέφρας και υαλοθραύσματος

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	L.o.I.	CaO <sub>free</sub>
Fly ash (F)	27.23	13.30	36.38	5.35	3.55	7.48	0.27	0.84	5.56	11.10
Glass cullet (G)	73.53	0.79	10.12	0.90	3.58	0.50	9.57	0.22	0.29	-

Τα αποτελέσματα από τη χημική ανάλυση δείχνουν υψηλό ποσοστό CaO (ως σύνολο) και CaO<sub>free</sub> το οποίο ταξινομεί την ιπτάμενη τέφρα ως υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο, η οποία δεν πληροί τους υφιστάμενους κανονισμούς σχετικά με τις τέφρες κατηγορίας C (ASTM C618). Η ορυκτολογική ανάλυση της ιπτάμενης τέφρας με περίθλαση ακτίνων X (XRD) παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.



**Σχήμα 1:** XRD διάγραμμα of fly ash F; (1) quartz, (2) anhydrite, (3) lime, (4) calcite, (5) mullite, (6) periclase, (7) feldspars.

Από την κοκκομετρική ανάλυση του γυαλιού (Πίνακας 2), διαπιστώθηκε ότι υπήρξε μειωμένη ποσότητα λεπτού υλικού (μόνο το 26,51% βρέθηκε να είναι μικρότερο από 4 mm) το οποίο αντικαταστάθηκε από άμμο σε αναλογία (3/2) (μέρη γυαλιού / μέρη άμμου).

**Πίνακας 2.** Κοκκομετρική ανάλυση γυαλιού

Sieve (mm)	16.0	8.0	6.3	4.0	2.5	1.0	0.5	0.2	0.1	0.063	blind
Pass.(%)	100.0	99.76	97.11	20.15	3.25	1.65	0.91	0.37	0.14	0.04	0.00

Το διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου αναμίχθηκε πρώτα με διάλυμα πυριτικού νατρίου και νερό για την παρασκευή της υγρής φάσης (18% διάλυμα NaOH, 18% διάλυμα  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  και 64% νερό). Όλες οι συνθέσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

**Πίνακας 3.** Συνθέσεις

Composition constituents, by mass (Kg)						
Fresh M/re	Fly ash	Glass ag/tes	Sand	Alkaline solution	Pink Pig/nt	PI/zer
FA-W	1	-	3	0.78*	-	-
FA	1	-	3	0.80	-	-
FA <sub>100</sub> -G	1	1.8	1.2	0.50	-	0.01
FA <sub>90</sub> -G <sub>pink</sub>	0.9**	1.8	1.2	0.60	0.1	0.02

\* Μόνο νερό (W)

\*\* 10% της ιπτάμενης τέφρας αντικαταστάθηκε από χρωστική

Η αναλογία ιπτάμενης τέφρας/αδρανή ήταν 1:3. Στις συνθέσεις FA-W, FA ως αδρανή χρησιμοποιήθηκε μόνο άμμος. Στις συνθέσεις FA<sub>100</sub>-G, FA<sub>90</sub>-Grpink ένα μέρος των αδρανών αντικαταστάθηκε από αδρανή γυαλιού. Για την FA<sub>90</sub>-Grpink 10% της ιπτάμενης τέφρας αντικαταστάθηκε με χρωστική για την επίτευξη του επιθυμητού χρώματος. Η ποσότητα του αλκαλικού ενεργοποιητή προσδιορίστηκε με τη δοκιμή της τράπεζας εξάπλωσης για την επίτευξη της κατάλληλης εργασιμότητας (11±1 cm).

Παρασκευάστηκαν δοκίμια διαστάσεων (40x40x160) mm, τα οποία διατηρήθηκαν για 48 ώρες στους 65 °C και στη συνέχεια ξεκαλουπώθηκαν και συντηρήθηκαν σε θάλαμο με RH 95 ± 5% και 20 °C.

Τέλος, με βάση τη σύνθεση FA<sub>90</sub>-Grpink παρασκευάστηκαν πλακίδια διαστάσεων (200x200x25) mm και δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικές χρωστικές (tawny pink, cobalt blue and iron black).

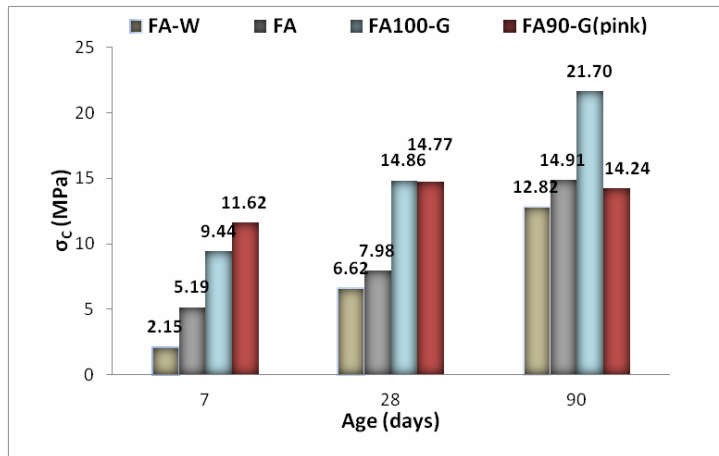


**Σχήμα 2:** Πλακίδια με χρωστικές

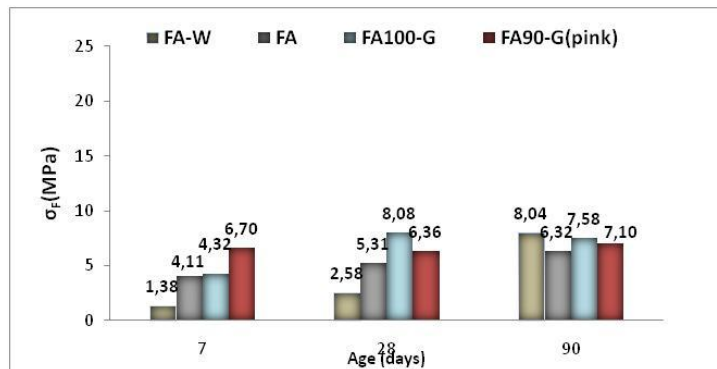
Έγινε προσδιορισμός των μηχανικών αντοχών (αντοχή σε κάμψη και θλίψη) των δοκιμίων στις 7, 28 και 90 ημέρες (EN 196-1). Επίσης, με βάση τη μέθοδο RILEM CPC 11.3 προσδιορίστηκε το ανοιχτό πορώδες των συνθέσεων. Η μεταβολή όγκου των δοκιμίων καταγράφηκε μέχρι και τις 28 ημέρες.

Επιπλέον, προσδιορίστηκε η καμπτική αντοχή των πλακιδίων στις 7,28 και 90 ημέρες σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1339. Μετρήθηκε επίσης η αντίσταση σε τριβή, σε κρούση, σε ψύξη-απόψυξη καθώς και η υδατοαπορροφητικότητα των συνθέσεων σύμφωνα με τον EN 1338.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων παρουσιάζονται στα Σχήματα 3 και 4.



Σχήμα 3. Θλιπτική αντοχή κονιαμάτων

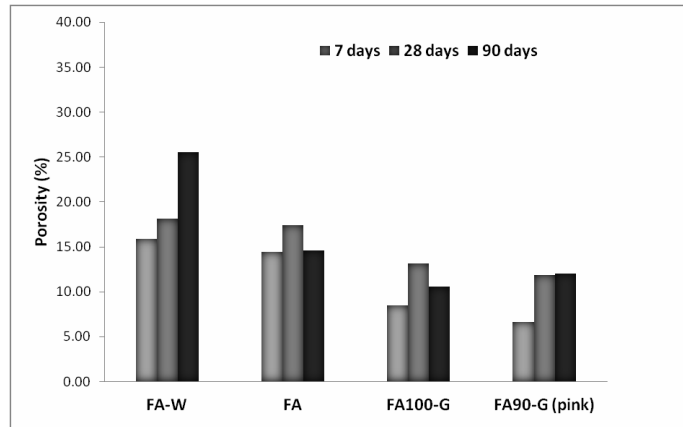


Σχήμα 4. Καμπτική αντοχή κονιαμάτων

Γενικά, παρατηρείται αύξηση της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής σε όλες τις συνθέσεις με το χρόνο. Η σύνθεση αναφοράς (χωρίς αλκαλική ενεργοποίηση) φτάνει τα 6.6 MPa στις 28 ημέρες. Η προσθήκη του αλκαλικού ενεργοποιητή και των αδρανών υαλοθραύσματος δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα, ειδικά στις πρώιμες αντοχές. Στην ηλικία των 28 ημερών οι συνθέσεις αγγίζουν τα 15 MPa μετά από έλεγχο σε θλίψη. Ομοίως, αύξηση της αντοχής παρουσιάζεται στον έλεγχο κάμψης (6-8MPa). Η αύξηση αυτή οφείλεται στην ενεργοποίηση της ιπτάμενης τέφρας και τη δημιουργία αργιλοπυριτικού τζελ (N-A-S-H) (Papayianni, 2012). Η σύνθεση FA<sub>100</sub>-G δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τη σύνθεση FA<sub>90</sub>Gpink στις 28 και 90 ημέρες, λόγω του ότι το 10% της ιπτάμενης

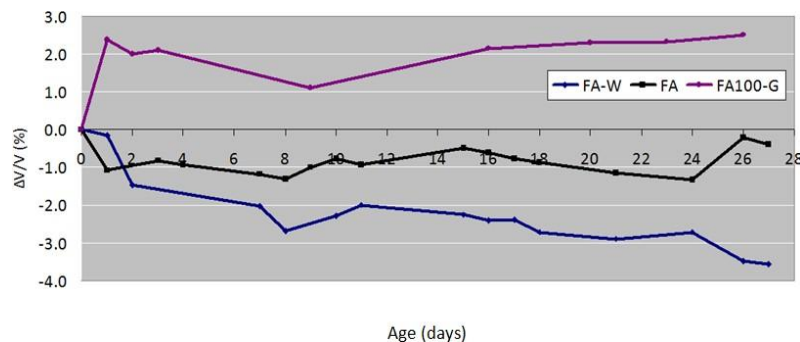
τέφρας αντικαταστάθηκε από χρωστική, περισσότερο υγρό και 2% ρευστοποιητή χρειάστηκαν για την επίτευξη της κατάλληλης εργασιμότητας.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5, παρατηρείται μείωση του πορώδους στις αλκαλικά ενεργοποιημένες συνθέσεις, με τη μεγαλύτερη διαφορά στις 90 ημέρες. Η προσθήκη των χρωστικών δεν φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα. Η μείωση αυτή του πορώδους ακολουθεί την ανάπτυξη των αντοχών για τις συνθέσεις με αλκαλικό διάλυμα.



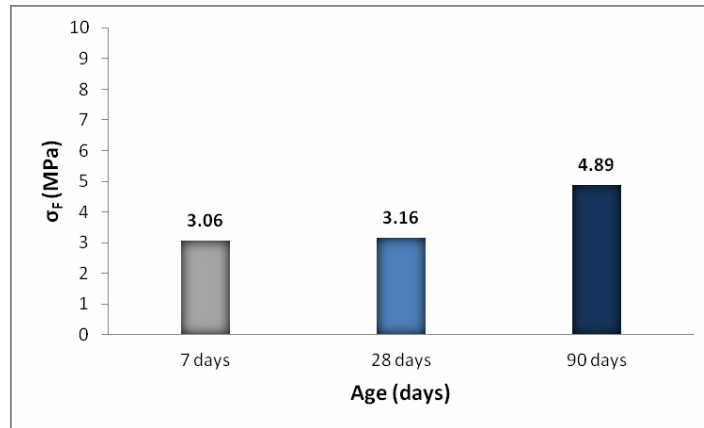
Σχήμα 5. Ανοιχτό πορώδες συνθέσεων

Τα δοκίμια χωρίς αλκαλικό διάλυμα και αυτά με αλκαλικό ενεργοποιητή και χωρίς αδρανή γυαλιού παρουσιάζουν μια μεταβολή όγκου που φαίνεται να σταθεροποιείται μετά τις 7 ημέρες. Αντίθετα, η σύνθεση με τον αλκαλικό ενεργοποιητή και το υαλόθραυσμα (FA<sub>100</sub>-G) σταθεροποιείται από την 3η ημέρα με την εμφάνιση ωστόσο διόγκωσης, πιθανόν λόγω της αλκαλιοπυριτικής αντίδρασης.



Σχήμα 6. Μεταβολή όγκου

Τρία πλακίδια ελέγχθηκαν σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1338 για τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής σε ηλικία 7, 28 και 90 ημερών. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 7. Στις 28 ημέρες η αντοχή αγγίζει τα 3.16 MPa (>2.9 MPa όριο κανονισμού).



Σχήμα 7. Καμπτική αντοχή πλακιδίων

Μια μεταλλική μπάλα 700g χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αντοχής σε κρούση. Δύο πλακίδια ελέγχθηκαν με την ίδια μέθοδο και έδωσαν το ίδιο αποτέλεσμα. Η μπάλα αφέθηκε να πέσει από διάφορα ύψη μέχρι να παρατηρηθεί ρηγμάτωση των πλακιδίων (EN 1338). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 4.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα αντοχής σε κρούση

Ύψος (cm)	10	20	30	40	50
Sample 1	-	-	-	-	fracture
Sample 2	-	-	-	-	fracture

Προσδιορίστηκε η υδατοαπορροφητικότητα δύο δοκιμίων σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1339. Μετά τη βύθιση των πλακιδίων σε νερό βρύσης για τουλάχιστον 3 ημέρες, τα δοκίμια ζυγίστηκαν και ξηράνθηκαν σε φούρνο στους  $105 \pm 5$  °C για τουλάχιστον 3 ημέρες. Έπειτα, ζυγίστηκαν ξανά και τα αποτελέσματά τους φαίνονται στον πίνακα 5.

Πίνακας 5. Αποτελέσματα ελέγχου υδατοαπορροφητικότητας

Weight (g)	After immersion	After drying	(%)
Sample 1	2112.56	1839.005	14.88
Sample 2	2127.635	1894.72	12.29



Και τα δύο πλακίδια ξεπέρασαν το 6% σε απορροφητικότητα, που είναι το όριο του κανονισμού. Η αντίσταση σε τριβή μετρήθηκε σύμφωνα με τον EN 1338, με τη χρήση οργάνου που περιέχει κορούνδιο σε διάμετρο F80 σύμφωνα με το ISO 8486-1. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 6 και οι απαιτήσεις του κανονισμού στον πίνακα 7.

**Πίνακας 6.** Αποτελέσματα ελέγχου αντίστασης σε τριβή

Sp/m en	Measurement of the groove (mm)			Mean value	Corr. result	Final mean value.
	Right	Middle	Left			
1a	19.1	18.8	17.9	18.6	18.9	19.9
1b	21.0	20.7	19.8	20.5	20.8	

**Πίνακας 7.** Όρια κανονισμού για αντίσταση σε τριβή

Class	Marking	
1	F	No performance measured
3	H	≤ 23 mm
4	I	≤ 20 mm

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η σύνθεση ανήκει στην κατηγορία 4 (19.9 mm < 20 mm όριο).

Για τους κύκλους ψύξης απόψυξης (EN 1338), ένα δοκίμιο ζυγίστηκε (2087.45 g) και τοποθετήθηκε σε θάλαμο για 6 εβδομάδες (περίπου 30 κύκλοι). Έπειτα, ζυγίστηκε ξανά (2027.96 g).

(L) η απώλεια μάζας ανά μονάδα επιφάνειας,  
(M) η μάζα του υλικού μετά τους 28 σε κιλά,  
(A) η επιφάνεια του δοκιμίου σε τετραγωνικά μέτρα  
Το αποτέλεσμα του τεστ δίνεται παρακάτω.

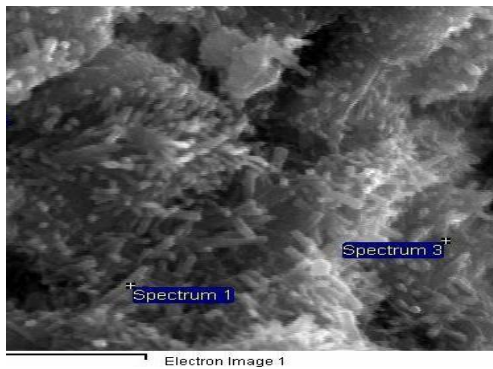
$$L = 0.059 / (4 * 10^{-4}) = 1.48 \text{ kg/m}^2 (> 0.5 \text{ Kg/m}^2)$$

Δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές μακροσκοπικά στην επιφάνεια του πλακιδίου, σε αντίθεση με το αποτέλεσμα του ελέγχου (Σχήμα 8).

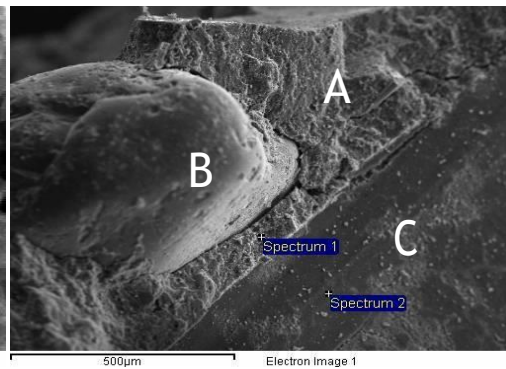


**Σχήμα 8.** Πλακίδιο πριν και μετά τους κύκλους ψύξης-απόψυξης

Στα Σχήματα 9 και 10 δίνονται οι εικόνες από το σαρωτικό μικροσκόπιο για τις συνθέσεις F-W και FA<sub>90</sub>-Gpink στις 28 ημέρες.



**Σχήμα 9.** Εικόνα SEM (F-W)



**Σχήμα 10.** Εικόνα SEM (FA<sub>90</sub>-Gpink)

Spectrum (F-W)	In stats.	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
Spectrum 1	Yes	0.72	10.38	9.99	16.16	17.21	0.40	43.84	2.76
Spectrum 3	Yes	0.59	8.63	9.51	19.07	13.48	0.65	46.37	1.72
Spectrum (FA <sub>90</sub> -Gpink)	In stats.	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
Spectrum 1	Yes	8.26	6.12	7.62	31.35	4.83	0.89	35.16	5.76
Spectrum 2	Yes	7.55	2.52	4.58	56.65	3.89	0.28	22.80	1.73

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 10, το τζελ της ιπτάμενης τέφρας (A) είναι η συνδετική κονία μεταξύ της άμμου (B) και των αδρανών του γυαλιού (C). Η διεπιφάνεια μεταξύ του τζελ και του κόκκου της άμμου παρουσιάζει μια χαλαρότητα με πιθανή την εμφάνιση ρωγμών. Αντίθετα, ανάμεσα στην ιπτάμενη τέφρα και το αδρανές του γυαλιού υπάρχει καλή συνάφεια. Η περιοχή C του γυαλιού περιέχει κυρίως πυρίτιο, ασβέστιο και νάτριο σε μικρότερη ποσότητα όπως φαίνεται στο Spectrum 2. Συγκριτικά με το Spectrum 1, είναι εμφανές ότι το γυαλί έχει υποστεί μια μερική διαλυτοποίηση του πυριτίου (Drosou, 2012). Τα ίδια στοιχεία βρέθηκαν περιμετρικά του τζελ της ιπτάμενης τέφρας (region A-Spectrum 1). Επιπλέον, τα ιόντα πυριτίου και νατρίου είναι διαθέσιμα και από τον αλκαλικό ενεργοποιητή. Ομοίως, ο λόγος Si/Ca (~0.9) του άμορφου τζελ φτάνει ένα υψηλότερο επίπεδο από τον λόγο Si/Ca (~0.4) της απλά ενυδατωμένης ιπτάμενης τέφρας, FA-W (Spectrum 1 and 3 in Figure 2). Τέλος, ο λόγος Na/Al, που στη σύνθεση FA-W είναι περίπου 0.1, στο άμορφο τζελ αυξάνει στο 1.01, κυρίως λόγω του διαθέσιμου νατρίου από το αλκαλικό διάλυμα.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο μηχανισμός της αλκαλικής ενεργοποίησης συμβάλλει στην ανάπτυξη των αντοχών και βελτιώνει τις πρώιμες αντοχές των συνθέσεων. Ωστόσο, η αύξηση της θλιπτικής αντοχής συνεχίζεται με την πάροδο του χρόνου λόγω του υδραυλικού χαρακτήρα της ιπτάμενης τέφρας ( $\text{CaO}_f$  11.1% w/w). Η προσθήκη αδρανών υαλοθραύσματος φαίνεται να έχει θετικό αποτέλεσμα στην αύξηση των αντοχών και στην αισθητική αξία του υλικού. Η αλκαλικώς ενεργοποιημένη ιπτάμενη τέφρα με αδρανή γυαλιού φτάνει τα 15 MPa στις 28 ημέρες, ενώ η σύνθεση με νερό τα 8 MPa. Η μεταβολή όγκου των συνθέσεων με αλκαλικό διάλυμα σταθεροποιείται έως τις 7 ημέρες και είναι μικρότερα του 3%.

Επιπλέον, τα πλακίδια που παράχθηκαν με βάση τη σύνθεση με αλκαλικό ενεργοποιητή και προσθήκη χρωστικής, ανέπτυξαν ικανοποιητική αντοχή σε κάμψη, κρούση και τριβή. Οι κύκλοι ψύξης απόψυξης φαίνεται να μην επηρεάζουν σημαντικά την επιφάνεια των δοκιμίων, ωστόσο η τιμή ήταν εκτός ορίου. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, μπορεί να εκτιμηθεί ότι προκατασκευασμένα προϊόντα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά μπορούν να παραχθούν με την αλκαλική ενεργοποίηση της ιπτάμενης τέφρας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Chindaprasirt P., De Silva P., Sagoe-Crentsil K. and Hanjitsuwan S., "Effect of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems", (2012) J. Mater. Sci. 47, 4876 - 4883.

- Davidovits J., "Inorganic polymeric new materials", (1991), *J. of Thermal Analysis* 37, 1633-1656.
- Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C. and van Deventer J.S.J., "The role of inorganic polymer technology in the development of "green concrete", (2007), *Cem. Concr. Res.* 37, 1590-1597.
- Drosou C.A., Aniktomati E. and Moutsatsou A.K., "Glass cullet: an effective or an inert by-product?" Utilization of industrial by-products in construction, 3rd Conf., Greece, 2012, Page(s): 153-164.
- Glavind M., Mathiesen D. and Nielsen C.V., "Sustainable concrete structures a win-win situation for industry and society", *Achieving Sustainability in Construction. Proc. of the Intern. Conf. on Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities*, Edited by Dhir, R.K., Dyer, T.D. & Newlands, M.D., Dundee, Scotland, Thomas Telford, (2005), 1-14.
- Malhotra V.M., Mehta P.K., "High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories", Marquardt Printing Ltd., Ottawa, Canada, (2002), 14-17.
- Palomo A., Garcia-Lodeiro I., Fernandez-Jimenez A. and Macphee D.E. "Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ", (2011), *Cem Concr Res* 41(9), 923-931.
- Papayianni I. and Konopissi S., "Study on Geopolymerization of High Lime Fly Ashes", *Concrete in the Low Carbon Era*, 8th Int. Conf., Dundee, UK, (2012), 519-533.
- Papayianni I. and Karkantelidou F., "Performance of Superplasticizers in mixed type binding systems", *Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete*, 9th CANMET/ACI Int. Conf., Seville, (2009)
- Provis J.L. and van Deventer J.S.J., "Alkali-activated materials: State-of-the-Art Report", RILEM TC 224-AAM, Springer/RILEM, (2013), Berlin.
- Provis J.L., "Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?", (2014), *Materials and Structures* 47, 11-25.