

# Πειραματική διερεύνηση της προσθήκης ανακυκλωμένου υαλοτρίμματος στην παραγωγή σύνθετων τσιμέντων

Παναγιώτα Κεχαγιά  
Μεταπτυχιακός Φοιτήτρια ΔΙΑ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ  
pankechagia@gmail.com, std131437@ac.eap.gr

Δρ. Πέτρος Τσακιρίδης  
Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.  
Μέλος ΣΕΠ ΔΙΑ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ  
ptsakiri@central.ntua.gr

*Περίληψη – Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση της δυνατότητας χρήσης του υαλοθραύσματος στην παραγωγή σύνθετων τσιμέντων με αντικατάσταση ποσοστού άλλων συστατικών του κλίνκερ. Πραγματοποιείται πειραματική αξιολόγηση για την προσθήκη του γυαλιού στο τσιμέντο και τη βιωσιμότητα του εγχειρήματος, αναφορικά με τις μηχανικές θλιπτικές αντοχές του τελικού προϊόντος. Οι πειραματικές διαδικασίες περιλαμβάνουν ανάλυση της φυσικής, χημικής και ορυκτολογικής σύστασης του τσιμέντου και του υαλοθραύσματος ως πρώτες ύλες, καθώς και τη διερεύνηση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων πέντε παραγόμενων δοκιμών τσιμεντοκονιάματος, με διαφορετικό ποσοστό μερικής αντικατάστασης τσιμέντου από υαλότριμμα το κάθε ένα. Τα τέσσερα υβριδικά δοκίμια περιέχουν 5, 10, 15 και 20% περιεκτικότητα σε υαλότριμμα ενώ παράγεται και ένα συμβατικό δοκίμιο αναφοράς σύμφωνα με το EN 196-1:2016.*

**Λέξεις-Κλειδιά:** Κοινό Τσιμέντο Portland, Κλίνκερ, Υαλόθραυσμα, Σταθερότητα όγκου, Λόγος νερού προς τσιμέντο, Ποζολανικότητα, Θλιπτική Αντοχή, Ευνδάτωση Τσιμέντου, Αλκαλοπυριτική Αντίδραση, Κοκκομετρία, Ποσοστό Αντικατάστασης.

## I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιομηχανία του γυαλιού παράγει ετησίως μεγάλες ποσότητες αποβλήτων που οδηγούνται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Το γυαλί ως υλικό είναι εξαιρετικά ανθεκτικό και μη βιοαποικοδομήσιμο, με αποτέλεσμα να καταλαμβάνει πολύ μεγάλες εκτάσεις για την απόρριψη του. Ταυτόχρονα όμως τα δύο αυτά χαρακτηριστικά το καθιστούν ως εξαιρετικό, ανακυκλώσιμο υλικό υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την ανακύκλωση του γυαλιού είναι πολλά αν και μετά τη διαλογή των γυάλινων αντικειμένων στα κέντρα διαλογής ανακυκλώσιμων υλικών (ΚΔΑΥ), προκύπτουν μεγάλες ποσότητες υαλοθραύσματος που δεν πληρούν τις ποιοτικές προδιαγραφές για σύντηξη και παραγωγή νέου γυαλιού (Hogland, 2002).

Η ανάγκη για περιβαλλοντική αξιοποίηση αυτών των ροών αποβλήτων στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας και της αειφόρου ανάπτυξης έχουν οδηγήσει την επιστημονική κοινότητα στην έρευνα της παραγωγής νέων σύνθετων υλικών με προσθήκη υαλοθραύσματος. Είναι γεγονός ότι διάφορα παραπροϊόντα και βιομηχανικά απόβλητα με υδραυλικές και ποζολανικές ιδιότητες παρόμοιες με του γυαλιού, όπως η σκωρία αλουμινίου, η ιπτάμενη τέφρα και τα υαλοκεραμικά, χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες σε διάφορα βιομηχανικά προϊόντα (Polley et al, 1998). Η ένταξη του υαλοθραύσματος στην παραγωγή δομικών υλικών είναι πολυσχιδής και ευρεία

με εφαρμογές όπως στην ασφάλτο, στα κεραμικά υλικά, στο τσιμέντο και στο σκυρόδεμα. Ερευνητές ήδη από τη δεκαετία του 1960 έχουν εξετάσει τη δυνατότητα χρήσης του υαλοθραύσματος στην παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου και του σκυροδέματος, όπως οι Schmidt and Saia το 1963.

Η προσθήκη του γυαλιού στην παραγωγική διαδικασία της βιομηχανίας του τσιμέντου θεωρείται καινοτόμα λύση. Το εγχείρημα απαιτεί ολοκληρωμένη αξιολόγηση της σύστασης του γυαλιού ως πρώτη ύλη με ποζολανικές ιδιότητες, τη συμπεριφορά όλων των συστατικών κατά την ανάμιξη τους και την τυχόν αλκαλοπυριτική αντίδραση που πρόκειται να αναπτυχθεί και τέλος την ικανοποιητική, από οικονομική και κοινωνική σκοπιά, διοχέτευση των νέων σύνθετων υλικών στην αγορά (Barros, et al., 2017).

Γενικά η βιομηχανία τσιμέντου είναι εξαιρετικά ενεργειακό λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται κατά την έψηση του κλίνκερ. Το κόστος για την επίτευξη αυτών των θερμοκρασιών αποτελεί σχεδόν το μισό κόστος της παραγωγής. Η κατανάλωση ενέργειας για την παγκόσμια παραγωγή του υλικού πρόκειται να αυξηθεί, καθώς αυξάνεται και η καταναλωτική ζήτηση (Madlool et al, 2011). Οι εκπομπές αέριων ρύπων και μάλιστα των αερίων του θερμοκηπίου είναι τεράστιες, με το ποσοστό της εκπομπής του CO<sub>2</sub> να κυμαίνεται γύρω στο 10% των συνολικών εκπομπών παγκοσμίως. Είναι σαφές ότι η παραγωγή τσιμέντου δεν είναι προανατολισμένη περιβαλλοντικά και επιβάλλεται η εύρεση λύσεων για τη μείωση της ποσότητας του κλίνκερ στο τσιμέντο. Η χρήση ποζολανικών υλικών όπως το γυαλί στο μίγμα τσιμέντου δύναται να μειώσει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> από 5 – 20% (Bosoaga et al, 2009).

## II. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ

### A. Πειραματικές Διαδικασίες

Το υαλότριμμα ήταν ανακυκλωμένο γυαλί με τυχαία χειροδιαλογή – δειγματοληψία βάσει προτύπου EN 932-1:1997 από ΚΔΑΥ από την Αττική, χωρίς διαχωρισμό χρώματος και ποιότητας. Στην εγχώρια αγορά κυκλοφορεί κατά κύριο λόγο γυαλί τεσσάρων χρωμάτων, το πράσινο, το καφέ, το μπλε και το λευκό. Αν και το χρώμα αποτελεί έναν καθοριστικό παράγοντα κατά την παραγωγή του γυαλιού, η χημική σύσταση παραμένει σχεδόν ίδια χωρίς σημαντικές διαφορές (Papadopoulos and Moutsatsou, 2003). Για αυτόν τον λόγο δεν γεννήθηκε η ανάγκη για ξεχωριστά ρεύματα ανά χρώμα στην πειραματική διαδικασία.

Το γυαλί υποβλήθηκε σε ξήρανση σε κλίβανο στη θερμοκρασία των 110°C για 24hr. Αφού ξηρανθηκε, οδηγήθηκε σε σφαιρόμυλο τύπου Bond για άλεση. Το τσιμέντο αναφοράς των πειραματικών διαδικασιών ήταν κοινό τσιμέντο Portland κατηγορίας CEM I - 52.5N, συσκευασμένο και πιστοποιημένο προϊόν και έφερε πάνω στην συσκευασία την ειδική σήμανση CE.

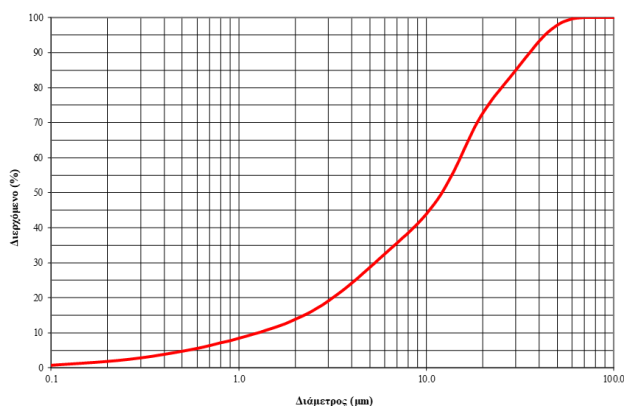
Προσδιορίστηκαν οι φυσικές ιδιότητες, η χημική και ορυκτολογική σύσταση των πρώτων υλών. Οι φυσικές ιδιότητες περιλαμβάνουν το ειδικό βάρος, που προσδιορίστηκε κατά το πρότυπο **ASTM C 188-95 (2003)** με την κυκλική διατομής φιάλη Le Chatelier και την ειδική επιφάνεια, η οποία προσδιορίστηκε κατά το πρότυπο **EN 196-6** και τη συσκευή αεροδιαπερατότητας Blaine. Στις φυσικές ιδιότητες του υαλοθραύσματος ανήκει και η κοκκομετρική ανάλυση του υλικού, η οποία προσδιορίστηκε κατά το πρότυπο **ISO 13320** με συσκευή σκέδασης ακτίνων laser μικρής γωνίας της εταιρείας Malvern, και συγκεκριμένα το μοντέλο Mastersizer 2000. Η χημική ανάλυση προσδιορίστηκε με τη μέθοδο φθορισμού ακτίνων X με το φασματόμετρο τύπου ED XRF Xeros της εταιρείας Spectro. Για το υαλόθραυσμα πραγματοποιήθηκε και προσδιορισμός των ιχνοστοιχείων του υαλοτρίμματος με τη μέθοδο της απορρόφησης μονοχρωματικής ακτινοβολίας (AAS) με φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης τύπου 4100 του οίκου PERKIN ELMER. Τέλος, η ορυκτολογική σύσταση του υαλοθραύσματος προσδιορίστηκε με την περίθλαση των ακτίνων X (μέθοδος X-ray diffraction – XRD) με περιθλασιόμετρο Bruker D8-Focus.

## B. Αποτελέσματα

### 1) Φυσικές ιδιότητες των πρώτων υλών:

Το ειδικό βάρος του κοινού τσιμέντου Portland CEM I - 52.5N προσδιορίστηκε ίσο με 3,14 g/cm<sup>3</sup> και η ειδική του επιφάνεια ίση με 3.550 cm<sup>2</sup>/g. Το υπό μελέτη υαλότριμμα παρουσίασε ειδικό βάρος 2,5 g/cm<sup>3</sup> και ειδική επιφάνεια 3.650 cm<sup>2</sup>/g. Συγκρίνοντας μεταξύ τους τις δύο πρώτες ύλες, παρατηρήθηκε ότι το τσιμέντο έχει μεγαλύτερο ειδικό βάρος, άρα είναι υλικό υψηλότερης πυκνότητας ενώ και τα δύο υλικά διαθέτουν παρόμοιες ειδικές επιφάνειες.

Η κοκκομετρική κατανομή του υαλοτρίμματος περιγράφεται σύμφωνα με την καμπύλη κατανομής, η οποία και εμφανίζεται στο διάγραμμα του **Σχήματος 1** που ακολουθεί:



**Σχήμα 1.** Κοκκομετρική κατανομή υαλοτρίμματος.

Η καμπύλη είναι αθροιστική και απεικονίζει τα διερχόμενα αδρανή με αποτέλεσμα το δείγμα να έχει ποσοστιαία μορφή. Το μέγεθος των κόκκων του υαλοτρίμματος κυμάνθηκε από 0,1 – 60µm περίπου. Το μέγιστο ποσοστό του υλικού, τουλάχιστον δηλαδή το 90%, είχε διάμετρο κόκκων από 35µm – 60µm.

### 2) Χημική ανάλυση των πρώτων υλών:

Από τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης με τη μέθοδο XRF, προέκυψε ότι το κύριο συστατικό του δείγματος του υαλοτρίμματος είναι το διοξείδιο του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>: 71,85% κ.β) αποδεικνύοντας την ποζολανική δράση του υλικού. Για το τσιμέντο προέκυψε κύριο συστατικό το οξείδιο του ασβεστίου (CaO: 62,83% κ.β). Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των πρώτων υλών παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1** που ακολουθεί:

**Πίνακας 1.** Χημική Ανάλυση Τσιμέντου και Ανακυκλωμένου Υαλοτρίμματος.

Οξείδια	Κοινό Τσιμέντο (wt%)	Recycled Glass (wt%)
SiO <sub>2</sub>	19.96	71.85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.45	2.08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.31	0.45
CaO	62.83	9.83
MgO	1.98	2.17
K <sub>2</sub> O	1.03	0.47
Na <sub>2</sub> O	0.25	12.59
SO <sub>3</sub>	3.35	0.05
TiO <sub>2</sub>	0.15	-
Free CaO	0.85	-
LOI	1.15	0,17

Η ανάλυση της περιεκτικότητας σε ιχνοστοιχεία για το δείγμα του υαλοτρίμματος εμφανίζεται στον **Πίνακα 2** που ακολουθεί:

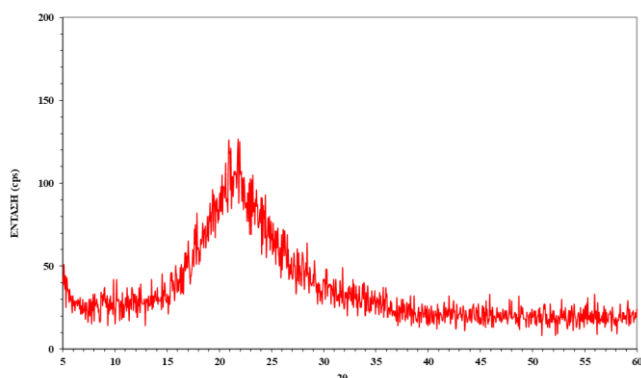
**Πίνακας 2.** Ανάλυση Ιχνοστοιχείων Υαλοτρίμματος

Ιχνοστοιχεία υαλοτρίμματος (mg/Kg)									
Ba	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Ti	Zr	Zn
352	12	985	48	82	62	183	73	107	47

Όπως φαίνεται από τις τιμές του **Πίνακα 2**, το δείγμα του υαλοτρίμματος περιέχει βαρέα μέταλλα σε υψηλές συγκεντρώσεις, κυρίως χαλκός, βάριο, μόλυβδος και ζirkόνιο.

Τα αποτελέσματα από την ορυκτολογική ανάλυση του δείγματος του υαλοτρίμματος με περίθλαση ακτίνων X (XRD), απεικονίζονται στο **Σχήμα 2**. Η έλλειψη εντάσεων – κορυφών επιβεβαίωσε την άμορφη δομή του γυαλιού, τη μη κρυσταλλικότητα του. Το πλέγμα της δομής του γυαλιού ήταν έντονα παραμορφωμένο και δεν

υπήρχαν προτιμητέοι προσανατολισμοί (peaks σε διαφορετικές γωνίες) λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε πυριτία (SiO<sub>2</sub>:71,85%w/w).



Σχήμα 2. Ορυκτολογική Ανάλυση Υαλοτρίμματος μέσω Περίθλασης Ακτίνων Χ (XRD).

Αυτό σημαίνει ότι οι κυψελίδες της πυριτίας δεν προσανατολιζόνταν με ένα δεδομένο τρόπο, όπως θα συνέβαινε στην περίπτωση ενός κρυσταλλικού υλικού, με συνέπεια να περιθλούν τις ακτίνες Χ προς όλες τις κατευθύνσεις. Με το δεδομένο της πειραματικής διαδικασίας XRD επιβεβαιώθηκε το γεγονός ότι η πρώτη ύλη του υαλοθραύσματος ήταν ένα άμορφο υλικό και λόγω αυτού αναμενόταν να δώσει ποζολανική αντίδραση στο αλκαλικό περιβάλλον που αναπτύσσεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου. Αν συνυπολογιστεί η χημική σύνθεση του υαλοτρίμματος, που το καθιστά ποζολανικό υλικό λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε πυριτία, με την άμορφη δομή του, τότε με ασφάλεια προέκυψε το συμπέρασμα ότι ενδείκνυται η χρήση του στη βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος (Σιδηροπούλου, 2015).

### III. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ & ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ

#### A. Πειραματικές Διαδικασίες

Παράχθηκαν τέσσερα δοκίμια με 5, 10, 15 και 20% περιεκτικότητα σε υαλότριμμα και ένα πέμπτο συμβατικό δοκίμιο αναφοράς χωρίς υαλότριμμα κατά το EN 196-1:2016. Η διάσταση των δύο ακμών των δοκιμίων πρέπει να είναι 40mm, η διάσταση του ύψους 160mm και να αποτελούνται από συγκεκριμένες ποσότητες τσιμέντου – άμμου – νερού. Για τις επιταγές της πειραματικής διαδικασίας, η ποσότητα νερού και άμμου παρέμεινε σταθερή σύμφωνα με την αντίστοιχη ποσότητα που προδιαγράφει το πρότυπο, ενώ η ποσότητα του τσιμέντου αντικαταστάθηκε από το υαλότριμμα. Σταθερός παρέμεινε και ο λόγος w/c και ίσος με 0,50. Μόλις το υλικό χύθηκε στα καλούπια, συμπυκνώθηκε και διαμορφώθηκε η τελική του επιφάνεια με μεταλλικό έλασμα. Τα δοκίμια εξήλθαν από τα καλούπια μετά την πάροδο 24hr. Τοποθετήθηκαν μέσα σε νερό σταθερής θερμοκρασίας στους 20oC με απόκλιση ±1 oC, από τις οποίες εξήλθαν 15min πριν υποβληθούν στη δοκιμή θλιπτικών αντοχών.

Για τα δοκίμια τσιμεντοκονιαμάτων προσδιορίστηκαν οι φυσικές και οι μηχανικές τους ιδιότητες. Αναφορικά με τα φυσικά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων,

προσδιορίστηκε η ειδική επιφάνεια κατά Blaine όπως και των πρώτων υλών. Επίσης πραγματοποιήθηκε μέτρηση του ειδικού βάρους των δοκιμίων με το πρότυπο ASTM C 188-95 (2003) και τη φιάλη Le Chatelier. Οι φυσικές ιδιότητες των κονιαμάτων που προσδιορίστηκαν, ήταν το νερό κανονικής πλαστικότητας και οι χρόνοι πήξης, αρχής και τέλους, κατά το πρότυπο EN 196-3:2016-TC μέσω δοκιμών διείσδυσης με συσκευή Vicat. Επίσης, φυσική ιδιότητα που βρέθηκε πειραματικά ήταν η σταθερότητα όγκου που πραγματοποιήθηκε βάσει του προτύπου EN 196-1:2016 με τη μέθοδο κατά Le Chatelier. Τέλος, οι μηχανικές ιδιότητες αφορούσαν στις θλιπτικές αντοχές των δοκιμίων βάσει του προτύπου EN 196-1:2016 με τη συσκευή προσδιορισμού θλιπτικών αντοχών τσιμέντου της εταιρείας Control, model Pilot Pro.

#### B. Αποτελέσματα

##### 1) Φυσικές ιδιότητες των δοκιμίων τσιμεντοκονιαμάτων:

Κάθε δοκίμιο παρουσίασε διαφορετικό ειδικό βάρος και ειδική επιφάνεια όπως παρουσιάζεται και στον πίνακα 3. Συγκεκριμένα όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του υαλοτρίμματος αυξάνεται η ειδική επιφάνεια, ενώ μειώνεται το ειδικό βάρος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το υαλότριμμα έχει μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια και μικρότερο ειδικό βάρος αντίστοιχα από το τσιμέντο.

Πίνακας 1. Σύσταση και φυσικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων τσιμεντοκονιαμάτων.

Sample	CEM I 52.5 (wt%)	Υαλότριμμα (wt%)	Specific Surface Area (cm <sup>2</sup> /g)	Specific Gravity (g/cm <sup>3</sup> )
CRef	100	0	3.550	3.14
C5	95	5	3.555	3.11
C10	90	10	3.560	3.07
C15	85	15	3.565	3.05
C20	80	20	3.570	3.01

Το νερό κανονικής πλαστικότητας και οι χρόνοι πήξης, αρχής και τέλους, παρουσιάζονται στον πίνακα 4. Το νερό κανονικής πλαστικότητας μειώθηκε με την αύξηση του υαλοτρίμματος. Αυτό οφείλεται στην ποζολανική δράση του υαλοτρίμματος καθώς απαιτείται μικρότερη ποσότητα νερού για να αποκτήσει το τσιμεντοκονίαμα στερεοποιημένη μορφή. Επίσης, το γυαλί έχει χαμηλή υδατοαπορροφητικότητα, άρα μειώνεται η απαίτηση του για νερό. Ταυτόχρονα, αυτό συνεπάγεται και αύξηση της εργασιμότητας του μίγματος (Kou and Poon, 2009). Λόγω της αυξημένης εργασιμότητας, παρατηρήθηκε και αύξηση των χρόνων πήξης, και της αρχής και του τέλους, καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα του υαλοτρίμματος. Η απαίτηση του νερού για την ενυδάτωση του τσιμέντου είναι μειωμένη, άρα η παρουσία του νερού στο μίγμα είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα οι χρόνοι πήξεως να αυξάνονται (Wang and Huang, 2010).

Η διόγκωση κατά Le Chatelier αυξήθηκε όσο μειωνόταν η περιεκτικότητα του τσιμέντου. Αυτό οφείλεται στην ποζολανικότητα του υαλοτρίμματος που ευνοεί την ανάπτυξη της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης που προκαλεί τα φαινόμενα διόγκωσης.

**Πίνακας 42.** Φυσικές ιδιότητες των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος.

Sample	Υαλότριμ. (wt%)	Νερό Καν. Πλαστικότητα (wt%)	Χρόνοι Πήξης (min)		Διόγκωση Le Chatelier (mm)
			Αρχή	Τέλος	
C <sub>Ref</sub>	-	27,7	150	200	0,8
C <sub>5</sub>	5	26,5	160	210	1,5
C <sub>10</sub>	10	26,3	165	215	2,0
C <sub>15</sub>	15	26,0	175	225	2,5
C <sub>20</sub>	20	25,8	180	235	2,5

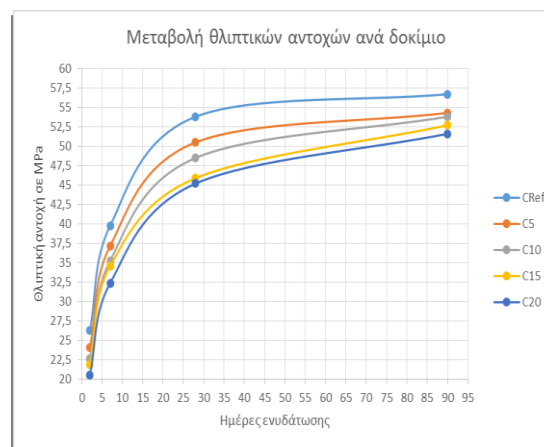
## 2) Μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος:

Οι μηχανικές ιδιότητες αφορούν στις θλιπτικές αντοχές των δοκιμών βάσει του προτύπου **EN 196-1:2016** με τη συσκευή προσδιορισμού θλιπτικών αντοχών τσιμέντου της εταιρείας Control, model Pilot Pro. Στον **πίνακα 5** παρουσιάζονται οι θλιπτικές αντοχές των δοκιμών στις 2, 7, 28 και 90 ημέρες ενυδάτωσης.

**Πίνακας 5.** Μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών τσιμεντοκονιάματος.

Ημέρες Ενυδάτωσης	Αντοχές σε Θλίψη (MPa)				
	C <sub>Ref</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>10</sub>	C <sub>15</sub>	C <sub>20</sub>
2	26,3	24,1	22,7	21,9	20,6
7	39,8	37,2	35,3	34,6	32,4
28	53,8	50,5	48,5	45,9	45,2
90	56,7	54,3	53,8	52,7	51,6

Παρατηρήθηκε πτώση των αντοχών όσο αυξάνεται η ποσότητα του υαλοτρίμματος. Στο **σχήμα 3** απεικονίζεται γραφικά η μεταβολή αυτή των αντοχών ανά δοκίμιο. Μάλιστα η διαφορά των αντοχών ήταν πιο έντονη στις 7 και 25 ημέρες, ενώ η αντοχή των 90 ημερών παρουσίασε συγκριτικά τη μικρότερη διαφορά μεταξύ των δοκιμών με υαλότριμμα και του δοκιμίου αναφοράς C<sub>Ref</sub>. Αυτό οφείλεται στην επιβράδυνση της ενυδάτωσης παρουσία υαλοτρίμματος, κάτι που παρατηρήθηκε και με τον προσδιορισμό του νερού κανονικής πλαστικότητας και των χρόνων πήξης. Το δοκίμιο C<sub>20</sub> θεωρήθηκε ακατάλληλο για την κατηγορία τσιμέντου C52,5 καθώς στις 90 ημέρες είχε χαμηλότερη αντοχή από τα 52,5MPa, ενώ το δοκίμιο C<sub>15</sub> ήταν οριακά αποδεκτό. Το **σχήμα 3** καταδεικνύει το ότι οι θλιπτικές αντοχές των C<sub>5</sub> και C<sub>10</sub> είναι σχετικά παρόμοιες με αυτές του δοκιμίου αναφοράς C<sub>Ref</sub>.



**Σχήμα 1.** Γραφική απεικόνιση της μεταβολής των αντοχών ανά δοκίμιο σε χαρακτηριστικές ημέρες ενυδάτωσης.

**Πίνακας 3.** Υπολογισμός δείκτη δραστηριότητας αντοχής για κάθε δοκίμιο με υαλότριμμα σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο ASTM C618-02.

Ημέρες Ενυδάτωσης	Αντοχές σε Θλίψη (MPa)			
	SAI <sub>C5</sub> (%)	SAI <sub>C10</sub> (%)	SAI <sub>C15</sub> (%)	SAI <sub>C20</sub> (%)
<b>2</b>	91,63	86,31	83,27	78,33
<b>7</b>	93,47	88,69	86,93	81,41
<b>28</b>	93,87	90,15	85,32	84,01
<b>90</b>	95,77	94,89	92,95	91,01

## IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα της μελέτης αποδεικνύουν την ασφαλή χρήση του λεπτόκοκκου υαλοτρίμματος ως πρόσμικτο στο τσιμέντο αντικαθιστώντας το σε περιεκτικότητα μέχρι 15%. Οι θλιπτικές αντοχές των δοκιμών με αντικατάσταση υαλοτρίμματος έως 10% είναι σχετικά παρόμοιες με αυτές του δοκιμίου αναφοράς C<sub>Ref</sub>. Παρατηρείται πτώση των αντοχών όσο αυξάνεται η ποσότητα του υαλοτρίμματος. Μάλιστα η διαφορά των αντοχών είναι πιο έντονη στις 7 και 25 ημέρες, ενώ η αντοχή των 90 ημερών παρουσιάζει συγκριτικά τη μικρότερη διαφορά μεταξύ των δοκιμών με υαλότριμμα και του δοκιμίου αναφοράς C<sub>Ref</sub>. Αυτό οφείλεται στην επιβράδυνση της ενυδάτωσης παρουσία υαλοτρίμματος, κάτι που παρατηρήθηκε και με τον προσδιορισμό του νερού κανονικής πλαστικότητας και των χρόνων πήξης. Το δοκίμιο C<sub>20</sub> θεωρείται ακατάλληλο για την κατηγορία τσιμέντου C52,5 καθώς στις 90 ημέρες έχει χαμηλότερη αντοχή από τα 52,5MPa, ενώ το δοκίμιο C<sub>15</sub> είναι οριακά αποδεκτό.

Με δεδομένο ότι η δυνατότητα της χρήσης του υαλοτρίμματος στο τσιμέντο εξυπηρετεί τις επιταγές της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης, μειώνοντας την κατανάλωση των φυσικών πόρων και της καταναλισκόμενης ενέργειας, επιβάλλεται ο καθορισμός προδιαγραφών, προτύπων και βέλτιστων διαθέσιμων τεχνικών για την παραγωγική διαδικασία και τη φυσικοχημική συμπεριφορά των νέων σύνθετων προϊόντων από τσιμέντο και υαλόθραυσμα.

Το γεγονός αυτό θα συμβάλει στην περαιτέρω έρευνα πρακτικών και μεθόδων, καθώς το γυαλί δύναται να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές δομικών υλικών και απαιτείται πρόσθετη διερεύνηση των οικονομικών και κοινωνικών παραγόντων για την υιοθέτηση αυτών των υλικών από την αγορά με τρόπο δυναμικό και βιώσιμο. Τέλος, περαιτέρω διερεύνηση απαιτείται για την πιθανή παραγωγή σύνθετων τσιμεντών με ταυτόχρονη χρήση ποζολανικών, βιομηχανικών παραπροϊόντων και την συνεργιστική δράση αυτών των υλικών στα μίγματα τσιμέντου.

#### ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ASTM C 188-95. (2002).** *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.* USA: ASTM International. DOI: 10.1520/C0188-95R03.
- Barros, J, Ferrara, L, Martinelli, E. (2017).** *Recent Advances on Green Concrete for Structural Purposes-The Contribution of the EU-FP7 Project EnCoRe.* Cham, Switzerland : Springer International Publishing AG, 2017. DOI 10.1007/978-3-319-56797-6.
- Bosoaga, A, Masek, O, Oakey, J, E. (2009).** CO2 Capture Technologies for Cement Industry. *Energy Procedia, 1, 133–140.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.egy-pro.2009.01.020>.
- BS EN 196-1. (2016).** *Methods of Testing Cement, Determination of Strength.* UK: British Standards Institution. ICS 91.100.10. ISBN 978-0-580-84580-2.
- BS EN 196-3-TC. (2016).** *Tracked Changes. Methods of Testing Cement. Determination of Setting Times and Soundness.* UK: British Standards Institution. ICS 91.100.10. ISBN 978-0-539-08576-1.
- BS EN 196-6-TC. (2018).** *Tracked Changes. Methods of Testing Cement. Determination of Fineness.* UK: British Standards Institution. ICS 91.100.10. ISBN 978-0-539-07244-0.
- BS EN 932-1. (1997).** *Tests for General Properties of Aggregates. Methods for Sampling.* UK: British Standards Institution. ICS 91.100.15. ISBN 978-0-580-26804-7.
- Hogland, W. (2002).** Remediation of an Old Landfill Site. *ESPR-Environmental Science and Pollution Research, 1, 49–54.* DOI: 10.1007/BF02987426.
- ISO 13320:2009. (2009).** *Particle Size Analysis — Laser Diffraction Methods.* Switzerland: International Organization for Standardization.
- Kou, S, Poon, C. (2009).** Properties of Self-Compacting Concrete Prepared with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates. *Cement and Concrete Composites, 3, 622-627.* DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005.
- Madloul, N, Saidur, R, Hossain, M, Rahim, N. (2011).** A Critical Review on Energy Use and Savings in the Cement Industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 2042–2060.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>.
- Papadopoulos, N, Moutsatsou, A. (2003).** Influence of Coloured Cullet during Production of Amber Glass. Part 1. Obtaining the Appropriate Colour and Physicochemical Characteristics. *GlassTechnology - European Journal of Glass Science and Technology Part A, 44, 123-127.*
- Polley, C, Cramer, S, Cruz R. (1998).** Potential for Using Waste Glass in Portland Cement Concrete. *J. Mater. Civ. Eng., 10, 210-219.* (ASCE)0899-1561(1998): (210).
- Schmidt, A, Saia, W.H.F. (1963).** Alkali – Aggregate Reaction Tests on Glass used for exposed Aggregate Wall Panel Work. *Journal of the American Concrete Institute, 60, 1235-1236.*
- Wang, H, Huang, W. (2010).** A Study on the Properties of Fresh Self-Consolidating
- Σιδηροπούλου, Α. (2015).** *Διπλωματική Εργασία: Μελέτη των Μηχανικών Ιδιοτήτων Σκυροδέματος με Διαφορετικής Ποιότητας Υαλόθραυσμα.* Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/43189>, <http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.5950/>.