

## ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ

**N. Νικολουτσόπουλος<sup>1,2,\*</sup>, A. Σωτηροπούλου<sup>2</sup>, Γ. Κακάλη<sup>1</sup>, Σ. Τσιβιλής<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

<sup>2</sup>Τμήμα Εκπαιδευτικών Πολιτικών Μηχανικών, ΑΣΠΑΙΤΕ, Νέο Ηράκλειο, Ελλάδα

(\*[nikolasnikoloutso@hotmail.com](mailto:nikolasnikoloutso@hotmail.com))

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ιπτάμενη τέφρα (IT) είναι ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με εγχώρια παραγωγή 9-10 εκατομμύρια τόνους ετησίως, όπου μόλις το 10% χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία τσιμέντου και έτοιμου σκυροδέματος. Η δυνατότητα εφαρμογής της τεχνολογίας του γεωπολυμερισμού σε ένα ευρύ φάσμα στερεών βιομηχανικών αποβλήτων και παραπροϊόντων αργιλοπυριτικής σύστασης, με στόχο την παραγωγή δομικών υλικών, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στην παρούσα ερευνητική εργασία παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο τρία γεωπολυμερικά σκυροδέματα (GC) με διαφορετική περιεκτικότητα σε IT. Ακόμη, για συγκριτικούς λόγους, παρασκευάστηκαν τρία κλασσικά σκυροδέματα (CC) με τσιμέντο Portland, κατάλληλης σύνθεσης και μηχανικών ιδιοτήτων για να γίνει άμεση σύγκριση της ανάπτυξης των αντοχών τους με τα GC. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν ότι το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα καλύπτει τα κριτήρια του ΚΤΣ-2016 και συμβαδίζει με τις απαιτήσεις του ΕΚΩΣ 2000.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκυρόδεμα είναι το πιο διαδεδομένο δομικό υλικό στην κατασκευή υποδομών όπως κτίρια, γέφυρες, αυτοκινητόδρομοι, φράγματα και πολλές άλλες κατασκευές. Η αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής του κοινού τσιμέντου Portland (OPC) για την κάλυψη των εξελίξεων στις υποδομές δείχνει ότι το σκυρόδεμα θα εξακολουθήσει να αποτελεί το πλέον συνηθισμένο υλικό κατασκευής στο μέλλον. Όμως, η παραγωγή τσιμέντου καταναλώνει πολλή ενέργεια και αυξάνει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Μια άλλη εναλλακτική λύση για να γίνει το σκυρόδεμα φιλικό προς το περιβάλλον είναι η ανάπτυξη του γεωπολυμερούς, που είναι ένα ανόργανο αργιλοπυριτικό υλικό, συντιθέμενο από ορυκτά ή παραπροϊόντα, όπως η ιπτάμενη τέφρα, πλούσια σε οξειδίο του πυριτίου και του αργιλίου<sup>[1]</sup>.

Η ιπτάμενη τέφρα (IT), η οποία είναι παραπροϊόν των μονάδων ηλεκτρικής ενέργειας της Δ.Ε.Η., περιέχει σχετικά υψηλό ποσοστό ελεύθερου ασβεστίου (CaO) και έχει κυμαινόμενη περιεκτικότητα θεικών. Οι επιπτώσεις της IT στο περιβάλλον είναι γνωστές, έτσι επιβάλλεται όχι μόνο η περισυλλογή της, αλλά και η αξιοποίηση της. Τα παραγόμενα από IT γεωπολυμερή επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος των σωματιδίων της, την μορφολογία τους και την παρουσία κρυσταλλικών φάσεων. Για την σύνθεση γεωπολυμερών με μεγάλη θλιπτική αντοχή ενδείκνυται ιπτάμενη τέφρα με μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκων σωματιδίων<sup>[2]</sup>. Έρευνες έχουν δείξει ότι το γεωπολυμερές που προέρχεται από την Ελληνική IT ικανοποιεί τις απαιτήσεις του EN 197-1 που περιγράφει τα κριτήρια για τα κλασσικά τσιμέντα<sup>[3]</sup>.

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η IT να ενταχθεί στη τεχνολογία σκυροδέματος όχι ως ορυκτό πρόσθετο, αλλά ως το αποκλειστικό συνδετικό υλικό (αντί του τσιμέντου) του σκυροδέματος. Ο στόχος αυτός μπορεί να επιτευχθεί μέσω της αλκαλικής ενεργοποίησης (γεωπολυμερισμός) της IT.

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο τρία γεωπολυμερικά σκυροδέματα (GC) με περιεκτικότητα σε IT 15%, 22.5% και 30% κατ' όγκο αντίστοιχα. Η επιλογή

της περιεκτικότητας έγινε σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές αναφορές της μέγιστης περιεκτικότητας OPC στο σκυρόδεμα<sup>[4]</sup>. Ακόμη, για συγκριτικούς λόγους, παρασκευάστηκαν τρία κλασικά σκυροδέματα (CC) με τσιμέντο Portland, κατάλληλης σύνθεσης και μηχανικών ιδιοτήτων για να γίνει άμεση σύγκριση της ανάπτυξης των αντοχών τους με τα GC.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τα GC και τα CC ήταν τα εξής:

- Ιπτάμενη τέφρα από τη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Δ.Ε.Η. στην Μεγαλόπολη, αλεσμένη σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο με μέσο μέγεθος κόκκων ( $d_{50}$ ) περίπου 20  $\mu\text{m}$
- Διάλυμα ενεργοποίησης που περιείχε NaOH και υδατικό αιώρημα πυριτίας<sup>[5]</sup>.
- Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε ήταν δύο διαφορετικών τύπων της Lafarge Holcim για την επίτευξη των απαιτούμενων μηχανικών ιδιοτήτων, το CEM II/B-M(P-W-L) 42,5N-Basis και το CEM II/B-M(W-L) 32.5R – Heracles
- Το νερό που χρησιμοποιήθηκε ήταν από το δίκτυο της ΕΥΔΑΠ
- Υπερρευστοποιητής Viscoflow-700 της Sika Hellas, όπου αυξάνει τη ρευστότητα του σκυροδέματος και διατηρεί την εργασιμότητα του.
- Ως αδρανή υλικά χρησιμοποιήθηκαν άμμος και γαρμπίλι μεγίστου κόκκου 12.5 mm, τα οποία καλύπτουν τις απαιτήσεις του ευρωπαϊκού προτύπου EN 12620, όπου παραπέμπει ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016 (ΚΤΣ-2016).

Σε όλα τα αναμίγματα των GC, σε συνέχεια σχετικής έρευνας<sup>[3]</sup>, επιλέχθηκε λόγος στερεό προς υγρό (S/L) 3.20, Si/Al 2.90 και R/Al 1.00. Εκτός από το απαιτούμενο νερό για την επίτευξη τους γεωπολυμερισμού, προστέθηκε νερό σύμφωνα με τις φυσικές ιδιότητες των αδρανών. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται αναλυτικά η μελέτη σύνθεσης όλων των GC για 1  $\text{m}^3$ . Η στήλη L/S, η οποία αφορά όλα τα υγρά και τα στερεά στοιχεία της κάθε σύνθεσης εκτός από τα αδρανή υλικά (άμμο και γαρμπίλι), επιλέχθηκε να παρουσιαστεί με αυτή τη μορφή για να είναι άμεσα συγκρίσιμη με το N/T των CC. Η μελέτη σύνθεσης όλων των CC για 1  $\text{m}^3$  παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

**Πίνακας 1.** Μελέτη σύνθεσης γεωπολυμερικού σκυροδέματος (GC) για 1  $\text{m}^3$ .

Κωδικός Σύνθεσης	Ιπτάμενη Τέφρα (kg)	Υδράλυος Νατρίου (kg)	Καυστικό Νάτριο (kg)	Νερό (kg)	L/S	Γαρμπίλι (kg)	Άμμος (kg)
GC.15	375.0	167.9	32.1	107.4	0.46	632.0	929.5
GC.22,5	562.5	251.9	48.2	95.8	0.36	490.3	721.2
GC.30	750.0	335.8	64.3	84.2	0.32	348.7	512.8

**Πίνακας 2.** Μελέτη σύνθεσης κλασικού σκυροδέματος (CC) για 1  $\text{m}^3$ .

Κωδικός Σύνθεσης	Τύπος Τσιμέντου	Τσιμέντο (kg)	Νερό (kg)	N/T	Γαρμπίλι (kg)	Άμμος (kg)	Viscoflow 700 (kg)
CC.32,5	CEM II/B-M(W-L) 32.5R	300.0	183.5	0.60	757.3	1111.1	1.20
A-CC.42,5	CEM II/B-M(P-W-L) 42.5N	300.0	177.5	0.58	763.1	1119.7	1.80
B-CC.42,5	CEM II/B-M(P-W-L) 42.5N	330.0	184.9	0.55	744.4	1092.3	1.65

Επιλέχθηκε όλα τα σκυροδέματα, GC και CC, να έχουν ίδια εργασιμότητα, κατηγορία F4 (κατά ΚΤΣ-2016), η οποία μετρήθηκε με τη μέθοδο του μέτρου εξάπλωσης (EN 12350-05) και εν συνεχεία την ίδια ικανότητα συμπίκνωσης. Στο Σχήμα 1 φαίνεται η εξάπλωση μιας σύνθεσης CC και μιας GC.

Παρασκευάστηκαν για όλες τις συνθέσεις κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm, τα οποία δοκιμάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη (EN 12390-3) σε ηλικίες 3, 7, 28, 90, 180 και 360 ημερών.

Επίσης, παρασκευάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 100x200 mm τα οποία καταπονήθηκαν στις 28 μέρες σε δοκιμή διάρρηξης (EN 12390-6), με τη βοήθεια της οποίας

μπορεί να υπολογιστεί η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000 (ΕΚΩΣ 2000).

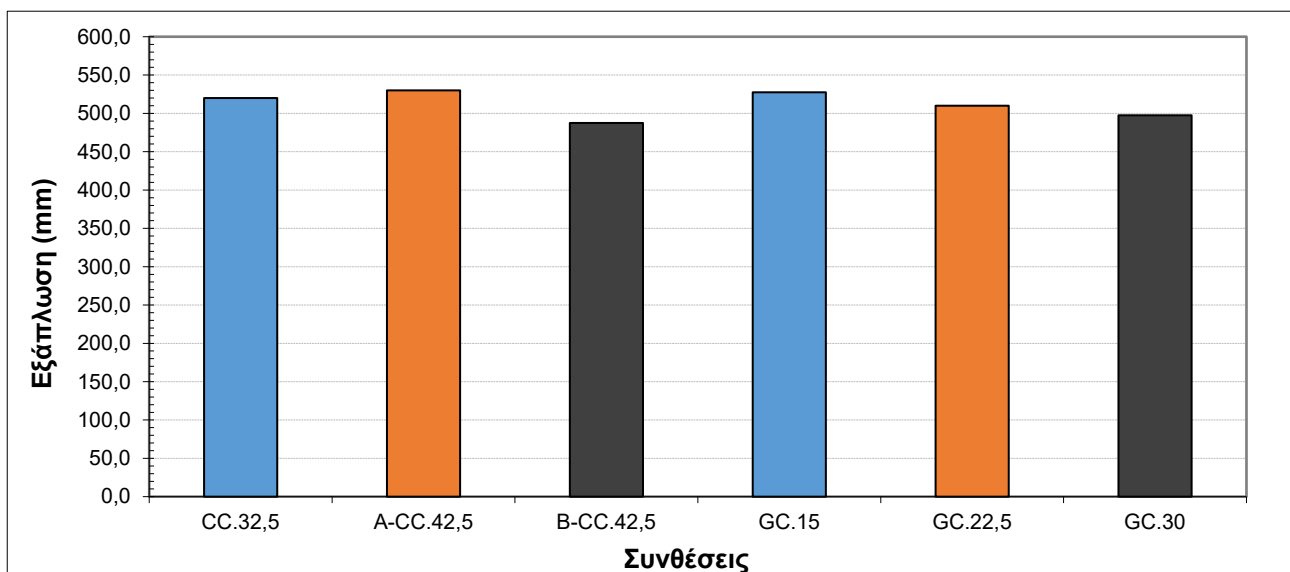
Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι τα δοκίμια GC ακολούθησαν την κλασική διαδικασία συντήρησης των γεωπολυμερών<sup>[6]</sup>, δηλαδή είχαν ένα αρχικό στάδιο θερμικής ωρίμανσης στους 70°C για 2 ημέρες και στη συνέχεια αφέθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου μέχρι την ηλικία δοκιμής τους, ενώ τα CC συντηρήθηκαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ΚΤΣ-2016 σε θερμοκρασία 20±2°C και υγρασία 95±5%.



**Σχήμα 1.** Δοκιμή εξάπλωσης στο κλασικό σκυρόδεμα CC (αριστερά) και στο γεωπολυμερικό σκυρόδεμα GC (δεξιά).

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

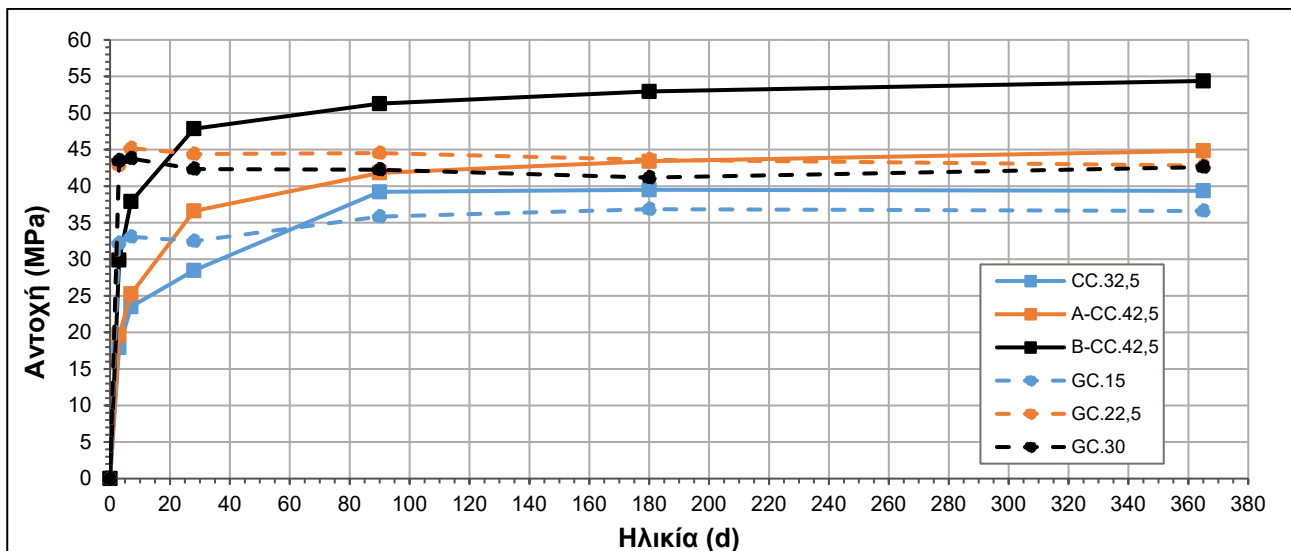
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το σκυρόδεμα τόσο στις συνθέσεις CC όσο και στις GC στη νωπή του κατάσταση επιλέχθηκε να είναι ίδιας εργασιμότητας και μάλιστα κατηγορίας F4. Στο Σχήμα 2 φαίνεται ότι επιτεύχθηκε αυτό, αφού τα όρια της κατηγορίας είναι μεταξύ 490 και 550 mm.



**Σχήμα 2.** Μέτρο εξάπλωσης των κλασικών (CC) και των γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μονοαξονικής θλίψης όλων των συνθέσεων, όπου φαίνεται η εξέλιξη της αντοχής τους μέχρι την ολοκλήρωση της ηλικίας του 1 έτους. Όπως

ήταν αναμενόμενο και συμφωνεί με τη βιβλιογραφία<sup>[4]</sup>, σε όλες τις συνθέσεις των κλασικών σκυροδεμάτων (CC) παρατηρείται μία αυξανόμενη αντοχή, έντονη μέχρι της 28 μέρες και πιο ήπια στη συνέχεια και η οποία δείχνει να σταθεροποιείται από τις 180 ημέρες και μετά. Όλες οι συνθέσεις των γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων (GC), όπως γίνεται αντιληπτό από το ίδιο σχήμα, αποκτούν τη μέγιστή τους αντοχή από την ηλικία των 3 ημερών τα GC.15 και GC.30 και των 7 ημερών το GC.22,5 και τη διατηρούν μέχρι την ηλικία των 360 ημερών με μία μικρή μέση τυπική απόκλιση της τάξης των  $\pm 2.0$  MPa και ένα μέσο συντελεστή μεταβλητότητας 4%.



**Σχήμα 3.** Ανάπτυξη αντοχής σε μονοαξονική θλίψη κλασικών (CC) και γεωπολυμερικών (GC) σκυροδεμάτων.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται για όλες τις συνθέσεις CC και GC η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του κυβικού δοκιμίου ( $f_{ck}$ ), η κατηγορία σκυροδέματος που ανήκει σύμφωνα με το αποτέλεσμα και με τον ΚΤΣ-2016, η μέση εκτιμώμενη εφελκυστική αντοχή του ( $f_{ctm}$ ) που υπολογίζεται έμμεσα από τα αποτελέσματα της θλιπτικής καταπόνησης σύμφωνα με τις εξισώσεις του ΕΚΩΣ 2000 και τέλος και πάλι η εκτιμώμενη εφελκυστική αντοχή του, όμως σύμφωνα με την κατηγορίας σκυροδέματος όπου ανήκει η κάθε σύνθεση. Όπως παρατηρείται στον πίνακα τα αποτελέσματα της εκτιμώμενης εφελκυστικής αντοχής των GC είναι πολύ κοντά στα αναμενόμενα θεωρητικά και πάντα λίγο υψηλά. Τα αποτελέσματα των CC επιβεβαιώνουν και αυτά με τη σειρά τους τον κανονισμό. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι για τα GC ως  $f_{ck}$  κύβου επιλέχθηκε η αντοχή στην ηλικία των 7 ημερών που σταθεροποιήθηκε η αντοχή σε όλες τις συνθέσεις, σε αντίθεση με των κανονισμό και με τα CC όπου αναφέρει την 28<sup>η</sup> μέρα.

**Πίνακας 3.** Εκτιμώμενη εφελκυστική αντοχή κλασικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος, υπολογισμένη σύμφωνα με τις εξισώσεις του ΕΚΩΣ 2000 από τη θλιπτική αντοχή.

Κωδικός Σύνθεσης	CC.32,5	A-CC.42,5	B-CC.42,5	GC.15	GC.22,5	GC.30
$f_{ck}$ Κύβου (MPa)	28.5	36.6	47.9	33.1	45.3	43.8
Κατηγορία κατά ΚΤΣ-2016	C20/25	C25/30	C35/45	C25/30	C35/45	C30/37
$f_{ctm}$ Εκτιμώμενη με $f_{ck}$ (MPa)	2.4	2.9	3.4	2.7	3.3	3.2
$f_{ctm}$ κατηγορίας κατά ΕΚΩΣ 2000 (MPa)	2.2	2.6	3.2	2.6	3.2	2.9

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται για όλες τις συνθέσεις CC και GC η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος όπως υπολογίστηκε με τον ΕΚΩΣ 2000 από το αποτέλεσμα της δοκιμής διάρρηξης κυλίνδρου, η κατηγορία σκυροδέματος που ανήκει η κάθε σύνθεση και τέλος τα μέγιστα και ελάχιστα όρια που θέτει ο ΕΚΩΣ για την αντίστοιχη κατηγορία. Όπως παρατηρείται, τα GC δείχνουν να ακολουθούν τα όρια του κανονισμού με μικρή εξαίρεση τη σύνθεση GC.22,5, όμως

και αυτή είναι πολύ οριακά κάτω από το κάτω όριο, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί τυχαίο με βάση τα υπόλοιπα αποτελέσματα και θα διερευνηθεί περαιτέρω. Τα CC επιβεβαιώνουν τον κανονισμό, αφού βρίσκονται εντός των ορίων.

**Πίνακας 4.** Πειραματική εφελκυστική αντοχή κλασσικού (CC) και γεωπολυμερικού (GC) σκυροδέματος από τη δοκιμή διάρρηξης κυλίνδρου σε σχέση με την αντίστοιχη του ΕΚΩΣ 2000.

Κωδικός Σύνθεσης	CC.32,5	A-CC.42,5	B-CC.42,5	GC.15	GC.22,5	GC.30
$f_{ct}$ Διάρρηξης κυλίνδρου (MPa)	1.9	2.9	3.7	2.4	2.0	2.3
Κατηγορία κατά ΚΤΣ-2016	C20/25	C25/30	C35/45	C25/30	C35/45	C30/37
Όρια $f_{ctm}$ κατηγορίας κατά ΕΚΩΣ 2000 (MPa)	1.5 - 2.9	1.8 - 3.3	2.2 - 4.2	1.8 - 3.3	2.2 - 4.2	2.0 - 3.8

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα της ιπτάμενης τέφρας αυξάνεται και η θλιπτική αντοχή των γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων (GC), αλλά μέχρι ένα ποσοστό, κάτι το οποίο ισχύει και στα κλασσικά σκυροδέματα (CC) με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Ακόμη, οι αντοχές σε θλίψη των GC φτάνουν κατά κανόνα στο μέγιστο από τις 3 μέρες, παραμένουν σταθερές ακόμα και μετά από 1 χρόνο και καλύπτουν τις απαιτήσεις του ΚΤΣ-2016. Τα CC έχουν μια σαφώς βραδύτερη ανάπτυξη αντοχών και αναπτύσσουν το μεγαλύτερο μέρος των αντοχών τους στις 28 ημέρες. Τέλος, η εφελκυστική αντοχή των GC δείχνει να μην επηρεάζεται σημαντικά από την περιεκτικότητα σε IT, κάτι που είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία ότι συμβαίνει και στα κλασσικά σκυροδέματα των αντίστοιχων κατηγοριών αντοχής, και συμβαδίζει με τις απαιτήσεις του ΕΚΩΣ 2000. Ως τελικό συμπέρασμα μπορεί να αναφερθεί ότι η ιπτάμενη τέφρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως το αποκλειστικό συνδετικό υλικό (αντί του τσιμέντου) για την παραγωγή γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τις εταιρείες ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Τ.Ε. για τον διεργαστηριακό έλεγχο, Sika Hellas Α.Β.Ε.Ε. για τη χορηγία του χημικού πρόσμικτου, Λατομεία Λαμίας Α.Β.Ε.Ε. για τη χορηγία των αδρανών υλικών, Lafarge Holcim L.T.D. για τη χορηγία των τσιμέντων και Titan Cement για τη χορηγία της ιπτάμενης τέφρας. Ευχαριστίες εκφράζονται ακόμη στους προπτυχιακούς σπουδαστές της Α.Σ.ΠΑΙ.Τ.Ε. του τμήματος Εκπαιδευτικών Πολιτικών Μηχανικών Μέμμου Ναταλία, Νιεζαμπιτόβσκι Μπαρτλομιέϊ, Σταυροπούλου Ευγενία και Τσολάκη Διονύσιο για την πολύτιμη βοήθεια τους στη διεκπεραίωση των πειραμάτων. Τέλος, εκφράζονται ευχαριστίες στον Ε.Λ.Κ.Ε. του Ε.Μ.Π. για τη χορήγηση υποτροφίας στον Ν. Νικολουτσόπουλο, Υποψήφιο Διδάκτορα στον Τομέα Ι της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ..

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] H. Shehab, A. Eisa, A. Wahba. Construction and Building Materials 126 (2016) 560-565.
- [2] Ν. Νικολουτσόπουλος, Α. Σωτηροπούλου, Γ. Κακάλη, Σ. Τσιβιλής. 18<sup>ο</sup> Παν. Συν. Σκυροδέματος (2018).
- [3] Ν. Nikoloutsopoulos, Α. Sotiropoulou, G. Kakali, S. Tsimilis. Mat. Today: Proc. 5 (2018) 27441–27445.
- [4] A. Neville. Properties of concrete, 5th Ed (2012).
- [5] Α. Ασπρογέρακας. Διδακτορική διατριβή (2003).
- [6] Κ. Komnitsas, D. Zaharaki, An. Vlachou, G. Bartzas, M. Galetakis. Adv Powder Technol 26 (2015) 368-374.