

**Επίδραση των Χημικών Προσμίκτων στο Χρόνο  
Πήξης, στην Εργασιμότητα και στη Θλιπτική Αντοχή  
Γεωπολυμερούς από Ιπτάμενη Τέφρα**  
The Effect of Chemical Admixtures on Setting Time,  
Workability and Compressive Strength of Fly Ash Based  
Geopolymers

Νικόλαος ΝΙΚΟΛΟΥΤΣΟΠΟΥΛΟΣ<sup>1</sup>, Αναστασία ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ<sup>2</sup>,  
Γλυκερία ΚΑΚΑΛΗ<sup>3</sup>, Σωτήριος ΤΣΙΒΙΛΗΣ<sup>4</sup>

*Λέξεις κλειδιά: Γεωπολυμερή, Ιπτάμενη Τέφρα, Χημικά Πρόσμικτα, Χρόνος Πήξης,  
Εργασιμότητα, Θλιπτική Αντοχή,  
Key words: Geopolymer, Fly Ash, Chemical Admixtures, Setting Time,  
Workability, Compressive Strength.*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Η Ιπτάμενη Τέφρα (ΙΤ) είναι παραπροϊόν που προέρχεται από την καύση λιγνίτη στους ηλεκτρικούς σταθμούς της ΔΕΗ, με εγχώρια ποσότητα παραγωγής 9-10 εκατομμύρια τόνους ετησίως, όπου μόλις το 10% χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία του τσιμέντου και του 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 έρευνα παρασκευάστηκαν γεωπολυμερή με βάση ΙΤ σε επιλεγμένους λόγους Στερεό/Υγρό (S/L) και χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά χημικά πρόσμικτα για σκυροδέματα και κονιάματα. Σε όλες τις συνθέσεις ελέγχθηκαν ο χρόνος πήξης, η εργασιμότητα και η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Από τις πειραματικές δοκιμές προέκυψε ο τρόπος επίδρασης των προσμίκτων στις ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου γεωπολυμερούς, ενώ ιδιαίτερης σημασίας είναι το συμπέρασμα ότι τα μελετηθέντα χημικά πρόσμικτα δεν λειτουργούν όλα όπως στο κλασσικό σκυροδέμα.

**ABSTRACT:** Intensive research has been focused on the exploitation of fly ash, which is the by-product of power plants. It is estimated that 9500000 t/y of fly ash are produced in Greece and only 10% of this amount is exploited in cement and concrete technology. An attractive way to manage the fly ash deposits is their use in geopolymer production. In this paper the effect of chemical admixtures on the main properties of fly ash based geopolymers is investigated. Four different admixtures were tested and the setting time, workability and compressive strength of the geopolymers were measured. The geopolymers showed satisfactory

---

<sup>1</sup> Υποψήφιος Διδάκτορ, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: [nikolasnikoloutso@hotmail.com](mailto:nikolasnikoloutso@hotmail.com)

<sup>2</sup> Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ανώτατη Σχολή Παιδαγωγικής και Τεχνολογικής Εκπαίδευσης, email: [sotiropoulou@aspete.gr](mailto:sotiropoulou@aspete.gr)

<sup>3</sup> Καθηγήτρια, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: [kakali@central.ntua.gr](mailto:kakali@central.ntua.gr)

<sup>4</sup> Καθηγητής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: [stsiv@central.ntua.gr](mailto:stsiv@central.ntua.gr)

mechanical and physical properties, while the contribution of each chemical admixture on the workability and compressive strength was evaluated.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιπτάμενη τέφρα (IT) είναι ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι αργιλοπυριτικής σύστασης με μικροποσότητες οξειδίων σιδήρου και ασβεστίου και μικρές συγκεντρώσεις Νατρίου (Na), Μαγνησίου (Mg), Φωσφόρου (P), Θείου (S), Καλίου (K), Τιτανίου (Ti), Στρόντιου (Sr) και Βάριου (Ba). Η χημική σύσταση της IT εξαρτάται από την αρχική σύσταση του στερεού καυσίμου. Η ορυκτολογική της σύσταση ωστόσο, εξαρτάται από το σχεδιασμό της μονάδας παραγωγής ισχύος και τον τρόπο και τις συνθήκες λειτουργίας της μονάδας. Για τον λόγο αυτό, η IT είναι ένα πολύ ετερογενές υλικό. Τα χαρακτηριστικά της διαφέρουν με βάση την μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, την πηγή του γαιάνθρακα και τις συνθήκες καύσης. Κύριες κρυσταλλικές φάσεις τις είναι ο χαλαζίας και ο μουλίτης ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό τους, που αγγίζει το 80% (w/w) βρίσκεται σε άμορφη φάση (μη κρυσταλλική).

Τα γεωπολυμερή υλικά, θεωρείται ότι αποτελούνται από τρισδιάστατες, πολυμερικές δομές που δημιουργούνται μέσω της πολυσυμπύκνωσης ολιγομερών του τύπου -Si-O-Al-O-, τα οποία αναπτύσσονται ευθύς αμέσως μόλις τα στερεά αργιλοπυριτικά υλικά αναμειχθούν με τις τρεις διαδοχικές φάσεις, την ισχυρά αλκαλική, την πυριτική και την υδατική φάση (Κακάλη Γ., 2013). Η ανάμειξη των δύο φάσεων, στερεής και υγρής, οδηγεί στο σχηματισμό ενός ιξώδους πολτού που μπορεί εύκολα να μορφοποιηθεί, προσδίνοντας στα τελικά προϊόντα το επιθυμητό σχήμα. Στη συνέχεια, τα μορφοποιημένα προϊόντα υφίστανται ωρίμανση σε θερμοκρασία, συνήθως, 50–90°C και μετατρέπονται σε συμπαγή, ανθεκτικά υλικά με εξαιρετικές φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες (Komnitsas K., 2015). Ο χρόνος της αντίδρασης του γεωπολυμερισμού είναι ιδιαίτερα μικρός και τα παραγόμενα υλικά είναι άμορφα ή ημι-κρυσταλλικά, ανάλογα με τις συνθήκες ωρίμανσης. Ο γεωπολυμερισμός χρησιμοποιεί ως δότες πυριτίου και αργιλίου αργιλοπυριτικά ορυκτά αργιλοπυριτικής σύστασης (Xu H., 2000).

Τα παραγόμενα από IT γεωπολυμερή επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος των σωματιδίων της, την μορφολογία της και την παρουσία κρυσταλλικών φάσεων. Για τη σύνθεση γεωπολυμερών με μεγάλη θλιπτική αντοχή ενδείκνυται IT με μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκων σωματιδίων (Παναγιωτοπούλου Χ., 2009). Τα εν λόγω γεωπολυμερή προορίζονται για χρήση σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Επίσης, η σφαιρική μορφολογία των κόκκων της IT είναι προτιμότερη για μίγματα γεωπολυμερών χαμηλής περιεκτικότητας σε νερό, λόγω της μεγαλύτερης εργασιμότητας του μίγματος.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη επίδρασης των χημικών προσμίκτων στο χρόνο πήξης, στην εργασιμότητα και στην θλιπτική αντοχή

γεωπολυμερούς από ΙΤ. Ευρύτερος στόχος της έρευνας είναι η ΙΤ 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 ΙΤ.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στα πλαίσια της έρευνας, παρασκευάστηκαν γεωπολυμερή με βάση την ΙΤ σε λόγους Στερεό/Υγρό (S/L) 3.0 και 3.2 με προσθήκη διάφορων χημικών προσμίκτων. Η μάζα των στερεών (S) αποτελείται από τη μάζα της ΙΤ και τη μάζα των διαλελυμένων στερεών του διαλύματος ενεργοποίησης, ενώ η μάζα των υγρών (L) είναι η μάζα του νερού που περιέχεται στο διάλυμα ενεργοποίησης. Στην παρούσα εργασία η αλλαγή του λόγου S/L οφειλόταν αποκλειστικά και μόνο στην προσθήκη ή αφαίρεση ορισμένης ποσότητας νερού. Οι λόγοι S/L που επιλέχθηκαν βασίστηκαν σε προηγούμενη έρευνα, όπου έδειξε ότι η αύξηση του λόγου S/L δεν φαίνεται να επηρεάζει ιδιαίτερα την αντοχή σε θλίψη των γεωπολυμερών και οδηγεί σε σημαντική μείωση του μέτρου εξάπλωσης, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται, όχι πάντως σημαντικά, ο χρόνος αρχής και τέλους πήξης (Νικολουτσόπουλος Ν., 2017).

Τα χημικά πρόσμικτα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τέσσερα (4), σε τρεις διαφορετικές δοσολογίες και προορίζονται για τσιμεντοειδή. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν αυτά είναι γιατί δεν παράγονται ακόμα χημικά πρόσμικτα για γεωπολυμερή. Το ποσοστό χρήσης του κάθε χημικού πρόσμικτου επιλέχθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του τεχνικού του φυλλαδίου που το συνοδεύει, όπου όμως αντί για κ.β. τσιμέντου έγινε χρήση κ.β. ΙΤ. Για κάθε χημικό πρόσμικτο επιλέχθηκε το μέγιστο, το ελάχιστο και ένα ενδιάμεσο ποσοστό.

### Υλικά

Η ΙΤ που χρησιμοποιήθηκε για τη σύνθεση των γεωπολυμερών προέρχεται από τη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Δ.Ε.Η. στην Μεγαλόπολη. Η χημική σύσταση της δίνεται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1.** Χημική σύσταση ιπτάμενης τέφρας (% κ.β)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	SO <sub>3</sub>	L.O.I.
48.28	22.06	6.45	15.12	2.5	1.37	0.68	2.99

Για να επιτευχθεί ο γεωπολυμερισμός, θα πρέπει η κοκκομετρία της ΙΤ να είναι μικρή, κάτω από το 0.063 mm, για να μπορέσει να διεισδύσει το διάλυμα ενεργοποίησης στον πυρήνα του υλικού. Η ΙΤ αλέστηκε σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο pilot plant και το μέσο μέγεθος κόκκων (d<sub>50</sub>) ήταν περίπου 15 μm.

Τα διαλύματα ενεργοποίησης όλων των συνθέσεων περιέχουν NaOH και υδατικό αιώρημα πυριτίας και παρασκευάστηκε με βάση υδρύαλο νατρίου και καυστικού

νατρίου. Στο διάλυμα προστίθεται νερό, το οποίο επηρεάζει το λόγο S/L, ο οποίος είναι μια σημαντική παράμετρος της σύνθεσης (Ασπρογέρακας Α., 2013).

Τα χημικά πρόσμικτα που χρησιμοποιήθηκαν, τα οποία προστέθηκαν στο διάλυμα ενεργοποίησης λίγο πριν την ανάμιξη με την ΙΤ, έχουν διαφορετικές ιδιότητες, είναι της εταιρείας Sika Hellas και είναι τα εξής:

- Υπερρυστοποιητής με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM), ο οποίος εφαρμόζεται σε σκυροδέματα με μειωμένο λόγο W/C, για αυξημένη ρευστότητα και αυξημένο χρόνο εργασιμότητας.
- Επιταχυντής πήξης Sigunit L-22E (SG), ο οποίος επιταχύνει την πήξη και προκαλεί ταχεία ανάπτυξη των αντοχών.
- Σταθεροποιητής ενυδάτωσης με επιβράδυνση Sikatard-930 (ST), όπου σταθεροποιεί τα μίγματα για μεγάλες χρονικές περιόδους.
- Υπερρυστοποιητής Viscoflow-700 (VF), όπου αυξάνει τη ρευστότητα του σκυροδέματος και διατηρεί την εργασιμότητα του.

### Σύνθεση Γεωπολυμερών

Η σύνθεση των μελετηθέντων γεωπολυμερών δίνεται στον Πίνακα 2. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα ποσοστά προσθήκης του κάθε χημικού πρόσμικτου και για τους δύο λόγους S/L. Τα γεωπολυμερή όλων των συνθέσεων παρασκευάστηκαν με λόγο πυρίτιο/αργίλιο Si/Al=2.40 και λόγο αλκαλίων/αργίλιο R/Al=0.85 (Panagiotopoulou C., 2015). Η σύνθεση τους περιλαμβάνει μηχανική ανάδευση της ΙΤ και του διαλύματος ενεργοποίησης, μεταφορά του μείγματος σε κυβικές μήτρες ακμής 50 mm, όπου παρέμεινε για 24 ώρες. Η ωρίμανση των δοκιμίων μέχρι τη συμπλήρωση των 28 ημερών έγινε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η κλασσική διαδικασία συντήρησης των γεωπολυμερών περιλαμβάνει ένα αρχικό στάδιο θερμικής ωρίμανσης, στους 50-90°C για 2-3 ημέρες (Παναγιωτοπούλου Χ., 2009). Επιλέχθηκε η διαδικασία ωρίμανσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για να είναι τα αποτελέσματα συγκρίσιμα με τα τσιμεντοειδή.

**Πίνακας 2.** Συνθέσεις Γεωπολυμερών

Λόγος S/L	Ιπτάμενη Τέφρα (g)	Υδρύαλος Νατρίου (g)	Καυστικό Νάτριο (g)	Νερό (g)
3.0	500.0	252.3	45.4	52.8
3.2	500.0	252.3	45.4	39.6

**Πίνακας 3.** Ποσοστό προσθήκης χημικών πρόσμικτων

Χημικό Πρόσμικτο	Ποσοστά Προσθήκης (%)			
Plastimet-15 (PM)	0	0.3	0.5	0.8
Sigunit L-22E (SG)	0	2.0	4.0	6.0
Sikatard-930 (ST)	0	0.5	1.0	2.0
Viscoflow-700 (VF)	0	0.7	1.5	2.5

## Εργαστηριακές Δοκιμές

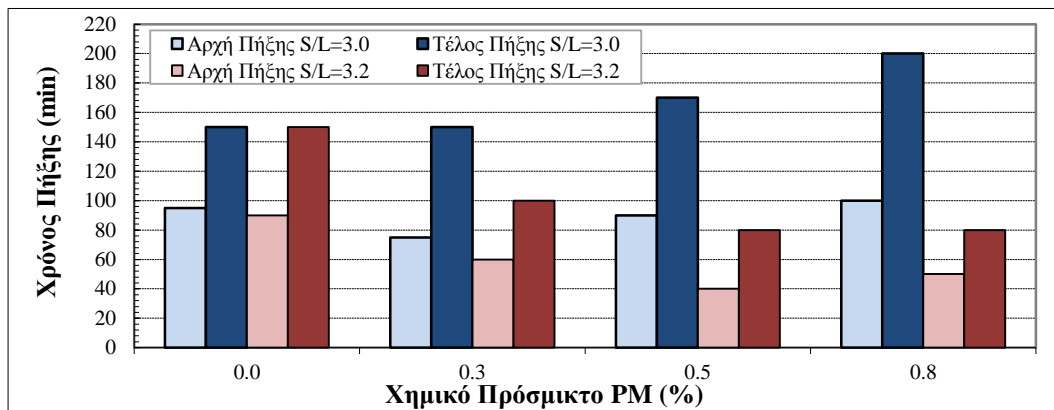
Σε όλες τις παραπάνω συνθέσεις μετρήθηκε ο χρόνος πήξης με τη συσκευή Vicat, σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-3, το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των τσιμεντών. Μετρήθηκε η εργασιμότητα με τη μέθοδο της τράπεζας εξάπλωσης, όπως περιγράφεται στο πρότυπο ASTM C 1437, το οποίο χρησιμοποιείται για τσιμεντοκονιάματα. Η χύτευση του γεωπολυμερούς έγινε σε κυβικές μήτρες ακμής 50 mm, όπου τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν καταπονήθηκαν στην ηλικία των 28 ημερών, όπως γίνονται στα τσιμεντοειδή, σε μονοαξονική θλίψη με ρυθμό φόρτισης 1.5 KN/sec, ακολουθώντας τις οδηγίες του προτύπου EN 196-1.

Όλα τα παραπάνω πρότυπα επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις δοκιμές που γίνονται στα τσιμεντοειδή, αφού απώτερος σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η πλήρης αντικατάσταση του τσιμεντοπολλτού στο σκυρόδεμα με το γεωπολυμερές.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### Χρόνος Πήξης

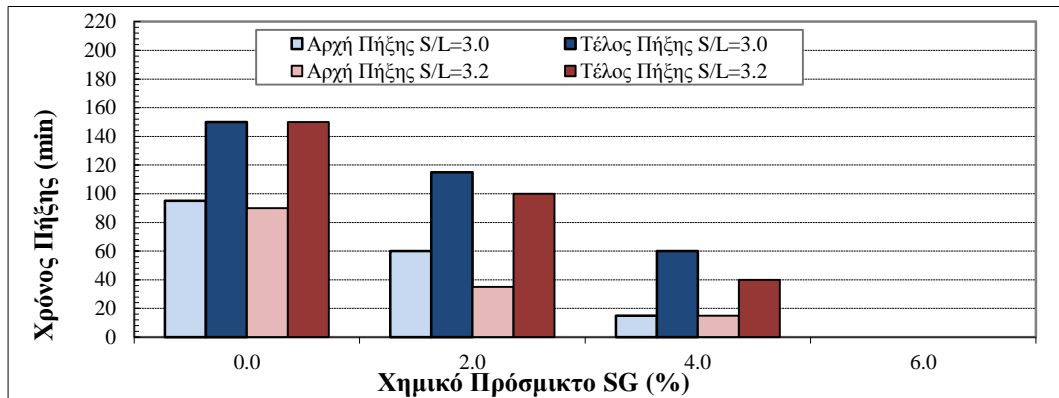
Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται οι χρόνοι αρχής και τέλους πήξης με προσθήκη χημικού PM σε όλα τα ποσοστά. Παρατηρείται στο S/L=3.0 ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό αυξάνεται και ο χρόνος πήξης, τόσο της αρχής όσο και του τέλους. Αυτό είναι φυσιολογικό, αφού το συγκεκριμένο πρόσμικτο είναι υπερρευστοποιητής με επιβράδυνση. Στο λόγο S/L=3.2 συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή όσο αυξάνεται το ποσοστό, μειώνεται ο χρόνος πήξης.



**Σχήμα 1.** Χρόνος Πήξης (αρχή και τέλος) γεωπολυμερούς σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη υπερρευστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM)

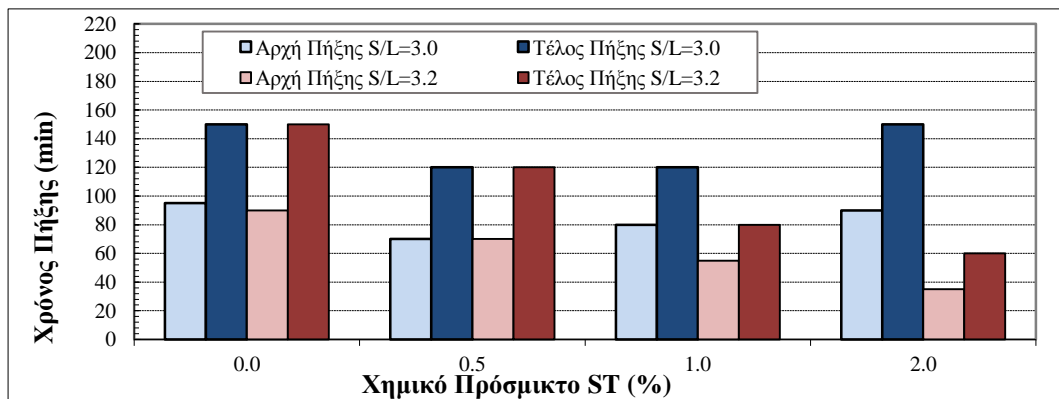
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, που παρουσιάζονται οι χρόνοι πήξης συνθέσεων με προσθήκη του επιταχυντή ταχείας πήξης SG, το πρόσμικτο δείχνει να λειτουργεί σωστά και στους δύο λόγους S/L. Όσο δηλαδή αυξάνεται το ποσοστό προσθήκης,

τόσο μειώνεται ο χρόνος αρχής και τέλους πήξης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο μέγιστο προτεινόμενο ποσοστό (6.0%) το μίγμα έπηξε στο μίξερ κατά την ανάδευση.



**Σχήμα 2.** Χρόνος Πήξης (αρχή και τέλος) γεωπολυμερούς σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη επιταχυντή πήξης Sigunit L-22E (SG).

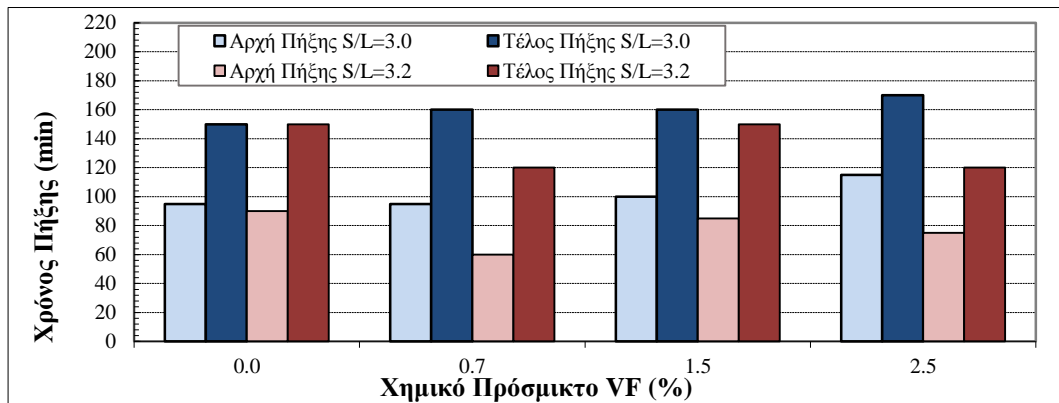
Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι χρόνοι αρχής και τέλους πήξης με προσθήκη χημικού ST σε όλα τα ποσοστά. Η χρήση του πρόσμικτου αυτού δείχνει μία ακανόνιστη συμπεριφορά στο 3.0 και μία διαφορετική από την αναμενόμενη συμπεριφορά στο 3.2, αφού είναι σταθεροποιητής ενυδάτωσης με επιβράδυνση.



**Σχήμα 3.** Χρόνος Πήξης (αρχή και τέλος) γεωπολυμερούς σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση Sikatard-930 (ST) .

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4, το χημικό VF, δείχνει να επηρεάζει μόνο την περίπτωση του S/L=3.2, αλλά όχι σημαντικά, ιδιαίτερα στα μεγάλα ποσοστά. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι το γεωπολυμερές σε αυτό το λόγο είναι πολύ

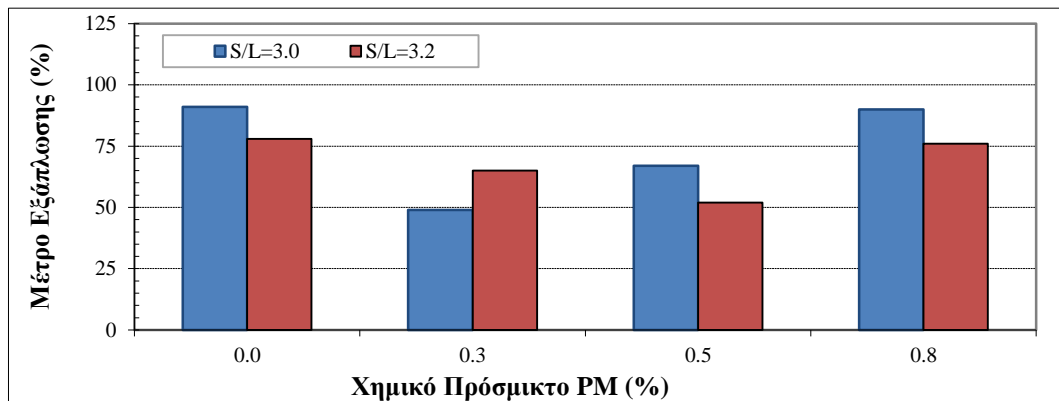
παχύρρευστο και να δυσκολεύει την αποτελεσματικότητα του πρόσμικτου. Σε  $S/L=3.0$  δείχνει να μην επηρεάζει τους χρόνους πήξης, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, αφού είναι απλά ένας πολύ ισχυρός υπερρρευστοποιητής.



**Σχήμα 4.** Χρόνος Πήξης (αρχή και τέλος) γεωπολυμερούς σε λόγους  $S/L=3.0$  και  $3.2$  με προσθήκη υπερρρευστοποιητή Viscoflow-700 (VF).

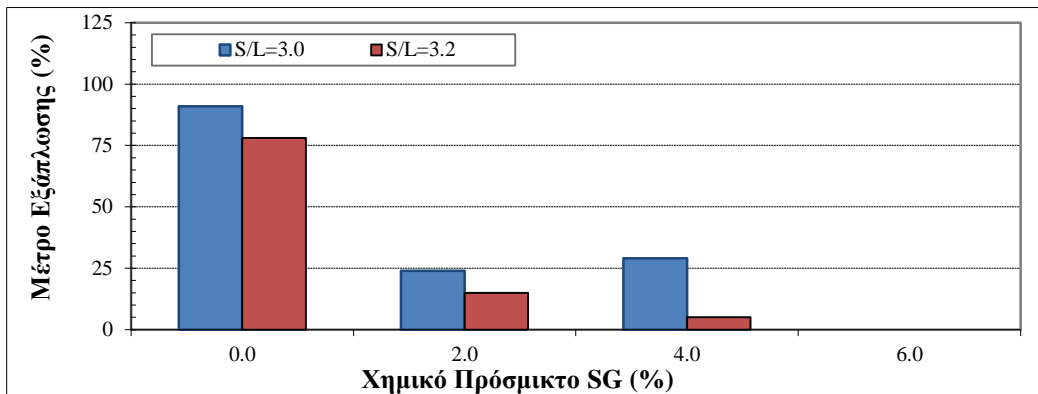
### Εργασιμότητα

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η επίδραση του πρόσμικτου PM στην εργασιμότητα του γεωπολυμερούς. Παρατηρείται να έχει ακανόνιστη συμπεριφορά συνολικά και στους δύο λόγους και σε όλες τις περιπτώσεις η εξάπλωση να είναι μικρότερη από το γεωπολυμερές χωρίς καθόλου χημικό πρόσμικτο.

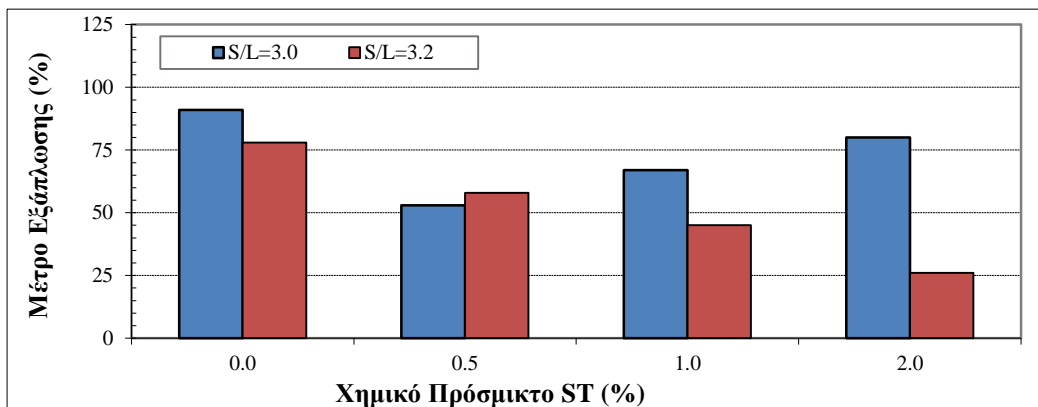


**Σχήμα 5.** Εργασιμότητα γεωπολυμερούς σε λόγους  $S/L=3.0$  και  $3.2$  με προσθήκη υπερρρευστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM) σε διάφορα ποσοστά.

Το SG που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6 δείχνει να έχει την αναμενόμενη συμπεριφορά και στους δύο λόγους ως επιταχυντής ταχείας πήξης, αφού όσο αυξάνεται το ποσοστό μειώνεται και η εργασιμότητα. Αντίθετα, το πρόσμικτο ST, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7, σε όλους τους λόγους δείχνει να έχει διαφορετική από το αναμενόμενο επίδραση στην εργασιμότητα, αφού είναι σταθεροποιητής ενυδάτωσης με επιβράδυνση και σε κάθε περίπτωση το μέτρο εξάπλωσης είναι μικρότερο από το γεωπολυμερές χωρίς χημικό.



**Σχήμα 6.** Εργασιμότητα γεωπολυμερούς σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη επιταχυντή πήξης Sigunit L-22E (SG).

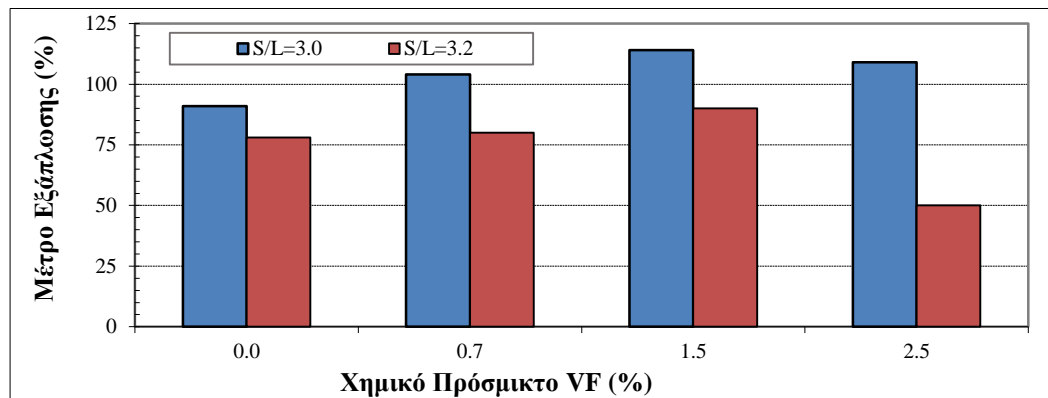


**Σχήμα 7.** Εργασιμότητα γεωπολυμερούς σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση Sikatard-930 (ST).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8 που παρουσιάζεται η επίδραση του VF στην εργασιμότητα, δείχνει να επηρεάζει το αναμενόμενο όσο αυξάνεται το ποσοστό χρήσης και στους δύο λόγους. Στο μέγιστο προτεινόμενο φαίνεται μία ασυνέχεια,



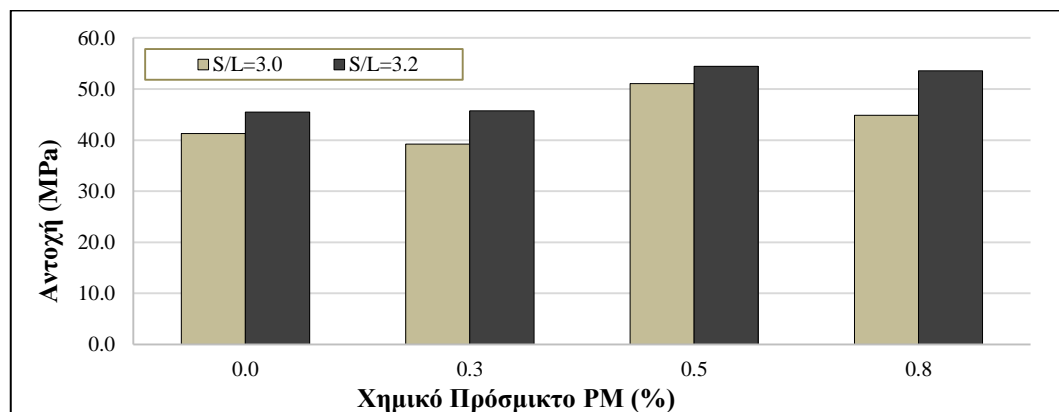
αλλά αυτό ίσως οφείλεται στο μέγιστο αποδεκτό όριο χρήσης για τα γεωπολυμερή.



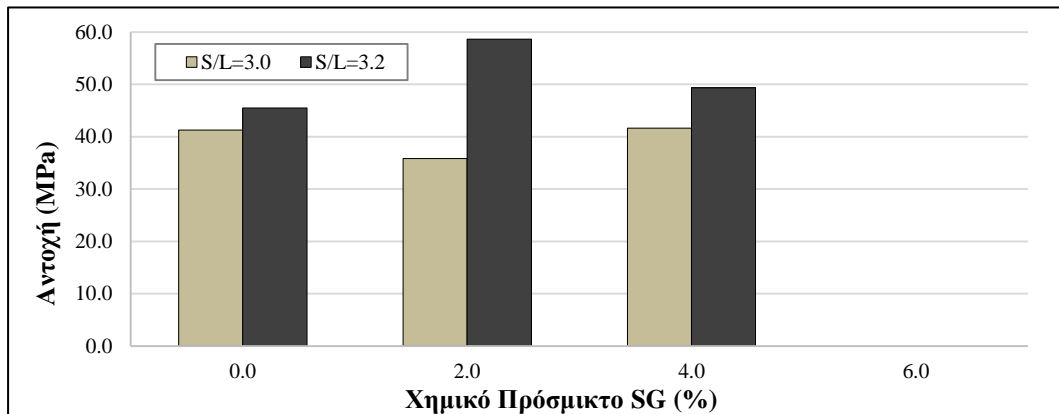
**Σχήμα 8.** Εργασιμότητα γεωπολυμερούς σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη υπερρυστοποιητή Viscosflow-700 (VF).

#### Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η επίδραση του PM στις αντοχές σε μονοαξονική θλίψη, όπου φαίνεται μία σημαντική αύξηση. Από την άλλη πλευρά, στο Σχήμα 10 που παρουσιάζεται η επίδραση του SG στις αντοχές σε μονοαξονική θλίψη, φαίνεται ότι το πρόσμηκτο αυτό επιδρά θετικά στην αντοχή σε θλίψη μόνο για την περίπτωση του υψηλού λόγου S/L=3.2.

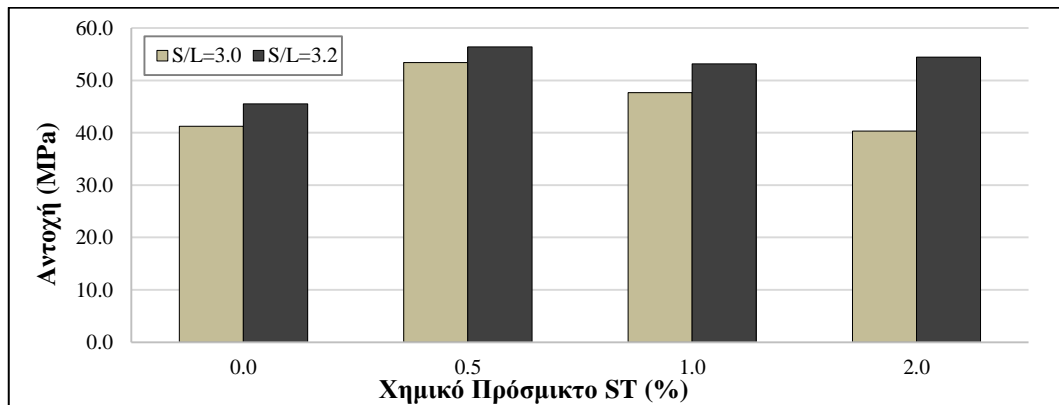


**Σχήμα 9.** Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών γεωπολυμερούς σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη υπερρυστοποιητή με επιβράδυνση Plastiment-15 (PM).



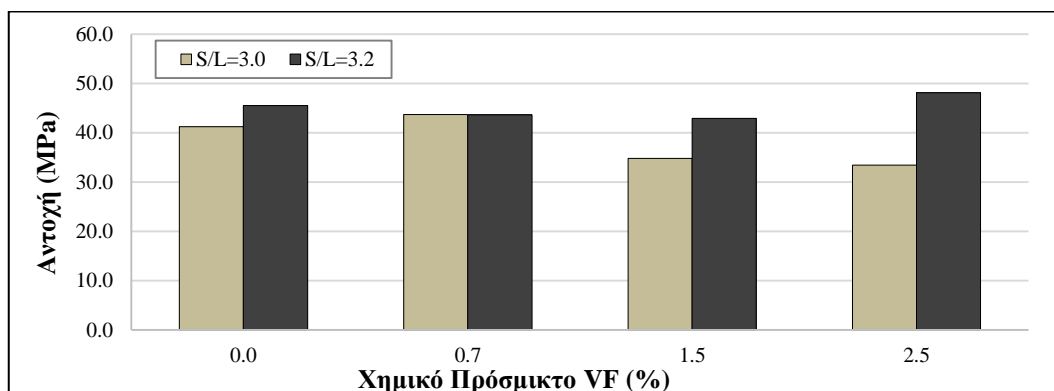
**Σχήμα 10.** Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών γεωπολυμερούς σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη επιταχυντή πήξης Sigunit L-22E (SG).

Στο Σχήμα 11 παρουσιάζεται η επίδραση στη μονοαξονική θλίψη του γεωπολυμερούς με χρήση πρόσμικτου ST. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι έχει θετική επίδραση στις αντοχές, ιδιαίτερα για υψηλούς λόγους S/L και ποσοστά προσθήκης 0.5%. Αντίθετη συμπεριφορά δείχνει να έχει το VF, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 12, αφού παρατηρείται ότι για S/L=3.0 το συγκεκριμένο πρόσμικτο δεν φαίνεται να επηρεάζει τις αντοχές, ενώ για S/L=3.2 οι αντοχές παρουσιάζονται μειωμένες κατά 8-10%.



**Σχήμα 11.** Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών γεωπολυμερούς σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη σταθεροποιητή ενυδάτωσης με επιβράδυνση Sikatard-930 (ST).

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η επίδραση των τεσσάρων χρησιμοποιηθέντων χημικών προσμίκτων στα γεωπολυμερή στους επιλεγμένους λόγους S/L.



**Σχήμα 12.** Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών γεωπολυμερούς σε λόγους S/L=3.0 και 3.2 με προσθήκη υπερρευστοποιητή Viscoflow-700 (VF).

**Πίνακας 4.** Επίδραση\* χημικών προσμίκτων στις ιδιότητες του γεωπολυμερούς

Ιδιότητα	Plastimet-15 (PM)		Sigunit L-22E (SG)		Sikatartd-930 (ST)		Viscoflow-700 (VF)	
	S/L	S/L	S/L	S/L	S/L	S/L	S/L	S/L
	3.0	3.2	3.0	3.2	3.0	3.2	3.0	3.2
Χρόνος Πήξης	+	-	+	+	-	-	0	0
Εργασιμότητα	-	-	+	+	-	-	+	+
Αντοχή	+	+	0	+	+	+	-	0

\* -: αρνητική επίδραση προσμίκτου, +: θετική επίδραση, 0: μηδενική επίδραση

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πρόσμικτο PM σε γεωπολυμερές με υψηλό λόγο S/L δίνει αντίθετα αποτελέσματα από τα αναμενόμενα σε ότι αφορά τους χρόνους πήξης, ενώ δείχνει να επιδρά αρνητικά στην εργασιμότητα ανεξάρτητα από την τιμή του λόγου S/L. Πάντως, έχει σημαντική συνεισφορά στις αντοχές θλίψης.

Το πρόσμικτο SG δείχνει να επιταχύνει σημαντικά τους χρόνους πήξης, ενώ το μέτρο εξάπλωσης μειώνεται σημαντικά όσο αυξάνεται το ποσοστό προσθήκης του. Οι αντοχές αυξάνονται μόνο στην περίπτωση υψηλού λόγου S/L.

Το πρόσμικτο ST δείχνει ακατάλληλο για χρήση σε γεωπολυμερές όσον αφορά τους χρόνους πήξης και την εργασιμότητα, αφού παρουσιάζει διαφορετικά αποτελέσματα από τα αναμενόμενα, ενώ φαίνεται να αυξάνει τις αντοχές, ιδιαίτερα στα χαμηλά ποσοστά προσθήκης.

Η χρήση του προσμίκτου VF δείχνει γενικά να ευνοεί το γεωπολυμερές με τη

χρήση του, αφού οι χρόνοι πήξης δεν επηρεάζονται σχεδόν καθόλου (επιθυμητό), η εργασιμότητα αυξάνεται και οι αντοχές δείχνουν να μην επηρεάζονται στην περίπτωση υψηλού λόγου S/L.

Συνοψίζοντας, τα χημικά πρόσμικτα τσιμεντοειδών δείχνουν να επηρεάζουν τις ιδιότητες και των γεωπολυμερών σε μεγάλο βαθμό, αλλά όχι όλα. Κάποια έχουν την αναμενόμενη επίδραση, ενώ κάποια την ακριβώς αντίθετη. Ο λόγος S/L δείχνει να μην έχει μονοσήμαντη επίδραση, αφού ορισμένα πρόσμικτα λειτούργησαν για S/L=3.0 και κάποια άλλα για S/L=3.2. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την εμβάθυνση στη δράση των χημικών προσμίκτων στα γεωπολυμερή.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν την εταιρεία ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Τ.Ε. για τον διεργαστηριακό έλεγχο των πειραμάτων και την εταιρεία Sika Hellas Α.Β.Ε.Ε. για τη χορηγία των χημικών προσμίκτων. Τέλος, ευχαριστίες εκφράζονται στους προπτυχιακούς σπουδαστές της Α.Σ.ΠΑΙ.Τ.Ε. του τμήματος Εκπ. Πολιτικών Μηχανικών Ανδρεαδάκη Βασίλειο, Γιακουμάκη Αργυρά, Ζαρκάδα Μαρία, Ζέρβα Άρτεμις, Ζορμπά Αντώνιο, Μέμμου Ναταλία και Τερψιόπουλο Αθανάσιο για την πολύτιμη βοήθεια τους στην διεκπεραίωση των πειραμάτων.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Komnitsas K., D. Zaharaki, A. Vlachou, G. Bartzas and M. Galetakis, "Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers", *Advanced Powder Technology* 26 (2015), 368-376

Panagiotopoulou C., Tsvivilis S., Kakali G., "Application of the Taguchi approach for the composition optimization of alkali activated fly ash binders", *Constr Build Mater* 91 (2015) 17-22.

Xu H. J.S.J Van Deventer, "The geopolymerization of alumino-silicate materials" *Int. J. Miner. Process*, vol. 59, (2000), pp. 247-266

Ασπρογέρακας Α., «Συγκριτική αξιολόγηση ανθεκτικότητας γεωπολυμερών από ιπτάμενη τέφρα και τσιμεντοκονιαμάτων», Διδακτορική Διατριβή (υπό την επίβλεψη του Καθ. Σ. Τσιβιλής), Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. (2013).

Κακάλη Γ., Τσιβιλής Σ., Παναγιωτοπούλου Χ. και Ασπρογέρακας Α., «Σύνθεση, χαρακτηρισμός και ιδιότητες γεωπολυμερών από ελληνικές ιπτάμενες τέφρες», 9<sup>ο</sup> ΠΕΣΧΜ, Αθήνα (2013)

Νικολουτσόπουλος Ν., Σωτηροπούλου Α., Κακάλη Γ. και Τσιβιλής Σ., «Επίδραση του λόγου στερεό/υγρό στο χρόνο πήξης, στην εργασιμότητα και στην θλιπτική αντοχή γεωπολυμερούς από ιπτάμενη τεφρά», 11<sup>ο</sup> ΠΕΣΧΜ, Θεσσαλονίκη, (2017)

Παναγιωτοπούλου Χ., «Σύνθεση και ιδιότητες γεωπολυμερών από βιομηχανικά πετρώματα και παραπροϊόντα», Διδακτορική Διατριβή (υπό την επίβλεψη της Καθ. Γ. Κακάλη), Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. (2009). Ε.Μ.Π.