

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Χρυσάνθη Παναγιωτοπούλου

Υ.Δ., Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών

Γλυκερία Κακάλη

Αν. Καθηγήτρια, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών

Σωτήρης Τσιβιλής

Αν. Καθηγητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών

Θεοδώρα Περράκη

Αν. Καθηγήτρια, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών

Σ. Κόλιας

Αν. Καθηγητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Νικολέττα Σκορδάκη

Προπτυχιακή Σπουδάστρια, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών

Λέξεις κλειδιά: γεωπολυμερή, Ιπτάμενη Τέφρα, σύνθεση, μηχανικές αντοχές,

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην εργασία αυτή γίνεται διερεύνηση της χρήσης της Ιπτάμενης Τέφρας Μεγαλόπολης ως πρώτης ύλης για την σύνθεση γεωπολυμερών. Το πειραματικό μέρος περιλαμβάνει: i) την διαλυτοποίηση της Ιπτάμενης Τέφρας σε αλκαλικά διαλύματα και την διερεύνηση της επίδρασης του αλκαλικού ιόντος (Na ή K), της συγκέντρωσης του αλκαλικού διαλύματος (2, 5 και 10M) και του χρόνου (5, 10 και 24 ώρες) στη διαλυτοποίηση των Al^{+3} και Si^{+4} και ii) τη σύνθεση γεωπολυμερών από Ιπτάμενη Τέφρα και τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών ωρίμανσης ($T= 50, 70$ και 90 °C, $t= 24, 48$ και 72 ώρες) και του λόγου Si/Al ($Si/Al= 1.75-4.5$) στην ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών. Ο ρυθμός με τον οποίο διαλυτοποιείται η Ιπτάμενη Τέφρα υποδεικνύει ότι το υλικό αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως πιθανή πρώτη ύλη για την σύνθεση γεωπολυμερών. Οι βέλτιστες συνθήκες ωρίμανσης είναι οι 70 °C για 48 ώρες. Αύξηση του χρόνου ωρίμανσης έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των μηχανικών αντοχών ενώ αύξηση της θερμοκρασίας ωρίμανσης προκαλεί μικρή αύξηση των μηχανικών αντοχών αλλά επιπλέον ευνοεί και την εμφάνιση επιφανειακών ρωγμών. Τέλος, οι αντοχές σε θλίψη φαίνεται πως εξαρτώνται συστηματικά από τον λόγο Si/Al, έχοντας ως μέγιστη τιμή τα 45.5 ± 2 MPa για λόγο Si/Al ίσο με 2.5 .

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη για δομικά υλικά τα οποία διαθέτουν βελτιωμένες ιδιότητες όσον αφορά την αντοχή τους σε θερμική καταπόνηση οδήγησε τον καθηγητή Joseph Davidovits στην σύνθεση νέων υλικών τα οποία ονόμασε γεωπολυμερή (Davidovits, 1994). Τα υλικά αυτά διαθέτουν άριστες μηχανικές ιδιότητες και υψηλή αντοχή σε θερμική καταπόνηση και χημική προσβολή ενώ η σύνθεσή τους βασίζεται στην ενεργοποίηση αργιλιπυριτικών υλικών από μία αλκαλική βάση και ένα αλκαλικό άλας και στην μετατροπή τους σε μια άμορφη, τρισδιάστατη ανόργανη δομή (Davidovits, 1991). Η σύνθεση και η χημική σύσταση των γεωπολυμερών είναι παρόμοια με αυτή των ζεολίθων, αλλά η μικροδομή τους είναι άμορφη έως ημικρυσταλλική.

Η αναλογία $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ των πρώτων υλών είναι πολύ σημαντική γιατί καθορίζει τις τελικές ιδιότητες των γεωπολυμερών (Davidovits 1988, 1999, Hua Xu & Συνεργάτες 2003). Μικροί λόγοι Si/Al οδηγούν στη δημιουργία ενός τρισδιάστατου πλέγματος ενώ μεγάλοι λόγοι Si/Al (>15) προσδίδουν πολυμερικό χαρακτήρα στο γεωπολυμερές (Davidovits 1999).

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τις ιδιότητες των γεωπολυμερών είναι οι συνθήκες ωρίμανσης, εφόσον η συμπεριφορά των γεωπολυμερών εξαρτάται από την θερμοκρασία συμπίκνωσης και το χρόνο για το οποίο το σχηματισμένο gel παραμένει στη θερμοκρασία αυτή. Σε χαμηλές θερμοκρασίες σχηματίζονται άμορφες ή υαλώδεις φάσεις με μικρές μηχανικές αντοχές. Θερμοκρασίες 35- 85 °C έχουν ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό άμορφων έως ημικρυσταλλικών δομών με καλές φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες ενώ σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 100 °C σχηματίζονται ημικρυσταλλικές δομές με άριστες ιδιότητες (Davidovits 1998, Barbosa & Συνεργάτες 1999).

Η Ιπτάμενη Τέφρα είναι ένα βιομηχανικό παραπροϊόν το οποίο προκαλεί προβλήματα απόθεσης. Λόγω όμως της μεγάλης περιεκτικότητάς της σε οξειδία του αργιλίου και του πυριτίου, η Ιπτάμενη Τέφρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πρώτη ύλη για τη σύνθεση γεωπολυμερών. Η εργασία αυτή αφορά τη χρήση της Ιπτάμενης Τέφρας ως πρώτης ύλης για την σύνθεση γεωπολυμερών και αποτελεί μέρος μιας ευρύτερης έρευνας σχετικά με την αξιοποίηση ελληνικών ορυκτών και παραπροϊόντων στην τεχνολογία των γεωπολυμερών.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Το πειραματικό μέρος αποτελείται από δύο μέρη:

i) τη διαλυτοποίηση της Ιπτάμενης Τέφρας σε αλκαλικά διαλύματα και τη διερεύνηση της επίδρασης του αλκαλικού ιόντος (K ή Na), της συγκέντρωσης του διαλύματος (2, 5 και 10M) και του χρόνου (5, 10 και 24 ώρες) στο βαθμό διαλυτοποίησης των ιόντων Al^{+3} και Si^{+4} .

ii) τη σύνθεση γεωπολυμερών από Ιπτάμενη Τέφρα και τη διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών ωρίμανσης και του λόγου Si/Al στην ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών.

Η Ιπτάμενη Τέφρα προέρχεται από το εργοστάσιο ηλεκτρικής ενέργειας της Μεγαλόπολης και η χημική της σύσταση φαίνεται στον πίνακα 1. Όσον αφορά την ορυκτολογική της σύσταση αποτελείται κυρίως από χαλαζία (SiO_2) και αστρίους (αλβίτης $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), ενώ σε μικρότερα ποσοστά απαντώνται ασβεστίτης (CaCO_3), ανυδρίτης (CaSO_4), μαγγελμίτης ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) και γκελενίτης ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$). Πριν τη χρήση, η Ιπτάμενη Τέφρα αλέθεται και το μέσο μέγεθος κόκκων της (d_{50}) είναι περίπου 10 μm .

Η μελέτη του βαθμού διαλυτοποίησης πραγματοποιήθηκε αναμειγνύοντας 0.5 (± 0.0001) g Ιπτάμενης Τέφρας με 20 ml αλκαλικού διαλύματος για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, υπό συνεχή ανάδευση. Ακολούθησε διήθηση υπό κενό, το διήθημα αραιώθηκε στα 250 ml, προστέθηκε πυκνό HCl για την ρύθμιση του pH έτσι ώστε $\text{pH} < 1$ και προσδιορίστηκε η συγκέντρωση Al και Si με χρήση Φασματομετρίας Ατομικής Απορρόφησης (AAS). Το στερεό υπόλειμμα εξετάστηκε με Περίθλαση Ακτίνων X (XRD) και Φασματοσκοπία Υπερύθρου (FTIR).

Πίνακας 1. Χημική Σύσταση Ιπτάμενης Τέφρας (% κ.β.)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	A.Π.*
47.86	23.54	7.15	10.56	2.28	1.58	-	2.50	4.30

* Απώλεια Πύρωσης

Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών ωρίμανσης χρησιμοποιήθηκε ένα υδατικό διάλυμα ενεργοποίησης που περιείχε πυριτικό νάτριο και υδροξείδιο του νατρίου. Τα δείγματα των γεωπολυμερών παρασκευάστηκαν σύμφωνα με τους λόγους $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3.68$, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 12.19$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0.27$ και $m_{\text{στερεών}}/m_{\text{υγρών}} = 2.4$. Πρόκειται για μια τυπική σύνθεση που αναφέρεται και από άλλους ερευνητές (Barbosa & Συνεργάτες 1999, Davidovits 1982). Μετά από μηχανική ανάδευση, το μίγμα τοποθετήθηκε σε μήτρες 5x5 mm και ακολούθησε ήπια δόνηση. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε πυριατήριο σε θερμοκρασίες 50, 70 και 90 °C για 24, 48 και 72 ώρες. Μετά από σταδιακή ψύξη τα δοκίμια διατηρήθηκαν σε αεροστεγή συσκευασία επί 7 ημέρες και στη συνέχεια μετρήθηκαν οι αντοχές τους σε θλίψη.

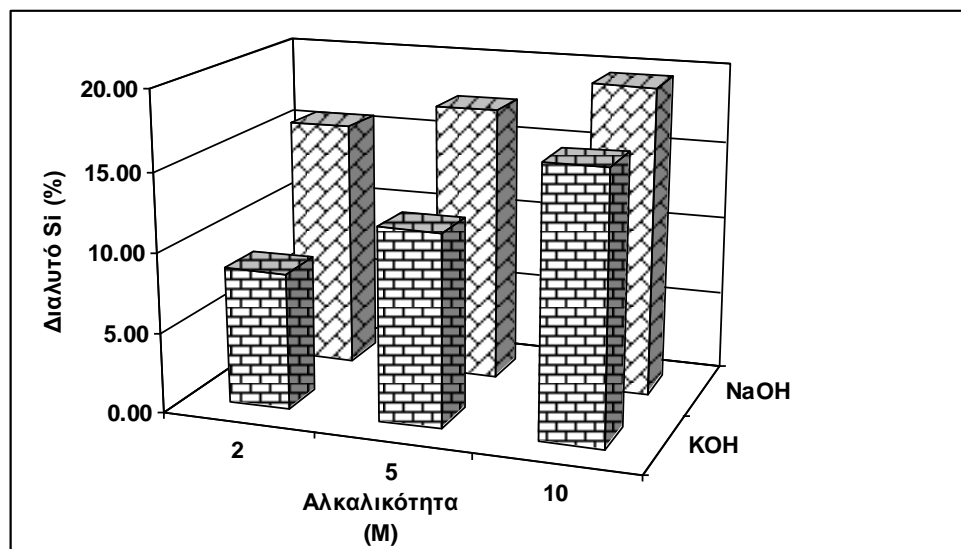
Στο τελευταίο σκέλος του πειραματικού πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση της επίδρασης του λόγου Si/Al στην ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών. Η Ιπτάμενη Τέφρα έχει λόγο Si/Al ίσο με 1.75. Παρασκευάστηκαν διαλύματα πυριτικού νατρίου διαλύοντας άμορφη πυριτία σε διαλύματα καυστικού νατρίου έτσι ώστε οι τελικοί λόγοι Si/Al να είναι από 1.75 έως 3.0. Λόγω της μικρής διαλυτότητας της άμορφης πυριτίας σε αλκαλικά διαλύματα, για τους λόγους Si/Al από 3.5 έως 4.5, τα

διαλύματα ενεργοποίησης παρασκευάστηκαν αναμειγνύοντας υδατικά αιωρήματα πυριτίας 30 και 50% κ.β. με διαλύματα καυστικού νατρίου. Σε όλες τις περιπτώσεις η αναλογία Al_2O_3/Na_2O διατηρήθηκε σταθερή και ίση με 1, ενώ τα διαλύματα ενεργοποίησης αφέθηκαν για τουλάχιστον 24 ώρες σε ηρεμία προτού χρησιμοποιηθούν. Όλα τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως και η θερμική τους κατεργασία έγινε στις βέλτιστες συνθήκες ωρίμανσης. Τέλος όλα τα δείγματα εξετάστηκαν με περίθλαση ακτίνων X (XRD) και φασματοσκοπία υπέρυθρου (FTIR).

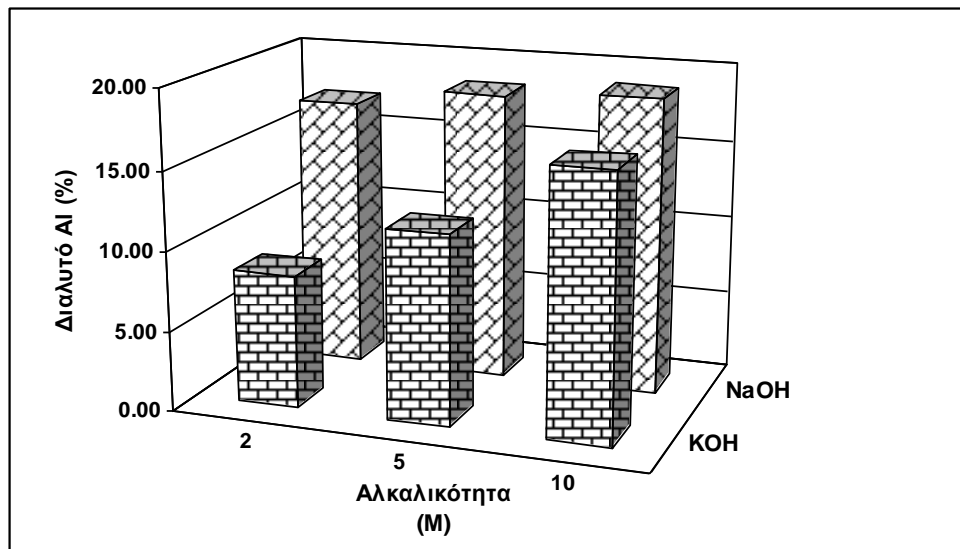
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Αλκαλική διαλυτοποίηση Ιπτάμενης Τέφρας

Στις εικόνες 1 και 2 φαίνεται το % διαλυτοποιημένο Si και Al μετά από διαλυτοποίηση της Ιπτάμενης Τέφρας για 24 ώρες σε διαλύματα NaOH και KOH, αντίστοιχα. Όπως παρατηρείται, η Ιπτάμενη Τέφρα έχει ικανοποιητική διαλυτότητα και για το λόγο αυτό μπορεί να αποτελέσει πρώτη ύλη για την σύνθεση γεωπολυμερών. Η διαλυτοποίηση της ιπτάμενης τέφρας αποδίδεται στις συνθήκες σχηματισμού της. Γενικά, η θερμική επεξεργασία των υλικών βελτιώνει την δραστηρότητά τους, ειδικά όταν η κρυσταλλική δομή τους έχει τροποποιηθεί για την αποθήκευση ενέργειας (Panagiotopoulou & Συνεργάτες 2007, Hua Xu 2002).



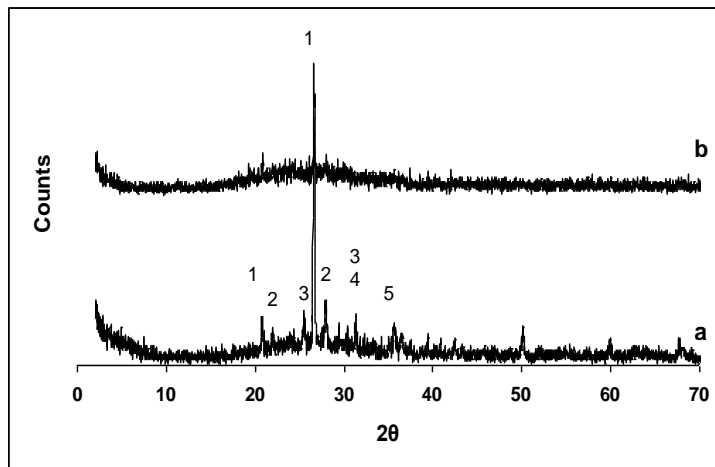
Εικόνα 1. Διαλυτοποιημένο Si (% w/w)



Εικόνα 2. Διαλυτοποιημένο Al (% w/w)

Σύμφωνα με τις εικόνες 1 και 2, το Si και το Al φαίνεται πως παρουσιάζουν συγχρονισμένη διαλυτοποίηση σε αλκαλικά διαλύματα. Αυτό υποδεικνύει ότι το Si και το Al πιθανώς να διαλυτοποιούνται με κάποια συνδεδεμένη μορφή, τουλάχιστον στα ισχυρά αλκαλικά διαλύματα. Και άλλοι ερευνητές έχουν αναφέρει την ταυτόχρονη διαλυτοποίηση των Si και Al στην περίπτωση καθαρών ορυκτών φάσεων (Hua Xu 2002). Στην περίπτωση του NaOH η αύξηση της αλκαλικότητας έχει πολύ μικρή επίδραση στην διαλυτοποίηση των Si και Al, ενώ στην περίπτωση του KOH η διαλυτοποίηση και των δύο αυτών στοιχείων είναι ανάλογη της αλκαλικότητας του διαλύματος. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι στην περίπτωση του NaOH η ισορροπία μεταξύ στερεού και διαλύματος επιτυγχάνεται σε μικρή αλκαλικότητα. Ο βαθμός διαλυτοποίησης είναι υψηλότερος στο NaOH από ότι στο KOH. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και από άλλους ερευνητές και συσχετίζεται με το μικρότερο μέγεθος του Na^+ που μπορεί καλύτερα να σταθεροποιήσει τα μονομερή και διμερή του πυριτίου στο διάλυμα, αυξάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το βαθμό διαλυτοποίησης της Ιπτάμενης Τέφρας (Hua Xu & Συνεργάτες 2001, 2003).

Η εικόνα 3 παρουσιάζει τα διαγράμματα XRD της Ιπτάμενης Τέφρας και του στερεού υπολείμματος μετά τη διαλυτοποίηση σε NaOH 10 M για 24 ώρες. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα το στερεό υπόλειμμα αποτελείται κυρίως από χαλαζία ενώ οι υπόλοιπες κρυσταλλικές φάσεις της Ιπτάμενης Τέφρας έχουν σχεδόν πλήρως διαλυτοποιηθεί.



Εικόνα 3: Διαγράμματα XRD. a: Ιπτάμενης Τέφρα, b: στερεό υπόλειμμα
1: χαλαζίας, 2: άστριοι 3: ανυδρίτης 4: γκελενίτης 5: μαγγεμίτης

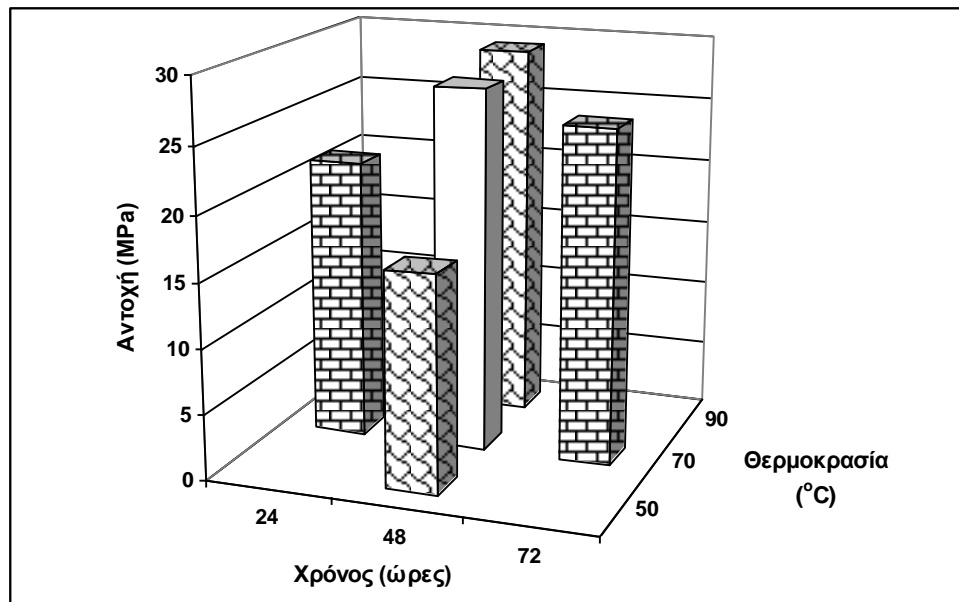
3.2 Αριστοποίηση των συνθηκών ωρίμανσης

Η εικόνα 4 δείχνει τις αντοχές σε θλίψη των 7 ημερών των δοκιμίων μετά από ωρίμανση σε 50,70 και 90 °C για 24, 48 και 72 ώρες. Όπως φαίνεται στο σχήμα, ο βέλτιστος χρόνος ωρίμανσης είναι οι 48 ώρες. Η αρνητική επίδραση του μεγαλύτερου χρόνου ωρίμανσης αναφέρεται επίσης και από άλλους ερευνητές (Hua Xu 2002). Η αύξηση της θερμοκρασίας ωρίμανσης από τους 50 στους 70 °C επιφέρει σημαντική αύξηση στις μηχανικές αντοχές των γεωπολυμερών. Ωρίμανση σε υψηλότερες θερμοκρασίες έχει ως αποτέλεσμα μικρή αύξηση των αντοχών σε θλίψη, αλλά προκαλεί την εμφάνιση επιφανειακών ρωγμών, εξαιτίας της εντονότερης εξάτμισης του νερού.

3.3 Επίδραση του λόγου Si/Al

Στην εικόνα 5 φαίνονται οι τελικές αντοχές σε θλίψη των γεωπολυμερών σε συνάρτηση με τον λόγο Si/Al του αρχικού μίγματος. Όπως φαίνεται η αύξηση του λόγου Si/Al από 1.75 σε 2.5 σχεδόν διπλασιάζει τις αντοχές. Επιπλέον αύξηση του λόγου Si/Al έχει αρνητική επίδραση στην ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών. Η ίδια τάση έχει αναφερθεί και στην περίπτωση γεωπολυμερών από μετακαολίνη (Rowles & Συνεργάτες 2003, Duxson & Συνεργάτες 2005, 2007). Θεωρείται πως η αρχική αύξηση που περιεχομένου Si έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό μεγαλύτερου γεωπολυμερικού δικτύου με αυξημένη δομική ακεραιότητα. Παραπέρα αύξηση διαλυτού Si μπορεί να δυσχεραίνει την διαλυτοποίηση της Ιπτάμενης Τέφρας μετακινώντας την αντίδραση διαλυτοποίησης προς

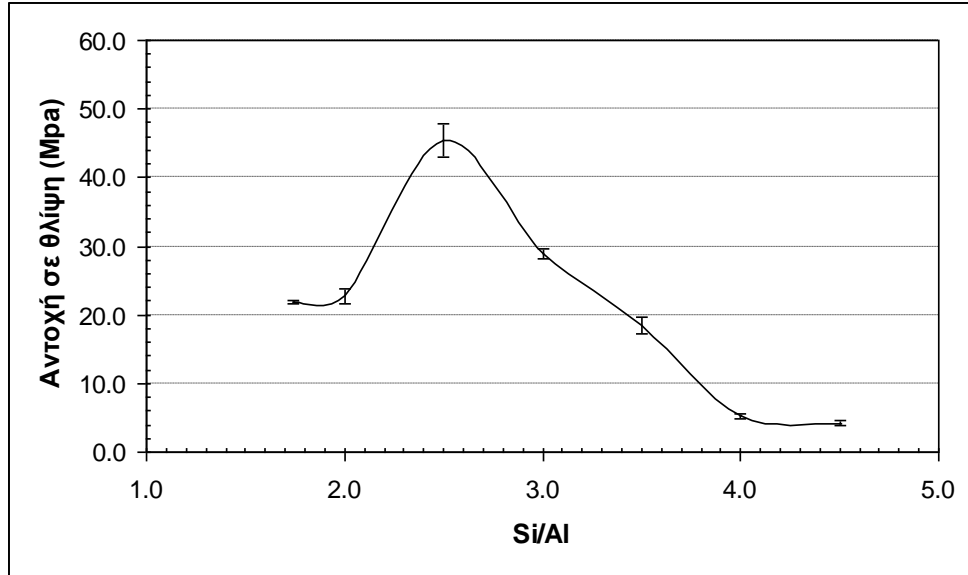
τα αριστερά, αφήνοντας υλικό χωρίς να αντιδράσει και επηρεάζοντας την μικροδομή του γεωπολυμερούς. Πρέπει να τονιστεί ότι τα γεωπολυμερή με λόγους Si/Al ίσους με 4.0 και 4.5 απαιτήσαν μεγαλύτερες ποσότητες νερού προκειμένου να επιτευχθεί ομοιογενές μείγμα και αυτός είναι κατά πάσα πιθανότητα ο λόγος για τις πολύ μικρές αντοχές τους.



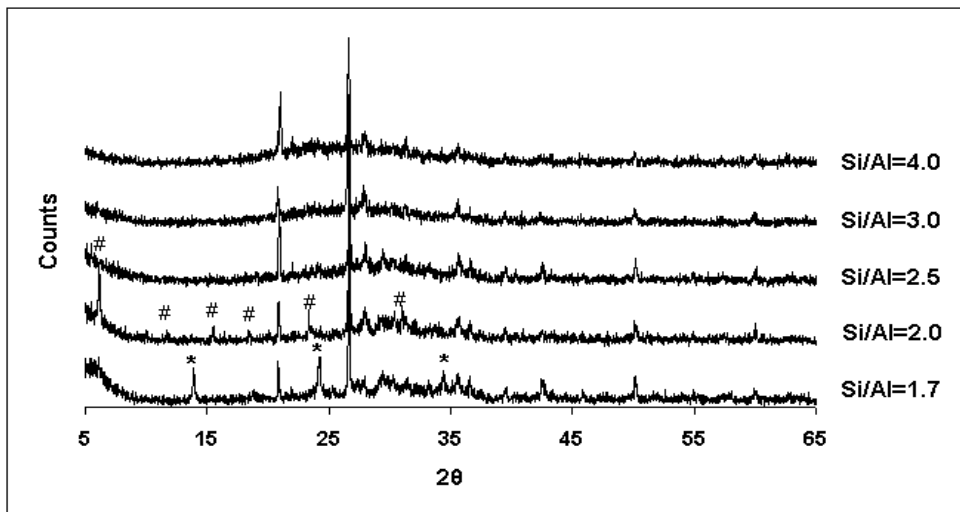
Εικόνα 4. Αντοχές σε θλίψη των γεωπολυμερών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και τον χρόνο ωρίμανσης

Στην εικόνα 6 φαίνονται τα διαγράμματα XRD των γεωπολυμερών σε σχέση με τον λόγο Si/Al. Στα δείγματα με λόγο Si/Al μεγαλύτερο του 2 οι μοναδικές κρυσταλλικές φάσεις που εμφανίζονται είναι ο χαλαζίας και οι άστριοι που δεν έχουν αντιδράσει ενώ υδροξυσοδάλιθος και φογιανζίτης απαντώνται μόνο στα δείγματα με λόγους Si/Al 1,7 και 2,0. Ο σχηματισμός ζεολιθικών φάσεων στα γεωπολυμερή για μικρούς λόγους Si/Al αναφέρεται και από άλλους ερευνητές (Rees & Συνεργάτες 2005). Όπως είναι γνωστό, στην σύνθεση ζεολίθων από συστήματα gel, η σύσταση του ζεολίθου είναι γενικά παραπλήσια με την σύσταση του gel από το οποίο κρυσταλλώνονται. Φαίνεται πως μικροί λόγοι Si/Al στο αντιδρών gel, ευνοούν, τουλάχιστον τοπικά, την σύνθεση των ανάλογων ζεολίθων (ο λόγος Si/Al για τον υδροξυσοδάλιθο είναι 1 και για τον φογιανζίτη 1,2). Με αύξηση του περιεχόμενου Si στο διάλυμα ενεργοποίησης, ο λόγος Si/Al στο μόλις

σχηματισμένο gel γίνεται πολύ υψηλός για τον σχηματισμό υδροξυσοδάλιθου και φογιανζίτη.

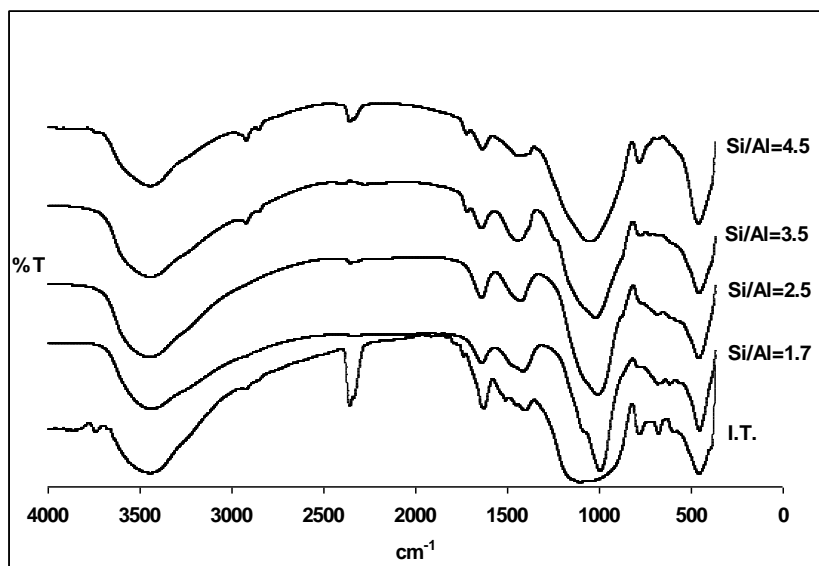


Εικόνα 5. Αντοχές σε θλίψη των γεωπολυμερών σε συνάρτηση με τον λόγο Si/Al



Εικόνα 6. Διαγράμματα XRD των γεωπολυμερών συναρτήσει του λόγου Si/Al (*: υδροξυσοδάλιθος, #: φογιαζίτης)

Στην εικόνα 7 φαίνονται τα φάσματα FTIR της Ιπτάμενης Τέφρας και των γεωπολυμερών για διάφορους λόγους Si/Al. Το φάσμα της Ιπτάμενης Τέφρας δεν έχει πολλές οξείες και χαρακτηριστικές απορροφήσεις εξαιτίας της υαλώδους φύσης και της ετερογένειας του υλικού αυτού. Οι κύριες αργιλοπυριτικές φάσεις της Ιπτάμενης Τέφρας (τόσο κρυσταλλικές όσο άμορφες) έχουν αλληλοκαλυπτόμενες κορυφές στην περιοχή των 800–1000 cm^{-1} . Αυτή η ευρεία απορρόφηση είναι το κύριο χαρακτηριστικό των φασμάτων τόσο της Ιπτάμενης Τέφρας όσο και του γεωπολυμερούς και συνδέεται με τις Si-O-T (T: τετραεδρικό Si ή Al) ασύμμετρες δονήσεις έκτασης. Όπως φαίνεται στην εικόνα 7, το μέγιστο αυτής της απορρόφησης, στην περίπτωση της Ιπτάμενης Τέφρας, είναι γύρω στα 1100 cm^{-1} , ενώ στα γεωπολυμερή η κορυφή αυτή γίνεται οξύτερη και μετακινείται σε μικρότερους κυματαριθμούς. Η θέση αυτής της κορυφής δίνει ένα μέτρο για το βαθμό υποκατάστασης του Si από Al σε ένα αργιλοπυριτικό πλέγμα. Η μετατόπισή της από τα 1100 cm^{-1} σε μικρότερους κυματαριθμούς, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των γεωπολυμερών, δείχνει την αύξηση της υποκατάστασης του Si από το τετραεδρικό Al στο γεωπολυμερικό δίκτυο.



Εικόνα 7. Φάσματα FTIR της Ιπτάμενης Τέφρας και των γεωπολυμερών

Συγκρίνοντας τα φάσματα των γεωπολυμερών μεταξύ τους, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο λόγος Si/Al τόσο η κορυφή αυτή μετακινείται σταδιακά σε μεγαλύτερους κυματαριθμούς (1000, 1011, 1025 και 1050 cm^{-1} για λόγους 1,75, 2,5, 3,5 και 4,5 αντίστοιχα). Αυτό συμβαίνει

επειδή ή αύξηση του λόγου Si/Al στο αρχικό υλικό, οδηγεί σε σχηματισμό γεωπολυμερούς με μειωμένη περιεκτικότητα σε Al και επομένως περιορισμένη υποκατάσταση Si από Al. Όποιες κορυφές υπάρχουν στην περιοχή $630-760\text{ cm}^{-1}$ αντιστοιχούν σε δομές όπως ο αργιλοπυριτικός δακτύλιος και δομές έγκλεισης και υποδεικνύουν την παρουσία κρυσταλλικών ζεολιθικών φάσεων. Οι δονήσεις περίπου στα 740 και 650 cm^{-1} στο γεωπολυμερές με λόγο Si/Al=1,75 υποδεικνύουν την παρουσία υδροξυσοδάλιθου. Σε γεωπολυμερή με μεγαλύτερους λόγους Si/Al δε διακρίνονται οι χαρακτηριστικές απορροφήσεις των ζεολίθων. Οι παρατηρήσεις αυτές επιβεβαιώνουν τις μετρήσεις XRD και βρίσκονται σε συμφωνία με τη σχετική βιβλιογραφία (Rees & Συνεργάτες 2007a,b).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρούσα εργασία προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η Ιπτάμενη Τέφρα της Μεγαλόπολης αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο υλικό για την σύνθεση γεωπολυμερών
- Η διαλυτοποίηση της Ιπτάμενης Τέφρας είναι μεγαλύτερη σε διαλύματα NaOH από ότι σε διαλύματα KOH, ενώ το Si και το Al φαίνεται να έχουν συγχρονισμένη συμπεριφορά όσον αφορά την διαλυτοποίησή τους σε όλα τα αλκαλικά διαλύματα.
- Οι βέλτιστες συνθήκες ωρίμανσης των γεωπολυμερών είναι οι 48 ώρες στους $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η αύξηση του χρόνου ωρίμανσης προκαλεί μείωση των αντοχών σε θλίψη, ενώ αύξηση της θερμοκρασίας ωρίμανσης επιφέρει μικρή αύξηση των αντοχών αλλά προκαλεί την εμφάνιση επιφανειακών ρωγμών στα δοκίμια.
- Οι αντοχές σε θλίψη των γεωπολυμερών εξαρτώνται συστηματικά από τον λόγο Si/Al, έχοντας ως μέγιστη τιμή τα $45.5\pm 2\text{ MPa}$ για λόγο Si/Al ίσο με 2.5.

5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά

T. Backarev, Geopolymeric material prepared by using Class F fly ash and elevated temperature curing, *Cem Concr Res*, Vol. 35, (2005),1224-1232

J. Davidovits, Geopolymers: Inorganic polymeric new materials, *J. Therm Anal Calorim*, Vol.37, (1991),1633- 1656

J. Davidovits, Geopolymers: Inorganic polymeric new materials, *J. Mater Edu*, **16**, 91(1994)

Duxson, J.L. Provis, G.C. Lukey, S.W. Mallicoat, W.M. Kriven, Jannie S.J. van Deventer, Understanding the relationship between geopolymer

composition, microstructure and mechanical properties, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, Vol. 269, (2005), 47-58

P. Duxson, S.W. Mallicoat, G.C. Lukey, W.M. Kriven, J.S.J. van Deventer, The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, Vol. 292, (2007), 8-20

A.M. Fernandez- Jimenez, A. Palomo, M. Criado, Microstructure development of alkali activated fly ash cement: a descriptive model, *Cem Concr Res*, Vol. 35, (2005), 1204-1209

D. Feng, H. Tan, J.S.J. van Deventer, Ultrasound enhanced geopolymerisation, *J Mater Sci*, Vol.39, (2004), 571-580

R.A. Flecher, C.L. Nicholson, S. Shimada, K.J.D. Mackenzie, The composition of aluminosilicate geopolymers, *J Eur Ceram Soc*, Vol. 25, (2005), 1471-1477

Hua Xu, J.S.J. van Deventer, The geopolymerisation of aluminosilicate materials, *Int J Miner Process*, Vol. 59, (2000), 247-258

Hua Xu, J.S.J. van Deventer, G.C Lukey, Effect of alkali metals on the preferential geopolymerisation of Stilbite/ Kaolinite mixtures, *Ind Eng Chem Res*, Vol.40, (2001), 3749-3756

Hua Xu, J.S.J. van Deventer, Geopolymerisation of multiple minerals, *Miner Eng*, Vol.15, (2002), 1131-1139

Hua Xu, J.S.J. van Deventer, The effect of alkali metals on the formation of polymeric gels from alkali feldspars, *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, Vol.216, (2003a), 27-44

Hua Xu, J.S.J. van Deventer, Effect of source materials on Geopolymerisation, *Ind Eng Chem Res*, 42, (2003b)1698-1706

J.G.S. van Jaarsveld, J.S.J. van Deventer, G.C. Lukey, The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite based geopolymers, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 89, (2002), 63-73

W.K.W. Lee, J.S.J. van Deventer, G.C Lukey, Effect of anions on the formation of aluminosilicate gel in geopolymers, *Ind Eng Chem Res*, Vol. 41, (2002), 4550-4558

Ch. Panagiotopoulou, E. Kontori, Th. Perraki, G. Kakali, Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media, *J Mater Sci*, Vol. 42, (2007), 2967-2973

J.W. Phair, J.S.J. van Deventer, Characterisation of fly ash based geopolymeric binders activated with sodium aluminate, *Ind Eng Chem Res*, Vol. 41, (2002), 4242-4251

C.A.. Rees, J.L. Provis, G.C. Lukey, J. S. J. van Deventer, Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Analysis of Fly Ash Geopolymer Gel Aging, *Langmuir*, Vol. 23, (2007a) 8170-8179

C.A.. Rees, J.L. Provis, G.C. Lukey, J. S. J. van Deventer, In Situ ATR-FTIR Study of the Early Stages of Fly Ash Geopolymer Gel Formation, *Langmuir*, Vol. 23, (2007b) 9076-9082

M. Rowles, B. O' Connor, Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesized by sodium silicate activation of metakaolinite, *J Mater Chem*, Vol. 13, No (5), (2003), 1161-1165

M. Schmucker, K.J.D. Mackenzie, Microstructure of sodium polysialate siloxo geopolymer, *Ceram Int*, Vol.31, (2005), 433-437

P.S. Singh, M. Trigg, I. Burgar, T. Bastow, Geopolymer formation processes at room temperature studied by Si and Al MAS- NMR, *Mate Sci Eng A*, Vol. 396, No (1-2), (2005), 392

J.C. Swanepoel, C.A. Strydom, Utilisation of fly ash in geopolymeric materials, *Appl Geochem*, Vol. 17, (2002), 1143-1148

Άρθρα σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια (δημοσιευμένα σε πρακτικά)

V.F.F. Barbosa, K.J.D. Mackenzie, C.D. Thaumaturgo, Synthesis and Characterisation of sodium polysialate inorganic polymer based on alumina and silica, *Proceedings, Geopolymer 99*, 65-78 (1999)

J. Davidovits, Structural Characterisation of Geopolymeric Materials with X-Ray Diffractometry and MAS-NMR Spectrometry, in *Proceedings of Geopolymer 88*, 149-166 (1988a)

J. Davidovits, Geopolymers on the first generation: SILIFACE process, *Proceedings, Geopolymer 88*, 49-68 (1988b)

J. Davidovits, Chemistry and geopolymeric systems terminology, *Proceedings, Geopolymer 99*, 9-40 (1999)

Διδακτορικές διατριβές και διπλωματικές / μεταπτυχιακές εργασίες

Hua Xu, Geopolymerisation of aluminosilicate minerals, *PhD Thesis, The University of Melbourne* (2002)

Διπλώματα ευρεσιτεχνίας (patents)

J. Davidovits, Mineral polymers and methods of making them, *United States Patent 4,349,386*, (1982)