

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΛΑΦΡΟΒΑΡΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΑΛΚΑΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ
ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΩΝ. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ
ΧΗΜΕΙΑΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΛΑΦΡΟΒΑΡΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕΣΩ
ΤΗΣ ΑΛΚΑΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ
ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΩΝ. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΣΤΙΣ
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ**

ΛΕΣΙΩΤΗ ΜΑΡΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Γ.ΚΑΚΑΛΗ

Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ

Ιούνιος 2019

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Η εκπόνησή της είναι μέρος του Προγράμματος Σπουδών της σχολής και αφορά τους τελειόφοιτους φοιτητές.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ελαφροβαρών δομικών υλικών μέσω της αλκαλικής ενεργοποίησης αποβλήτων κατεδαφίσεων και η μελέτη της επίδρασης προσθέτων στις ιδιότητες των τελικών προϊόντων. Συγκεκριμένα, ως πρώτη ύλη χρησιμοποιήθηκε τούβλο, το οποίο προήλθε από κατεδαφισμένα κτήρια, αφού πρώτα είχε υποστεί θραύση και άλεση, προκειμένου να αποκτήσει την κατάλληλη κοκκομετρία. Στη συνέχεια, προστέθηκαν πρόσθετα στα δείγματα αναφοράς, με σκοπό τη δημιουργία ενός ελαφροβαρούς δομικού στοιχείου, το οποίο ταυτόχρονα θα παρουσίαζε ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες (πυκνότητα, θλιπτική αντοχή, καμπτική αντοχή). Σε ορισμένα από τα δοκίμια μελετήθηκαν και πιο εξειδικευμένες μηχανικές ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson). Για την ολοκλήρωση και συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά:

Την κ. Κακάλη Γλυκερία, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., για την ανάθεση της εργασίας και για τις πολύτιμες συμβουλές της κατά την διάρκεια της συγγραφής της εργασίας.

Τον κ. Κιούπη Δημήτρη, Δρ. Ε.Μ.Π., ο οποίος με βοήθησε ιδιαίτερα σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, τόσο κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, όσο και κατά τη διάρκεια μελέτης της βιβλιογραφίας και της συγγραφής της διπλωματικής εργασίας. Η υπομονή του και η αγάπη του για το αντικείμενο, έκαναν την βοήθειά του καθοριστική και πολύτιμη.

Τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου για την καλή συνεργασία και τις χρήσιμες συμβουλές τους όλο αυτό το διάστημα.

Τον Μάμαλη Δημήτρη και τον Κυριαζή Χάρη, οι οποίοι έθεσαν την προηγούμενη εμπειρία τους στη διάθεσή μου, προκειμένου να επιτευχθεί ένα καλό αποτέλεσμα.

Τη μητέρα μου, Γεωργία, που κοπίασε καθ' όλη τη διάρκεια της μαθητικής και φοιτητικής μου ζωής, προκειμένου να μου εξασφαλίσει ένα μέλλον με όσο το δυνατόν λιγότερο άγχος και όσο το δυνατόν πιο γερά θεμέλια για να μπορέσω να στηρίξω πάνω του τα όνειρά μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μια προσπάθεια διερεύνησης της ανάπτυξης ελαφροβαρών δομικών υλικών, μέσω της αλκαλικής ενεργοποίησης αποβλήτων κατεδαφίσεων και μελέτης της επίδρασης προσθέτων στις ιδιότητες των τελικών προϊόντων.

Τα γεωπολυμερή παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των ποικίλων πλεονεκτημάτων τους, τόσο σε επίπεδο ιδιοτήτων, όσο και σε επίπεδο ενεργειακού περιεχομένου, αλλά και οικονομικό επίπεδο. Έχουν την ικανότητα να διαμορφώσουν βελτιωμένες κάποιες συγκεκριμένες ιδιότητες ανάλογα με την σύσταση των πρώτων υλών και τις συνθήκες της αντίδρασης γεωπολυμερισμού. Τα παραπάνω, τα καθιστούν ελκυστική επιλογή για μία σειρά εφαρμογών, όχι μόνο στον τομέα των κατασκευών. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των γεωπολυμερών έναντι των άλλων δομικών υλικών είναι η δυνατότητα αξιοποίησης παραπροϊόντων της βιομηχανίας και αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) ως πρώτες ύλες και η απαίτηση χαμηλών θερμοκρασιών για την σύνθεσή τους. Έτσι, επιτυγχάνεται μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας και φυσικών πόρων, ανακύκλωση αποβλήτων τα οποία διαφορετικά θα κατέληγαν στο περιβάλλον δημιουργώντας σωρεία προβλημάτων και σημαντική μείωση των εκπομπών CO₂.

Η σύνθεσή τους είναι αποτέλεσμα της αντίδρασης μεταξύ μιας αργιλοπυριτικής πρώτης ύλης και ενός αλκαλικού διαλύματος, που ονομάζεται διάλυμα ενεργοποίησης. Στη συγκεκριμένη εργασία, μελετήθηκε η συμπεριφορά τούβλου, που προήλθε από κατεδάφιση κτηρίου. Τα πρόσθετα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση των γεωπολυμερών αναφοράς ήταν επίσης προϊόντα ανακύκλωσης, τα οποία υπέστησαν προηγουμένως κατάλληλη επεξεργασία. Πιο συγκεκριμένα, ως παράγοντας μείωσης της πυκνότητας χρησιμοποιήθηκε διογκωμένη πολυστερίνη που προήλθε από μονωτικά πάνελ, οι ίνες πολυαιθυλενίου που προστέθηκαν για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων προήλθαν από πλαστικά απόβλητα. Τέλος τα αδρανή προήλθαν από χρησιμοποιημένο σκυρόδεμα. Αυτό υπέστη θραύση και αφού επιλέχθηκαν τα πιο ελαφροβαρή στοιχεία, ενθυλακώθηκαν σε αυτά υλικά αλλαγής φάσης. Τα αδρανή αυτά προστέθηκαν προκειμένου να βελτιωθεί η ενεργειακή απόδοση του τελικού προϊόντος.

Αρχικά, έγινε χαρακτηρισμός της πρώτης ύλης, όσον αφορά την χημική και ορυκτολογική της σύσταση, καθώς και την κοκκομετρία της. Στη συνέχεια, τα δείγματα αναφοράς ενισχύθηκαν με διογκωμένη πολυστερίνη σε ποσοστό 0.5% έως 3.0% κατά βάρος (κ.β.). Έπειτα, πραγματοποιήθηκε ενίσχυση των δειγμάτων αναφοράς με ίνες πολυαιθυλενίου σε ποσοστό 0.5% έως 2.0% κατ' όγκο (κ.ο.). Συγκρίνοντας τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων (θλιπτική, καμπτική αντοχή και πυκνότητα) επιλέχθηκαν οι βέλτιστοι συνδυασμοί, ώστε να γίνει ενίσχυση και με τους δύο παράγοντες και τελικά μελετήθηκαν εκ νέου δοκίμια τα οποία περιείχαν 1.5% κ.β. διογκωμένη πολυστερίνη και 0.5% έως 2.0% κ.ο. πολυαιθυλένιο, και δοκίμια τα οποία περιείχαν 2.0% κ.β. διογκωμένη πολυστερίνη και 0.5% έως 2.0% κ.ο. πολυαιθυλένιο. Βρέθηκε ότι τα δοκίμια που περιείχαν 1.5%κ.β. διογκωμένη πολυστερίνη και 2.0% κ.ο. πολυαιθυλένιο εμφάνισαν τον βέλτιστο συνδυασμό ιδιοτήτων, δηλαδή τις υψηλότερες αντοχές για τη χαμηλότερη πυκνότητα. Σε αυτά τα δοκίμια προστέθηκαν αδρανή με ενθυλακωμένα υλικά αλλαγής φάσης σε ποσοστά από 4.0% έως 18% κ.β.. Τα δοκίμια που εμφάνισαν τις βέλτιστες ιδιότητες ήταν αυτά που περιείχαν 1.5% κ.β. διογκωμένη πολυστερίνη, 2.0% κ.ο. πολυαιθυλένιο και 6.0% κ.β. αδρανή με ενθυλακωμένα υλικά αλλαγής φάσης. Σε αυτά έγινε επιπλέον μελέτη του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σε σχέση με την ψαθυρότητα του τελικού

προϊόντος και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά των δειγμάτων αναφοράς και των δειγμάτων που περιείχαν 1.5% κατά βάρος διογκωμένη πολυστερίνη και 2.0% κατ' όγκο πολυαιθυλένιο.

Όπως αποδείχθηκε, μπορούν να παρασκευαστούν γεωπολυμερή και ελαφροβαρή γεωπολυμερή από απόβλητα τούβλου. Επιπλέον, τα δομικά υλικά από γεωπολυμερή με βάση τα απόβλητα τούβλου μπορούν να αναπτύξουν αντοχές παρόμοιες με αυτές του συμβατικού τσιμέντου. Ακόμα αποδείχθηκε ότι ένας εύκολος τρόπος για την παρασκευή ελαφροβαρών δομικών υλικών είναι η προσθήκη διογκωμένης πολυστερίνης, ενώ παράλληλα οι ίνες που έχουν προέλθει από απόβλητα ενισχύουν τις μηχανικές αντοχές των προϊόντων.

Το δείγμα αναφοράς παρουσίασε θλιπτική αντοχή 43.9MPa, καμπτική αντοχή 4.0MPa, πυκνότητα 2.0g/cm³, μέτρο ελαστικότητας 3.85GPa και λόγο Poisson 0.28. Τα δείγματα που ενισχύθηκαν με διογκωμένη πολυστερίνη παρουσίασαν θλιπτική αντοχή από 22.8MPa έως 6.5MPa, καμπτική αντοχή από 3.1MPa έως 1.7MPa και πυκνότητα 1.7g/cm³ έως 1.1g/cm³. Τα δείγματα που ενισχύθηκαν με ίνες πολυαιθυλενίου παρουσίασαν θλιπτική αντοχή από 44.9MPa έως 41.7MPa, καμπτική αντοχή από 3.2MPa έως 2.6MPa και πυκνότητα 2g/cm³. Τα δείγματα που ενισχύθηκαν με 2.0% κατά βάρος διογκωμένη πολυστερίνη και ίνες πολυαιθυλενίου παρουσίασαν θλιπτική αντοχή 10.8MPa έως 9.8MPa, καμπτική αντοχή 2.6MPa έως 1.9MPa και πυκνότητα 1.3g/cm³ έως 1.2g/cm³. Τα δείγματα που ενισχύθηκαν με 1.5% κατά βάρος διογκωμένη πολυστερίνη και ίνες πολυαιθυλενίου παρουσίασαν θλιπτική αντοχή 13.9MPa έως 12.8MPa, καμπτική αντοχή 3.2MPa έως 2.4MPa, πυκνότητα 1.4g/cm³. Το βέλτιστο συνδυασμό μηχανικό ιδιοτήτων είχε το δείγμα που περιείχε 1.5%κ.β. διογκωμένη πολυστερίνη και 2.0%κ.ο. πολυαιθυλένιο, με 13.0MPa θλιπτική αντοχή, 3.2MPa καμπτική αντοχή, 1.4 g/cm³, 1.15GPa μέτρο ελαστικότητας και 0.15 λόγο Poisson. Τα δείγματα που περιείχαν 1.5%κ.β. διογκωμένη πολυστερίνη και 2.0%κ.ο. πολυαιθυλένιο και ενισχύθηκαν με αδρανή με ενθυλακωμένα υλικά αλλαγής φάσης παρουσίασαν θλιπτική αντοχή από 17.7MPa έως 10.1MPa, καμπτική αντοχή 3.2MPa έως 2.1MPa, πυκνότητα 1.5g/cm³ έως 1.3g/cm³. Το βέλτιστο συνδυασμό μηχανικών ιδιοτήτων εμφάνισε το δείγμα που περιείχε 1.5%κ.β. διογκωμένη πολυστερίνη, 2.0%κ.ο. πολυαιθυλένιο και 6.0%κ.β. αδρανή, με 11.7MPa θλιπτική αντοχή, 3.0MPa καμπτική αντοχή, 1.3 g/cm³, 3.8GPa μέτρο ελαστικότητας και 0.18 λόγο Poisson.

ABSTRACT

In this work an attempt was made to investigate the development of lightweight building materials through the alkali activation of demolition waste and the study of the effect of additives on the properties of the final products.

Geopolymers are of interest because of their varying advantages, both in terms of properties, as well as in terms of energy content and cost. They can have improved properties depending on the composition of the raw materials and the conditions of the geopolymerization reaction. The above makes them an attractive choice for a range of applications, not only in the construction sector but in other sectors as well. The main advantages of geopolymers over other building materials are the ability to exploit by-products of industry and construction and demolition waste (CDW) as raw materials and the requirement of low temperatures for their composition. Thus, considerable savings in energy and natural resources, recycling of waste which would otherwise end up in the environment and a significant reduction in CO₂ emissions, are achieved.

Their composition is the result of the reaction between an aluminosilicate feedstock and an alkaline solution called “activating solution”. In this paper was studied, the behavior of brick, which came from the demolition of a building. Additives that were used to reinforce reference geopolymers were also recycled products, which were previously processed appropriately. To be specific, polystyrene derived from insulating panels and was used as a density reducing agent, polyethylene fibers added to improve mechanical properties derived from plastic waste. Finally, the aggregates were derived from used concrete, which was fractured and after the lightest elements were selected, phase change materials were encapsulated therein. These aggregates were added to improve the energy efficiency of the final product.

In the beginning, the raw material was characterized regards its chemical and mineralogical composition, as well as its granulometry. The reference samples were then reinforced with 0.5 up to 3.0% w/w polystyrene. Next, reinforcement of the reference samples with 0.5% to 2.0% v/v polyethylene fibers was carried out. By comparing the mechanical properties of the specimens (compressive strength, flexural strength and density), the optimal combinations were chosen to reinforce with both factors and finally samples containing 1.5% w/w polystyrene and 0.5% up to 2.0% v/v polyethylene, and specimens containing 2.0% w/w polystyrene and 0.5% up to 2.0% v/v polyethylene were re-studied. It was found that the samples containing 1.5% w/w polystyrene and 2.0% v/v polyethylene exhibited the optimum combination of properties, i.e. the higher strengths for the lower density. In these samples, aggregates with encapsulated phase change materials were added in amounts of from 4.0% up to 18.0% w/w. The samples exhibiting the optimal properties were those containing 1.5%w/w polystyrene, 2.0% v/v polyethylene and 6.0% w/w aggregates with encapsulated phase change materials. In addition, a study of the elastic modulus and the Poisson ratio was carried out in order to draw conclusions about the brittleness of the final product and the results were compared with those of the reference samples and the samples containing 1.5% w/w polystyrene and 2.0% v/v polyethylene.

Through this work it was proved that, geopolymers and lightweight geopolymers from brick waste can be prepared as shown. In addition, construction materials made from brick can develop strengths like those of conventional cement. It has also been found that an easy way to prepare lightweight building materials is the addition of polystyrene, while the fibers derived from waste enhance the mechanical strength of the products.

The reference sample had compressive strength equal to 43.9MPa, flexural strength equal to

4.0MPa, density 2.0g/cm³, modulus of elasticity 3.85GPa and Poisson ratio 0.28. Polystyrene-reinforced samples showed compressive strength of 22.8MPa to 6.5MPa, flexural strength of 3.1MPa to 1.7MPa and density of 1.7g / cm³ to 1.1g / cm³. Polyethylene-reinforced samples showed compressive strength of 44.9MPa to 41.7MPa, flexural strength from 3.2MPa to 2.6MPa and density of 2g/cm³. Samples reinforced with 2.0% w/w polystyrene and polyethylene fibers showed compressive strength of 10.8MPa to 9.8MPa, flexural strength of 2.6MPa to 1.9MPa and density of 1.3g/cm³ to 1.2g/cm³. Samples reinforced with 1.5% by w/w polystyrene and polyethylene fibers showed compressive strength of 13.9MPa to 12.8MPa, flexural strength of 3.2MPa to 2.4MPa, density of 1.4g/cm³. The sample containing 1.5% w/w polystyrene and 2.0% v/v polyethylene had the optimal combination of mechanical properties: 13.0MPa compressive strength, 3.2MPa flexural strength, 1.4g/cm³, 1.15GPa elastic modulus and 0.15 Poisson ratio. Samples containing 1.5% w/w polystyrene and 2.0% v/v polyethylene and reinforced with aggregates with encapsulated phase change materials showed compressive strength of 17.7MPa to 10.1MPa, flexural strength of 3.2MPa to 2.1MPa, density of 1.5g/cm³ to 1.3g/cm³. The sample containing 1.5% w/w polystyrene, 2.0% v/v polyethylene and 6.0% w/w aggregates had the optimal combination of mechanical properties: 11.7MPa compressive strength, 3.0MPa flexural strength, 1.3g/cm³, 3.8GPa elastic modulus and 0.18 Poisson ratio.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	9
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	10
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	15
2.1. Γεωπολυμερή	15
2.1.1. Σύντομη ιστορική ανασκόπηση	15
2.1.2. Σύνθεση γεωπολυμερών	16
2.1.3. Πρόδρομα υλικά	20
2.1.4. Πλεονεκτήματα	21
2.1.5. Εφαρμογές	22
2.1.6. Βιομηχανοποίηση των γεωπολυμερικών τσιμέντων	23
2.2. Απόβλητα Εκσκαφών, Κατασκευών και Κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ)	26
2.2.1. Σύσταση των ΑΕΚΚ	26
2.2.2. Ποσότητες και ανακυκλώσεις στην Ε.Ε.	28
2.2.3. ΑΕΚΚ Κεραμικού Τύπου	30
2.2.4. ΑΕΚΚ και Αλκαλική Ενεργοποίηση	31
2.2.5. Εναλλακτικές πηγές ΑΕΚΚ	35
2.3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση: Μέθοδοι παραγωγής ελαφροβαρών δομικών υλικών από γεωπολυμερή	37
2.3.1. Αφρισμός	37
2.3.2. Ελαφροβαρή αδρανή	40
3. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΘΕΜΑΤΟΣ	42
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	44
4.1. Επιλογή και χαρακτηρισμός πρώτων υλών	44
4.2. Διάλυμα ενεργοποίησης	47
4.3. Πρόσθετα	47
4.4. Σύνθεση γεωπολυμερών	49
4.5. Τεχνικές Χαρακτηρισμού	52
4.5.1. Περίθλαση Ακτινών Χ	52
4.5.2. Κοκκομετρική κατανομή με περίθλαση ακτινών laser	52
4.5.3. Δοκιμές μονοαξονικής θλίψης/κάμψης	53
5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	54

5.1. Ιδιότητες γεωπολυμερούς αναφοράς	54
5.2. Μείωση της πυκνότητας με τη χρήση αποβλήτου διογκωμένης πολυστερίνης (EPS)	55
5.3. Ενίσχυση της γεωπολυμερικής μήτρας με ίνες από ΑΕΚΚ	58
5.4. Ενίσχυση ελαφροβαρών γεωπολυμερών με ίνες από ΑΕΚΚ	60
5.5. Ενίσχυση ελαφροβαρών γεωπολυμερών με ανακυκλωμένα αδρανή	64
5.6. Μέτρηση Μέτρου Ελαστικότητας E και λόγου Poisson ν	67
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	70
7. ΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	71
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	73

Ευρετήριο Σχημάτων

1. Σχήμα 2.1: Σιαλικές δομές που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια του γεωπολυμερισμού
2. Σχήμα 2.2: Διάγραμμα Ροής Σύνθεσης Γεωπολυμερών
3. Σχήμα 2.3: Σύσταση ΑΕΚΚ
4. Σχήμα 2.4: Σύσταση ΑΕΚΚ με βάση την Ε.Ε.
5. Σχήμα 2.5: Τυπική σύσταση ΑΕΚΚ
6. Σχήμα 2.6: Ποσοότητες ΑΕΚΚ στην Ε.Ε.
7. Σχήμα 2.7: Ποσοστά Ανακυκλώσεων ΑΕΚΚ στην Ε.Ε.
8. Σχήμα 3.1: Διάγραμμα Ροής της πειραματικής διαδικασίας
9. Σχήμα 4.1: Ορυκτολογική ανάλυση αποβλήτου τούβλου
10. Σχήμα 4.2: Κοκκομετρική κατανομή τούβλου
11. Σχήμα 4.3: Διάγραμμα ροής σύνθεσης γεωπολυμερών από απόβλητα τούβλου
12. Σχήμα 5.1: Θλιπτικές αντοχές συναρτήσεως της περιεκτικότητας σε EPS
13. Σχήμα 5.2: Καμπτικές αντοχές συναρτήσεως της περιεκτικότητας σε EPS
14. Σχήμα 5.3: Θλιπτικές αντοχές συναρτήσεως της περιεκτικότητας σε PE
15. Σχήμα 5.4: Καμπτικές αντοχές συναρτήσεως της περιεκτικότητας σε PE
16. Σχήμα 5.5: Θλιπτικές αντοχές ενισχυμένων γεωπολυμερών με 2.0% κ.β. EPS συναρτήσεως της περιεκτικότητας σε PE
17. Σχήμα 5.6: Καμπτικές αντοχές ενισχυμένων γεωπολυμερών με 2.0% κ.β. EPS συναρτήσεως της περιεκτικότητας σε PE
18. Σχήμα 5.7: Θλιπτικές αντοχές ενισχυμένων γεωπολυμερών με 1.5% κ.β. EPS συναρτήσεως της περιεκτικότητας σε PE
19. Σχήμα 5.8: Καμπτικές αντοχές ενισχυμένων γεωπολυμερών με 1.5% κ.β. EPS συναρτήσεως της περιεκτικότητας σε PE
20. Σχήμα 5.9: Θλιπτικές αντοχές ενισχυμένων γεωπολυμερών με 1.5% κ.β. EPS, 2.0% κ.ο. PE συναρτήσεως της περιεκτικότητας σε ανακυκλωμένα αδρανή
21. Σχήμα 5.10: Καμπτικές αντοχές ενισχυμένων γεωπολυμερών με 1.5% κ.β. EPS, 2.0% κ.ο. PE συναρτήσεως της περιεκτικότητας σε ανακυκλωμένα αδρανή
22. Σχήμα 5.11: Διάγραμμα τάσης/ανηγμένης παραμόρφωσης γεωπολυμερούς αναφοράς
23. Σχήμα 5.12: Διάγραμμα τάσης/ανηγμένης παραμόρφωσης δειγμάτων ενισχυμένων με 1.5% κ.β. EPS και 2% κ.ο. PE
24. Σχήμα 5.13: Διάγραμμα τάσης/ανηγμένης παραμόρφωσης δειγμάτων ενισχυμένων με 1.5% κ.β. EPS, 2% κ.ο. PE και 6% κ.β. ανακυκλωμένα αδρανή

Ευρετήριο Πινάκων

1. Πίνακας 2.1: Τυπική σύσταση ΑΕΚΚ στις χώρες της Ε.Ε.
2. Πίνακας 2.2: Ποσότητες και Ανακυκλώσεις ΑΕΚΚ στην Ε.Ε.
3. Πίνακας 4.1: Χημική ανάλυση αποβλήτου τούβλου
4. Πίνακας 4.2: Κοκκομετρία τούβλου – d50, d90
5. Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά ινών PE
6. Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά ανακυκλωμένων αδρανών με ενθυλακωμένα PCM's
7. Πίνακας 4.5: Ποσότητες συστατικών για την παρασκευή του διαλύματος ενεργοποίησης, του δείγματος αναφοράς και των δειγμάτων ενισχυμένων με EPS
8. Πίνακας 4.6: Ποσότητες συστατικών για την παρασκευή του διαλύματος ενεργοποίησης, του δείγματος αναφοράς και των δειγμάτων ενισχυμένων με PE
9. Πίνακας 4.7: Ποσότητες συστατικών για την παρασκευή του διαλύματος ενεργοποίησης, του δείγματος αναφοράς και των δειγμάτων ενισχυμένων με 1.5% κ.β. EPS και PE
10. Πίνακας 4.8: Ποσότητες συστατικών για την παρασκευή του διαλύματος ενεργοποίησης, του δείγματος αναφοράς και των δειγμάτων ενισχυμένων με 2.0% κ.β. EPS και PE
11. Πίνακας 4.9: Ποσότητες συστατικών για την παρασκευή του διαλύματος ενεργοποίησης, του δείγματος αναφοράς και των δειγμάτων ενισχυμένων με 1.5% κ.β. EPS, 2.0% κ.ο. PE και ανακυκλωμένα αδρανή
12. Πίνακας 5.1: Ιδιότητες γεωπολυμερούς αναφοράς
13. Πίνακας 5.2: Ιδιότητες γεωπολυμερούς ενισχυμένου με EPS
14. Πίνακας 5.3: Ιδιότητες γεωπολυμερούς ενισχυμένου με PE
15. Πίνακας 5.4: Ιδιότητες γεωπολυμερούς ενισχυμένου με 2.0% κ.β. EPS και PE
16. Πίνακας 5.5: Ιδιότητες γεωπολυμερούς ενισχυμένου με 1.5% κ.β. EPS και PE
17. Πίνακας 5.6: Ιδιότητες γεωπολυμερούς ενισχυμένου με 1.5% κ.β. EPS, 2.0% κ.ο. PE και 6.0% κ.β. ανακυκλωμένα αδρανή
18. Πίνακας 5.7: Μέτρο ελαστικότητας και λόγος Poisson των δειγμάτων αναφοράς
19. Πίνακας 5.8: Μέτρο ελαστικότητας και λόγος Poisson των ενισχυμένων δειγμάτων με 1.5% κ.β. EPS και 2% κ.ο. PE
20. Πίνακας 5.9: Μέτρο ελαστικότητας και λόγος Poisson των ενισχυμένων δειγμάτων με 1.5% κ.β. EPS, 2% κ.ο. PE και 6% κ.ο. ανακυκλωμένα αδρανή

Ευρετήριο Εικόνων

1. Εικόνα 2.1: Δείγματα γεωπολυμερούς και OPC μετά από θερμική καταπόνηση στους 900οC για 2h
2. Εικόνα 4.1: Ίνες PE
3. Εικόνα 4.2: Σωματίδια EPS
4. Εικόνα 4.3: Περιθλασίμετρο ακτινών X
5. Εικόνα 4.4: Συσκευή τεχνολογίας περίθλασης ακτινών laser
6. Εικόνα 4.5: Πρέσα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης/κάμψης και μέτρησης μέτρου ελαστικότητας και λόγου Poisson
7. Εικόνα 5.1: Δείγμα γεωπολυμερούς αναφοράς
8. Εικόνα 5.2: Δείγμα γεωπολυμερούς ενισχυμένου με 1.5% κ.β. EPS
9. Εικόνα 5.3: Δείγμα γεωπολυμερούς ενισχυμένου με 1.5% κ.β. EPS και 0.5% κ.ο. PE
10. Εικόνα 5.4: Δείγμα γεωπολυμερούς ενισχυμένου με 1.5% κ.β. EPS, 2.0% κ.ο. PE και 6.0% κ.β. ανακυκλωμένα αδρανή

1. Εισαγωγή

Ο κλάδος της τσιμεντοβιομηχανίας αναμένεται να επεκταθεί σημαντικά λόγω της ταχείας υποδομής, τις εξελίξεις στις αναπτυσσόμενες χώρες και την ετήσια παγκόσμια παραγωγή της.

Μετά από σχεδόν 175 χρόνια βιομηχανικής παραγωγής, το κλασικό τσιμέντο Portland (OPC) έχει καταστεί το κυρίαρχο ανόργανο συνδετικό υλικό που χρησιμοποιείται σε κατασκευές μεγάλης κλίμακας από σκυρόδεμα. [1]

Ωστόσο, αυτό το παγκοσμίως αποδεκτό ανόργανο συνδετικό υλικό πάσχει από πολλά μειονεκτήματα. Η παραγωγική διαδικασία του OPC (κυρίως σε ό,τι αφορά την παραγωγή του κλίνκερ) [2,3] είναι εντατική σε ενέργεια, λαμβάνοντας περίπου το 2 έως 3% της παγκόσμιας χρήσης πρωτογενούς ενέργειας. Επιπλέον, η βιομηχανία OPC είναι υπό πίεση για τη μείωση των εκπομπών CO₂. [4] Αυτή τη στιγμή εκπέμπονται περίπου 0,87 τόνοι CO₂ για κάθε τόνο παραγόμενου τσιμέντου, ή αλλιώς 1.5 δισεκατομμύρια τόνοι CO₂ ετησίως, δηλαδή σχεδόν το 5-6% των συνολικών εκπομπών που προέρχονται από ανθρωπογενή παράγοντα. Επιπλέον, η άμμος και τα πρόσθετα, που είναι και αυτά βασικά στοιχεία στην παραγωγή του τσιμέντου, προέρχονται από δραστηριότητες λατομείου, που είναι ταυτόχρονα και ενεργοβόρες δραστηριότητες, αλλά και παράγουν υψηλά ποσά αποβλήτων. [3,5] Άλλα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν προβλήματα ανθεκτικότητας σε ορισμένα επιθετικά περιβάλλοντα.

Όλες αυτές οι ελλείψεις έχουν προκαλέσει το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη εναλλακτικών λύσεων. Οι έρευνες προσανατολίζονται στη δημιουργία ενός ανόργανου συνδετικού υλικού χαμηλού κόστους, φιλικού προς το περιβάλλον, που θα παρέχει βελτιωμένη ανθεκτικότητα και απόδοση σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα.

Μεταξύ άλλων εναλλακτικών συνδετικών υλικών είναι τα αλκαλικά ενεργοποιημένα τσιμέντα ή αλλιώς γεωπολυμερή, παρόλο που δεν έχουν ακόμη εμπορευματοποιηθεί σε ευρεία κλίμακα. Μέχρι τώρα έχει χρησιμοποιηθεί ποικιλία βιομηχανικών παραπροϊόντων και αποβλήτων, καθώς και μια σειρά αργιλοπυριτικών πρώτων υλών, στην ανάπτυξη και παραγωγή αλκαλικά ενεργοποιημένων ή αλλιώς γεωπολυμερικών τσιμέντων. Ωστόσο, μέχρι τώρα έχει αφιερωθεί λίγη προσπάθεια στη χρήση των αποβλήτων κατασκευής και κατεδάφισης (AEKK) ως εναλλακτική πηγή στην ανάπτυξη και παραγωγή τσιμέντων αλκαλικά ενεργοποιημένων ή γεωπολυμερών. [2]

Κατά την ανάπτυξη οποιουδήποτε νέου υλικού ή διεργασίας μεγάλης κλίμακας, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί η ύπαρξη μιας ισχυρής αλυσίδας εφοδιασμού. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη βιομηχανία δομικών υλικών, λόγω των τεράστιων όγκων που πρέπει να υποστούν επεξεργασία, ώστε μια επιχείρηση -αυτού του κλάδου- να είναι οικονομικά βιώσιμη. Η βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος, η βιομηχανία γεωργίας και η βιομηχανία εξόρυξης μεταλλουργίας είναι αναμφισβήτητα οι μοναδικοί τομείς επεξεργασίας που είναι εξοπλισμένοι για να διαχειριστούν τόσο μεγάλο όγκο στερεών, τόσο ως πρόδρομο όσο και ως προϊόν, και αυτό εγείρει σημαντικά ερωτήματα για το αν ένα νέο υλικό θα είναι εμπορικά βιώσιμο. [6]

Έχει διεξαχθεί και δημοσιευθεί μεγάλος αριθμός ακαδημαϊκών μελετών, οι οποίες μελετούν την παραγωγή ενός αλκαλικά ενεργοποιημένου συνδετικού υλικού, το οποίο παράγεται από συγκεκριμένους συνδυασμούς βιομηχανικών αποβλήτων και χημικών πρώτων υλών. Ωστόσο, εάν ένα συγκεκριμένο απόβλητο είναι διαθέσιμο μόνο σε ποσότητες μερικών δεκάδων τόνων ημερησίως, θα είναι πολύ δύσκολο να παραχθεί ένας εμπορικώς χρήσιμος όγκος αλκαλικά ενεργοποιημένου σκυροδέματος για γενική κατασκευή ή για εφαρμογές υποδομής. Αυτό σημαίνει ότι η παραγωγή αλκαλικά ενεργοποιημένου

σκυροδέματος που βασίζεται σε ρεύματα αποβλήτων χαμηλού έως μέτριου όγκου θα απαιτήσει κάποιες μορφές διεύρυνσης, ώστε τελικά να παραχθεί σκυρόδεμα χαμηλού κόστους και τυπικής απόδοσης, που θα επιτρέψει τη χρήση του σε πρακτικό και προοπτικό πλαίσιο.[3,6]

Από τη χρήση αλκαλικά ενεργοποιημένου σκυροδέματος μπορεί να προκύψουν ειδικά περιβαλλοντικά ή οικονομικά οφέλη, καθώς αυτή συνεπάγεται πολλές ευεργετικές ιδιότητες, οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια.[6]

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της ανάπτυξης ελαφροβαρών δομικών υλικών μέσω της αλκαλικής ενεργοποίησης αποβλήτων κατεδάφισεων. Συγκεκριμένα, ως πρώτη ύλη χρησιμοποιήθηκε απόβλητο τούβλου από κατεδάφιση κτηρίου, ενώ σαν πρόσθετα για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος χρησιμοποιήθηκαν: απόβλητο πολυστυρενίου από μονωτικά πάνελ, ίνες πολυαιθυλενίου που παρήχθησαν από απόβλητα πλαστικών και ανακυκλωμένα αδρανή με ενθυλακωμένα υλικά αλλαγής φάσης από χρησιμοποιημένο σκυρόδεμα. Είναι σημαντικό το γεγονός ότι τόσο η πρώτη ύλη, όσο και τα πρόσθετα, αποτελούν υλικά που ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των Αποβλήτων Εκσκαφών Κατεδαφίσεων και Κατασκευών (ΑΕΚΚ). Το πολυστυρένιο προστέθηκε ώστε να επιτευχθεί μείωση της πυκνότητας του υλικού, ενώ οι ίνες πολυαιθυλενίου για να βελτιώσουν τις μηχανικές και ρεολογικές ιδιότητες του παραγόμενου υλικού. Τέλος, τα ανακυκλωμένα αδρανή με ενθυλακωμένα υλικά αλλαγής φάσης, προστέθηκαν προκειμένου να αποδώσουν θερμικές ιδιότητες στο υλικό και κυρίως ιδιότητες που αφορούν την καλύτερη ενεργειακή απόδοσή του.

Τα βασικά σημεία που αναπτύσσονται στην εργασία είναι:

- Ο χαρακτηρισμός των πρώτων υλών
- Η διερεύνηση της επίδρασης των προσθέτων στις μηχανικές ιδιότητες των τελικών προϊόντων
- Η σύγκριση των ιδιοτήτων του παραγόμενου υλικού σε σχέση με αυτές του συμβατικού σκυροδέματος

Οι ενότητες της εργασίας έχουν διαμορφωθεί ως εξής:

Θεωρητικό μέρος:

- Ενότητα 1: Γενικά στοιχεία για την τεχνολογία γεωπολυμερών και τα γεωπολυμερή
- Ενότητα 2: Γενικά στοιχεία για τα Απόβλητα Εκσκαφών, Κατεδαφίσεων και Κατασκευών
- Ενότητα 3: Βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθόδων που έχουν μελετηθεί για τη μείωση του βάρους των τελικών προϊόντων
- Ενότητα 4: Τοποθέτηση θέματος και Διάγραμμα ροής της πειραματικής διαδικασίας

Πειραματικό μέρος:

- Ενότητα 5: Επιλογή και χαρακτηρισμός πρώτων υλών
- Ενότητα 6: Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας
- Ενότητα 7: Χαρακτηρισμός τελικών προϊόντων

Συζήτηση Αποτελεσμάτων

- Ενότητα 8: Παρουσίαση αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας και συζήτηση αυτών

Συμπεράσματα

- Ενότητα 9: Παρουσίαση συμπερασμάτων

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

- Ενότητα 10: Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Βιβλιογραφία

- Ενότητα 11: Παρουσίαση βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας

2. Θεωρητικό Μέρος

2.1. Γεωπολυμερή

Γεωπολυμερή ονομάζονται αλλιώς τα αλκαλικά ενεργοποιημένα υλικά και η αλκαλική ενεργοποίηση αργιλοπυριτικών υλικών είναι γνωστή από την Τρίτη δεκαετία του περασμένου αιώνα. [7,8] Η ονομασία αυτή δόθηκε από τον Davidovits [1] το 1978 και περιγράφει μία ολόκληρη οικογένεια συνδετικών υλικών, των οποίων η δομή είναι παρόμοια με αυτή που συναντάμε στους ζεόλιθους, καθώς έχουν περίπου τον ίδιο λόγο αργιλίου προς πυρίτιο (Al:Si).[2,9,10,11] Οποιαδήποτε πηγή διοξειδίου του πυριτίου και αλούμινας που μπορεί να διαλυθεί σε αλκαλικό διάλυμα μπορεί να λειτουργήσει ως πρόδρομο γεωπολυμερούς. [12]

Ο όρος γεωπολυμερές, όπως προτάθηκε αρχικά, αναφέρεται κυρίως σε καθαρά ανόργανα υλικά, αλλά θα μπορούσε να επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει και γεωϋλικά με οργανικό περιεχόμενο. Είναι γνωστό ότι οι αρχαίοι Αιγύπτιοι χρησιμοποιούσαν αρωματικές και ποτάμιες λάσπες που περιείχαν οργανικά υλικά (πχ. χουμικά υλικά) για την κατασκευή στοιχείων με αξιοσημείωτη αντοχή και ανθεκτικότητα. Τα ρωμαϊκά σκυροδέματα επίσης περιείχαν λάσπη ως συνδετικό υλικό[12], καθώς και άμορφα ζεολιθικά συστατικά[1].

Τα γεωπολυμερή σχηματίζονται από τη χημική αντίδραση μεταξύ αργιλοπυριτικών υλικών και διαλύματος αλκαλοπυριτίου σε ισχυρά αλκαλικό μέσο [1,2,7,13,14]. Το αποτέλεσμα είναι εν μέρει ή πλήρως άμορφα ανόργανα πολυμερή με δεσμούς Si-O-Al διατεταγμένους σε τετράεδρα SiO₄ και AlO₄ σε τρισδιάστατη δομή.[1,2] Το τελικό προϊόν είναι συνήθως μία γέλη ένυδρου αργιλοπυριτικού νατρίου (NASH) ή ένυδρου αργιλοπυριτικού ασβεστίου (CASH) ή ένυδρου αργιλοπυριτικού νατρίου-ασβεστίου ((N,C)ASH).[2] Έχει αποδειχτεί ότι ο μηχανισμός της αντίδρασης και ο τύπος του παραγόμενου συνδετικού υλικού εξαρτώνται από τη φύση τόσο του πρόδρομου υλικού, όσο και του ενεργοποιητή, και πιο συγκεκριμένα από το επίπεδο ασβεστίου που είναι διαθέσιμο προς αντίδραση (NASH-χαμηλό ασβέστιο, CASH-υψηλό ασβέστιο).[2,14] Άλλοι σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν τις ιδιότητες των γεωπολυμερών είναι: η μέθοδος επεξεργασίας και η προσθήκη μεταλλικών στοιχείων κατά τη διεργασία του γεωπολυμερισμού.[14]

Μεγάλη προσοχή έχει δοθεί στην αλκαλική ενεργοποίηση μετακαολίνη, αργίλου, ιπτάμενης τέφρας, σκωριών, καθώς και μιγμάτων τους.[2,7,13,14] Σημειώνεται ότι ερευνητές έχουν, επιπλέον, μελετήσει πολλά διαφορετικά βιομηχανικά παραπροϊόντα/απόβλητα που περιέχουν πυρίτιο και αργίλιο, όπως απορρίμματα/υπολείμματα βωξίτη [15], τέφρα φλοιού ρυζιού, τέφρα από κάρβουνο, γυαλί, απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων και κεραμικά παραπροϊόντα [8].

2.1.1. Σύντομη ιστορική ανασκόπηση

Οι Victor Glukhovsky και Pavel Krivenko ανέπτυξαν την δεκαετία του 1950 στην Ουκρανία αλκαλικά ενεργοποιημένα υλικά, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή ενός ψηλού κτιρίου στην Ρωσία.

Ο Glukhovsky ήταν ο πρώτος που υπέθεσε ότι εφόσον η γεωλογική διαδικασία μετατροπής κάποιων ηφαιστειογενών πετρωμάτων σε ζεόλιθους λαμβάνει χώρα κατά το σχηματισμό προσχωσιγενών πετρωμάτων σε χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, μπορεί να διαμορφωθεί μία αντίστοιχη διαδικασία, που θα χρησιμοποιηθεί σε συστήματα τσιμέντου.

Μία τέτοια διαδικασία θα μπορούσε να εξασφαλίσει εξαιρετική ανθεκτικότητα, αλλά και νέες χρήσιμες ιδιότητες.

Ο όρος «γεωπολυμερές» εισήχθη το 1978 από τον J. Davidovits σε μια προσπάθεια να περιγραφούν τα τρισδιάστατα, άμορφα έως ημικρυσταλλικά, αργιλοπυριτικά προϊόντα της αντίδρασης έντονα αλκαλικών διαλυμάτων με αργιλοπυριτικές πρώτες ύλες. Το πρώτο συνθετικό του όρου περιγράφει την ανόργανη προέλευση τους (και κυρίως την απουσία ενώσεων του άνθρακα), ενώ το δεύτερο συνθετικό περιγράφει, κατ' αναλογία με τα οργανικά πολυμερή, την μετατροπή και πολυσυμπύκνωση των ανόργανων πρώτων υλών σε μια τρισδιάστατη, μεγάλου μήκους δομή. Η δομική μονάδα του πολυμερούς θεωρείται πως αποτελείται από τετράεδρα πυριτίου και αργιλίου τα οποία ενώνονται με «γέφυρες» οξυγόνου, τύπου (-O-Si-O-Al-).

Τα τελευταία χρόνια η πληθώρα ονομασιών που περιγράφουν αυτά τα υλικά, όπως alkali-bounded-ceramics, υδρο-κεραμικά και αλκαλικά ενεργοποιημένα τσιμέντα, προκαλούν μεγάλη σύγχυση. Σε όλες τις περιπτώσεις πάντως η έννοια της αλκαλικής ενεργοποίησης περιλαμβάνεται απαραίτητως. Ίσως να είναι πιο σωστός ένας περισσότερο ευρύς όρος, ο οποίος περιγράφει τα παραγόμενα προϊόντα ως «ανόργανα πολυμερή». Πάντως στην βιβλιογραφία επικρατεί ο όρος «γεωπολυμερές». [16]

2.1.2. Σύνθεση γεωπολυμερών

Ο γεωπολυμερισμός είναι μία τεχνολογία που βασίζεται στις χημικές αντιδράσεις άμορφων αργιλοπυριτικών υλικών με διάλυμα υψηλής αλκαλικότητας [3,4,7,12,15,17,18] σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή λίγο υψηλότερες θερμοκρασίες [3,7,8,19], προκειμένου να δημιουργηθεί μία νέα μορφή ανόργανου πολυμερούς ή αλλιώς γεωπολυμερούς, το οποίο θεωρείται ως ένα άμορφο ή ημικρυσταλλικό αργιλοπυριτικό υλικό.[7,8,10,11,15,19]

Η αλκαλική ενεργοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε υλικό με επαρκώς υψηλό περιεχόμενο ενεργών Al_2O_3 και SiO_2 . [3,4,6] Τα υλικά που διαθέτουν την περισσότερο άμορφη δομή και την μικρότερη ενέργεια συνοχής επιδεικνύουν την μεγαλύτερη δραστηριότητα στην αλκαλική ενεργοποίηση.[4,19] Ο γεωπολυμερισμός μειγμάτων δύο ή τριών υλικών ευνοείται λόγω της αλληλεπίδρασης των υλικών αυτών, τα οποία μπορεί να ενεργοποιήσουν το ένα το άλλο. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται το εύρος της αντίδρασης και είναι δυνατή η επίτευξη υψηλών θλιπτικών αντοχών.[4]

Η σύνθεση των γεωπολυμερών μοιάζει πολύ με τη ζεολιθική σύνθεση [4,19], αλλά διαφέρει στο ότι πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες κάτω των 100 βαθμών Κελσίου, υπό ατμοσφαιρική πίεση, ενώ και ο χρόνος αντίδρασης είναι σημαντικά μικρότερος.

Το διάλυμα υψηλής αλκαλικότητας μπορεί να είναι είτε διάλυμα KOH, είτε NaOH, είτε συνδυασμός τους. Η ύπαρξη αλκαλικού διαλύματος απαιτείται τόσο για την διαλυτοποίηση των αργιλοπυριτικών οξειδίων, όσο και για την κατάλυση της αντίδρασης πολυμερισμού/συμπύκνωσης.[4] Η χρήση του KOH αντί για NaOH μπορεί να είναι προνομιακή για την επίτευξη υψηλών θλιπτικών αντοχών. Αυτό συμβαίνει λόγω του υψηλού μεγέθους του κατιόντος K^+ . [1,2] Τόσο το υδροξείδιο του νατρίου όσο και το πυριτικό νάτριο διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις αντιδράσεις γεωπολυμερισμού. Το υδροξείδιο του νατρίου παρέχει τόσο το ανιόν υδροξειδίου (OH^-), το οποίο είναι σημαντικό για τη διάλυση των αργιλοπυριτικών στο πρώτο στάδιο, όσο και το κατιόν νατρίου (Na^+), το οποίο είναι σημαντικό για την ισορροπία φορτίου του αργιλοπυριτικού δικτύου που σχηματίζεται στο τελευταίο στάδιο. OH^- . Ωστόσο, η χρήση υπερβολικά μεγάλης ποσότητας υδροξειδίου του νατρίου κατά την παρασκευή του αλκαλικού ενεργοποιητή δεν είναι ωφέλιμη. Υπερβολική ποσότητα OH^- θα μπορούσε να προκαλέσει όχι μόνο γρηγορότερα τις

αντιδράσεις πολυσυμπύκνωσης αλλά και βεβιασμένα, εμποδίζοντας έτσι τη διάλυση των αργιλοπυριτικών, που χρειάζονται αρκετό χρόνο για να διαλυθούν. Συνεπώς, υπάρχει ένα όριο για τη συγκέντρωση του υδροξειδίου του αλκαλίου στο διάλυμα του ενεργοποιητή για να επιτευχθεί φάση γέλης υψηλής αντοχής. [1,2,5] Το πυριτικό νάτριο παρέχει καλή διασύνδεση μεταξύ των σωματιδίων και ως εκ τούτου καλύτερη μηχανική αντοχή του υλικού. Επιπλέον, εμποδίζει την εξάτμιση του νερού. Οι ιδιότητες του γεωπολυμερικού υλικού εξαρτώνται συνεπώς σε μεγάλο βαθμό από τη χημική του σύνθεση, και έτσι για την ανάπτυξη ενός υγρού γεωπολυμερικού τσιμέντου που παρουσιάζει συνολικά αποδεκτές ιδιότητες και υψηλή αντοχή, είναι απαραίτητο να καθορισθεί η βέλτιστη χημική σύνθεση. [2]

Λόγω της σημασίας της διάλυσης των ειδών του Al-Si σε αλκαλικό διάλυμα και της αντίδρασης πολυμερισμού, δεν είναι έκπληξη το γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά του αλκαλικού διαλύματος επηρεάζουν άμεσα την αναδιάρθρωση των μικροδομών του πυρωμένου πηλού και έτσι των τελικών μηχανικών ιδιοτήτων του προϊόντος. Έχει αποδειχθεί ότι η αντοχή σε κάμψη, η αντοχή σε θλίψη και η φαινόμενη πυκνότητα των γεωπολυμερών αυξάνεται όσο αυξάνεται η συγκέντρωση NaOH στο διάστημα από 4 έως 12 mol, ενώ παράλληλα όσο υψηλότερη είναι η συγκέντρωση NaOH, τόσο υψηλότερο είναι και το άμορφο περιεχόμενο των προϊόντων. [1,5]

Η χρήση αλκαλικού διαλύματος αποτελούμενο από υδροξείδιο αλκαλίου και διαλυμένο πυρίτιο έχει βρεθεί ότι είναι επωφελής για την αντοχή σε θλίψη σε σχέση με το υδροξείδιο αλκαλίου μόνο. Το διαλυμένο διοξείδιο του πυριτίου όχι μόνο εξισορροπεί το λόγο SiO_2/Al_2O_3 και το λόγο Na_2O/SiO_2 στο μείγμα, αλλά καταλύει επίσης την πολυσυμπύκνωση παρέχοντας μονομερή SiO_2 , καθώς αρχίζει τον πολυμερισμό μεταξύ των τετραεδρικών μονάδων Al_2O_4 και Si_2O_4 . Ως εκ τούτου, υψηλότερη αντοχή σε θλίψη μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας έναν ενεργοποιητή που αποτελείται από διαλυτό πυρίτιο και υδροξείδιο αλκαλίου.

Υψηλοί λόγοι Si/Al αυξάνουν το πορώδες της δομής και επίσης το περιεχόμενο των μη αντιδρώντων ειδών και αυτοί είναι παράγοντες που μειώνουν άμεσα τη θλιπτική αντοχή του γεωπολυμερούς. [1]

Από την άλλη, το νερό είναι αναγκαίο στη σύνθεση γεωπολυμερών προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία ανάμειξης και επιπλέον παρέχει ένα μηχανισμό μεταφοράς των ιόντων από την επιφάνεια των κόκκων της πρώτης ύλης στο σημείο που γίνεται η αντίδραση.[4] Μετά το τέλος της ωρίμανσης που διαρκεί από 24 έως 72 ώρες, λαμβάνεται το τελικό προϊόν το οποίο έχει ήδη αναπτύξει το μεγαλύτερο μέρος των αντοχών του.

Ο μηχανισμός της αλκαλικής ενεργοποίησης αποτελείται από συνδυασμένες αντιδράσεις καταστροφής-συμπύκνωσης, που περιλαμβάνουν την καταστροφή του αρχικού υλικού σε χαμηλότερες, σταθερές δομικές μονάδες, την αλληλεπίδραση με δομές πήξης και τη δημιουργία δομών συμπύκνωσης. [2,15,20] Το πρώτο βήμα συνίσταται στη διάσπαση των ομοιοπολικών δεσμών Si-O-Si και Al-O-Si και λαμβάνει χώρα όταν το pH του αλκαλικού διαλύματος αυξάνεται, οπότε αυτές οι ομάδες μετασηματίζονται σε μία κolloειδή φάση. [2,4,20] Στη συνέχεια, τα κατεστραμμένα προϊόντα αυτού του σταδίου συσσωρεύονται και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους δημιουργώντας, τελικά, μία δομή πήξης, οδηγώντας σε μια τρίτη φάση, αυτή της δημιουργίας μιας συμπυκνωμένης δομής. [3,4,20] Μετά την διαλυτοποίηση των Al και Si ακολουθεί ο σχηματισμός μιας πολύ ενεργής φάσης γέλης με ταυτόχρονο πολυμερισμό καθενός από τα ιόντα αργιλίου και πυριτίου. Δηλαδή, η διαλυτοποίηση και η καταβύθιση πραγματοποιούνται παράλληλα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορούν να μελετηθούν ξεχωριστά, δυσχεραίνοντας έτσι τη

διερεύνηση του μηχανισμού της αντίδρασης. Για το λόγο αυτό, πολύ λίγα είναι γνωστά σχετικά με το πώς συμπεριφέρεται αυτή η ενδιάμεση φάση γέλης, αλλά και μέχρι ποιο βαθμό επηρεάζεται ο σχηματισμός και η φύση της, τόσο από τη φύση των αρχικών υλικών όσο και από τις ακριβείς συγκεντρώσεις τους στο διάλυμα, αφού δεν είναι δυνατόν να «παγώσει» η αντίδραση και να μελετηθούν τα ενδιάμεσα προϊόντα.[6,14] Παρά το γεγονός ότι δεν μπορούν να μελετηθούν άμεσα τα ενδιάμεσα προϊόντα της αντίδρασης, εντούτοις από την μελέτη της μικροδομής και των ιδιοτήτων των προϊόντων, αλλά και από τον συσχετισμό τους με τις αρχικές ποσότητες των αντιδραστηρίων που χρησιμοποιήθηκαν, πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να αποδώσουν τον μηχανισμό αντίδρασης του γεωπολυμερισμού. Σύμφωνα με τον μηχανισμό που προτείνει ο Davidovits, ο γεωπολυμερισμός των αργιλοπυριτικών οξειδίων με αλκαλοπυριτικά μέταλλα κάτω από ισχυρές αλκαλικές συνθήκες μπορεί να θεωρηθεί αποτέλεσμα της πολυσυμπύκνωσης υποθετικών πρόδρομων γεωπολυμερών, τα οποία και παρέχουν τη βασική δομική μονάδα της τρισδιάστατης μακρομοριακής δομής. [4]

Οι περισσότεροι προτεινόμενοι μηχανισμοί γεωπολυμερισμού περιλαμβάνουν τρία κύρια στάδια:

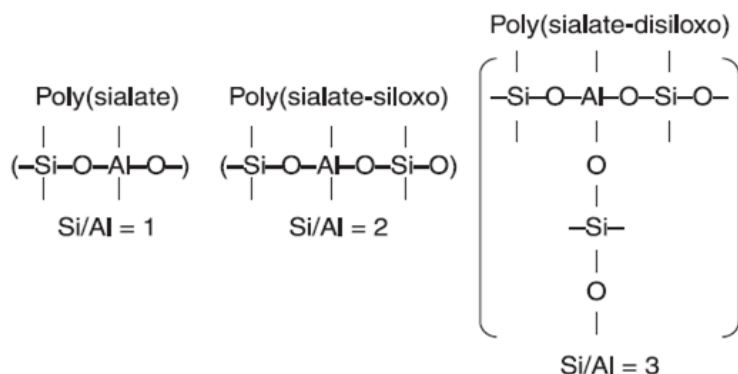
1. Διαλυτοποίηση: υπό την επίδραση του πολύ υψηλού pH διαλυτοποιείται αργίλιο και πυρίτιο από τα πρόδρομα αργιλοπυριτικά υλικά [8]. Έχει προταθεί ότι η διαλυτοποίηση προκαλεί τη δημιουργία μιας υψηλά ενεργής ενδιάμεσης φάσης γέλης (πήγματος), η οποία σχηματίζεται ακαριαία κατά τη ανάμιξη των αργιλοπυριτικών υλικών με το διάλυμα. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται ο σχηματισμός σχετικά ευκίνητων πρόδρομων γεωπολυμερών.

2. Προσανατολισμός: Υπό την επίδραση του φορτίου των ιόντων των αλκαλίων πραγματοποιείται ο μερικός προσανατολισμός των πρόδρομων γεωπολυμερών.

3. Πολυσυμπύκνωση: Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου τα ολιγομερή συμπυκνώνονται σε ένα δίκτυο Si-O-Si και Si-O-Al αλυσίδων, οι οποίες μέσω της διασταύρωσής τους συνθέτουν το τρισδιάστατο πολυμερικό δίκτυο. Οι κόκκοι του υλικού που δεν αντέδρασε ενσωματώνονται στην πολυμερική δομή και όλο το σύστημα σκληρύνεται αρχίζοντας να αναπτύσσει μηχανικές αντοχές. [4]

Ο πολυμερισμός λαμβάνει χώρα όταν τα δραστικά αργιλοπυριτικά διαλυθούν γρήγορα και απελευθερώνονται ελεύθερες τετραεδρικές μονάδες SiO₄ και AlO₄ στο διάλυμα. [1,10,11,12] Οι τετραεδρικές μονάδες συνδέονται εναλλακτικά με πολυμερείς πρόδρομες ενώσεις μέσω του διαμοιρασμού ατόμων οξυγόνου και σχηματίζουν έτσι άμορφα γεωπολυμερή. Θετικά ιόντα όπως K⁺ ή Na⁺, εξισορροπούν το αρνητικό φορτίο. [4,16] Για τον χημικό χαρακτηρισμό των γεωπολυμερών με βάση τα αργιλοπυριτικά υλικά, έχει προταθεί ο όρος πολυ-σιαλικός εστέρας [16]. Τα πολυ-σιαλικά είναι πολυμερή αλυσίδας και δακτυλίου με Si⁴⁺ και Al³⁺ σε συντονισμό με το οξυγόνο[16] και ο γενικός τους τύπος είναι M_n {-(SiO₂)_z - AlO₂}_n, wH₂O, όπου n είναι ο βαθμός πολυμερισμού και M ένα μονοσθενές κατιόν όπως το K⁺ ή Na⁺, οι δομές αυτές φαίνονται στο Σχήμα 2.1. [1,2,3,16]

Οι αλυσίδες και οι δακτύλιοι σχηματίζονται και διασυνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας σιαλικής Si-O-Al γέφυρας. [2,12]



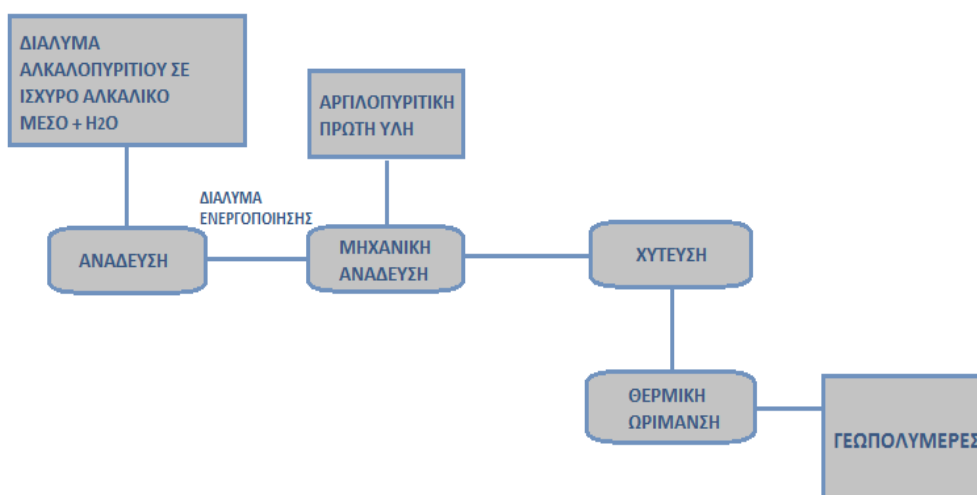
Σχήμα 2.1: Σιαλικές δομές που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια του γεωπολυμερισμού

Η κατάταξη των πολυσιαλικών ανάλογα με τον μοριακό λόγο πυριτίου προς αργίλιο, Si/Al, της βασικής αργιλοπυριτικής μονάδας του πολυμερούς, περιλαμβάνει τις εξής στοιχειώδεις δομές:

- 1. Poly(sialate), PS:** πρόκειται για γεωπολυμερή με μοριακό λόγο Si/Al= 1, τα οποία έχουν ως βασική δομική μονάδα το μονομερές [-Si-O-Al-O].
- 2. Poly(sialate-siloxo), PPS:** πρόκειται για γεωπολυμερή με μοριακό λόγο Si/Al=2, τα οποία έχουν ως βασική δομική μονάδα είναι το μονομερές [-Si-O-Al-O-Si-O].
- 3. Poly(sialate-disiloxo), PSDS:** πρόκειται για γεωπολυμερή με μοριακό λόγο Si/Al=3, τα οποία έχουν ως βασική μονάδα το μονομερές [-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-].
- 4. Poly(sialate-multisiloxo):** Τα παραγόμενα πολυμερή έχουν λόγο Si/Al >> 3 και διαθέτουν γέφυρα Si-O-Al- μεταξύ δύο αλυσίδων PS.

[16]

Συνολικά, η διαδικασία σύνθεσης των γεωπολυμερών φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα ροής σύνθεσης γεωπολυμερών

2.1.3. Πρόδρομα υλικά

Στις αρχικές μελέτες και εφαρμογές της αλκαλικής ενεργοποίησης χρησιμοποιήθηκαν ως πρόδρομα: σκωρία υψικαμίνων, ιπτάμενη τέφρα [1,2,4,7,17,19] και μετακαολίνης. Οι πρόσφατες μελέτες ωστόσο έχουν διευρύνει κατά πολύ τις πηγές και τα είδη των πρόδρομων υλικών.

- 1. Σκωρία SiMn:** Η σκωρία αυτή αποτελεί απόρροια της τήξης του πυριτομαγγανίου. Αποτελείται από ακανόνιστα, πορώδη, άμορφα σωματίδια, με κάπως χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ασβέστιο σε σχέση με τη σκωρία υψικαμίνων.
- 2. Ορυκτός άνθρακας:** Είναι ορυκτό απόβλητο, το οποίο απορρίπτεται κατά τη διάρκεια της εκσκαφής και έκλυσης άνθρακα.
- 3. Υπολείμματα βωξίτη:** Είναι ένα απόβλητο που προκύπτει κατά την εξόρυξη αλουμινίου. Αποτελείται κυρίως από SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 κ.α.. Όλα αυτά τα συστατικά είναι κατάλληλες πρώτες ύλες για την παραγωγή αλκαλικά ενεργοποιημένων υλικών.
- 4. Απόβλητα εξορύξεων (π.χ. Βαναδίου)**
- 5. Υπολείμματα καταλύτη:** Τα διυλιστήρια πετρελαίου επεξεργάζονται αργό πετρέλαιο σε καταλυτικά ρευστά. Ο καταλύτης που έχει αναλωθεί είναι ουσιαστικά μία συσσώρευση κρυστάλλων ζεόλιθου που συγκρατούνται σε μία αργιλοπυριτική μήτρα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ως πρόδρομο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν το σημαντικό περιεχόμενο του καταλύτη σε βαρέα μέταλλα, ειδικά νικέλιο, βανάδιο και/ή λανθάνιο, καθώς το περιεχόμενο αυτό μπορεί να επηρεάσει την λειτουργία των αλκαλικά ενεργοποιημένων υλικών, ενώ παράλληλα σε συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να είναι και εκπλύσιμο και επομένως επιβλαβές.
- 6. Τέφρα άνθρακα πυθμένα [3]:** Είναι ένα παραπροϊόν της καύσης του άνθρακα, το οποίο συλλέγεται από τη βάση των κλιβάνων που καίνε άνθρακα για την παραγωγή ατμού ή/και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι πιο χονδρόκοκκη σε σχέση με την ιπτάμενη τέφρα. Δίνει αλκαλικά ενεργοποιημένα υλικά με χαμηλότερες αντοχές.
- 7. Τέφρα φλοιού ρυζιού [3]:** Είναι ένα απόβλητο που προέρχεται από την καύση φλοιού ρυζιού, πρωταρχικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- 8. Τέφρα καυσίμου φοινικέλαιου [3]:** Είναι παραπροϊόν της βιομηχανίας φοινικέλαιου, το οποίο παράγεται σε μεγάλες ποσότητες σε πολλά μέρη του κόσμου.
- 9. Γυαλί:** Οι ιδιότητες και μικροδομή του έχουν μελετηθεί κυρίως στη μορφή ινών. Έχει χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή ελαφροβαρών δομικών υλικών.
- 10. Απόβλητα κεραμικών:** Τα απόβλητα κεραμικών προκύπτουν κατά την κατεδάφιση των κτιρίων, αλλά και ως υποπροϊόν της παραγωγής ή διάθεσης πορσελάνης και ξυλείας. Τα κεραμικά απόβλητα αποτελούνται κυρίως από SiO_2 και Al_2O_3 , με το μεγαλύτερο μέρος τους να είναι κρυσταλλικές φάσεις χαλαζία και λευκίτη, επιπλέον μιας υαλώδους φάσης.
- 11. Τέφρα ιλύος χαρτιού [3]:** Σημαντικά ρεύματα αποβλήτων χαρτιού παράγονται σε μύλους χαρτοπολτού και χαρτιού. Η καύση ιλύος χαρτιού στους $700-800^\circ\text{C}$ μπορεί να δημιουργήσει μια τέφρα με υψηλή περιεκτικότητα σε πολύ δραστικά αργιλοπυριτικά συστατικά τα οποία μπορεί να είναι αποτελεσματικά ως πρόδρομα της αλκαλικής ενεργοποίησης.
- 12. Λύματα που προέρχονται από την επεξεργασία του νερού:** Αποτελούνται κυρίως από σμηκτίτη και αργίλους, όπως ο μοντμοριλλονίτης.

13. Φυσικά ορυκτά [2]

2.1.4. Πλεονεκτήματα

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των γεωπολυμερών και η χρήση τους ως εναλλακτική του OPC [6,7,20], μπορεί να εξασφαλίσει πολλά πλεονεκτήματα για το περιβάλλον. [1,3] Έχουν μελετηθεί και αποδειχθεί ως επιτυχείς ποικίλες μέθοδοι ανακύκλωσης και αξιοποίησης βιομηχανικών υποπροϊόντων και μετατροπής τους σε πολύτιμα γεωπολυμερικά προϊόντα. Αυτές οι διαδικασίες, εκτός των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων (π.χ. μείωση της χρήσης των φυσικών πόρων [21]), μπορούν να αποφέρουν και οικονομικά οφέλη στον τομέα των δομικών υλικών -αφού η παραγωγή τους είναι λιγότερο κοστοβόρα[14], λόγω της χρήσης εναλλακτικών πρώτων υλών για την παραγωγή του γεωπολυμερούς. [4,7,20] Η τεχνολογία των γεωπολυμερών θεωρείται μία νέα τεχνολογία, κατάλληλη για τη διαδικασία διάθεσης αποβλήτων [1,3,4,7,22] και για την πλήρη σταθεροποίηση ενώσεων, οι οποίες σε διαφορετικό ενδεχόμενο θα προκαλούσαν πολύ περισσότερη μόλυνση, π.χ. βαρέα μέταλλα. [4,7] Ταυτόχρονα, δίνουν τη δυνατότητα να παραχθούν υλικά με βελτιωμένες συγκεκριμένες, επιθυμητές ιδιότητες, τα οποία είναι κατάλληλα για συγκεκριμένες εφαρμογές.[4,19]

Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει πληθώρα πηγών πρώτων υλών για την παραγωγή γεωπολυμερών. Επιπλέον, παρατηρείται γρήγορη σκλήρυνση των προϊόντων τους, εμφανίζουν υψηλές μηχανικές αντοχές [4,7,8,15,14] και εξαιρετική αντοχή σε ισχυρά χημικά περιβάλλοντα [4], ενώ ταυτόχρονα ακινητοποιούν τους ρύπους. Απαιτούν σημαντικά μειωμένη ενέργεια για την παραγωγή τους [7,9,14], ενώ παράλληλα η παραγωγική τους διαδικασία έχει μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και αερίων του θερμοκηπίου. [1,4,5,6,7,9,11,14,19,21] Επιπλέον, η επαναχρησιμοποίηση στερεών αποβλήτων είναι εξαιρετικής περιβαλλοντικής σημασίας, ειδικά για τα υπολείμματα που παράγονται σε μεγάλες ποσότητες. [1,2,3,4,14,21,23]

Τα γεωπολυμερή σκληραίνουν γρήγορα και αποκτούν υψηλή πρώτημη αντοχή [4,12], ενώ η τελική αντοχή σε θλίψη στις 28 ημέρες μπορεί να φτάσει ή και να υπερβεί τα 100 MPa. Το πορώδες τους μπορεί να είναι μικρότερο από εκείνο των τσιμέντων ή των κονιαμάτων και έτσι επιτυγχάνονται ανώτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με το OPC. [4,5,12] Η τελική δομή και οι φυσικές τους ιδιότητες εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους όπως η περιεκτικότητα σε νερό, το μέγεθος των σωματιδίων, το θερμικό ιστορικό και η περιεκτικότητα σε αλκάλια. Τα γεωπολυμερή παρουσιάζουν διαπερατότητα όμοια με αυτή του τσιμέντου Portland [3], χαμηλή αλκαλική ανάπτυξη [12], χαμηλή συρρίκνωση, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, εξαιρετική αντίσταση σε οξέα [1,2,4,12], θειικά άλατα [12], κύκλους διάβρωσης και κατάψυξης-απόψυξης. [2,4,11,12] Επιπλέον, εμφανίζουν υψηλές αντοχές στις υψηλές θερμοκρασίες και τη φωτιά. [1,2,3,9,17,22] Σε συγκριτική μελέτη των αντοχών σε θερμική καταπόνηση δειγμάτων γεωπολυμερικής μήτρας και καθαρού OPC, αφού τα δείγματα υποβλήθηκαν σε καταπόνηση στους 900°C για 2 ώρες, η οπτική επιθεώρηση των δειγμάτων έδειξε ότι όλα τα δείγματα OPC καταστράφηκαν, ενώ τα δείγματα γεωπολυμερικής μήτρας ήταν σταθερά, παρά το γεγονός ότι είχαν κάποιες ρωγμές. Παρατηρήθηκαν αλλαγές χρώματος σε όλα τα δείγματα.[22]

Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.1: Δείγματα γεωπολυμερούς και OPC ύστερα από θερμική καταπόνηση τους 900 βαθμούς Κελσίου για 2 ώρες

Σημαντικό είναι και το οικονομικό όφελος, το οποίο προκύπτει από την εξοικονόμηση ενέργειας κατά την παραγωγή των γεωπολυμερών. Η σύνθεση των γεωπολυμερών προϋποθέτει θερμοκρασίες της τάξης των 60-100 °C, οι οποίες είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές που απαιτούνται για την παρασκευή τόσο των κεραμικών όσο και των τσιμέντων. Όπως έχει τεκμηριωθεί η ενέργεια που καταναλώνεται για την κατασκευή πλακών από γεωπολυμερή είναι μικρότερη κατά 16% από αυτή που χρειάζεται για τα συμβατικά κεραμικά. [4]

Στην ίδια μελέτη τεκμηριώνεται ότι τα γεωπολυμερή που έχουν σαν βάση τα ΑΕΚΚ μετά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, διατηρούν λογικά υψηλές μηχανικές αντιστάσεις σε αντίθεση με το OPC, το οποίο καταστράφηκε εντελώς μετά την απώλεια του νερού υπό τις ίδιες συνθήκες [22].

2.1.5. Εφαρμογές

Τα γεωπολυμερή έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε πολλούς τομείς την βιομηχανίας και της τεχνολογίας. Παρακάτω αναφέρονται κάποιες από αυτές τις εφαρμογές των γεωπολυμερών. Έτσι τα γεωπολυμερή αποτελούν:

Α. Υλικά για την κατασκευή εργαλείων και μητρώων

Ανθεκτικά υλικά από γεωπολυμερή χρησιμοποιούνται για την ασφαλή μετάβαση των διαβρωτικών κραμάτων αργιλίου/λιθίου στην υγρή κατάσταση.

Β. Υλικά σε εφαρμογές που απαιτούν ανθεκτικότητα στη φωτιά και στην θερμότητα.

Τα γεωπολυμερή εξασφαλίζουν τη θερμική προστασία των βιομηχανικών κτιρίων και των εγκαταστάσεων από θερμοκρασίες έως 1200 βαθμούς Κελσίου. Τα ενισχυμένα με άνθρακα γεωπολυμερικά σύνθετα δεν αναφλέγονται, δεν καίγονται και δεν απελευθερώνουν καπνό ακόμα και μετά από την επιβολή εκτεταμένης ροής θερμότητας. Η ενισχυμένη με ίνες άνθρακα γεωπολυμερική μήτρα εξακολουθεί να διατηρεί το 63% της αρχικής αντοχής σε κάμψη μετά από προσομοίωση μεγάλης πυρκαγιάς. Επιπλέον τα γεωπολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τους ίδιους λόγους και στην αεροδιαστημική. [1,9]

Γ. Υλικά για την επισκευή και ανοικοδόμηση κτιρίων

Δ. Τσιμέντο από γεωπολυμερές

Η χημεία των γεωπολυμερών βελτιώνει τις ιδιότητες του τσιμέντου Portland και του κανονικού σκυροδέματος. Το τσιμέντο από γεωπολυμερές φτάνει τις αντοχές στη θλίψη των 20MPa μετά από 4 ώρες, ενώ το απλό μπετόν φτάνει αυτές τις αντοχές ύστερα από μερικές μέρες. Το γεωπολυμερικό τσιμέντο χρησιμοποιείται στον τομέα των μεταφορών στην Αμερική και πιο πρόσφατα στην Αυστραλία. Ο μικρός χρόνος ωρίμανσης του γεωπολυμερικού τσιμέντου, το καθιστά ιδανική λύση για την επισκευή αυτοκινητοδρόμων και αεροδιαδρόμων. [1]

Ε. Τσιμέντο από γεωπολυμερές με αντοχή στη διάβρωση από θειικό οξύ
ΣΤ. Τσιμέντο από γεωπολυμερές για αδρανοποίηση τοξικών στοιχείων [1]

2.1.6. Βιομηχανοποίηση των γεωπολυμερικών τσιμέντων

Τα αλκαλικά ενεργοποιημένα ή γεωπολυμερικά τσιμέντα δεν έχουν ακόμα βιομηχανοποιηθεί σε ευρεία κλίμακα. Ένα από τα βασικότερα εμπόδια για την προώθηση αυτών των συνδετικών υλικών ως ένα καινούριο και βιώσιμο υλικό, είναι το σχετικά υψηλό κόστος σε σχέση με το OPC. Εφόσον το πιο ακριβό συστατικό του αλκαλικά ενεργοποιημένου τσιμέντου είναι ο ενεργοποιητής, το κλειδί στην εμπορευματοποίηση αυτών των τσιμέντων είναι να βρεθεί φθηνότερη σύνθεση και δοσολογία. Η επίδραση στο περιβάλλον θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψιν, καθώς πολλοί ενεργοποιητές είναι σημαντικές πηγές εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου κατά την παραγωγή των γεωπολυμερών. [2] Υψηλό ενεργειακό και οικονομικό κόστος συνδέεται με τη μείωση των αποβλήτων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη σε ένα αρκετά μικρό μέγεθος σωματιδίων ώστε να μπορέσει να γίνει η αλκαλική ενεργοποίηση. [6,24]

Το γεγονός ότι τσιμέντο OPC δέχθηκε ευρείες κριτικές κατά τις τελευταίες δεκαετίες λόγω του εγγενώς υψηλού ενσωματωμένου αποτυπώματος ενέργειας και άνθρακα οδήγησε στην άνοδο της τεχνολογίας γεωπολυμερών τα τελευταία χρόνια. Τα γεωπολυμερή θεωρήθηκαν λύση τόσο για την κατασκευαστική βιομηχανία, όσο και για τα ζητήματα διαχείρισης των αποβλήτων που υφίστανται διάφοροι κλάδοι, όπως η βιομηχανία καύσης άνθρακα, η βιομηχανία φοινικέλαιου, η βιομηχανία άλεσης ρυζιού κ.λπ. Ωστόσο, παρά τις εντατικές έρευνες που πραγματοποιήθηκαν τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία των γεωπολυμερών δεν είναι ακόμη κοντά στην αντικατάσταση του συμβατικού OPC σε πραγματικές βιομηχανικές πρακτικές. Με βάση τις αναθεωρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, οι πιο σημαντικοί παράγοντες που διέπουν τις μηχανικές και φυσικές αντοχές, καθώς και τη μικροδομή των γεωπολυμερών είναι ο αλκαλικός ενεργοποιητής, το καθεστώς σκλήρυνσης, οι φυσικές ιδιότητες της πρώτης ύλης και η χημική σύνθεση. [1,3]

Επιπλέον, Η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή των αλκαλικών ενεργοποιητών, δηλαδή το πυριτικό νάτριο και το υδροξείδιο του νατρίου είναι της τάξης των 5.37 και 20.5 MJ/kg αντίστοιχα και είναι υψηλότερη σε σύγκριση με την ενσωματωμένη ενέργεια του OPC. Οι αλκαλικοί ενεργοποιητές συνιστούν περίπου το 60% του συνολικού αποτυπώματος άνθρακα στον τομέα της βιομηχανίας γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων. Η αναγκαιότητα της θερμικής επεξεργασίας για την επίτευξη της επιθυμητής αντοχής προσθέτει περαιτέρω στις ενεργειακές απαιτήσεις της παραγωγής γεωπολυμερικού σκυροδέματος. [3]

Η σύνθεση γεωπολυμερών είναι μια πολύπλοκη διαδικασία η οποία εξαρτάται από πολλούς και διαφορετικούς παράγοντες. Για να ασχοληθεί μια βιομηχανία με την παραγωγή γεωπολυμερικών υλικών θα πρέπει να μπορεί να έχει στη διάθεσή της μια διαδικασία σύνθεσης η οποία να αποδίδει κάθε φορά προϊόντα με τις ίδιες επιθυμητές ιδιότητες. Ακόμα και για μικρές αλλαγές στην σύσταση των πρώτων υλών θα πρέπει να είναι γνωστή η επίδραση που θα έχουν αυτές στα τελικά προϊόντα, αλλά και να υπάρχουν

διαθέσιμοι τρόποι με τους οποίους θα αναιρείται οποιαδήποτε μεταβολή και ποιοτική υποβάθμιση του τελικού προϊόντος. Έλλειψη πειραματικών δεδομένων υπάρχει και σε ότι αφορά τις ιδιότητες των γεωπολυμερών. Η δυνατότητα τους να χρησιμοποιηθούν στην βιομηχανία της δόμησης εξαρτάται από την ικανότητά τους να διαθέτουν ιδιότητες οι οποίες να ικανοποιούν τις προδιαγραφές που τίθενται ανεξάρτητα με το αν διαθέτουν μεμονωμένα ιδιαίτερα βελτιωμένα κάποια μηχανική ή άλλη ιδιότητα. Τα δεδομένα αυτά δεν είναι διαθέσιμα αυτή τη στιγμή, τουλάχιστον σε ένα βαθμό που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις και προδιαγραφές δόμησης.

Επιπλέον, επειδή πρόκειται για υλικά τα οποία αναπτύχθηκαν κυρίως την τελευταία δεκαετία δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με την μακροχρόνια ανθεκτικότητά τους, τόσο εργαστηριακά όσο και στην πράξη. Άρα, πριν τα γεωπολυμερή περάσουν από τα εργαστήρια στην καθημερινότητα θα πρέπει να έχει προηγηθεί ενδελεχής έρευνα της σύνθεσης, των ιδιοτήτων και της ανθεκτικότητάς τους στο χρόνο. Στα κύρια μειονεκτήματα των γεωπολυμερών συγκαταλέγεται και η έλλειψη μιας διαδικασίας σύνθεσης φιλικής προς τον χρήστη (user friendly). Η δυσκολία της εφαρμογής της γεωπολυμερικής σύνθεσης στην πράξη έγκειται στο γεγονός ότι οι μέχρι τώρα προτεινόμενες διαδικασίες σύνθεσης περιλαμβάνουν τη χρήση ισχυρά αλκαλικών διαλυμάτων, τα οποία είναι πολύ δύσκολο να παρασκευαστούν και πολύ επισφαλές να χρησιμοποιηθούν από προσωπικό το οποίο δεν είναι εξειδικευμένο. [4,25] Ο Davidovits αναφέρει ότι, μετά από σύγκριση διαφόρων μελετών και πατεντών, διαπίστωσε ότι η πλειοψηφία των ερευνητών και των επιστημόνων δεν έλαβαν υπόψιν τους την ασφάλεια των χρηστών.

Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι η χρήση των γεωπολυμερών δεν έχει ως στόχο την αντικατάσταση του τσιμέντου και των υπόλοιπων δομικών υλικών σε όλες τις εφαρμογές τους. Ακόμα και αν αυτή ήταν η πρόθεση, κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό αφού οι πρώτες ύλες που απαιτούνται για την σύνθεση γεωπολυμερών δεν επαρκούν έτσι ώστε τα παραγόμενα προϊόντα να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις δόμησης. [4] Στο πλαίσιο της αξιοποίησης αποβλήτων στη σύνθεση γεωπολυμερών, η επιστημονική έρευνα συχνά παίρνει τη μορφή μιας δημοσίευσης σε ένα ακαδημαϊκό περιοδικό, η οποία δείχνει ότι υπάρχει ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό, το οποίο μπορεί να αναμιχθεί με ένα δεδομένο ποσοστό των αποβλήτων που προέρχονται από μια συγκεκριμένη διαδικασία χωρίς να διακυβεύεται η απόδοσή του σε έναν απαράδεκτο βαθμό. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τον σχετικά περιορισμένο όγκο των παραγόμενων αποβλήτων από οποιαδήποτε διαδικασία σε σύγκριση με τη συνήθη απόδοση μιας παραγωγικής μονάδας τσιμέντου ή σκυροδέματος εμπορικής κλίμακας και της μεγάλης μεταβλητότητας των ροών των αποβλήτων από μήνα σε μήνα (ή ακόμα και από μέρα σε μέρα), είναι απαραίτητο για τους ερευνητές να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το πιο θεμελιώδες χημικό/ορυκτολογικό επίπεδο, ώστε να καταστεί δυνατή η δημοσίευση αποτελεσμάτων χρήσιμων σε ένα ευρύτερο πλαίσιο εργαζομένων, πέρα από τον πολύ περιορισμένο αριθμό που θα τυχαίνει να έχουν πρόσβαση ακριβώς στην ίδια ποσότητα ακατέργαστων (ή αποβλήτων) υλικών. [26]

Παρολαυτά, οι αξιοσημείωτες ιδιότητές τους τα καθιστούν ελκυστικά όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές στις οποίες οι προδιαγραφές ασφάλειας και οι συνθήκες λειτουργίας απαιτούν τη χρήση δομικών υλικών με καλή συμπεριφορά σε ακραίες συνθήκες. [4]

Παρολαυτά τα σημαντικά εμπόδια, τα γεωπολυμερικά τσιμέντα στοχεύουν σε ένα μικρό μερίδιο της αγοράς. Καθώς τα γεωπολυμερικά τσιμέντα έχουν την ικανότητα να ακινητοποιούν τοξικά υλικά μπορούν να θεωρηθούν μία συμφέρουσα λύση για την

αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων κάτω από κρίσιμες περιβαλλοντικές συνθήκες σύμφωνα με πιλοτική μελέτη που πραγματοποιήθηκε στη Γερμανία.[2]

Από την άλλη, πρόσφατη μελέτη που συγκρίνει το αποτύπωμα άνθρακα των OPC με αυτών των γεωπολυμερικών συνδετικών υλικών έχει προκαλέσει αμφιβολίες σχετικά με το πραγματικό αποτύπωμα άνθρακα των γεωπολυμερικών συνδετικών υλικών. Αναφέρεται ότι η πραγματική διαφορά στο αποτύπωμα άνθρακα μεταξύ των γεωπολυμερικών συνδετικών υλικών και των OPC είναι μόλις 9%, σε αντίθεση με την ευρέως διαδεδομένη αξίωση ότι η παραγωγή γεωπολυμερικών συνδετικών θα μπορούσε να μειώσει το αποτύπωμα άνθρακα σε ποσοστό έως και 60%.

2.2. Απόβλητα Εκσκαφών, Κατασκευών και Κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ)

2.2.1. Σύσταση των ΑΕΚΚ

Η σύσταση των υλικών κατεδάφισης εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, όπως ο χρόνος κατασκευής, η μορφή της κατασκευής κ.λπ.. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή παλαιότερων κτιρίων, και τα οποία τώρα κατεδαφίζονται, προσδιορίζουν την τωρινή σύσταση των εν λόγω αποβλήτων, ενώ στο μέλλον η διαφοροποίηση στην επιλογή των δομικών υλικών θα προξενήσει και μεταβολή στη σύσταση των αποβλήτων που θα παράγονται. Τα υλικά κατεδαφίσεων στο μέλλον αναμένεται να περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες σκυροδέματος το οποίο θα αντικαταστήσει τα τούβλα και το ασβεστοκονίαμα, προϊόντα από ατσάλι, περισσότερα μονωτικά υλικά και γενικότερα υλικά που θα χρειάζονται πιο εξειδικευμένη διαχείριση για την ορθή επεξεργασία και ανακύκλωσή τους. Τα απόβλητα που παράγονται στα εργοτάξια κατά την κατασκευή νέων κτιρίων είναι κυρίως υλικά συσκευασίας, κατεστραμμένα υλικά αλλά και υλικά που δεν χρησιμοποιήθηκαν.

Τα απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ) προκύπτουν όπως γνωρίζουμε από δραστηριότητες όπως η κατασκευή των κτιρίων και άλλων υποδομών, από την ολική ή μερική κατεδάφισή τους, το σχεδιασμό και τη συντήρηση οδικών δικτύων κ.λπ.. Τα απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων(ΑΕΚΚ) αποτελούν περίπου το 25% του συνόλου των αποβλήτων που παράγονται στην Ε.Ε., με μεγάλο μέρος τους να προέρχεται από την κατεδάφιση και την ανακαίνιση των παλαιών κτιρίων. Αποτελούνται από πολλά υλικά, συμπεριλαμβανομένων σκυροδέμα, τούβλα, ξύλο, γυαλί, μέταλλα, πλαστικά, διαλύτες, αμίαντος, πολλά από τα οποία μπορούν να ανακυκλωθούν με ένα ή τον άλλο τρόπο. [5,24,27,28] Η κύρια σύνθεση των αποβλήτων κατασκευής είναι η άμμος και το τσιμέντο. που αποτελούν τις κυριότερες πηγές Al_2O_3 και SiO_2 . [9]

Τα ΑΕΚΚ αποτελούνται από δύο μεγάλα κλάσματα: προϊόντα σκυροδέματος και κεραμικά προϊόντα. Τα κύρια συστατικά του πρώτου κλάσματος είναι SiO_2 και CaO μαζί με μικρές συγκεντρώσεις Al_2O_3 και Fe_2O_3 , κυρίως κρυσταλλικές. Το κύριο συστατικό του δεύτερου κλάσματος είναι SiO_2 και Al_2O_3 και περιλαμβάνει κρυσταλλικά και υαλώδη συστατικά. [22] Στα Σχήματα 2.3, 2.4, 2.5 εικονίζεται η τυπική σύσταση των ΑΕΚΚ.



Σχήμα 2.3: Σύσταση ΑΕΚΚ



Σχήμα 2.4: Σύσταση ΑΕΚΚ με βάση την Ε.Ε.



Σχήμα 2.5: Τυπική Σύσταση ΑΕΚΚ

Πίνακας 2.1: Τυπική σύσταση ΑΕΚΚ στις χώρες τις Ε.Ε.

Συστατικό	Ποσοστό %	
	Απόβλητα κατεδαφίσεων	Απόβλητα Κατασκευών
Άσφαλτος	1.61	0.13
Σκυρόδεμα	19.99	9.27
Οπλισμένο σκυρόδεμα	33.11	8.25
Ακαθαρσίες, Χώμα, Λάσπη	11.91	30.55
Πέτρες	6.83	9.74
Χαλίκια	4.95	14.13
Μπαμπού	0.31	0.30
Τούβλο από σκυρόδεμα	1.11	0.90
Τούβλο	6.33	5.00
Γυαλί	0.20	0.56
Άλλα οργανικά	1.30	3.05
Πλαστικοί σωλήνες	0.61	1.13
Άμμος	1.44	1.70
Δέντρα	0.00	0.12
Εντοιχισμένα έπιπλα	0.04	0.03
Άχρηστα αντικείμενα	0.07	0.24
Μέταλλα	3.41	4.36

2.2.2. Ποσότητες και ανακυκλώσεις στην Ε.Ε.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση ο όγκος των ΑΕΚΚ αντιπροσωπεύει περίπου το 35% των συνολικών αποβλήτων που παράγονται και υπολογίζεται ότι είναι περίπου 850 εκατομμύρια τόνους το χρόνο. [5,23,24,27,29] Υπολογίζεται ότι αυτά αντιπροσωπεύουν σχεδόν το ένα τέταρτο των υφιστάμενων αποβλήτων σε παγκόσμιο επίπεδο.[5,27] Σε συγκεκριμένες χώρες, όπως η Γερμανία, η Δανία και η Ολλανδία, η ανακύκλωση φτάνει το 80%, ενώ στις υπόλοιπες χώρες η ανακύκλωση δεν ξεπερνά κατά μέσο όρο το 30 - 40%. [27,29] Σύμφωνα με τους Pacheco-Torgal και Jalali, το ποσό των αποβλήτων που παράγονται από την ευρωπαϊκή βιομηχανία

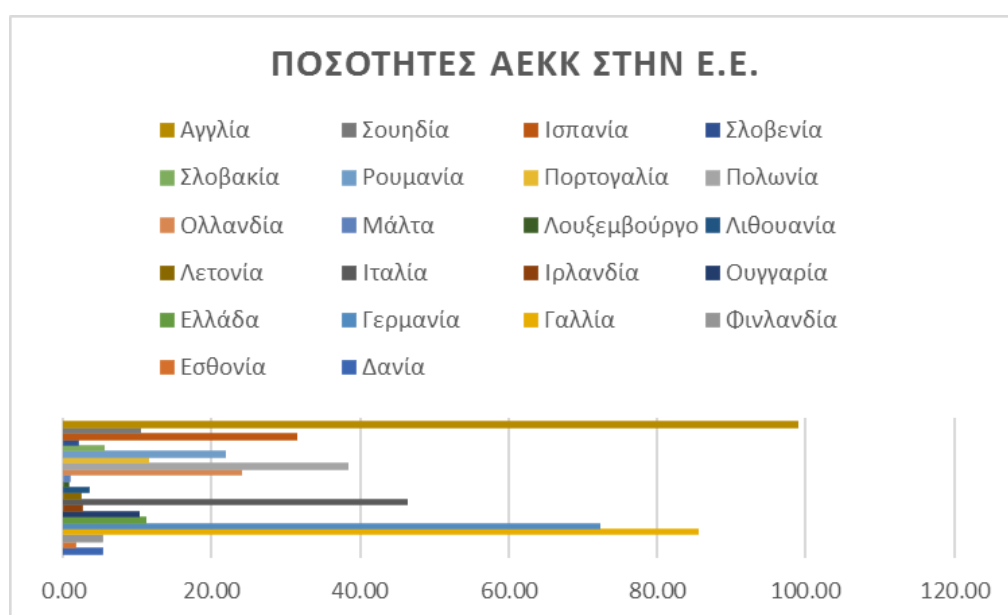
κεραμικών είναι συνήθως το 3-7% κατά βάρος της συνολικής παραγωγής. [10]

Στην περίπτωση των αποβλήτων από την κατασκευή, θα πρέπει να ανακυκλωθεί ή να επαναχρησιμοποιηθεί το 70% αυτών, με βάση τις ευρωπαϊκές οδηγίες, μέχρι το 2020. [5,24]

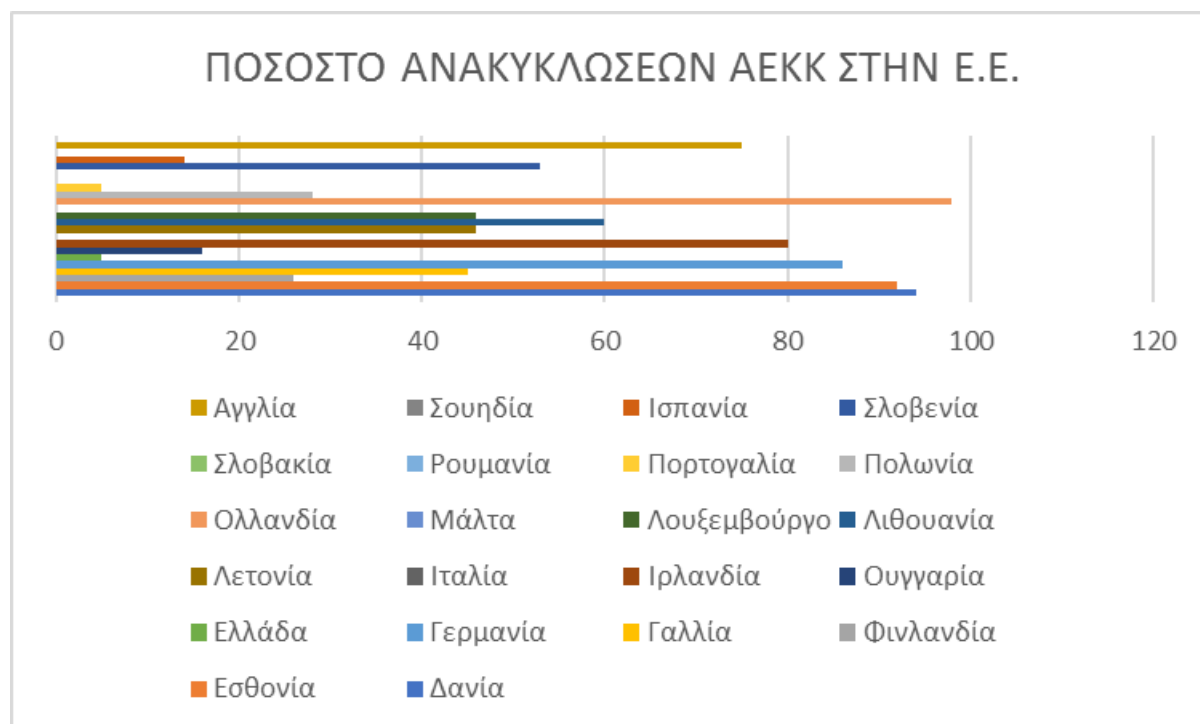
Το επίπεδο της ανακύκλωσης στην Ελλάδα κυμαίνεται στο 5% (Pereira & Vieira, 2015). Η αναλογία των αποβλήτων που παράγονται από τις διάφορες οικοδομικές εργασίες, εκτιμάται σε 6 με 7 εκατ. τόνους ετησίως στη χώρα μας, συνεχώς όμως ελαττώνονται λόγω της κρίσης στον κλάδο των κατασκευών (Ε.Ο.ΑΝ., 2016). [27] Στον Πίνακα 2.2 και τα Σχήματα 2.6, 2.7 φαίνονται οι ποσότητες και οι ανακυκλώσεις των ΑΕΚΚ στις χώρες της Ε.Ε..

Πίνακας 2.2: Ποσότητες και ανακυκλώσεις ΑΕΚΚ στην Ε.Ε.

Χώρα	ΑΕΚΚ (εκατομ. τόννοι)	% ποσοστό ανακύκλωσης	Χώρα	ΑΕΚΚ (εκατομ. τόννοι)	% ποσοστό ανακύκλωσης
Δανία	5.27	94	Μάλτα	0.8	0
Εσθονία	1.51	92	Ολλανδία	23.9	98
Φινλανδία	5.21	26	Πολωνία	38.19	28
Γαλλία	85.65	45	Πορτογαλία	11.42	5
Γερμανία	72.40	86	Ρουμανία	21.71	0
Ελλάδα	11.04	5	Σλοβακία	5.38	0
Ουγγαρία	10.12	16	Σλοβενία	2.00	53
Ιρλανδία	2.54	80	Ισπανία	31.34	14
Ιταλία	46.31	0	Σουηδία	10.23	0
Λετονία	2.32	46	Αγγλία	99.10	75
Λιθουανία	3.45	60	Ε.Ε.-27	531.38	46
Λουξεμβούργο	0.67	46			



Σχήμα 2.6: Ποσότητες ΑΕΚΚ στην Ε.Ε.



Σχήμα 2.7: Ποσοστό Ανακυκλώσεων ΑΕΚΚ στην Ε.Ε.

2.2.3. ΑΕΚΚ Κεραμικού Τύπου

Σχεδόν το 45% των συνολικών αποβλήτων που προέρχονται από τις διεργασίες κατασκευής είναι απόβλητα κεραμικού τύπου, τα οποία παράγονται κυρίως από δύο πηγές:

1. Απόβλητα από διαδικασίες κατεδάφισης και κατασκευής: τσιμέντο (και γενικότερα προϊόντα σκυροδέματος), τούβλα, κεραμικά
2. Απόβλητα από τη βιομηχανία κεραμικών [8,22,24]

Πιο αναλυτικά, πρόκειται για:

Υλικά Εκσκαφών

Τα υλικά αυτά αποτελούνται από χώματα εκσκαφών, άμμο, χαλίκι, πέτρες, άργιλο καθώς και άλλα υλικά που μπορεί να προκύψουν από εκσκαφές. Τα άχρηστα υλικά εκσκαφών απαντώνται σχεδόν σε κάθε κατασκευαστική δραστηριότητα και ιδιαίτερα στις υπόγειες κατασκευές και σε έργα της γεωτεχνικής μηχανικής. Τα υλικά αυτά προέρχονται και από φυσικά φαινόμενα, όπως υπερχειλίσεις χειμάρρων, κατολισθήσεις σε δρόμους κ.λπ. Η σύσταση των υλικών εκσκαφών εξαρτάται σημαντικά από τα γεωλογικά δεδομένα της εκάστοτε περιοχής.

Υλικά Οδοποιίας

Αυτά τα υλικά αποτελούνται από ασφαλτο καθώς και άλλα υλικά οδοστρώματος, όπως χαλίκι, άμμος, σκύρα και γενικά υλικά που προέρχονται από την αποξήλωση και ανακαίνιση οδών. Τα άχρηστα υλικά οδοποιίας προκύπτουν όχι μόνο από την αποξήλωση και τη συντήρηση των δρόμων αλλά και από τις υπόγειες υδραυλικές και ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πόλεων καθώς και από έργα επιδιόρθωσης αυτών.

Υλικά Κατεδαφίσεων-Μπάζα

Τα υλικά αυτά αποτελούνται από χρώματα, χαλίκι, κομμάτια ή στοιχεία από μπετόν (σκυροδέματα), επιχρίσματα, πλίνθους (τούβλα), πλάκες επιστρώσεως, γύψο, άμμο, λαξευμένες πέτρες, θρύμματα ειδών υγιεινής κ.λπ. Τα υλικά κατεδαφίσεων διακρίνονται από μεγάλη ετερογένεια και προέρχονται από την εξ' ολοκλήρου ή επιμέρους κατεδάφιση των κατασκευών. Η σύσταση των υλικών αυτών διαφέρει ανάλογα με το είδος, την ηλικία, το σχήμα, τη χρήση και το μέγεθος του κτιρίου/κατασκευής.

Απόβλητα από Εργοτάξια

Αυτά τα απόβλητα αποτελούνται από ξύλο, πλαστικό, χαρτί, γυαλί, μέταλλα, καλώδια, χρώματα, βερνίκια, στοιχεία επικαλύψεων προσόψεων, κόλλες και γενικά υλικά που προκύπτουν από τη λειτουργία εργοταξίων κατασκευής, κατεδάφισης, επισκευής, ενίσχυσης, προσθήκης, επέκτασης και ανακαίνισης. Σημειώνεται ότι μεγάλες ποσότητες άχρηστων υλικών στα εργοτάξια συνιστούν και τα υλικά συσκευασίας οικοδομικών υλικών. [5,28]

2.2.4. ΑΕΚΚ και Αλκαλική Ενεργοποίηση

Ο κύριος καταναλωτής των αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων είναι ο ίδιος ο κατασκευαστικός κλάδος, ο οποίος αναπτύσσει και εξειδικευμένες εφαρμογές για τη χρήση τους. Μεταξύ αυτών είναι η χρήση τους για σταθεροποίηση του εδάφους, ως υλικό πλήρωσης για εξωραϊστικούς σκοπούς, αλλά και στην παραγωγή σκυροδέματος ή/και τσιμέντου Portland. Ωστόσο, στις αναπτυσσόμενες οικονομίες όπου παράγονται μεγάλοι όγκοι κεραμικών και κατεδαφιστικών αποβλήτων, συχνά δεν υφίσταται η δυνατότητα ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης αυτών των αποβλήτων, ως συνέπεια της χαμηλού κόστους και υψηλής διαθεσιμότητας παρθένων πρώτων υλών, καθώς και της περιορισμένης εμπειρίας στην επεξεργασία αποβλήτων και της περιορισμένης κατανομής πόρων για τη διαχείρισή τους. Πρόσφατα, η μοντελοποίηση της ανάλυσης κύκλου ζωής απέδειξε ότι η επαναχρησιμοποίηση και αξιοποίηση των ΑΕΚΚ μπορεί να μειώσει το αποτύπωμα της βιομηχανίας δομικών υλικών στις περισσότερες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. [6,7]

Το ενυδατωμένο τσιμέντο Portland μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη στην παραγωγή γεωπολυμερών. Τα οξείδια πυριτίου και αλουμινίου που χρειάζονται για τη διαδικασία γεωπολυμερισμού παράγονται με την ενανθράκωση του ενυδατωμένου τσιμέντου Portland, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως συνδετικό υλικό χαμηλών εκπομπών CO₂. [14] Επιπλέον, ως πρώτη ύλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα κεραμίδια, τα τούβλα και τα κεραμικά απόβλητα από τη μία και τα προϊόντα σκυροδέματος και η πέτρα τοιχοποιίας από την άλλη, τα οποία είναι τα δύο μείζονα κλάσματα των ΑΕΚΚ. Αυτά τα υλικά είναι αδρανή αφού στην πραγματικότητα έχουν, ως κύρια συστατικά τους, τα πιο κοινά μέταλλα του γήινου φλοιού, τα αργιλοπυριτικά. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτών των υλικών είναι ότι εμφανίζονται συνήθως σε διαφορετικές χρονικές στιγμές στη διαδικασία κατασκευής, και επομένως μπορούν εύκολα να διαχωριστούν και να συλλεχθούν. [22] Το τούβλο είναι ένα από τα κυριότερα υλικά που συναντάμε στην τοιχοποιία, λόγω των ιδιοτήτων του. Τα κοινά τούβλα παράγονται από ένα μίγμα πρώτων υλών που περιλαμβάνει πηλό και άμμο. Το μίγμα αυτό ψήνεται σε θερμοκρασία 850 έως 950 βαθμών Κελσίου. Αυτή τη στιγμή η παγκόσμια, ετήσια παραγωγή τούβλου είναι περίπου 1391 δισεκατομμύρια μονάδες, ενώ ταυτόχρονα η ζήτηση αναμένεται να αυξάνεται συνεχώς, καθώς η κατασκευαστική δραστηριότητα εντείνεται παγκοσμίως.[7] Τα απόβλητα τούβλων επαναχρησιμοποιούνται σε ένα μικρό βαθμό για την παραγωγή του τούβλου, αλλά

τεράστιες ποσότητες “πετιούνται”, προκαλώντας μεγάλα περιβαλλοντικά προβλήματα.[8] Το υλικό αυτό έχει πολύ μικρή κοκκομετρία και δεν περιέχει βλαβερές ουσίες, επομένως δε χρειάζεται περεταίρω επεξεργασία. Καθώς όμως έχει χαμηλό ποζολανικό περιεχόμενο, μελετήθηκαν μίγματα με σκωρία υψικαμίνων. [7,13] Αποτελέσματα πειραμάτων αλκαλικής διάλυσης έδειξαν ότι τα τούβλα είναι ευαίσθητα σε αλκαλικές προσβολές και επομένως έχουν καλές δυνατότητες γεωπολυμερισμού. Επιπλέον, τα απόβλητα τούβλων είναι το πλέον άφθονο αργιλοπυριτικό υλικό στα ΑΕΚΚ, προσφέροντας την ευκαιρία ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης υψηλότερων ποσοτήτων αυτών των αποβλήτων. [5] Ειδικότερα, έχουν μελετηθεί μικτά συστήματα από σκωρία υψικαμίνων και σκόνη από απόβλητα τούβλων.[13] Η σκωρία υψικαμίνων ήταν το πρώτο υλικό που ενεργοποιήθηκε αλκαλικά λόγω των υδραυλικών του ιδιοτήτων. [20]

Οι δυνατότητες των ΑΕΚΚ για αλκαλική ενεργοποίηση παραμένουν μία πρόκληση και μελετώνται εκτενώς [17]. Πιο συγκεκριμένα, οι Allahverdi και Kani παρήγαγαν γεωπολυμερικό τσιμέντο χρησιμοποιώντας απόβλητα τούβλων και τσιμέντο, σε διάφορες αναλογίες ανάμιξης. Ο Ahmarı παρήγαγε γεωπολυμερικό συνδετικό υλικό από μίγματα αποβλήτων τσιμέντου και ιπτάμενης τέφρας. Ο Reig μελέτησε τις ιδιότητες και τη μικροδομή αλκαλικά ενεργοποιημένων παστών τσιμέντου και σκυροδέματος από πηλό. Ο Pathak μελέτησε δύο είδη ΑΕΚΚ, σκόνη τσιμέντου και σκόνη τούβλου. Η θερμομετρική ανάλυση έδειξε ότι η σκόνη τούβλου είναι πιο δραστική από αυτή του τσιμέντου. Από αυτή τη μελέτη προέκυψε ως συμπέρασμα ότι οι φυσικομηχανικές ιδιότητες των γεωπολυμερών από ΑΕΚΚ ήταν συγκρίσιμες με εκείνες άλλων κατασκευαστικών υλικών. Ο Zedan μελέτησε τις επιπτώσεις της ανάμιξης κεραμικών, αποβλήτων βωξίτη και τσιμέντου με σκωρία υψικαμίνων στις ιδιότητες του παραγόμενου αλκαλικά ενεργοποιημένου τσιμέντου.[21] Πρόσφατα, ο Κομνίτσας έδειξε την πιθανή χρήση αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων (συμπεριλαμβανομένων ανακυκλωμένου σκυροδέματος, τούβλων και πλακιδίων) ως πρώτων υλών για τη σύνθεση γεωπολυμερών, τα όποια μάλιστα παρουσίασαν υψηλή μηχανική αντοχή (> 40MPa μετά από 7 ημέρες σκλήρυνσης). [6] Οι Allahverdi και Naja παρήγαγαν αλκαλικά ενεργοποιημένες πάστες βασισμένες σε μείγματα τούβλων, απορριμμάτων και θραυσμάτων σκυροδέματος 8 μηνών, τα οποία έφθασαν σε θλιπτική αντοχή μέχρι και 40MPa μετά την πάροδο του χρόνου. Η χρήση ανακυκλωμένου θρυμματισμένου υλικού που προέρχεται από τούβλα και άλλα προϊόντα αργίλου ως πρώτες ύλες για την ανάπτυξη γεωπολυμερικών τσιμέντων, είναι επί του παρόντος αρκετά περιορισμένη, αν και διάφορες μελέτες υποδεικνύουν ότι αυτό μπορεί να είναι τεχνικά εφικτό. [5,6] Τα παραπάνω αποτελέσματα διασαφηνίζουν τη σημασία της εξέτασης της επεξεργασίας των αποβλήτων κατεδάφισης πριν από τη χρήση τους ως πρόδρομα υλικά στην αλκαλική ενεργοποίηση, λαμβάνοντας υπόψη την ετερογένειά τους. Ως εκ τούτου, τα απόβλητα που παράγονται από την κεραμική βιομηχανία μπορούν πιθανώς να επαναχρησιμοποιηθούν ευκολότερα από τα γενικά απορρίμματα κατεδάφισης, καθώς είναι ευκολότερο να ελεγχθεί η σύνθεση και να μειωθεί η μεταβλητότητά τους. [6]

Οι δυνατότητες χρήσης των ΑΕΚΚ στην αλκαλική ενεργοποίηση μπορούν να ενισχυθούν αν αναμιχθούν συγκεκριμένοι λόγοι συστατικών, προκειμένου να προσδιοριστεί η ορυκτολογική σύσταση των αρχικών πρώτων υλών. Τα ΑΕΚΚ, όπως για παράδειγμα τα απόβλητα κεραμικών, έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε αργιλοπυριτικά συστατικά, και συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση γεωπολυμερών. [6,8] Οποιαδήποτε έλλειψη χημικών συστατικών αντισταθμίζεται με την προσθήκη κατάλληλου υλικού. Τα τελικά προϊόντα είναι ένα πολύ σκληρό κεραμικό προϊόν με εφαρμογές όπως μπλοκ πεζοδρομίων, προκατασκευασμένο σκυρόδεμα κ.α..

Είναι γνωστό ότι τα συμβατικά γεωπολυμερή χρειάζονται θερμότητα για να επιτευχθεί παρόμοια ή υψηλότερη αντοχή σε θλίψη σε σύγκριση με το σκυρόδεμα OPC. Η θερμική επεξεργασία είναι επωφελής για τη διάλυση και το γεωπολυμερισμό της αργιλοπυριτικής γέλης, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα υψηλό κέρδος πρώιμης αντοχής. Επίσης συμβάλλει στην επιτάχυνση της διάλυσης των ειδών πυριτίας και αλούμινας και την επακόλουθη διαδικασία πολυσυμπύκνωσης. Ωστόσο, το είδος θερμικής επεξεργασίας που εφαρμόζεται πρέπει να είναι κατάλληλο κατά τρόπον ώστε να παρέχει μια ιδανική κατάσταση για την διάλυση και την καταβύθιση των διαλυμένων ειδών πυριτίας και αλούμινας. Ο γεωπολυμερισμός μπορεί να παρεμποδιστεί όταν υπερβεί ορισμένη θερμοκρασία και θερμότητα κατά την περίοδο της θερμικής ωρίμανσης, ανάλογα με την πρώτη ύλη, η οποία με τη σειρά της είναι δυνατόν να επηρεάζει δυσμενώς τις μηχανικές ιδιότητες των γεωπολυμερών. [3,4] Σύμφωνα με τον Davidovits, σε χαμηλές θερμοκρασίες, δημιουργούνται άμορφες ή υαλώδεις δομές με φτωχές μηχανικές ιδιότητες, σε μεσαίες θερμοκρασίες (35°C έως 85°C) δημιουργούνται άμορφες ή ημικρυσταλλικές δομές με καλές φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες ενώ σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 100°C σχηματίζονται ημικρυσταλλικές δομές με άριστες ιδιότητες. Παρολαυτά, η χρήση θερμοκρασιών μεγαλύτερων των 100°C μπορεί να προκαλέσει την ρωγμάτωση των δοκιμίων και κατά συνέπεια την υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. [4]

Το διάλυμα ενεργοποίησης διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στην έναρξη της διαδικασίας γεωπολυμερισμού. Γενικά, είναι απαραίτητο ισχυρό αλκαλικό μέσο για την αύξηση της επιφάνειας υδρόλυσης των αργιλοπυριτικών σωματιδίων που υπάρχουν στην πρώτη ύλη, ενώ η συγκέντρωσή του έχει έντονη επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες των γεωπολυμερών. Οι Gorhan και Kurklu διερεύνησαν την επιρροή του διαλύματος NaOH στην αντοχή σε θλίψη στις 7 ημέρες. Σε όλο το εργαστηριακό έργο τους χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις NaOH (3, 6 και 9 M), ενώ οι υπόλοιποι παράγοντες διατηρήθηκαν σταθεροί. Με βάση τα αποτελέσματα αντοχής που αποκτήθηκαν, η βέλτιστη συγκέντρωση NaOH με την οποία παράγεται η υψηλότερη θλιπτική αντοχή 7 ημερών (22,0 MPa) ήταν 6 M. Από την άλλη, πάνω από ένα ορισμένο επίπεδο αλκαλικότητας, περίπου 16M, έχουμε μείωση των αντοχών. Ανεξάρτητα από το είδος των ενεργοποιητών, η θλιπτική αντοχή γενικά αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης του ενεργοποιητή. Επιπλέον οι ρεολογικές ιδιότητες και οι φυσικές ιδιότητες των γεωπολυμερών βρέθηκαν να είναι επηρεασμένες από τη φύση και τη διαδικασία του γεωπολυμερισμού, η οποία με τη σειρά της διέπεται κυρίως από το διάλυμα ενεργοποίησης καθώς και από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο ωρίμανσης. [3]

Σύμφωνα με τον Davidovits το εύρος των λόγων των διαφόρων συστατικών, προκειμένου το σύστημα να είναι κατάλληλο για την παρασκευή γεωπολυμερών, πρέπει να κυμαίνεται ως εξής:

$$0.2 < M_2O/SiO_2 < 0.28$$

$$3.5 < SiO_2/Al_2O_3 < 4.5$$

$$15 < H_2O/M_2O < 17.5$$

$$m_{στερεών}/m_{υγρών} \approx 3$$

$$0.72 < [Si] < 3.96$$

Όπου:

M₂O: το οξειδίο του αλκαλίου που περιέχεται στο διάλυμα ενεργοποίησης.

m_{υγρού}: το σύνολο της μάζας νερού που περιέχεται στο διάλυμα ενεργοποίησης

m_{στερεού}: το σύνολο της μάζας όλων των στερεών που συμμετέχουν στην αντίδραση,

δηλαδή την μάζα της πρώτης ύλης, την μάζα των καυστικών αλκαλίων και του πυριτικού ή αργιλικού άλατος που τυχόν υπάρχει.

[Si] : η συγκέντρωση του πυριτίου στο διάλυμα ενεργοποίησης

Ο μοριακός λόγος Si/Al θεωρείται ένας από τους σημαντικότερους λόγους που επηρεάζουν την γεωπολυμερική σύνθεση. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο λόγος αυτός περιλαμβάνει τις ποσότητες πυριτίου και αργιλίου τόσο της πρώτης ύλης όσο και αυτές που περιέχονται στο διάλυμα ενεργοποίησης. Άρα πρόκειται για έναν συνολικό λόγο και όχι τον πραγματικό λόγο Si/Al που περιέχεται στην αντιδρούσα γέλη, αφού δεν είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός της ποσότητας πυριτίου και αργιλίου της πρώτης ύλης που περνά στο διάλυμα. Δεν παύει να αποτελεί όμως ένα χρήσιμο εργαλείο για τον προσδιορισμό της επίδρασης της περιεκτικότητας του διαλύματος ενεργοποίησης σε διαλυτό πυρίτιο/αργίλιο στον γεωπολυμερισμό ενός συγκεκριμένου υλικού. Φαίνεται λοιπόν πως ο λόγος αυτός είναι κρίσιμος για τα παραγόμενα πολυμερή, καθώς είναι υπεύθυνος για τις σημαντικές δομικές διαφορές μεταξύ γεωπολυμερών της ίδιας πρώτης ύλης, ενώ καθορίζει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τους. Ένας μικρός λόγος Si/Al (=1,2,3) στα τελικά προϊόντα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μιας τρισδιάστατης, συμπαγούς δομής με καλές μηχανικές ιδιότητες. Για λόγο $3 < \text{Si/Al} < 20$ τα παραγόμενα προϊόντα έχουν πολυμερικό χαρακτήρα και οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι αυξανόμενα ελαστικές ενώ για μεγαλύτερους λόγους τα γεωπολυμερή αναπτύσσουν δισδιάστατο δίκτυο και έχουν ένα εντελώς διαφορετικό πεδίο εφαρμογών. [4]

Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι η παρουσία διαλυτού πυριτίου στο διάλυμα ενεργοποίησης ευνοεί την παραγωγή γεωπολυμερών με ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες. Το διαλυτό Si αντιδρά με το Al της πρώτης ύλης, το οποίο διαλύεται στα πρώιμα στάδια της διεργασίας διαλυτοποίησης και σχηματίζει ολιγομερή τα οποία πολυμερίζονται στις γεωπολυμερείς δομές. Το θετικό αποτέλεσμα του διαλυτού πυριτίου στις μηχανικές ιδιότητες έχει ένα ανώτερο όριο ($[\text{Si}]/\text{Na}_2\text{O} = 1,05$). Σε υψηλότερες τιμές, παρατηρείται μείωση της θλιπτικής αντοχής. Φαίνεται ότι μια υψηλή συγκέντρωση διαλυτού πυριτίου στο διάλυμα ενεργοποίησης καθυστερεί τις αντιδράσεις γεωπολυμερισμού. [5]

Μεγάλης σημασίας φαίνεται να είναι και ο λόγος $\text{M}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ ο οποίος αφορά την αντίδραση μεταξύ των ιόντων $\text{Al}(\text{OH})_4$ και του πυριτίου. Ένας μεγάλος λόγος $\text{M}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό κυρίως μεγάλων ολιγομερών πυριτίου στο διάλυμα. Αυτά τα μεγάλα ολιγομερή πυριτίου ξεκινούν τον πολυμερισμό με τα ιόντα $\text{Al}(\text{OH})_4$, με αποτέλεσμα την μείωση της συγκέντρωσης των ιόντων Al και Si στο διάλυμα. Αυτό σημαίνει ότι πραγματοποιείται επιπλέον διαλυτοποίηση Al και Si από το αργιλοπυριτικό υλικό, λόγω της μετατόπισης της ισορροπίας της αντίδρασης διαλυτοποίησης.

Τέλος, αξιολογήθηκε η επίδραση της περιεκτικότητας σε νερό (στερεό / υγρό) στο γεωπολυμερισμό των αποβλήτων τούβλων. Καθώς αυξάνεται ο λόγος στερεών / υγρών, αυξάνεται και η αντοχή σε θλίψη, πιθανώς λόγω της αύξησης της αλκαλικότητας στο διάλυμα ενεργοποίησης. Οι αναλογίες στερεών / υγρών υψηλότερες από 3.6 οδήγησαν σε περιορισμένα προβλήματα εργασιμότητας και ανάμιξης των πολτών. [5]

Προκειμένου να βελτιωθούν οι ιδιότητες των τελικών προϊόντων συχνά χρησιμοποιούνται και διάφορα πρόσθετα στην αλκαλική ενεργοποίηση, τα οποία πολλές φορές είναι επίσης κλάσματα ΑΕΚΚ. Για τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης των γεωπολυμερών με βάση τα ΑΕΚΚ μπορούν να ενσωματωθούν υλικά αλλαγής φάσης και αερογέλες από ανανεώσιμες πηγές. Μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν διακριτές ίνες από ανακυκλωμένα δομικά υλικά όπως χαλιά [25,30] ή/και ανανεώσιμοι φυσικοί πόροι,

όπως γιούτα και κάνναβη για την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων των γεωπολυμερών, καθώς και της ολκιμότητας και της δυναμικής, έτσι ώστε τα γεωπολυμερή δομικά στοιχεία να μπορούν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο σε μη σεισμικές ζώνες αλλά και σε σεισμικές ζώνες. [30] Ιδιαίτερα, έχει μελετηθεί και η προσθήκη αλεσμένου γυαλιού για την παραγωγή σύνθετων γεωπολυμερών και η επίδρασή του στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Ωστόσο, η υπερβολική περιεκτικότητα σε πυρίτιο (λόγω του γυαλιού) μπορεί να αντιδράσει με το αλκάλιο και μπορεί να οδηγήσει σε πρόβλημα διαστολής στα σύνθετα γεωπολυμερή. [25]

Μετά τις ανασκοπήσεις που έγιναν σχετικά με τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες των γεωπολυμερών που προέρχονται από βιομηχανικά υποπροϊόντα, μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες περιλήψεις:

(1) Γενικά, οι εγκλείσεις 2-14 Μ NaOH ως χημικό ενεργοποιητή στη μήτρα του γεωπολυμερούς αυξάνουν τη θλιπτική αντοχή του σκληρυνθέντος γεωπολυμερικού σκυροδέματος.

(2) Οι πολυσύνθετοι χημικοί ενεργοποιητές που αποτελούνται από $\text{Na}_2\text{O-SiO}_2/\text{NaOH}$ βρέθηκε ότι είναι οι πιο αποτελεσματικοί χημικοί ενεργοποιητές που μπορούν να προστεθούν στο γεωμετρικό πλέγμα για το σκοπό της ενίσχυσης της μηχανικής αντοχής.

(3) Σε συνδυασμό με την προσθήκη χημικών ενεργοποιητών, η εφαρμογή της θερμικής ωρίμανσης, όσον αφορά στη διάρκεια και τη θερμοκρασία είναι απαραίτητη για την επιτάχυνση της ανάπτυξης των πρώιμων αντοχών του γεωπολυμερικού σκυροδέματος. Μία μέγιστη διάρκεια 24 ωρών και η περιοχή θερμοκρασίας σκλήρυνσης των 50-90°C βρέθηκε να είναι ωφέλιμη για την βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη ανάπτυξη αντοχών και τη σταθερότητα του γεωπολυμερικού σκυροδέματος.

(4) Γενικά, η συρρίκνωση του γεωπολυμερικού σκυροδέματος διέπεται από την αντίστοιχη αντοχή, δηλ. αύξηση της συρρίκνωσης σχετίζεται με την ανάπτυξη χαμηλής αντοχής του γεωπολυμερικού σκυροδέματος.

(5) Μπορεί να κατασκευαστεί γεωπολυμερικό σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (> 60 MPa) με την υψηλότερη λεπτότητα των πρώτων υλών.

2.2.5. Εναλλακτικές πηγές ΑΕΚΚ

Οι κύριες πηγές ΑΕΚΚ είναι τα έργα κατασκευής και κατεδάφισης. Μερικές φορές, για να επιτευχθούν παράμετροι υψηλής ποιότητας για τα επεξεργασμένα απόβλητα, όπως για την επιθυμητή καθαρότητα, υγρασία, κ.λπ., προκειμένου να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη για περαιτέρω παραγωγή, είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν περίπλοκες τεχνολογικές διαδικασίες. Σε πολλές περιπτώσεις, ο βαθμός μόλυνσης εμποδίζει τη χρήση τους για πιο απαιτητικές τεχνολογίες.

Ως εκ τούτου, είναι σκόπιμο να αναζητηθούν και άλλες εναλλακτικές πηγές ΑΕΚΚ. Η έρευνα της International Synergies για τις εναλλακτικές πρώτες ύλες για τις κατασκευές εντόπισε μια πιθανή δεξαμενή εναλλακτικών πρώτων υλών που παράγονται κάθε χρόνο και είναι διαθέσιμες για επαναχρησιμοποίηση από τον κατασκευαστικό κλάδο. Εάν η κατασκευαστική βιομηχανία επεκτείνει την προσέγγισή της στην επαναχρησιμοποίηση των πλεονασματικών ροών πόρων που παράγονται από άλλες βιομηχανίες καθώς και της δικής της, θα οδηγούσε σε δραματική μείωση της εξάρτησης του κλάδου από τους πρωτογενείς πόρους και θα μείωνε σημαντικά τις εκπομπές διοξειδίου άνθρακα.

Εναλλακτικά, ως ΑΕΚΚ μπορούν να θεωρηθούν όλα τα δομικά και λειτουργικά υλικά, όπως:

- τούβλα, σκυρόδεμα και άλλα υλικά τοιχοποιίας

- πέτρα
- γυαλί, επενδύσεις τοίχων (χαρτί, βινύλιο, κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα)
- γυψοσανίδα
- ξύλο
- υλικά στέγης
- είδη υγιεινής (τουαλέτες, νεροχύτες, θερμοσίφωνες, σωλήνες - PE, PEX, PVC)
- εξοπλισμός θέρμανσης (φούρνοι, αγωγοί, θερμοσίφωνες)
- ηλεκτρικές καλωδιώσεις και εξαρτήματα που δεν περιέχουν επικίνδυνα υγρά ή ψυκτικά μέσα
- μόνωση (αφρός PU, Styrofoam, XPS, ορυκτό μαλλί, φύλλα)
- χαλιά από τοίχο σε τοίχο (υφάσματα)
- ασφαλτικές ουσίες
- μέταλλο

[24]

2.3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση: Μέθοδοι παραγωγής ελαφροβαρών δομικών υλικών από γεωπολυμερή

Η παραγωγή ελαφροβαρών δομικών υλικών έχει να προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων. Γι' αυτό το λόγο έχουν μελετηθεί διάφορες μέθοδοι για την παραγωγή τους, καθώς και οι επιπτώσεις τους στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι υπάρχουν δύο μέθοδοι για την παραγωγή τους:

1. Αφρισμός
2. Ελαφροβαρή αδρανή

2.3.1. Αφρισμός

Το αφρώδες σκυρόδεμα γενικά ορίζεται ως ένας τύπος ελαφρού σκυροδέματος που έχει υψηλό βαθμό κενού χώρου, ο οποίος δημιουργείται με ή χωρίς την προσθήκη λεπτών συσσωματωμάτων. Το αφρώδες σκυρόδεμα κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Aylsworth και τον Dyer το 1914 και αργότερα από τους Bayer και Eriksson το 1923, αλλά η εφαρμογή του ως ελαφρύ οικοδομικό υλικό έχει γίνει πολύ πιο δημοφιλής τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων έχει καταστεί πλέον διαδεδομένη ανησυχία. Ο έλεγχος της φύσης, του μεγέθους και της κατανομής των κενών είναι το πιο κρίσιμο βήμα στην παραγωγή ενός αφρώδους σκυροδέματος, καθώς οι κενοί χώροι καθορίζουν την πυκνότητα και την αντοχή του σκυροδέματος.

Οι κενοί χώροι παράγονται κυρίως με δύο μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος είναι ο αφρισμός με τη δημιουργία ενδογενούς αερίου, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με την ανάμιξη παραγόντων απελευθέρωσης αερίου, όπως το H_2O_2 ή οι λεπτές σκόνες αλουμινίου ή ψευδαργύρου σε πάστα τσιμέντου ή κονιάματος. Η δεύτερη μέθοδος είναι η εισαγωγή ενός πολύ μεγάλου κλάσματος όγκου φυσαλίδων αέρα, συνήθως μέσω της χρήσης κάποιου οργανικού παράγοντα αφρισμού.

Διαφορετικές μέθοδοι αφρισμού, σύνθεση μείγματος και συνθήκες ωρίμανσης θα παράγουν διαφορετικά μεγέθη και κατανομές κενών χώρων στο εσωτερικό του αφρώδους σκυροδέματος, παράγοντες οι οποίοι θα επηρεάσουν περαιτέρω τις ιδιότητές του. [31]

Όπως προαναφέρθηκε, ενδογενές αέριο μπορεί να παραχθεί με την εισαγωγή παραγόντων απελευθέρωσης αερίου, όπως το υπεροξείδιο του υδρογόνου, ή το silica fume. Το κύριο πλεονέκτημα του ανόργανου αφρισμού είναι η καταλληλότητά του για την παραγωγή κεραμικών αφρών χωρίς τη χρήση υψηλής θερμοκρασίας (όπως απαιτεί η καύση οργανικών ενώσεων και η τήξη) σε αντίθεση με τη συμβατική παραγωγή μακροπορώδων κεραμικών. Από την άλλη πλευρά, τα ελαφρά γεωπολυμερή που αναπτύσσονται μέσω της χημικής αντίδρασης αφριστικών παραγόντων, συνήθως παρουσιάζουν περιορισμένη μηχανική συμπεριφορά λόγω της μεγάλης κατανομής μεγέθους πόρων (στην περιοχή από 0,5-3,0mm). Εάν η κατανομή μεγέθους πόρων ελέγχεται αποτελεσματικά, οι μηχανικές ιδιότητες των αφρωδών γεωπολυμερών μπορούν να βελτιωθούν.

Η σύνθεση των αφρωδών γεωπολυμερών περιλαμβάνει τρία στάδια: α) την παρασκευή του διαλύματος ενεργοποίησης, β) την ανάμιξη των πρώτων υλών (ΑΕΚΚ και παράγοντα απελευθέρωσης αερίου) με το διάλυμα ενεργοποίησης και γ) τη χύτευση και τη σκλήρυνση των δειγμάτων.

Αφρισμός με τη μέθοδο δημιουργίας ενδογενούς αερίου

Οι Κιούπης, Καβακάκη, Τσιβιλής και Κακάλη, μελέτησαν τη σύνθεση και το χαρακτηρισμό γεωπολυμερών υπτάμενης τέφρας χρησιμοποιώντας πυρίτιο (Si) ως

παράγοντα αφρισμού. Εφαρμόστηκε η προσέγγιση Taguchi προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος μερικών σημαντικών παραμέτρων της σύνθεσης, όπως η περιεκτικότητα σε παράγοντα αφρισμού (Si %w/w με βάση την ιπτάμενη τέφρα), ο τύπος του αλκαλίου που χρησιμοποιήθηκε στο διάλυμα ενεργοποίησης (R: Na ή K) και η αλκαλικότητα (μοριακός λόγος R/Al) του διαλύματος ενεργοποίησης σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή και την φαινόμενη πυκνότητα των αφρώδων γεωπολυμερών. Επιπλέον, μελετήθηκε η αναλογία Na/(Na+K), η οποία σχετίζεται με το είδος του αλκαλίου στο διάλυμα ενεργοποίησης. Τα τελικά προϊόντα χαρακτηρίστηκαν με τις μεθόδους XRD, FTIR και SEM, ενώ για την αξιολόγηση του πορώδους χρησιμοποιήθηκε οπτικό μικροσκόπιο. Αυτή η εργασία κατέληξε στα ακόλουθα αποτελέσματα: η ιπτάμενη τέφρα ανακυκλώθηκε με επιτυχία στην παραγωγή ελαφροβαρών γεωπολυμερών. Το μεταλλικό πυρίτιο, που προστίθεται στο αρχικό μείγμα ακόμη και σε μικρές ποσότητες, δρα αποτελεσματικά ως παράγοντας αφρισμού, καθώς τα ελαφροβαρή γεωπολυμερή με περιεκτικότητα σε Si μέχρι 0.2 %w/w επί της ιπτάμενης τέφρας εμφάνισαν αντοχή σε θλίψη από 2.08 έως 14.88 MPa και φαινόμενη πυκνότητα από 0.84 έως και 1.55 g/cm³. Η μεγάλη διακύμανση της θλιπτικής αντοχής και της φαινόμενης πυκνότητας δείχνει ότι οι επιλεγμένες παράμετροι επηρεάζουν έντονα αυτές τις ιδιότητες, επιπλέον αποκαλύπτει το μεγάλο δυναμικό εφαρμογών του αφρώδους σκυροδέματος. Η αντοχή σε θλίψη των αφρώδων γεωπολυμερών είναι σε στενή σχέση με το πορώδες των τελικών προϊόντων, αλλά ακόμη και στην περίπτωση των ιδιαίτερα πορώδων δομών, μπορεί να επιτευχθεί εύκολα αντοχή σε θλίψη μεγαλύτερη από 2 MPa. Το γεωπολυμερές αναφοράς που παρασκευάστηκε χωρίς προσθήκη Si, με μοριακούς λόγους Si/Al=2.4, R/Al=0.8, Na/(Na+K)=1,00 και solid/liquid=2.8, διέθετε αυξημένη θλιπτική αντοχή και φαινόμενη πυκνότητα, με τιμές 53.70 MPa και 1.77 g/cm³ αντίστοιχα. [19]

Οι Lassinantti-Gualtieri, Romagnoli και Gualtieri παρασκεύασαν αφρούς γεωπολυμερούς με αντίδραση μετακαολίνη με φωσφορικό οξύ και με τη χρήση φυσικού ασβεστίου/δολομίτη ως παράγοντα αφρισμού. Σε αυτό το σύστημα μελέτησαν το συνολικό πορώδες και η θερμική αγωγιμότητα των τελικών προϊόντων, που ήταν περίπου 70% και 0,083±0,008 W/mK, αντίστοιχα. Επιπλέον διεξήχθησαν βελτιώσεις τύπου Rietveld προκειμένου να διασαφηνιστεί η σταθερότητα της φάσης του σχηματισμένου συνδετικού υλικού έως τους 1200°C. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στους 700 βαθμούς Κελσίου η άμορφη μήτρα κρυσταλλοποιήθηκε μερικώς σε δομές τύπου τριδυμίτη και χριστοβαλίτη. Στους 1000°C ξεκινά η κρυστάλλωση του μολίτη 3:2, ενδεχομένως από μη-αντιδρασθέντα μετακαολινίτη, με αποτέλεσμα την κρυσταλλοποίηση του χριστοβαλίτη. Ταυτόχρονα, η ποσότητα της δομής τύπου τριδυμίτη μειώθηκε, πιθανόν λόγω του εκλεκτικού μετασχηματισμού φάσης του τριδυμίτη προς τον χριστοβαλίτη. [32]

Οι Zuhua Zhang και Hao Wang κατασκεύασαν αφρώδες σκυρόδεμα (GFC) με προσθήκες προσηματισμένου αφρού σε ποσοστό από 0 έως 16% σε αλκαλικά ενεργοποιημένο μίγμα ιπτάμενης τέφρας-σκωρίας (σύστασης 70/30) και μελέτησαν τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων χρησιμοποιώντας τεχνικές ανάλυσης εικόνας (IA) και τεχνικές κορεσμού νερού κενού. Ο αφρός δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας μια γεννήτρια αφρού πίεσης αέρα και στη συνέχεια ζυγίστηκε και προστέθηκε στο μίγμα στο τέλος της ανάμιξης της πάστας. Η σκλήρυνση των δειγμάτων έγινε στους 40°C για 1 ημέρα, και η ωρίμανση 27 ημερών σε συνθήκες περιβάλλοντος. Η κατανομή μεγέθους των πόρων, το σχήμα πόρων και το πορώδες μελετήθηκαν μέσω της μεθόδου ανάλυσης εικόνας, η οποία παρέχει κατάλληλη προσέγγιση για την απόκτηση πληροφοριών για τους μεγάλους πόρους, οι οποίοι έχουν και την πιο σημαντική επίδραση στη θλιπτική αντοχή του αφρώδους σκυροδέματος. Η μελέτη

αυτή επιβεβαιώνει ότι το αφρώδες σκυρόδεμα έχει παρόμοιες δομές πόρων και μηχανική συμπεριφορά όπως το σκυρόδεμα από τσιμέντο Portland και μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά στη βιομηχανία για την κατασκευή και τη μόνωση. [33]

Αφρισμός με τη χρήση οργανικών προσθέτων

Οι Kaliappan, Siyal, Man, Lay και Shamsuddin ερεύνησαν τις δυνατότητες του καλαμποκέλαιου, των αποβλήτων ελαίων μαγειρέματος (φοινικέλαιο) και του αμύλου ως οργανικούς παράγοντες σχηματισμού πόρων σε γεωπολυμερή ιπτάμενης τέφρας.

Τα κυριότερα σημεία των αποτελεσμάτων περιλαμβάνουν: το γεωπολυμερές αναφοράς είχε αντοχή σε θλίψη 30,93 MPa. Το δείγμα που παρασκευάστηκε με καλαμποκέλαιο εμφάνισε το υψηλότερο πορώδες 26,6% και θλιπτική αντοχή 9,9 MPa, ακολούθησε το φοινικέλαιο με πορώδες 21,3% και θλιπτική αντοχή 9,0 MPa και τέλος το άμυλο με πορώδες 17,9% και θλιπτική αντοχή 20,41 MPa. Οι πόροι ήταν συνδυασμός κενών και σφαιρικών όπως επιβεβαιώθηκε και από ανάλυση με SEM. [34,35]

Οι Novais, Ascensão, Buruberri, Senff, Labrincha μελέτησαν μεταξύ άλλων την επίδραση της περιεκτικότητας σε παράγοντα αφρισμού στις ιδιότητες των γεωπολυμερών που παράγονται από ιπτάμενη τέφρα. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι ο ρυθμός γεωπολυμερισμού επηρεάζεται ελάχιστα από τον παράγοντα αφρισμού. Επίσης διαπιστώθηκε ότι, η σωστή συσχέτιση μεταξύ της γραμμομοριακότητας του NaOH (ως ενεργοποιητή του γεωπολυμερούς) και του περιεχομένου σε παράγοντα αφρισμού οδηγεί στην παραγωγή ελαφροβαρών γεωπολυμερών που εμφανίζουν πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (μέχρι 0,08 W/mK) και φαινόμενη πυκνότητα (440 kg/m³). Η θερμική αγωγιμότητα που εμφανίζουν αυτά τα πρωτοποριακά υλικά υποδηλώνει την καταλληλότητά τους για θερμομονωτικές εφαρμογές. [36]

Οι Kligys, Laukaitis, Sinica και Sezemanas μελέτησαν τις ιδιότητες των υδατικών διαλυμάτων ορισμένων επιφανειοδραστικών ουσιών και την επίδραση διαφορετικών τύπων επιφανειοδραστικού, συγκέντρωσής του και χρόνου ανάμιξης, στην πυκνότητα της νωπής πάστας τσιμέντου και των σκληρωσμένων δειγμάτων. Με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας, επιλέχθηκε ο καταλληλότερος τύπος επιφανειοδραστικού, η βέλτιστη περιεκτικότητα και ιδανικός ο χρόνος ανάμιξης. Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του επιφανειοδραστικού διαλύματος, μελετήθηκαν υδατικά διαλύματα από απεσταγμένο νερό και τα εξής επιφανειοδραστικά: α) Ufarore CC 85, (β) Ufarore TP 707, (γ) Ufarore CC, δ) Ufarore TCO, (ε) PB-2000 και (στ) κόλλα σουλφονών-οστών. Αυτά τα επιφανειοδραστικά χρησιμοποιήθηκαν σε περιεκτικότητες: 0.025, 0.050, 0.075 και 0.100%. Η μελέτη αυτή έδειξε ότι όλες οι επιφανειοδραστικές ουσίες που μελετήθηκαν βελτιώνουν την ικανότητα διαβροχής των θραυσμένων διογκωμένων αποβλήτων πολυστυρενίου με φρέσκια πάστα τσιμέντου. Τα πιο αποτελεσματικά επιφανειοδραστικά είναι το Ufarore CC και το Ufarore TCO. Το βέλτιστο περιεχόμενο αυτών δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.03%. Η χρήση αυτών των επιφανειοδραστικών ουσιών σε υψηλότερα περιεχόμενα δεν είναι οικονομικά αποτελεσματική. Αν και το επιφανειοδραστικό Ufarore CC μειώνει την τιμή της πυκνότητας του πορώδους σκυροδέματος λίγο πιο αποτελεσματικά από το επιφανειοδραστικό Ufarore TCO, η ανάλυση της δομής έδειξε ότι οι πόροι μεγάλης διαμέτρου που σχηματίζονται, συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζονται όταν χρησιμοποιείται αυτό το επιφανειοδραστικό. Αυτός ο τύπος κενών μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις ιδιότητες όλων των σύνθετων υλικών, κάτι το οποίο δε συμβαίνει στην περίπτωση του Ufarore TCO. [37]

2.3.2. Ελαφροβαρή αδρανή

Η μείωση της πυκνότητας ενός γεωπολυμερούς μπορεί να πραγματοποιηθεί με την ενσωμάτωση ελαφροβαρών προσθέτων στα μείγματα πρώτων υλών. Ένα τέτοιο ελαφροβαρές αδρανές είναι και η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS). Άλλα ελαφρά πρόσθετα όπως η πολυουρεθάνη (XPS) και αφρός πολυουρεθάνης (PU) έχουν επίσης δοκιμαστεί, ωστόσο, το EPS διατηρεί τις βέλτιστες επιδόσεις όσον αφορά στις αντοχές και την πυκνότητα. Το μέγεθος των σφαιρικών σωματιδίων EPS κυμαίνεται από 1 έως 4 mm.

Στο έργο GI, μελετήθηκαν και οι τρεις προαναφερθέντες τύποι ελαφροβαρών παραγόντων. Τα συγκριτικά αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι το EPS διατηρεί τη βέλτιστη συμπεριφορά όσον αφορά τις τιμές θλιπτικής αντοχής και πυκνότητας. Η ενσωμάτωση XPS απαιτεί ελαφρώς υψηλότερες ποσότητες ελαφροβαρούς υλικού για την επίτευξη παρόμοιων τιμών πυκνότητας με αυτές του EPS. Επιπλέον, η εισαγωγή αφρού PU στο εσωτερικό της γεωπολυμερικής μήτρας δεν οδήγησε σε σημαντική μείωση στην τελική πυκνότητα του προϊόντος. Ως εκ τούτου, το EPS προήχθη ως ελαφρύς παράγοντας των γεωλογικών πλακών.

Η ενσωμάτωση διογκωμένου πολυστυρενίου στη γεωπολυμερική μήτρα ευνοεί την παραγωγή ελαφροβαρών δομικών υλικών μειώνοντας την πυκνότητα τους. Ωστόσο, η μείωση αυτή συνοδεύεται από μια πιο έντονη μείωση των τιμών της θλιπτικής αντοχής. Βρέθηκε ότι η προσθήκη 3% κ.β. του EPS μειώνει την πυκνότητα κατά 46%, ενώ η μείωση της αντοχής είναι πολύ μεγαλύτερη (85%). Παρά το χαμηλό ποσοστό διογκωμένης πολυστερίνης, το κλάσμα όγκου του EPS στο γεωπολυμερές είναι υψηλό (~ 75%) και η αραίωση της μήτρας του συνδετικού υλικού προκαλεί σοβαρή μείωση της αντοχής σε θλίψη. Το ελαφροβαρές γεωπολυμερές που περιέχει 3% κατά βάρος EPS παρουσιάζει αντοχή σε θλίψη 6.5 MPa και πυκνότητα 1.1 g/cm³. Τα χαμηλά επίπεδα ενσωμάτωσης (<1.5% κατά βάρος EPS) ενισχύουν την αντοχή σε κάμψη των δειγμάτων. Ιδιαίτερα, η εισαγωγή 0.5% κατά βάρος EPS οδήγησε σε 22% αύξηση της καμπτικής αντοχής. Τα δείγματα που παρασκευάστηκαν και είχαν υψηλότερο περιεχόμενο EPS (> 1,5% κατά βάρος) εμφάνισαν χαμηλότερη αντοχή από το γεωπολυμερές αναφοράς (0% κ.β. EPS). Η ανάλυση των αποτελεσμάτων αποκάλυψε ότι περιεκτικότητα πάνω από 2% κατά βάρος σε EPS οδηγούν σε προϊόντα με περιορισμένη θλιπτική αντοχή (C.S. <10 MPa) και επομένως δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη για την ανάπτυξη του ελαφροβαρούς γεωπολυμερούς. Γεωπολυμερή που περιέχουν 1.5% κ.β. και 2.0% κ.β. EPS εμφανίζουν τον βέλτιστο συνδυασμό ιδιοτήτων (πυκνότητα <1.5 g/cm³, θλιπτική αντοχή >10MPa και καμπτική αντοχή > 1,8 MPa). [18]

Οι Dulsang, Kasemsiri, Posi, Hiziroglu και Chindaprasirt μελέτησαν την παραγωγή ελαφροβαρούς σκυροδέματος με τη χρήση αιθυλοβινυλεστέρα (EVA). Τα απόβλητα EVA ανακτήθηκαν από τη βιομηχανία υποδημάτων, χρησιμοποιήθηκαν ως ελαφροβαρείς παράγοντες και προστέθηκαν σε ποσοστά σε 3.0, 5.0, 7.0 και 10.0% κατά βάρος ως προς το ελαφροβαρές σκυροδέμα. Σε όλα τα δείγματα χρησιμοποιήθηκε λόγος νερό : τσιμέντο=0.45 και λόγος απόβλητα EVA : άμμος=0.50. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι το βάρος των ελαφροβαρών σκυροδεμάτων που περιείχαν τα απόβλητα EVA μειώθηκε με την αύξηση της περιεκτικότητας σε απόβλητα EVA. Η θερμική αγωγιμότητα, η χημική αντοχή και η απορρόφηση νερού βελτιώθηκαν σημαντικά και ήταν συγκρίσιμες με εκείνες των ελαφροβαρών σκυροδεμάτων που περιέχουν άλλα πολυμερή. Με βάση τα αποτελέσματα, η χρήση των αποβλήτων EVA ως ελαφροβαρών αδρανών υλικών για την παραγωγή ελαφροβαρών σκυροδεμάτων παρουσιάζει καλές δυνατότητες. Κάτι τέτοιο, θα αποτελούσε μία καλή εναλλακτική λύση για την ανακύκλωση πλαστικών αποβλήτων. Σύμφωνα με το

πρότυπο ASTM, αυτό το ελαφροβαρές σκυρόδεμα είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί στην τοιχοποιία. [38]

Οι Lima, Leite και Santiago χρησιμοποίησαν δύο τύπους ανακυκλωμένων αδρανών. Τα μεν προέρχονταν από ΑΕΚΚ, τα δε από τη βιομηχανία υποδημάτων (EVA) για την παραγωγή ελαφροβαρούς σκυροδέματος. Στόχος της μελέτης τους ήταν να αξιολογήσουν την επίδραση της χρήσης αυτών των ανακυκλωμένων αδρανών ως αντικαταστάσεων του φυσικού χονδρόκοκκου αδρανούς υλικού, σε ό,τι αφορά την πυκνότητα, την αντοχή σε θλίψη, την τάση εφελκυσμού και καμπτική συμπεριφορά του τελικού προϊόντος. Η μελέτη αυτή απέδειξε ότι είναι δυνατή η χρήση των αποβλήτων EVA και ΑΕΚΚ για την παραγωγή ελαφρού σκυροδέματος με ημι-δομικές ιδιότητες. [39]

3. Τοποθέτηση Θέματος

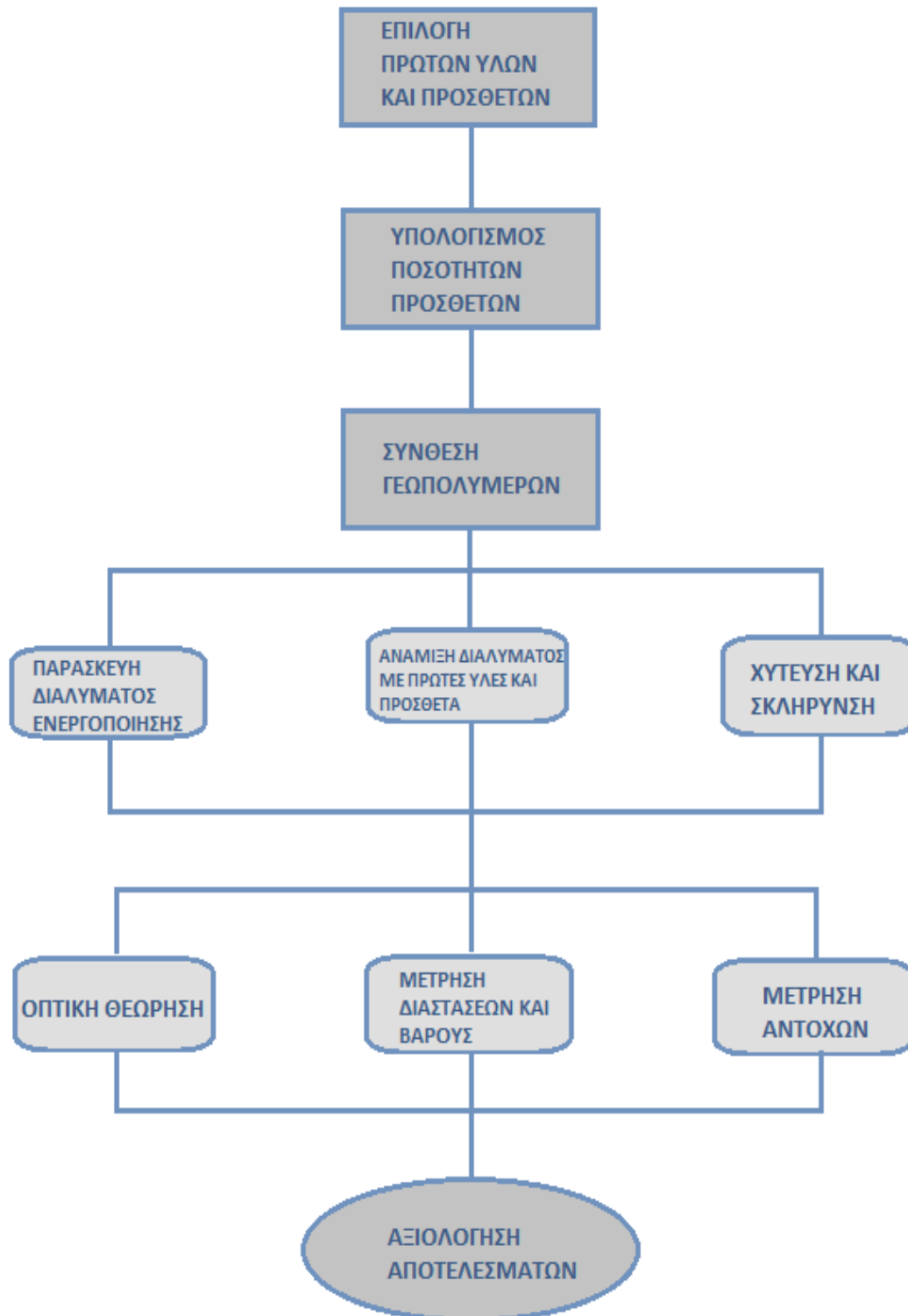
Υπό το πρίσμα των περιβαλλοντικών προτύπων που αποσκοπούν στον περιορισμό των αποβλήτων και των ρύπων που είναι επιβλαβείς για το περιβάλλον, η δημιουργία νέων τεχνικών ανακύκλωσης καθώς και η αξιοποίηση των αποβλήτων για την παραγωγή νέων πολύτιμων προϊόντων, αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία για τον βιομηχανικό και περιβαλλοντικό τομέα. [7] Τα προγράμματα αστικής ανανέωσης, οι φυσικές καταστροφές όπως οι σεισμοί και η κατεδάφιση παλαιότερων κτηρίων οδηγούν σε περιβαλλοντικά προβλήματα, ιδιαίτερα στις μεγάλες αστικές περιοχές, λόγω του μεγάλου όγκου παραγόμενων αποβλήτων. Επιπλέον, η έλλειψη σε πρώτες ύλες, που προκύπτει από αυξημένη συνολική χρήση, έχει κινητοποιήσει τους ενδιαφερόμενους φορείς στην κατασκευαστική βιομηχανία σχετικά με τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών.[27] Η ανακύκλωση και η χρήση των ΑΕΚΚ θα έχει σημαντική συμβολή στο περιβάλλον και στη βιώσιμη ανάπτυξη μέσω της υιοθέτησης της αρχής "μηδενικών αποβλήτων". [8]

Επιπλέον, τα γεωπολυμερή είναι εναλλακτικά υλικά του τσιμέντου, τα οποία έχουν τη δυνατότητα μείωσης των εκπομπών CO₂ και της καταναλισκόμενης ενέργειας για την παραγωγή δομικών υλικών. [29] Στο πλαίσιο αυτό, η βιομηχανία επιδιώκει συνεχώς την παραγωγή προϊόντων με απόδοση τουλάχιστον συγκρίσιμη με αυτή του συμβατικού τσιμέντου και με το ελάχιστο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. [15]

Ταυτόχρονα, τα προκατασκευασμένα στοιχεία χρησιμοποιούνται πλέον στον κατασκευαστικό τομέα όχι μόνο για τη μείωση του κόστους αλλά και για τη διευκόλυνση της εγκατάστασης/αποσυναρμολόγησης και επαναχρησιμοποίησης των στοιχείων. Απαιτείται, επομένως, η ανάπτυξη προκατασκευασμένων στοιχείων που θα περιέχουν υψηλό ποσοστό ανακυκλωμένων υλικών, που θα συμβάλλουν στην ενεργειακή αποδοτικότητα των κτηρίων και που θα έχουν χαμηλή πυκνότητα. [23]

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εξετάζεται η δυνατότητα ενίσχυσης δειγμάτων γεωπολυμερών με βάση τα απόβλητα τούβλων (αργιλοπυριτική πρώτη ύλη), με πρόσθετα, προκειμένου να βελτιωθούν οι μηχανικές ιδιότητες των δειγμάτων. Τα τούβλα επιλέχθηκαν καθώς πρόκειται για αργιλοπυριτικά υλικά τα οποία έχουν υποστεί έψηση σε υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που αναμένεται να αυξάνει την δραστηριότητά τους κατά το γεωπολυμερισμό. Η σύσταση των δειγμάτων αναφοράς προέκυψε μετά από αριστοποίηση της σύνθεσης γεωπολυμερών από ΑΕΚΚ με την χρήση του πολυπαραγοντικού σχεδιασμού πειραμάτων (Μέθοδος Taguchi), που αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο για την εξέταση της απόκρισης πειραματικών συστημάτων. Η σύσταση αυτή προσδιορίστηκε σε προηγούμενη διπλωματική εργασία που εκπονήθηκε στο εργαστήριο.[40] Η αριστοποιημένη σύνθεση χρησιμοποιήθηκε ως σύνθεση αναφοράς και σε αυτήν προστέθηκαν διογκωμένη πολυστερίνη (EPS), ίνες πολυαιθυλενίου (PE) και ανακυκλωμένα αδρανή με ενθυλακωμένα υλικά αλλαγής φάσης (AGG). Η προσθήκη EPS έγινε για τη μείωση της πυκνότητας του υλικού, καθώς αυτό προορίζεται για την παραγωγή προκατασκευασμένων εξαρτημάτων και επομένως είναι αναγκαίο, τα προκατασκευασμένα εξαρτήματα να είναι εύκολο να μετακινηθούν. Η προσθήκη ινών PE έγινε για τη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς καθώς και των ρεολογικών ιδιοτήτων του υλικού. [18] Τέλος, η προσθήκη των AGG έγινε καθώς αυτά δίνουν τη δυνατότητα στο υλικό να αποθηκεύει ενέργεια, υπό τη μορφή θερμότητας, και να την αποδίδει εκ νέου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τα ενεργά συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας θεωρούνται μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων και έχει δοθεί αυξημένη προσοχή τις τελευταίες δεκαετίες στη βελτιστοποίηση των απαραίτητων τεχνικών

για εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία της διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα Ροής της πειραματικής διαδικασίας

4. Πειραματικό μέρος

4.1 Επιλογή και χαρακτηρισμός πρώτων υλών

Τα κεραμίδια, τα τούβλα, τα κεραμικά απόβλητα, τα προϊόντα σκυροδέματος και η πέτρα τοιχοποιίας αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των ΑΕΚΚ. Αυτά τα υλικά είναι αδρανή, γεγονός που αποτελεί ενδιαφέρον χαρακτηριστικό που πρέπει να αναφερθεί καθώς δεν είναι επιβλαβή για τους ανθρώπους, τα ζώα ή το περιβάλλον. Στην πραγματικότητα έχουν, ως κύρια συστατικά τους, τα πιο κοινά μέταλλα του γήινου φλοιού, τα αργιλοपुरιτικά. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτών των υλικών είναι ότι εμφανίζονται συνήθως σε διαφορετικές χρονικές στιγμές στη διαδικασία κατασκευής, έτσι ώστε να μπορούν εύκολα να διαχωριστούν και να συλλεχθούν. [22]

Τα απόβλητα τούβλων επαναχρησιμοποιούνται σε ένα μικρό βαθμό για την παραγωγή του τούβλου, αλλά τεράστιες ποσότητες “πετιούνται”, προκαλώντας σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα.[8]

Τα κοινά ΑΕΚΚ αποτελούνται από δύο μεγάλα κλάσματα: προϊόντα σκυροδέματος και κεραμικά προϊόντα. Το κύριο συστατικό του πρώτου είναι SiO₂ και CaO μαζί με μικρές συγκεντρώσεις Al₂O₃ και Fe₂O₃, κυρίως κρυσταλλικές. Το κύριο συστατικό του τελευταίου είναι SiO₂ και Al₂O₃ και περιλαμβάνει κρυσταλλικά και υαλώδη συστατικά. [5,22]

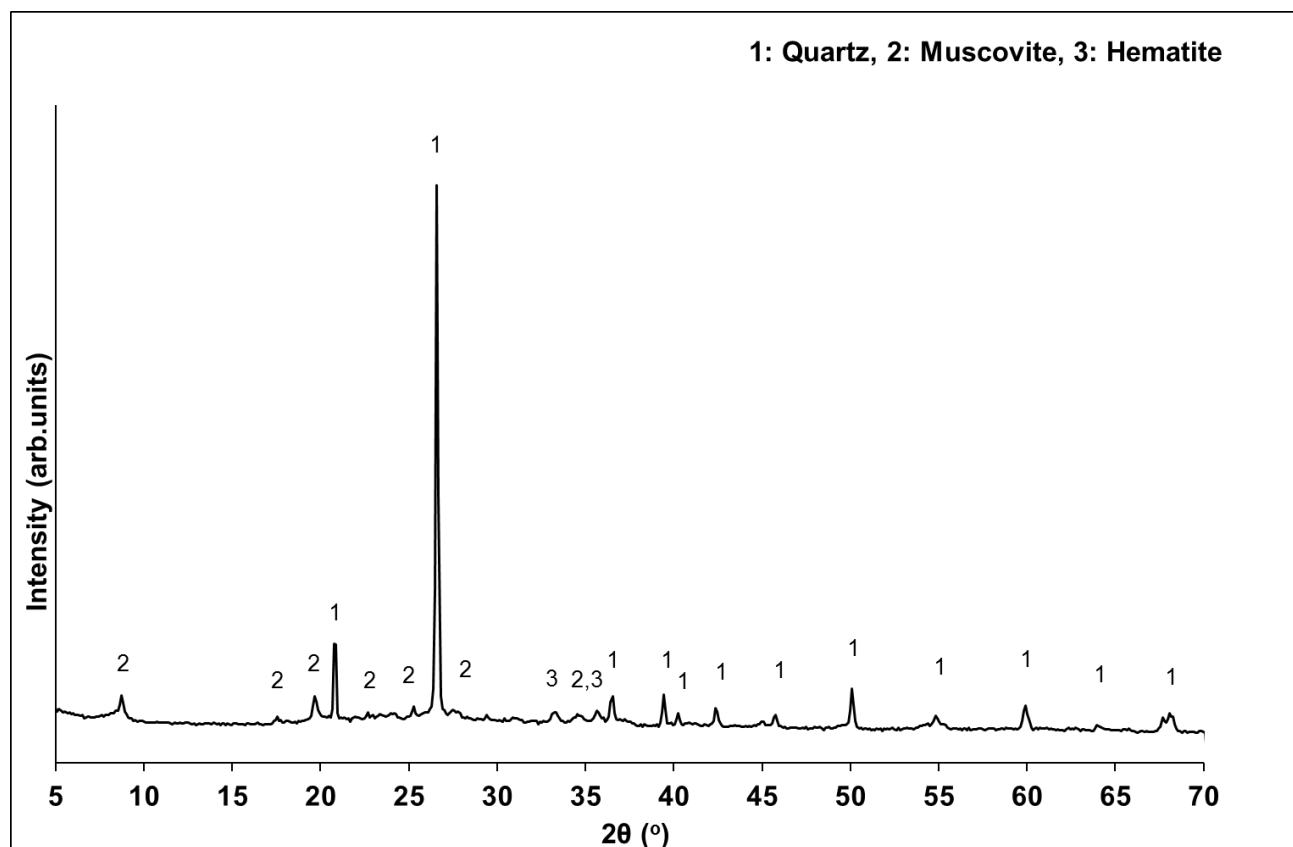
Στην περίπτωση των τούβλων τοιχοποιίας τα Al, Si είναι ψημένα και επομένως είναι πιο δραστικά και άρα καταλληλότερα για την αλκαλική ενεργοποίηση. [2,17] Θερμιδομετρικές αναλύσεις έχουν δείξει ότι η σκόνη τούβλου είναι πιο δραστική από το απόβλητο τσιμέντου. [8] Επιπλέον, μελέτες έχουν αποδείξει ότι τα απόβλητα κεραμικών μπορούν να γεωπολυμεριστούν επιτυχώς, εμφανίζοντας μάλιστα υψηλές θλιπτικές αντοχές και καλές ιδιότητες σε ό,τι αφορά τις υψηλές θερμοκρασίες. Ιδιαίτερα προτιμώνται τα απόβλητα κεραμικών που έχουν υψηλό περιεχόμενο σε Si και Al (>80%) και που είναι εύκολο να αλεστούν. [11]

Η χημική ανάλυση του αποβλήτου τούβλου, το οποίο χρησιμοποιήσαμε για τη σύνθεση του γεωπολυμερούς προέκυψε από ανάλυση XRF [41], τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Βλέπουμε ότι τα ποσοστά σε Al₂O₃ και SiO₂ είναι 18.85% και 61.02% αντίστοιχα, συνεπώς είναι τα κύρια συστατικά, ενώ άλλες χημικές ενώσεις ενυπάρχουν σε πολύ μικρότερα ποσοστά.

Πίνακας 4.1: Χημική Ανάλυση αποβλήτου τούβλου

Οξείδιο	% περιεκτικότητα
SiO ₂	61.02
Al ₂ O ₃	18.85
Na ₂ O	1.30
MgO	3.00
K ₂ O	3.50
CaO	1.80
Άλλα	7.13
Απώλεια πύρωσης (LOI)	3.40

Η ορυκτολογική ανάλυση του αποβλήτου τούβλου που χρησιμοποιήθηκε, προέκυψε από ανάλυση XRD [41], όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η πρώτη ύλη αποτελείται κυρίως από quartz, μοσχοβίτη και αιματίτη.

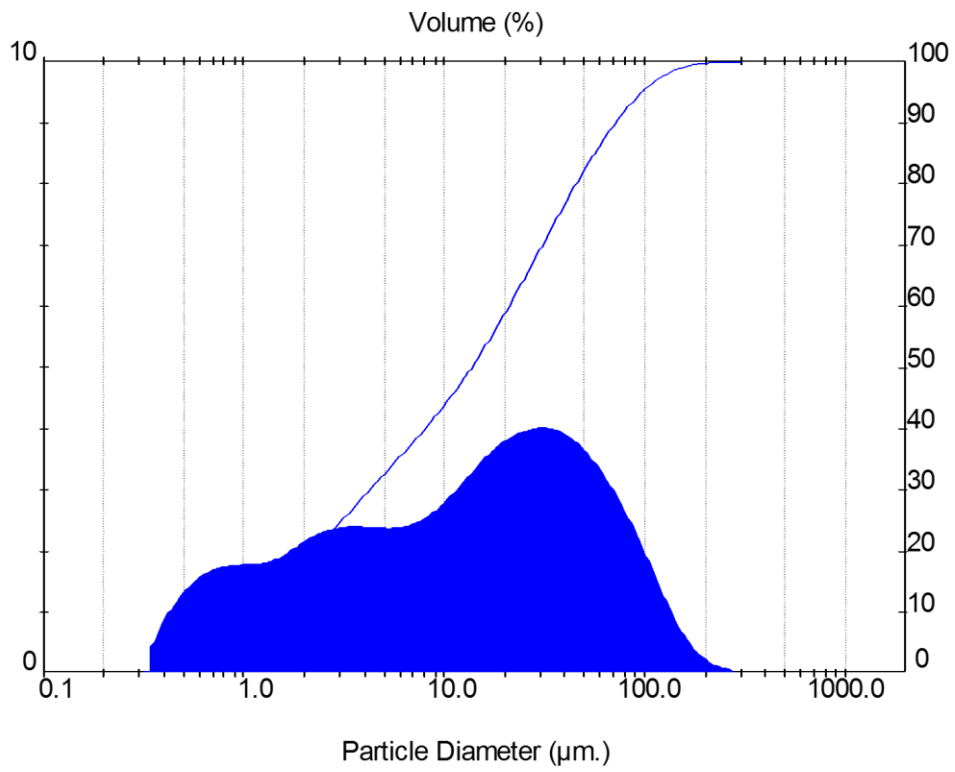


Σχήμα 4.1: Ορυκτολογική ανάλυση αποβλήτου τούβλου

Τέλος, η κοκκομετρική ανάλυση της πρώτης ύλης του αποβλήτου τούβλου, φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα για τα d90, d50, ενώ παράλληλα παρατίθεται το διάγραμμα κοκκομετρικής κατανομής του δείγματος. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.2, το 90% των σωματιδίων του δείγματος έχει μέγεθος κάτω των 71.4μm και το 50% του δείγματος έχει μέγεθος κάτω των 13.7μm. Προκειμένου να επιτευχθεί συγκεκριμένη κοκκομετρία (το d50 να είναι κοντά στο 20μm), τα απόβλητα τούβλου αφού συλλέχθηκαν, υπέστησαν κατάλληλη επεξεργασία μέσω θραύσης και άλεσης ώστε να επιτευχθεί

Πίνακας 4.2: Κοκκομετρία τούβλου – d90, d50

Κοκκομετρία	CDW (τούβλο)
D90 (μm)	71.4
D50 (μm)	13.7



Σχήμα 4.2: Κοκκομετρική κατανομή τούβλου

4.2. Διάλυμα ενεργοποίησης

Για το διάλυμα ενεργοποίησης χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

1. ΚΟΗ μοριακού βάρους 56,11, > 85% (CAS: 1310-58-3)
2. NaOH puriss p.a., ≥98.0% (CAS: 1310-73-2)
3. Διάλυμα SiO₂ σε κολλοειδή διασπορά, 50% σε H₂O, 0.02 micron particles, 180m²/g (σημειώνεται ότι σε βιομηχανικές εφαρμογές αντί του διαλύματος SiO₂ σε κολλοειδή διασπορά χρησιμοποιείται υδρίαλος)

4.3. Πρόσθετα

Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιήσαμε τα ακόλουθα πρόσθετα, προκειμένου να βελτιωθούν οι ιδιότητες των τελικών προϊόντων προς την επιθυμητή κατεύθυνση.

1. Ίνες PE

Η ενσωμάτωση των ινών ελέγχθηκε, ώστε να βελτιωθεί η μηχανική συμπεριφορά και οι ρεολογικές ιδιότητες της γεωπολυμερικής πάστας. Οι ίνες PE έχουν μέση διάμετρο 212.8μm, μέγιστη διάμετρο 331μm, ελάχιστη διάμετρο 114μm και μήκος 6 έως 12 mm. Προήλθαν από ανακύκλωση πλαστικών αποβλήτων, μέσω εξώθησης από απόβλητα πολυαιθυλενίου (PE).

Αυτές οι ίνες καλύπτουν τις απαιτήσεις της τεχνολογίας γεωπολυμερών, καθώς είναι υδροφοβικές και εμφανίζουν αντίσταση στα αλκάλια. Στον Πίνακα 4.3 αναγράφονται μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά των ινών, ενώ στην εικόνα 4.2 φαίνονται οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά ινών PE

Χαρακτηριστικά	Τιμές
Μήκος (mm)	6-12
Μέση διάμετρος (μm)	213
Πυκνότητα (g/cm ³)	0.97
Δύναμη Εφέλκυσμού (MPa)	258.60



Εικόνα 4.1: Ίνες PE

2. Διογκωμένη πολυστερίνη EPS

Για τη μείωση της πυκνότητας του γεωπολυμερούς, χρησιμοποιήθηκε διογκωμένη πολυστερίνη EPS. Πρόκειται για απόβλητο με αυστηρούς όρους διάθεσης στο περιβάλλον. Το EPS που χρησιμοποιήθηκε, προήλθε από την ανακύκλωση θερμομονωτικών πάνελ, τα οποία αποσπάστηκαν από κτήρια που προορίζονταν για κατεδάφιση και τεμαχίστηκαν, έως ότου το μέγεθος των σωματιδίων να είναι μέσα στο εύρος 1 – 4mm. Στην εικόνα φαίνονται τα σωματίδια EPS που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 4.2: Σωματίδια EPS

3. Ανακυκλωμένα αδρανή με ενθυλακωμένα υλικά αλλαγής φάσης (PCM's)

Απόβλητο σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε ως πρώτη ύλη για την ανάπτυξη ανακυκλωμένων αδρανών που περιέχουν υλικά αλλαγής φάσης (PCMs). Αυτά τα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενεργειακή βελτίωση συμβατικών και καινοτόμων οικοδομικών υλικών. Η παρασκευή των ανακυκλωμένων αδρανών περιλαμβάνει αρχικά την κατάλληλη επεξεργασία του σκυροδέματος ώστε να διαχωριστούν τα χονδρόκοκα αδρανή από το κονίαμα και στη συνέχεια την ενθυλάκωση υλικών αλλαγής φάσης με βάση την παραφίνη εντός των αδρανών. Μερικές από τις ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά ανακυκλωμένων αδρανών με ενθυλακωμένα PCM's

Πυκνότητα (g/cm ³)	0.8
Απορρόφηση νερού (%w/w)	0.05
Απώλεια μάζας (%w/w)	1.8
Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	0.141
Δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας πριν το thermal cycling test (J/g)	23.7
Δυνατότητα αποθήκευσης θερμότητας μετά το thermal cycling test (J/g)	21.2

4.4 Σύνθεση γεωπολυμερών

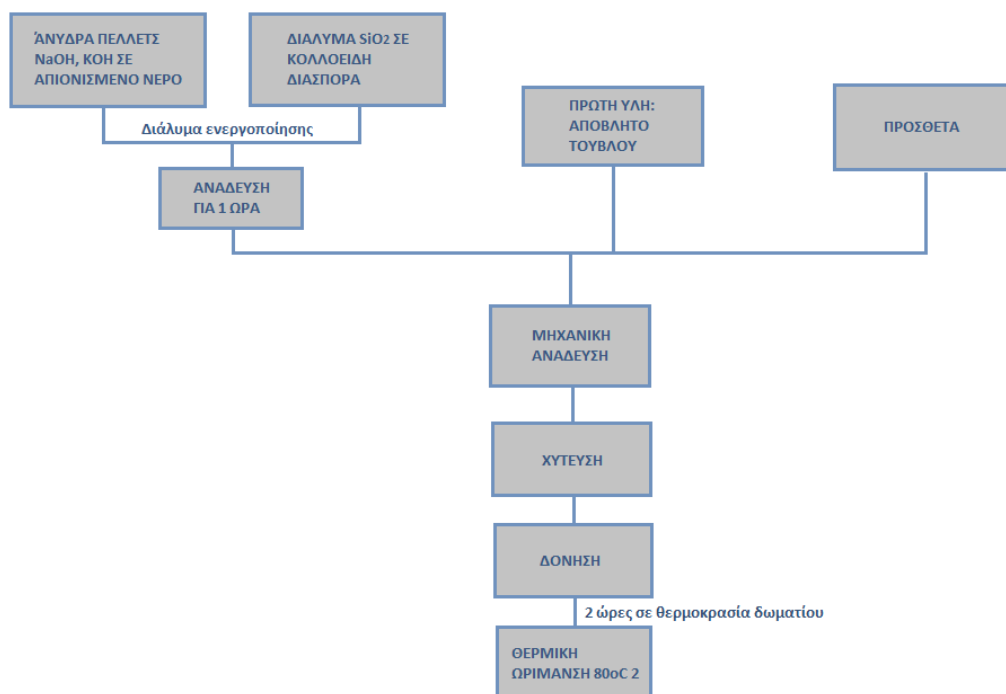
Η επιλογή των συνθηκών και των αντιδραστηρίων για τη σύνθεση του γεωπολυμερούς έγινε με βάση τη διπλωματική εργασία της Isufaj Lorena στην οποία αριστοποιήθηκε η σύνθεση αναφοράς με την πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία [40].

Το πρώτο βήμα για τη σύνθεση του γεωπολυμερούς είναι η προετοιμασία του διαλύματος ενεργοποίησης. Ζυγίζονται άνυδρα πέλλετες NaOH και KOH [29], απιονισμένο νερό και διάλυμα SiO₂ σε κολλοειδή διασπορά. Στη συνέχεια τα πέλλετες και το απιονισμένο νερό αναμιγνύονται και τελικά προστίθεται σταδιακά το πυρίτιο Si στη μορφή του διαλύματος SiO₂ σε κολλοειδή διασπορά, με ταυτόχρονη ανάδευση. Οι λόγοι των συστατικών στο διάλυμα έχουν επιλεγεί ως εξής: Si/Al=3.0, Na/R= 0.35 και R/Al=0.75, στερεά:υγρό=5.2.

Όπου, ο μοριακός λόγος Si/Al, βασίζεται στο συνολικό Si και Al που περιέχεται τόσο στην αργιλοπυριτική πρώτη ύλη όσο και στο διάλυμα ενεργοποίησης (διαλυτό πυρίτιο) και δεν σχετίζεται με το Si και το Al της γεωπολυμερικής φάσης, ο μοριακός λόγος R/Al, συσχετίζει την συνολική ποσότητα αλκαλίων (R=Na+K) στο διάλυμα ενεργοποίησης με την ποσότητα Al που περιέχεται στην πρώτη ύλη και μοριακός λόγος Na/R, αντικατοπτρίζει το είδος του αλκαλίου που περιέχεται στο διάλυμα ενεργοποίησης. [40]

Τα διαλύματα ενεργοποίησης ανακατεύονται για 1 ώρα πριν τη χρήση τους, ώστε να επιτευχθεί η ισορροπία. Στη συνέχεια αφήνονται μέσα σε δεξαμενή νερού βρύσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος έως ότου η θερμοκρασία τους πέσει στη θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια, ζυγίζονται η πρώτη ύλη (αλεσμένο απόβλητο τούβλου) και τα πρόσθετα (EPS, PE, αδρανή με ενθυλακωμένα PCM's) και έπειτα αναμιγνύονται με το διάλυμα ενεργοποίησης. Ακολουθεί μηχανική ανάδευση σε εργαστηριακό αναμικτή, ώστε να δημιουργηθεί μία ομογενής πάστα, η οποία μεταφέρεται σε λαδωμένες ορθογώνιες μήτρες διαστάσεων 4cm x 4cm x 16cm. Οι μήτρες γεμίζονται αρχικά με πάστα μέχρι τη μέση και δονούνται για 1 λεπτό, στη συνέχεια γεμίζονται μέχρι και την επιφάνειά τους και δονούνται και πάλι για 1 λεπτό. Σκοπός της δόνησης είναι να ελαττωθεί η παρουσία των κενών αέρα μέσα στην δραστική μάζα και άρα να βελτιωθούν οι ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Τα δείγματα αφήνονται σε θερμοκρασία δωματίου για 2 ώρες, προκειμένου να ξεκινήσουν έγκαιρα οι αντιδράσεις που ευνοούν τη δημιουργία των δομικών δεσμών και τη στερεοποίηση της πάστας και στη συνέχεια αφήνονται σε θερμοκρασία 80oC για 72 ώρες. Αφού ξεκαλουπωθούν, μετράμε το βάρος και τις διαστάσεις τους.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΛΑΦΡΟΒΑΡΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΑΛΚΑΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΩΝ. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα Ροής σύνθεσης γεωπολυμερών από απόβλητα τούβλου

Παρακάτω παρατίθενται πίνακες με τις ποσότητες που ζυγίστηκαν για την παρασκευή των διαλυμάτων ενεργοποίησης, αλλά και οι ποσότητες της πρώτης ύλης και των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση των γεωπολυμερών:

Πίνακας 4.5: Ποσότητες συστατικών για την παρασκευή του δείγματος αναφοράς και την ενίσχυση με EPS

Γεωπολυμερές	Απόβλητο τούβλου (g)	NaOH (g)	KOH (g)	SiO ₂ σε κολλοειδή διασπορά	Μάζα στερεών (g)	Νερό (g)	EPS (g)	PE (g)	Ανακυκλωμένα αδρανή (g)
Δείγμα αναφοράς	1250.00	48.53	126.44	140.82	1495.38	217.16	0	0	0
0.5% EPS	1070.00	41.54	108.23	120.54	1280.04	185.89	5.35	0	0
1.0% EPS	935.00	36.30	84.58	105.33	1108.55	162.44	9.35	0	0
1.5% EPS	830.00	32.23	83.96	93.50	1039.69	144.20	12.45	0	0
2.0% EPS	750.00	28.12	75.86	84.49	896.23	130.30	15.00	0	0
2.5% EPS	680.00	26.40	68.78	76.61	813.49	118.14	17.00	0	0
3.0% EPS	620.00	24.07	62.71	69.85	741.05	107.71	18.60	0	0

Πίνακας 4.6: Ποσότητες συστατικών για την παρασκευή του δείγματος αναφοράς και την ενίσχυση με PE

Γεωπολυμερές	Απόβλητο τούβλου (g)	NaOH (g)	KOH (g)	SiO ₂ σε κολλοειδή διασπορά	Μάζα στερεών (g)	Νερό (g)	EPS (g)	PE (g)	Ανακυκλωμένα αδρανή (g)
Δείγμα αναφοράς	600.00	23.30	60.69	67.59	717.79	101.97	0	0	0
0.5% PE	1250.00	48.53	126.44	140.82	1495.38	217.16	0	3.53	0
1.0% PE	1250.00	48.53	126.44	140.82	1495.38	217.16	0	7.07	0
1.5% PE	1250.00	48.53	126.44	140.82	1495.38	217.16	0	10.60	0
2.0% PE	1250.00	48.53	126.44	140.82	1495.38	217.16	0	14.13	0

Πίνακας 4.7: Ποσότητες συστατικών για την παρασκευή του δείγματος αναφοράς και την ενίσχυση με 1.5% κ.β. EPS και PE

Γεωπολυμερές	Απόβλητο τούβλου (g)	NaOH (g)	KOH (g)	SiO ₂ σε κολλοειδή διασπορά	Μάζα στερεών (g)	Νερό (g)	EPS (g)	PE (g)	Ανακυκλωμένα αδρανή (g)
1.5% EPS 0% PE	830.00	32.23	83.96	93.50	992.94	144.20	12.45	0	0
1.5% EPS 0.5% PE	830.00	32.23	83.96	93.50	992.94	144.20	12.45	3.53	0
1.5% EPS 1.0% PE	830.00	32.23	83.96	93.50	992.94	144.20	12.45	7.07	0
1.5% EPS 1.5% PE	830.00	32.23	83.96	93.50	992.94	144.20	12.45	10.60	0
1.5% EPS 2.0% PE	830.00	32.23	83.96	93.50	992.94	144.20	12.45	14.13	0

Πίνακας 4.8: Ποσότητες συστατικών για την παρασκευή του δείγματος αναφοράς και την ενίσχυση με 2.0% κ.β. EPS και PE

Γεωπολυμερές	Απόβλητο τούβλου (g)	NaOH (g)	KOH (g)	SiO ₂ σε κολλοειδή διασπορά	Μάζα στερεών (g)	Νερό (g)	EPS (g)	PE (g)	Ανακυκλωμένα αδρανή (g)
2.0% EPS 0% PE	830.00	32.23	83.96	93.50	992.94	144.20	16.60	0	0
2.0% EPS 0.5% PE	830.00	32.23	83.96	93.50	992.94	144.20	16.60	3.53	0
2.0% EPS 1.0% PE	830.00	32.23	83.96	93.50	992.94	144.20	16.60	7.07	0
2.0% EPS 1.5% PE	830.00	32.23	83.96	93.50	992.94	144.20	16.60	10.60	0
2.0% EPS 2.0% PE	830.00	32.23	83.96	93.50	992.94	144.20	16.60	14.13	0

Πίνακας 4.9: Ποσότητες συστατικών για την παρασκευή του δείγματος αναφοράς και την ενίσχυση με 1.5% κ.β. EPS, 2.0% κ.ο. PE και ανακυκλωμένα αδρανή

Γεωπολυμερές	Απόβλητο τούβλου (g)	NaOH (g)	KOH (g)	SiO ₂ σε κολλοειδή διασπορά	Μάζα στερεών (g)	Νερό (g)	EPS (g)	PE (g)	Ανακυκλωμένα αδρανή (g)
1.5% EPS 2.0% PE 4.0% AGG	820.00	31.84	82.95	92.38	980.98	142.46	12.30	14.13	32.80
1.5% EPS 2.0% PE 6.0% AGG	1640.00	63.67	165.89	184.75	1961.94	300.01	24.60	28.26	98.40
1.5% EPS 2.0% PE 8.0% AGG	820.00	31.84	82.95	92.38	980.98	142.46	12.30	14.13	65.60
1.5% EPS 2.0% PE 12.0% AGG	820.00	31.84	82.95	92.38	980.98	142.46	12.30	14.13	98.40
1.5% EPS 2.0% PE 18.0% AGG	820.00	31.84	82.95	92.38	980.98	142.46	12.30	14.13	147.60

4.5. Τεχνικές Χαρακτηρισμού

4.5.1. Περίθλαση Ακτινών Χ



Για τον χαρακτηρισμό των υλικών χρησιμοποιήθηκε ένα περιθλασίμετρο ακτινών Χ Bruker D8 ADVANCE. Είναι ένα όργανο XRD, που μετρά δείγματα σε σκόνη, το οποίο χρησιμοποιεί έναν σωλήνα ακτινών Χ με μια άνοδο Cu ως κύρια πηγή δέσμης ακτινών Χ. Εκπέμπει 8 kV με αντίστοιχο μήκος κύματος 1,54 Å και λειτουργεί σε 40 kV και 40 mA. Ο ανιχνευτής κινείται τόσο γρήγορα όσο η πηγή (θ / θ που έχει ρυθμιστεί), ενώ το δείγμα παραμένει ακίνητο. Τα δεδομένα που συλλέγονται αξιολογούνται με λογισμικό Diffrac.Eva v3.1.

Εικόνα 4.3: Περίθλασίμετρο ακτινών Χ

4.5.2. Κοκκομετρική κατανομή με περίθλαση ακτινών laser



Η κατανομή μεγέθους σωματιδίων των δειγμάτων προσδιορίστηκε με το Malvern Mastersizer Micro, το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνολογία περίθλασης λέιζερ. Αυτό επιτυγχάνεται μετρώντας την ένταση του φωτός που διασκορπίζεται καθώς η δέσμη λέιζερ διέρχεται από ένα διασκορπισμένο σωματιδιακό δείγμα. Αυτά τα δεδομένα στη συνέχεια αναλύονται για τον υπολογισμό του μεγέθους των σωματιδίων που δημιούργησαν το σχέδιο σκέδασης. Όλα τα δείγματα διασκορπίστηκαν σε νερό υπό υπερήχους.

Εικόνα 4.4: Συσκευή τεχνολογίας περίθλασης ακτινών laser

4.5.3. Δοκιμές μονοαξονικής θλίψης/κάμψης



Για τη μέτρηση των θλιπτικών και καμπτικών αντοχών των δοκιμίων που κατασκευάσαμε χρησιμοποιήθηκε η πρέσα TONI TECHNIK 3000, που εικονίζεται δίπλα. Για τις δοκιμές αυτές ακολουθήθηκε το ευρωπαϊκό πρότυπο ENG196-1. Με την πρέσα αυτή έγινε και η μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson των δειγμάτων.

Εικόνα 4.5: Πρέσα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης/κάμψης

Από το νόμο του Hooke έχουμε ότι: $\sigma = E \cdot \epsilon$, όπου σ : τάση, ϵ : τροπή και E : μέτρο ελαστικότητας. Αντιλαμβανόμαστε από την παραπάνω σχέση ότι, όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας τόσο λιγότερο παραμορφώνεται το υλικό όταν ασκείται σε αυτό τάση, δηλαδή είναι περισσότερο ψαθυρό.

Για το λόγο Poisson έχουμε ότι: $\nu = -$ (εγκάρσια τροπή/αξονική τροπή), ορίζεται σε σχέση με την δοκιμή εφελκυσμού μιας ράβδου, και περιγράφει την μείωση, που υφίσταται η διατομή της, όταν η ένταση στην ράβδο είναι γραμμικά ελαστική. [42,43]

5. Συζήτηση Αποτελεσμάτων

5.1. Ιδιότητες γεωπολυμερούς αναφοράς

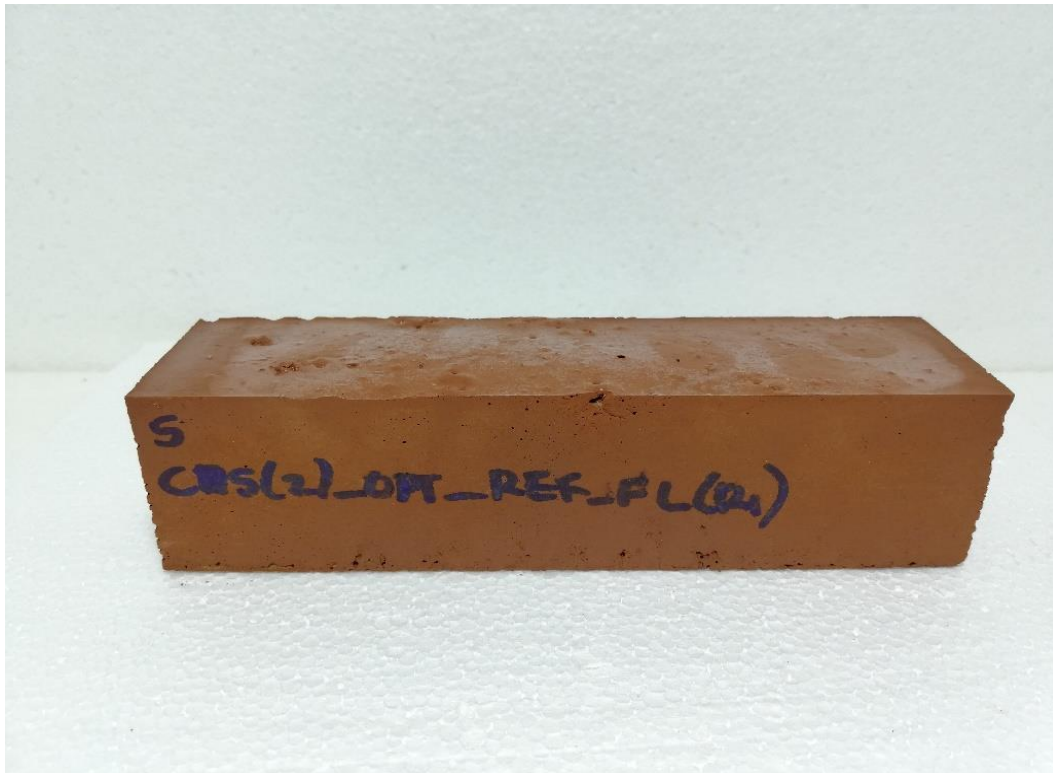
Από τις μετρήσεις πυκνότητας, θλιπτικής και καμπτικής αντοχής των δειγμάτων αναφοράς προέκυψαν τα παρακάτω στοιχεία:

Πίνακας 5.1: Ιδιότητες γεωπολυμερούς αναφοράς

Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Καμπτική Αντοχή (MPa)	Φαινόμενη Πυκνότητα (g/cm ³)
43.9	4.0	2.0

Παρατηρούμε ότι, σε ό,τι αφορά τις αντοχές, τα δείγματα αναφοράς προσομοιάζουν με το συμβατικό τσιμέντο (θλιπτική αντοχή συμβατικού τσιμέντου 25-52.5MPa [44]) και συνεπώς μπορούμε να προσθέσουμε ελαφροβαρείς παράγοντες για να μειώσουμε την πυκνότητά τους, διατηρώντας τις αντοχές σε ικανοποιητικό επίπεδο. Η υψηλές θλιπτικές αντοχές του δείγματος αναφοράς οφείλονται και στο γεγονός ότι στο διάλυμα ενεργοποίησης υπήρχε μεγαλύτερη ποσότητα ΚΟΗ αντί για ΝΑΟΗ. Αυτό συμβαίνει λόγω του υψηλού μεγέθους του κατιόντος Κ⁺. [1,2]

Παρακάτω βλέπουμε εικόνα του δείγματος αναφοράς. Παρατηρούμε ότι είναι συμπαγές και δεν έχει ρωγμές.



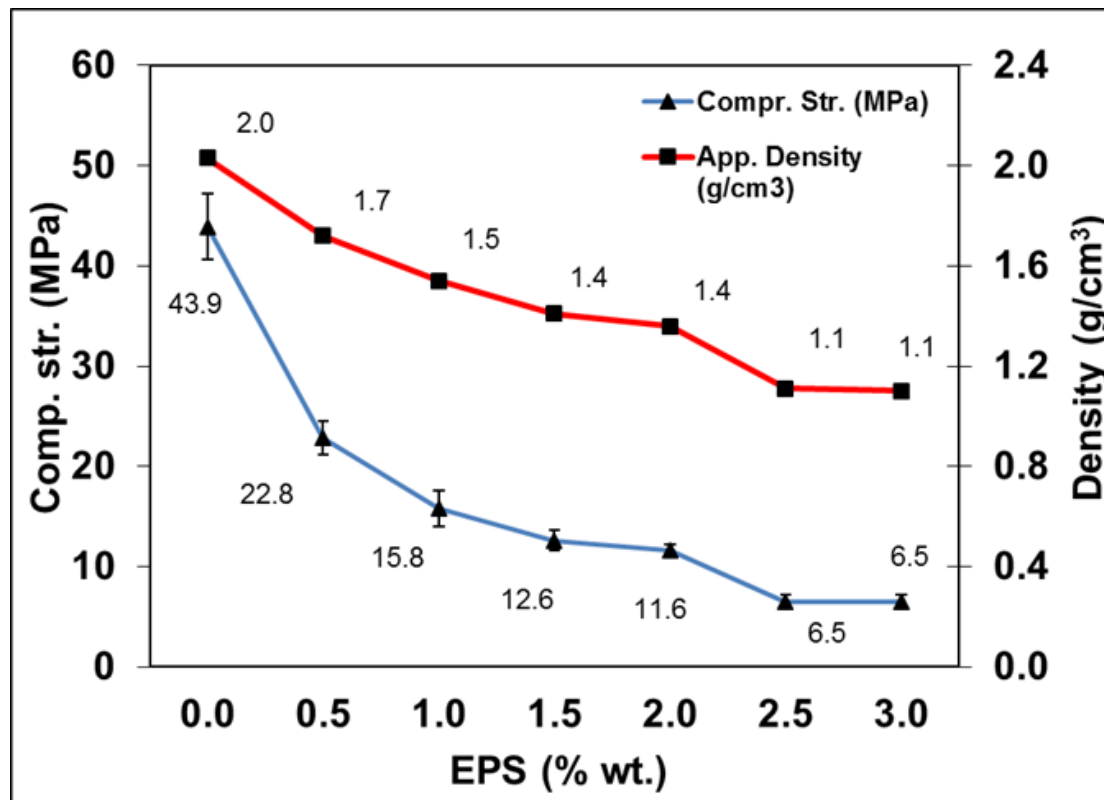
Εικόνα 5.1: Δείγμα αναφοράς

5.2. Μείωση της πυκνότητας με τη χρήση αποβλήτου διογκωμένης πολυστερίνης (EPS)

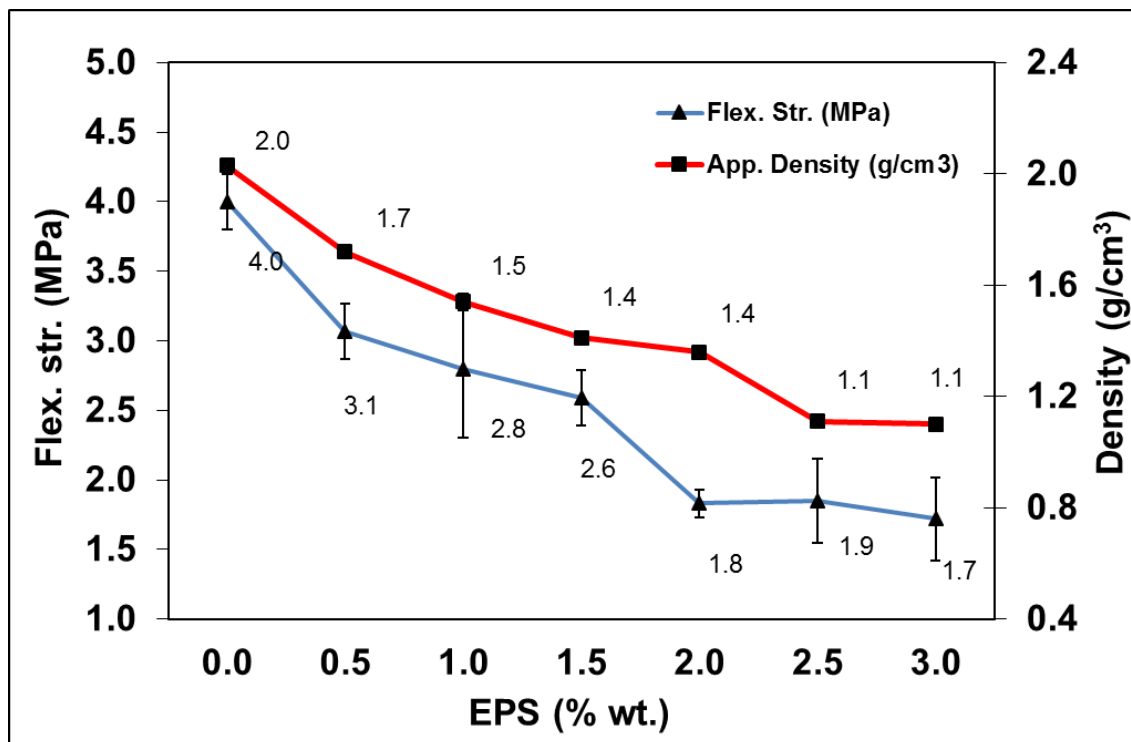
Στα δείγματα αναφοράς προστέθηκε EPS σε ποσοστά από 0.5 έως 3.0% κ.β.. Τα ποσοστά επιλέχθηκαν ώστε να μειωθεί η πυκνότητα, αλλά να μπορεί ταυτόχρονα να δημιουργηθεί ένα ενιαίο υλικό με βάση την ποσότητα της μήτρας. Από τις μετρήσεις προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα αντοχών όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα και στα παρακάτω διαγράμματα:

Πίνακας 5.2: Ιδιότητες γεωπολυμερούς ενισχυμένου με EPS

% κ.β. EPS	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Καμπτική Αντοχή (MPa)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)
0.0	43.9	4.0	2.0
0.5	22.8	3.1	1.7
1.0	15.8	2.8	1.5
1.5	12.6	2.6	1.4
2.0	11.6	1.8	1.4
2.5	6.5	1.9	1.1
3.0	6.5	1.7	1.1



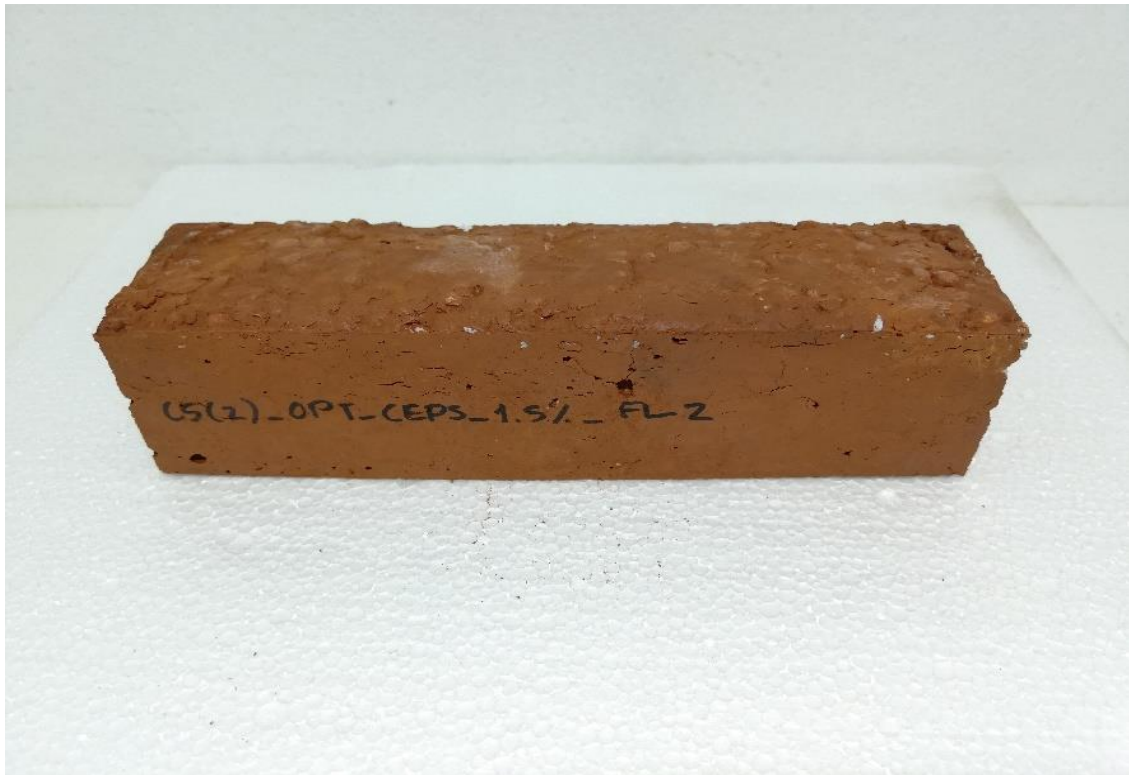
Σχήμα 5.1: Θλιπτικές αντοχές συναρτήσει της περιεκτικότητας σε EPS



Σχήμα 5.2: Καμπτικές αντοχές συναρτήσει της περιεκτικότητας σε EPS

Από το διάγραμμα των θλιπτικών αντοχών γίνεται φανερό ότι, με μικρή προσθήκη EPS, της τάξεως του 0.5% κ.β. έχουμε μείωση της πυκνότητας, αλλά και ραγδαία μείωση των θλιπτικών αντοχών, περίπου κατά 50%. Παρόλο που η ποσότητα η οποία προστέθηκε είναι μικρή, αν αναλογισθεί κανείς τη διαφορά πυκνότητα μεταξύ της γεωπολυμερικής μήτρας και του EPS, θα αντιληφθεί ότι στην πράξη πρόκειται για μία αρκετά μεγάλη αραιώση. Με περαιτέρω προσθήκη EPS τόσο η πυκνότητα, όσο και η θλιπτική αντοχή μειώνονται με πιο ομαλό τρόπο και τελικά σταθεροποιούνται γύρω από τις τιμές 1.1 g/cm³ για την πυκνότητα και 6.5MPa για τη θλιπτική αντοχή. Παρόλο που η γεωπολυμερική μήτρα αραιώνεται ολοένα και περισσότερο, η μεταβολή των ιδιοτήτων του υλικού είναι πιο ομαλή, καθώς η διογκωμένη πολυστερίνη είναι ένα μαλακό υλικό και η αύξηση της μάζας της στη μήτρα οδηγεί σε ολοένα και μεγαλύτερη συμπίεσή του όγκου της. Ομοίως, και από το διάγραμμα των καμπτικών αντοχών, φαίνεται μεγαλύτερη μείωση κατά την προσθήκη 0.5% EPS και στη συνέχεια ομαλή μείωση.

Παρακάτω βλέπουμε εικόνα του ενισχυμένου με ελαφροβαρείς παράγοντες δείγματος. Παρατηρούμε ότι και αυτό το δοκίμιο είναι συμπαγές.



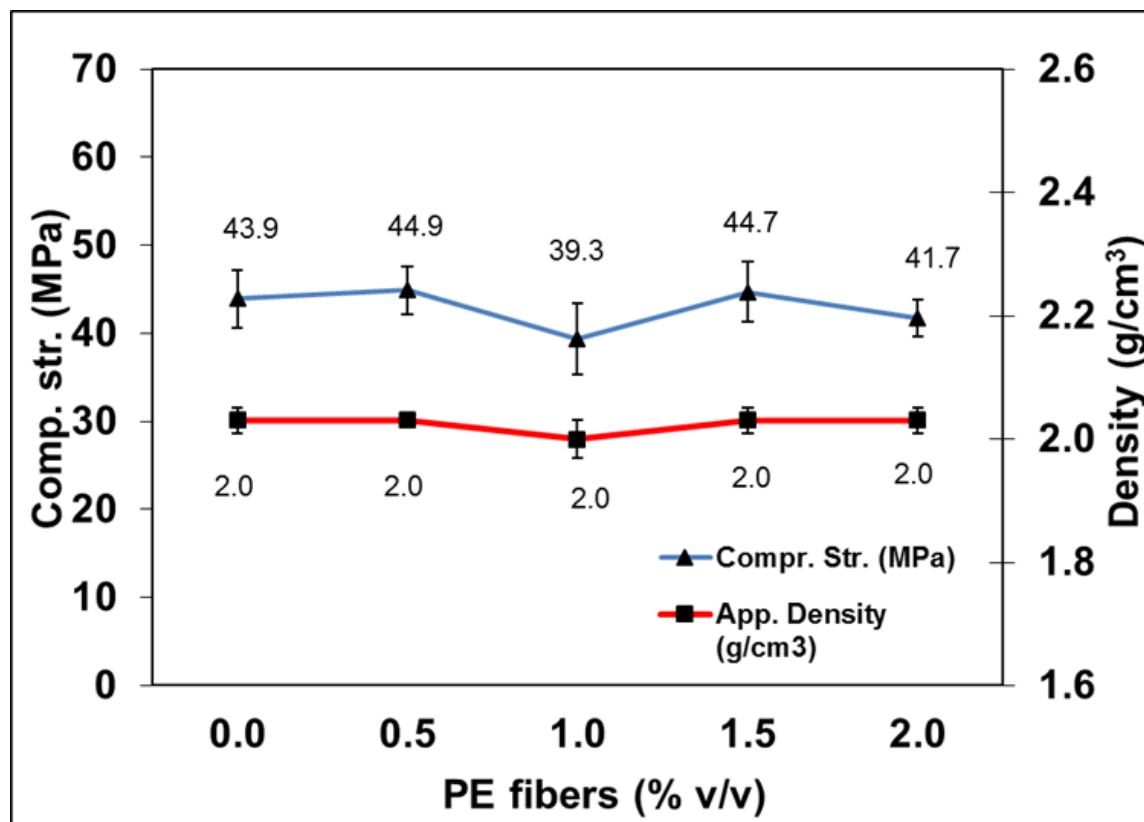
Εικόνα 5.2: Δείγμα γεωπολυμερούς ενισχυμένο με 1.5% κ.β. EPS

5.3. Ενίσχυση της γεωπολυμερικής μήτρας με ίνες από ΑΕΚΚ

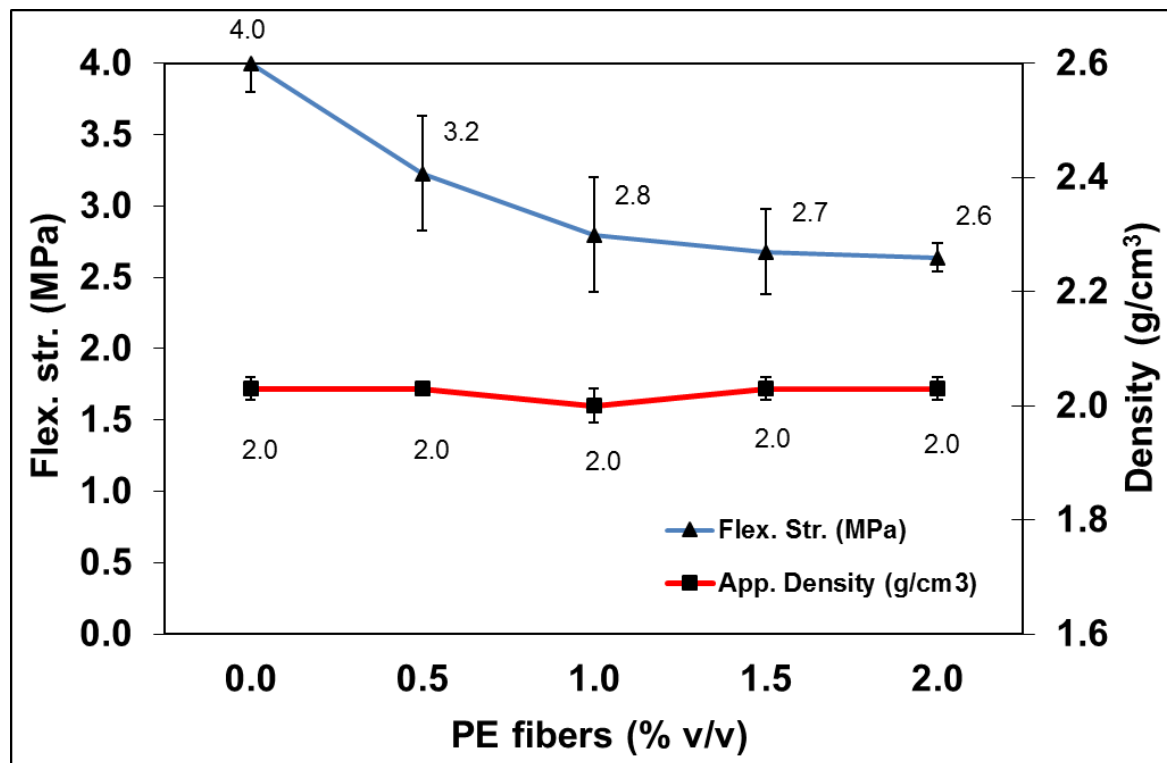
Στα δείγματα αναφοράς προστέθηκαν ίνες από πολυαιθυλένιο (PE) σε ποσοστά από 0.5 έως 2.0% κ.ο.. Η ίνες αυτές έχουν κατασκευαστεί από ανακυκλωμένα απόβλητα πλαστικών. Η προσθήκη των ινών έγινε ώστε να βελτιωθούν οι μηχανικές ιδιότητες και η ρεολογική συμπεριφορά των γεωπολυμερών [18]. Προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα αντοχών όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα και στα παρακάτω διαγράμματα:

Πίνακας 5.3: Ιδιότητες γεωπολυμερούς ενισχυμένου με PE

% PE κ.ο.	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Καμπτική Αντοχή (MPa)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)
0.0	43.9	4.0	2.0
0.5	44.9	3.2	2.0
1.0	39.3	2.8	2.0
1.5	44.7	2.7	2.0
2.0	41.7	2.6	2.0



Σχήμα 5.3: Καμπτικές αντοχές συναρτήσει της περιεκτικότητας σε ίνες PE



Σχήμα 5.4: Καμπτικές αντοχές συναρτήσει της περιεκτικότητας σε ίνες PE

Από το διάγραμμα των θλιπτικών αντοχών γίνεται φανερό ότι, η προσθήκη ινών PE δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στη θλιπτική αντοχή του γεωπολυμερούς. Γενικά, όσο αυξάνεται η κατ' όγκο περιεκτικότητα σε ίνες τόσο μειώνεται η θλιπτική αντοχή, αλλά με πολύ μικρό ρυθμό. Μπορεί να σημειωθεί ότι το δείγμα που περιείχε 1.0% κ.ο. PE εμφάνισε τοπικό ελάχιστο θλιπτικής αντοχής 39.4MPa. Από το διάγραμμα των καμπτικών αντοχών, φαίνεται μεγαλύτερη μείωση της καμπτικής αντοχής κατά την προσθήκη 0.5% PE, από 4.0MPa του δείγματος αναφοράς, στα 3.2MPa, και στη συνέχεια ομαλή μείωση έως τα 2.6MPa. Γενικά, παρατηρείται ότι η προσθήκη ινών PE έχει αρνητική επίδραση στις αντοχές του γεωπολυμερούς και επηρεάζει περισσότερο την καμπτική αντοχή. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι η προσθήκη ινών δεν έχει καμία επίδραση στη φαινόμενη πυκνότητα των δειγμάτων. Η παραπάνω συμπεριφορά επιβεβαιώνεται και βιβλιογραφικά.

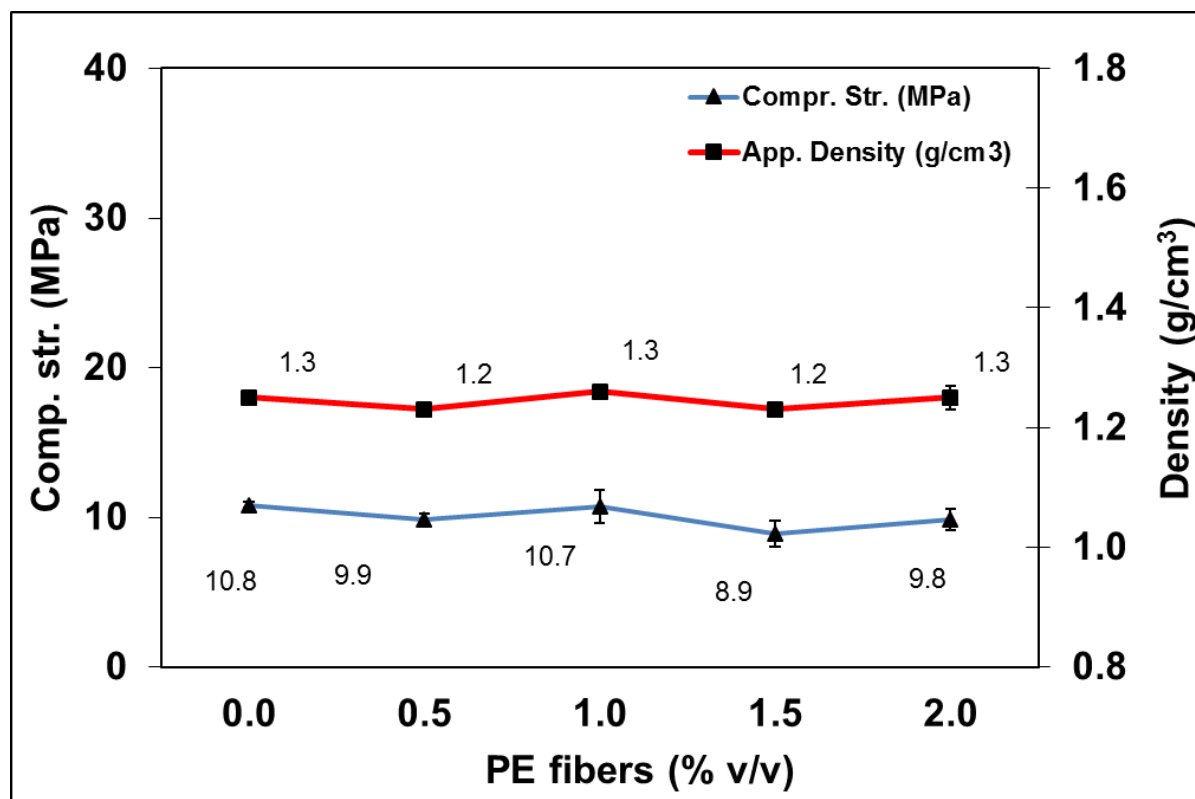
5.4. Ενίσχυση ελαφροβαρών γεωπολυμερών με ίνες από ΑΕΚΚ

Η επίδραση των ινών από ΑΕΚΚ εξετάστηκε και στην περίπτωση γεωπολυμερικών προϊόντων με μειωμένη πυκνότητα. Συγκεκριμένα, για τα πειράματα ενίσχυσης επιλέχθηκαν τα προϊόντα που περιέχουν 1.5% κ.β. και 2.0 % κ.β. EPS καθώς διαθέτουν ικανοποιητικές ιδιότητες (θλιπτικές αντοχές 12,6MPa και 11,6 MPa αντίστοιχα και πυκνότητα 1.4g/cm³) για χρήση ως ελαφροβαρή δομικά υλικά. Σε αυτά τα δείγματα προστέθηκαν και πάλι ίνες σε ποσοστά από 0.5% έως 2.0% κατ' όγκο.

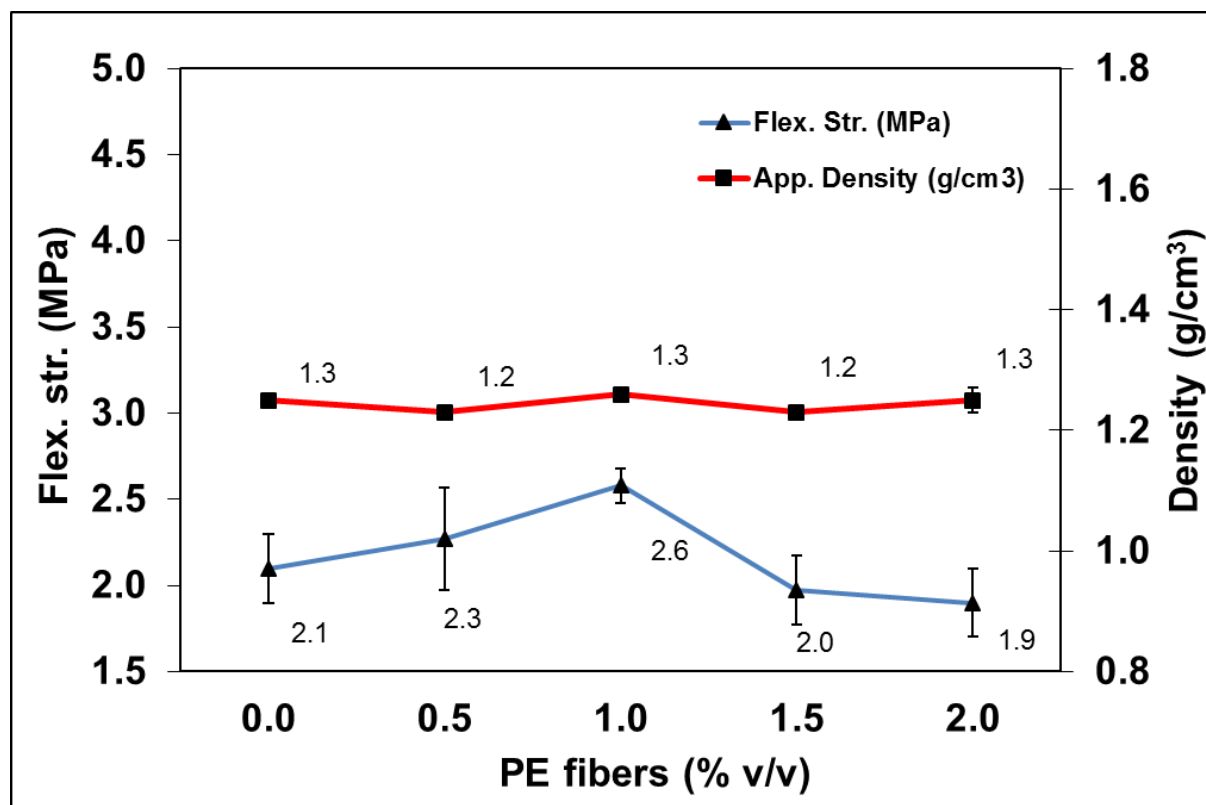
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών φαίνονται στους παρακάτω πίνακες, καθώς και στα διαγράμματα που ακολουθούν:

Πίνακας 5.4: Ιδιότητες γεωπολυμερούς ενισχυμένου με 2% κ.β. EPS και ίνες PE

% PE κ.ο.	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Καμπτική Αντοχή (MPa)	Φαινόμενη Πυκνότητα (g/cm ³)
0.0	10.8	2.1	1.3
0.5	9.9	2.3	1.2
1.0	10.7	2.6	1.3
1.5	8.9	2.0	1.2
2.0	9.8	1.9	1.3



Σχήμα 5.5: Θλιπτικές αντοχές γεωπολυμερών με 2% κ.β. EPS συναρτήσει της περιεκτικότητας σε ίνες PE

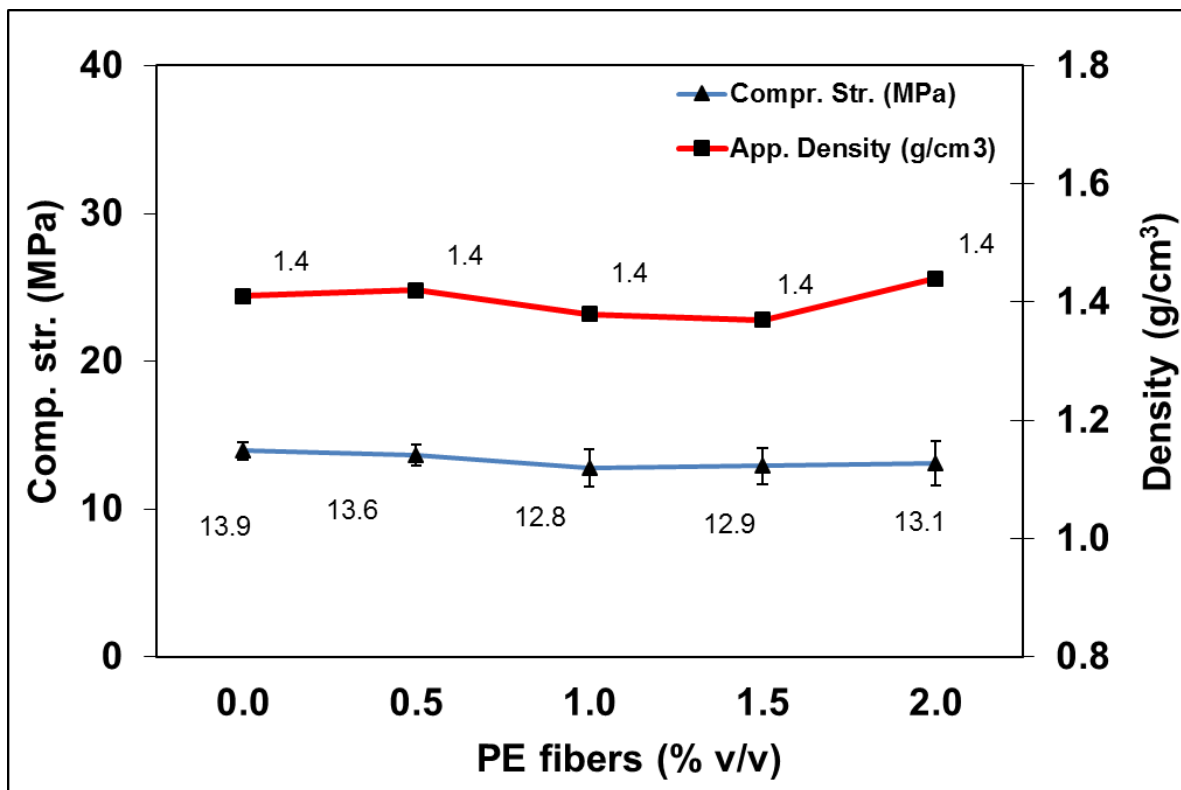


Σχήμα 5.6: Καμπτικές αντοχές γεωπολυμερών με 2% κ.β. EPS συναρτήσει της περιεκτικότητας σε ίνες PE

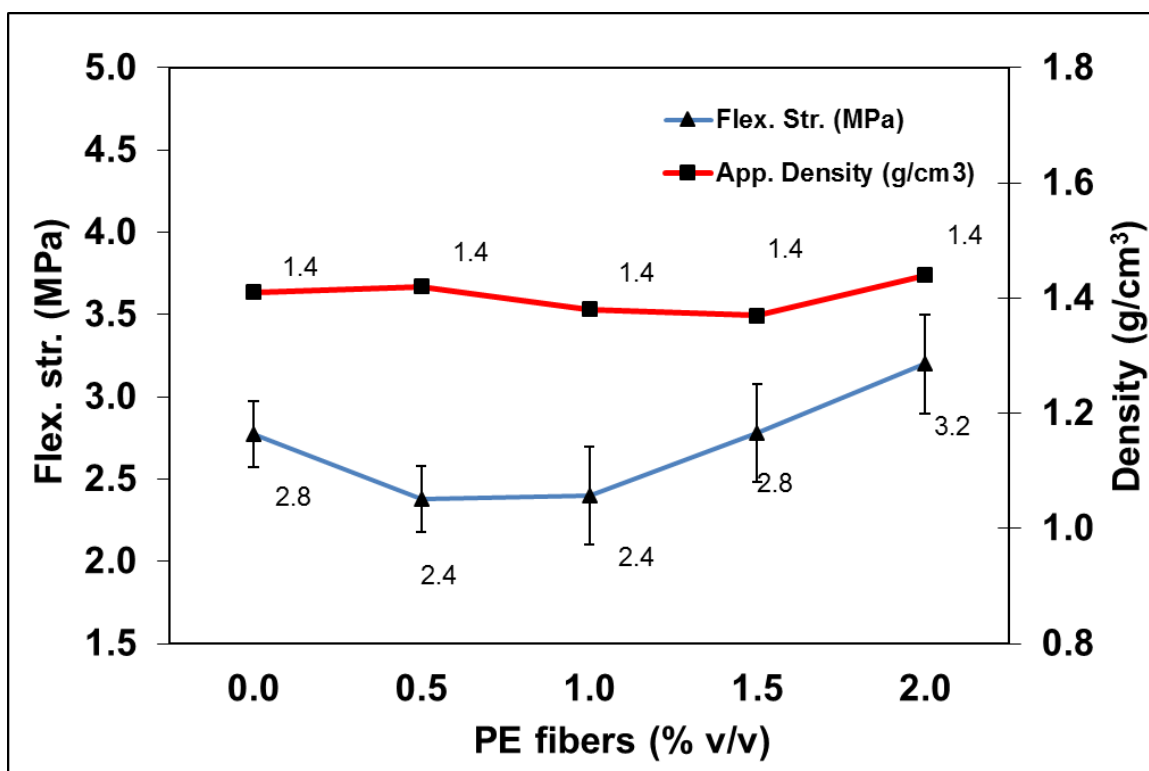
Από το διάγραμμα των θλιπτικών αντοχών γίνεται φανερό ότι, η προσθήκη ινών PE δεν έχει σχεδόν καμία επίδραση στη θλιπτική αντοχή του γεωπολυμερούς, αφού η τιμή της ισορροπεί γύρω από την τιμή των 10MPa. Το ίδιο ισχύει και για την φαινόμενη πυκνότητα, όπου υπάρχει ισορροπία γύρω από την τιμή 1.25g/cm³. Παρατηρείται ότι η προσθήκη ινών επιδρά με παρόμοιο τρόπο στη θλιπτική αντοχή και την πυκνότητα του αμιγούς γεωπολυμερούς και του ελαφροβαρούς γεωπολυμερούς. Αντιθέτως, από το διάγραμμα των καμπτικών αντοχών, φαίνεται πως η προσθήκη ινών έχει μεγαλύτερη επίδραση στην καμπτική αντοχή του ελαφροβαρούς γεωπολυμερούς, όπου παρουσιάζει τοπικό μέγιστο 2.6MPa όταν η περιεκτικότητα σε ίνες είναι 1.0% κ.ο.. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα για την καμπτική αντοχή του απλού γεωπολυμερούς, όπου η προσθήκη ινών επέφερε μείωση των καμπτικών αντοχών. Γενικά, παρατηρείται ότι η προσθήκη ινών PE έχει μηδενική ή σχεδόν μηδενική επίδραση στη θλιπτική αντοχή και στην πυκνότητα του ελαφροβαρούς γεωπολυμερούς, ενώ η συνδυασμένη ενίσχυση με EPS και PE επιδρά θετικά στην καμπτική αντοχή των δειγμάτων.

Πίνακας 5.5: Ιδιότητες γεωπολυμερών ενισχυμένων με 1.5%κ.β. EPS και ίνες PE

% PE κ.ο.	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Καμπτική Αντοχή (MPa)	Φαινόμενη Πυκνότητα (g/cm ³)
0.0	13.9	2.8	1.4
0.5	13.6	2.4	1.4
1.0	12.8	2.4	1.4
1.5	12.9	2.8	1.4
2.0	13.1	3.2	1.4



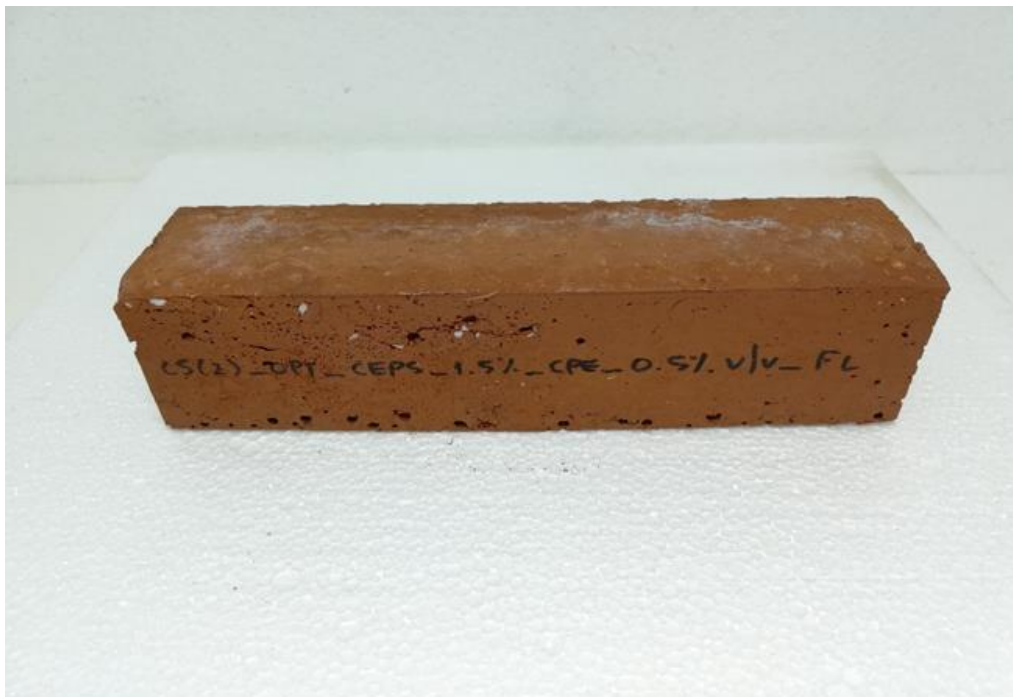
Σχήμα 5.7: Θλιπτικές αντοχές γεωπολυμερών με 1.5% κ.β. EPS συναρτήσε της περιεκτικότητας σε ίνες PE



Σχήμα 5.8: Καμπτικές αντοχές γεωπολυμερών 1.5% κ.β. EPS συναρτήσε της περιεκτικότητας σε ίνες PE

Από το διάγραμμα των θλιπτικών αντοχών γίνεται φανερό ότι, η προσθήκη ιών PE, ούτε σε αυτήν την περίπτωση έχει επίδραση στη θλιπτική αντοχή του γεωπολυμερούς, αφού η τιμή της ισορροπεί γύρω από την τιμή των 13.3MPa. Το ίδιο ισχύει και για την φαινόμενη πυκνότητα, όπου υπάρχει ισορροπία γύρω από την τιμή 1.4g/cm³. Αντιθέτως, από το διάγραμμα των καμπτικών αντοχών, φαίνεται και εδώ πως η προσθήκη ιών έχει μεγαλύτερη επίδραση στην καμπτική αντοχή του ελαφροβαρούς γεωπολυμερούς, όπου παρουσιάζει τοπικό μέγιστο 3.2MPa όταν η περιεκτικότητα σε ίνες είναι 2.0% κ.ο.. Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται αρχικά μικρή μείωση των καμπτικών αντοχών και στη συνέχεια άνοδος έως το τοπικό μέγιστο. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα για την καμπτική αντοχή του απλού γεωπολυμερούς, όπου η προσθήκη ιών επέφερε συνολική μείωση των καμπτικών αντοχών. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι τα δείγματα που με 1.5% κ.β. EPS εμφανίζουν καλύτερες αντοχές, τόσο θλιπτικές, όσο και καμπτικές, σε σχέση με τα δείγματα με 2.0% EPS, όταν έχουμε ταυτόχρονη ενίσχυση με ίνες PE.

Παρακάτω εικονίζεται δείγμα γεωπολυμερούς ενισχυμένο με 1.5% κ.β. EPS και 0.5% κ.ο. PE.



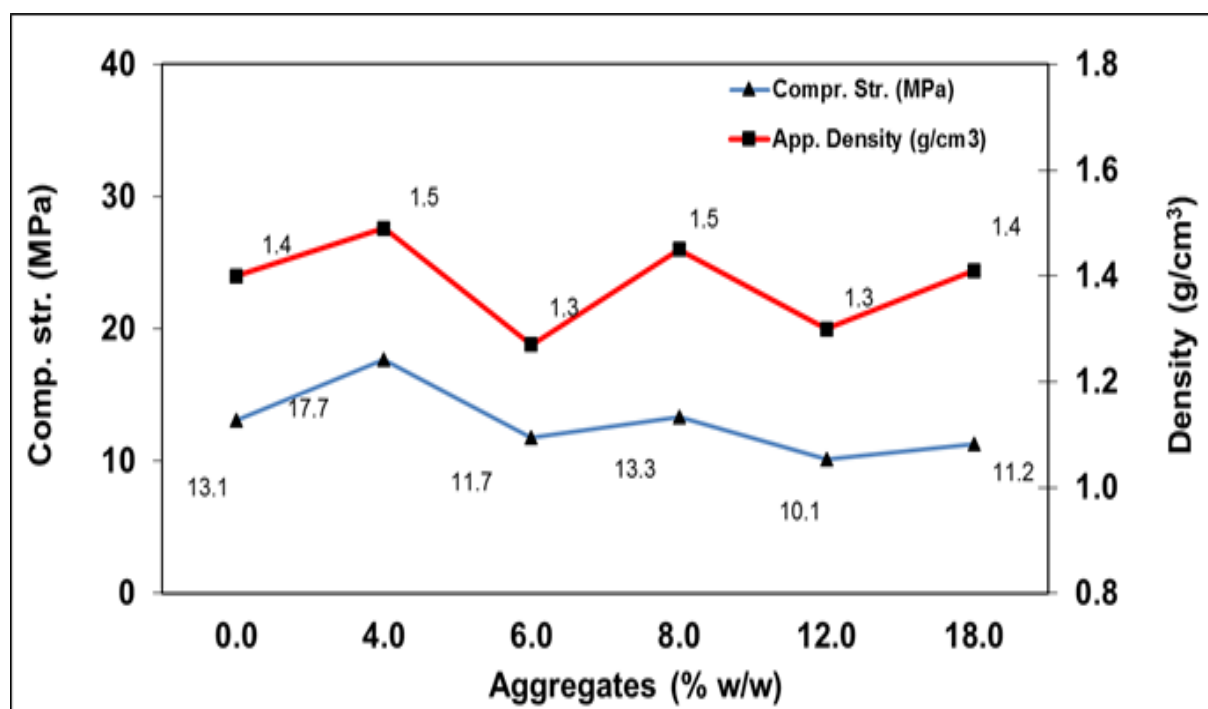
Εικόνα 5.3: Δείγμα γεωπολυμερούς ενισχυμένο με 1.5% κ.β. EPS και 0.5% κ.ο. PE

5.5. Ενίσχυση ελαφροβαρών γεωπολυμερών με ανακυκλωμένα αδρανή

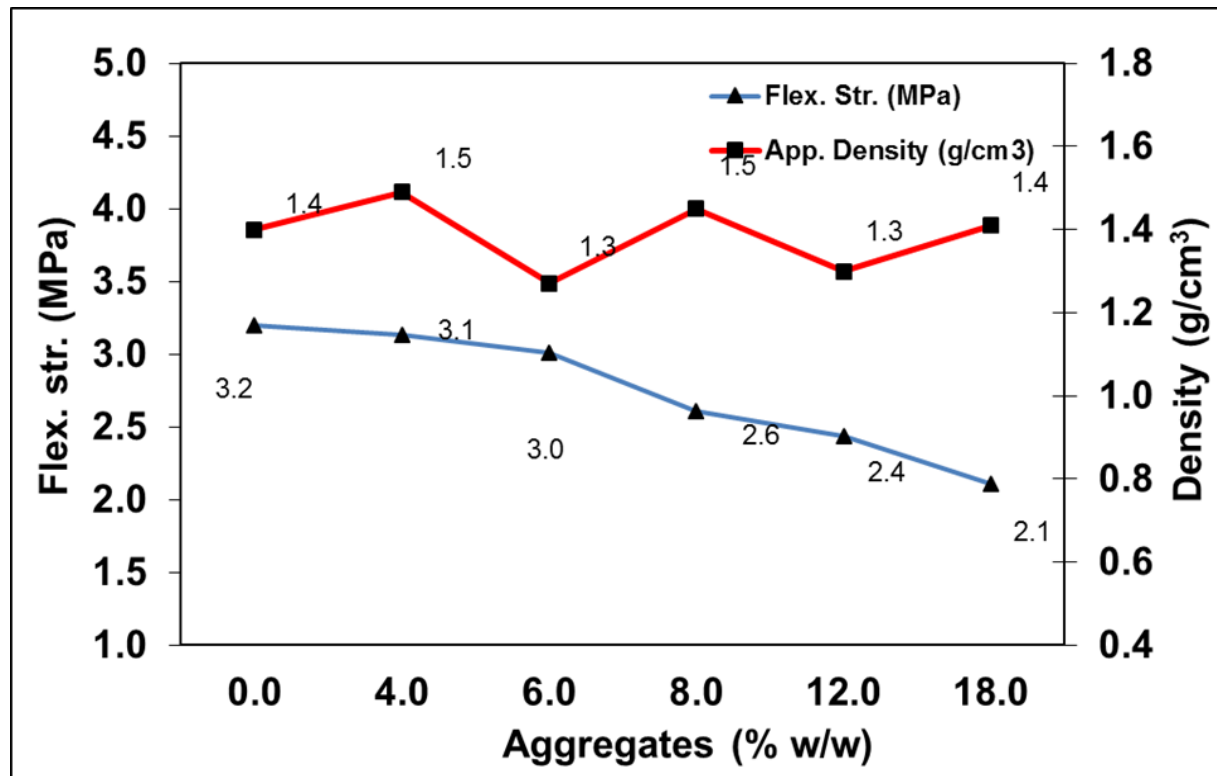
Με βάση τα πειραματικά δεδομένα των μετρήσεων από τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με EPS και PE ταυτόχρονα και με βάση τη συζήτηση των αποτελεσμάτων που προηγήθηκε βρέθηκε ότι οι ιδανικές περιεκτικότητες σε πρόσθετα είναι 1.5% κ.β. EPS και 2.0% κ.ο. PE., καθώς μέσω αυτών επιτυγχάνεται ο καλύτερος συνδυασμός ιδιοτήτων (υψηλότερες αντοχές για την χαμηλότερη πυκνότητα): θλιπτική αντοχή 13,0 MPa, καμπτική αντοχή 3,2 MPa και πυκνότητα 1,4 g/cm³. Σε τέτοιου τύπου δοκίμια προστέθηκαν ανακυκλωμένα αδρανή με ενθυλακωμένα υλικά αλλαγής φάσης, σε ποσοότητες 4,6,8,12,18 % κ.β. και έγιναν μετρήσεις αντοχής σε θλίψη και σε κάμψη, από τις οποίες προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πίνακας 5.6: Ιδιότητες γεωπολυμερών ενισχυμένων με 1.5% κ.β. EPS, 2.0% κ.ο. PE και ανακυκλωμένα αδρανή

% aggregates	Αντοχή σε θλίψη (MPa)	Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)
0	13.1	3.2	1.4
4	17.7	3.1	1.5
6	11.7	3.0	1.3
8	13.3	2.6	1.5
12	10.1	2.4	1.3
18	11.2	2.1	1.4



Σχήμα 5.9: Θλιπτικές αντοχές γεωπολυμερών ενισχυμένων με 1.5% κ.β. EPS και 2.0% κ.ο. PE συναρτήσει της περιεκτικότητας σε ανακυκλωμένα αδρανή



Σχήμα 5.10: Καμπτικές αντοχές γεωπολυμερών ενισχυμένων με 1.5% κ.β. EPS και 2.0% κ.ο. PE συναρτήσει της περιεκτικότητας σε ανακυκλωμένα αδρανή

Από το διάγραμμα των θλιπτικών αντοχών φαίνεται ότι, με την προσθήκη ανακυκλωμένων αδρανών η πυκνότητα του δείγματος συνεχώς αυξομειώνεται, με ελάχιστη τιμή τα 1.3g/cm³ και μέγιστη τα 1.5g/cm³. Σε ό,τι αφορά τη θλιπτική αντοχή, με την προσθήκη 4.0% κ.β. αδρανών παρατηρείται αύξηση της αντοχής από 13.1MPa σε 17.7MPa, ενώ στη συνέχεια, με περαιτέρω προσθήκη αδρανών υπάρχει μία γενική τάση πτώσης της θλιπτικής αντοχής. Από το διάγραμμα των καμπτικών αντοχών, φαίνεται πως η προσθήκη ανακυκλωμένων αδρανών έχει αρνητική επίδραση στην καμπτική αντοχή των δειγμάτων, καθώς όσο προσθέτουμε αδρανή αυτή μειώνεται, με συνολική μείωση της τάξεως του 30%. Εφόσον είναι επιθυμητή η δημιουργία ενός ελαφροβαρούς δομικού υλικού με ικανοποιητικές θλιπτικές και καμπτικές αντοχές, γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω ότι η ιδανικές περιεκτικότητες σε πρόσθετα είναι: 1.5% κ.β. EPS, 2.0% κ.ο. PE και 6% κ.β. ανακυκλωμένα αδρανή, καθώς το συγκεκριμένο δείγμα εμφάνισε τις βέλτιστες αντοχές, 11.7MPa θλιπτική αντοχή και 3.0MPa καμπτική αντοχή, για την ελάχιστη πυκνότητα 1.3g/cm³.

Παρακάτω βλέπουμε δείγμα γεωπολυμερούς ενισχυμένο με 1.5% κ.β. EPS, 2.0% κ.ο.ΡΕ και 6.0% κ.β. ανακυκλωμένα αδρανή.



Εικόνα 5.4: Δείγμα γεωπολυμερούς ενισχυμένο με 1.5% κ.β. EPS, 2% κ.ο. ΡΕ και 6.0% κ.β. ανακυκλωμένα αδρανή

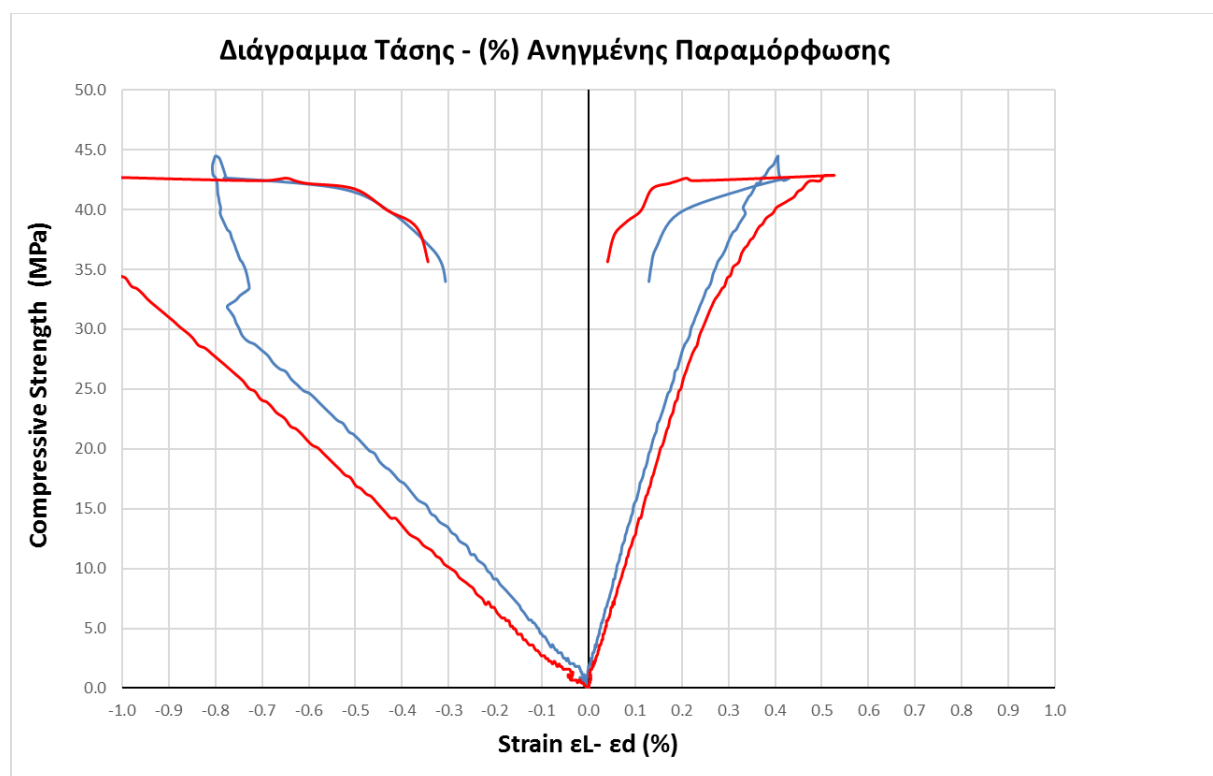
5.6. Μέτρηση Μέτρου Ελαστικότητας E και λόγου Poisson ν

Εκτός των αντοχών και της πυκνότητας σε επιλεγμένα δείγματα μελετήθηκε επιπλέον το μέτρο ελαστικότητας E και ο λόγος Poisson ν . Αυτά ήταν τα δείγματα αναφοράς, τα ενισχυμένα δείγματα με 1.5% κ.β. EPS και 2.0% κ.ο. PE, καθώς και σε αυτά που ενισχύθηκαν με 1.5% κ.β. EPS, 2.0% κ.ο. PE και 6.0% κ.β. ανακυκλωμένα αδρανή. Από τις μετρήσεις αυτές προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 5.7: Μέτρο ελαστικότητας και λόγος Poisson δειγμάτων αναφοράς

Αριθμός δοκιμίου	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Λόγος Poisson
1	4.3	0.28
2	3.4	0.27
Μέσος Όρος	3.9	0.28

Παρακάτω φαίνεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης/ανηγμένης παραμόρφωσης:



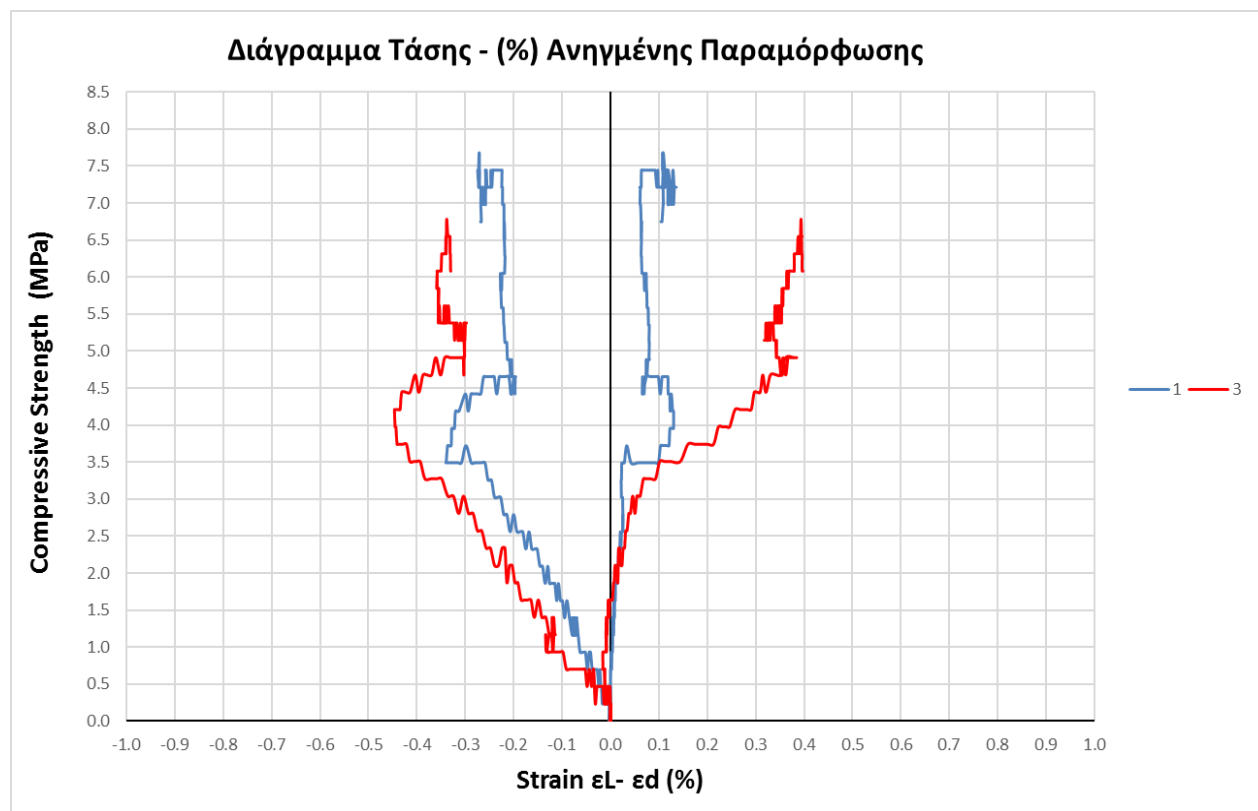
Σχήμα 5.11: Διάγραμμα τάσης/ανηγμένης παραμόρφωσης γεωπολυμερούς αναφοράς

Στο παραπάνω διάγραμμα με την μπλε γραμμή εικονίζεται η συνάρτηση του δείγματος 1, ενώ με την κόκκινη η συνάρτηση του δείγματος 2. Από την κλίση του διαγράμματος υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας. Στο τέλος της γραμμικής περιοχής των διαγραμμάτων λαμβάνει χώρα το σπάσιμο των δειγμάτων ύστερα από τη μηχανική τους καταπόνηση. Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας κατατάσσουν το παραχθέν υλικό στην κατηγορία των ελαστικών υλικών και όχι των ψαθυρών υλικών. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο καθώς αυτό αποτελεί μία σκληροσμένη γεωπολυμερική πάστα.

Πίνακας 5.8: Μέτρο ελαστικότητας και λόγος Poisson δειγμάτων ενισχυμένων με 1.5% κ.β. EPS και 2% κ.ο. PE

Αριθμός δοκιμίου	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Λόγος Poisson
1	1.4	0.11
3	0.9	0.19
Μέσος όρος	1.2	0.15

Παρακάτω φαίνεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης/ανηγμένης παραμόρφωσης:



Σχήμα 5.12: Διάγραμμα τάσης/ανηγμένης παραμόρφωσης δειγμάτων ενισχυμένων με 1.5% κ.β. EPS και 2% κ.ο. PE

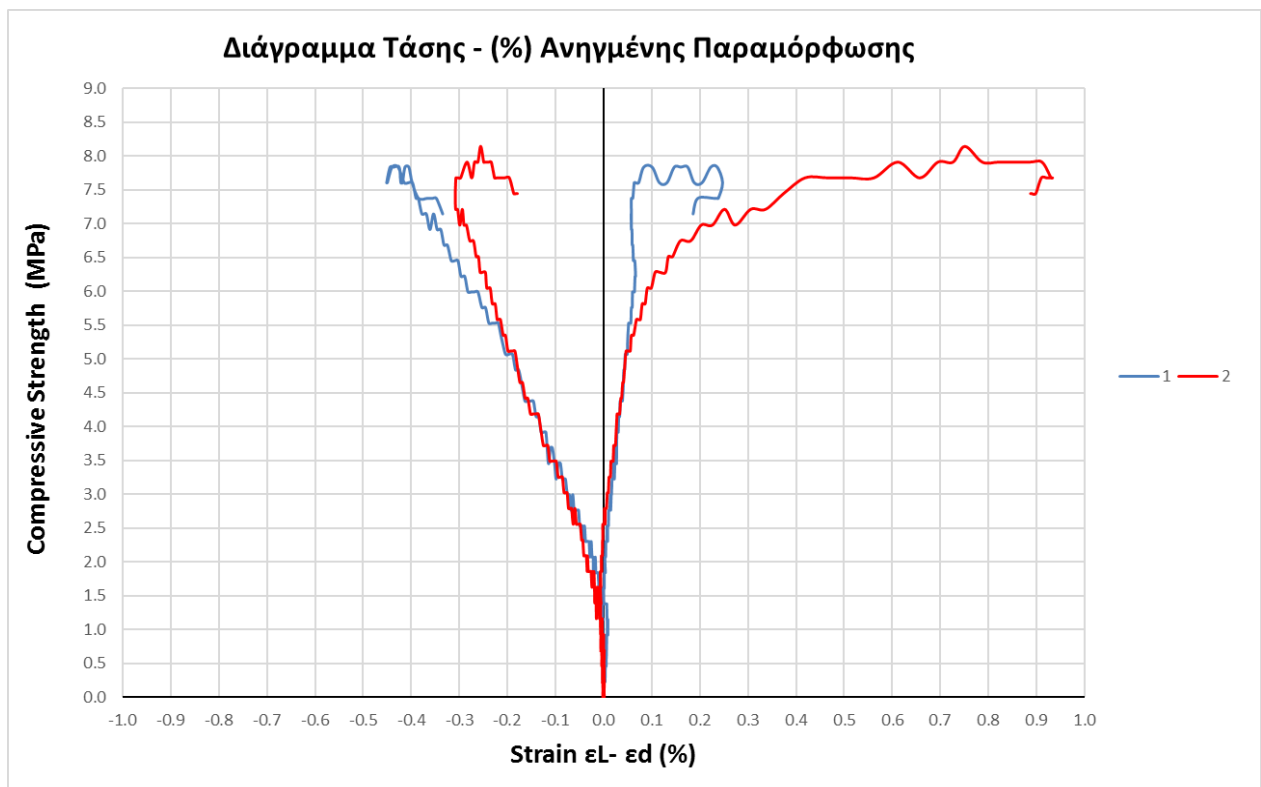
Στο παραπάνω διάγραμμα με την μπλε γραμμή εικονίζεται η συνάρτηση του δείγματος 1, ενώ με την κόκκινη η συνάρτηση του δείγματος 3. Παρατηρείται ότι τόσο το μέτρο ελαστικότητας, όσο και ο λόγος Poisson έχουν χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τα γεωπολυμερή αναφοράς. Καθώς η αντοχή σε θλίψη μπορεί να συσχετιστεί με το μέτρο ελαστικότητας, γίνεται αντιληπτό ότι εφόσον η μήτρα του ενισχυμένου γεωπολυμερούς έχει χαμηλότερη πυκνότητα σε σχέση με τα γεωπολυμερή αναφοράς και χαμηλότερη θλιπτική αντοχή, όπως έχει αποδειχθεί παραπάνω, είναι λογικό να εμφανίζει και μικρότερο μέτρο ελαστικότητας. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και το γεγονός ότι η γεωπολυμερική πάστα έχει αραιωθεί με υλικά (EPS, PE) τα οποία έχουν μεγαλύτερη πλαστικότητα από αυτήν. Συνεπώς, αποδεικνύεται ότι η ενισχύση με EPS και ίνες PE, καθιστά το τελικό προϊόν λιγότερο ψαθυρό. Αυτό σημαίνει ότι τα ενισχυμένα γεωπολυμερή παραμορφώνονται περισσότερο σε σχέση με τα γεωπολυμερή αναφοράς πριν τη θραύση.

ΤΟΥΣ.

Πίνακας 5.9: Μέτρο ελαστικότητας και λόγος Poisson δειγμάτων ενισχυμένων με 1.5% κ.β. EPS, 2% κ.ο. PE, 6% ανακυκλωμένα αδρανή

Αριθμός δοκιμίου	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Λόγος Poisson
1	3.9	0.22
2	3.7	0.13
Μέσος Όρος	3.8	0.18

Παρακάτω φαίνεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης/ανηγμένης παραμόρφωσης:



Σχήμα 5.13: Διάγραμμα τάσης/ανηγμένης παραμόρφωσης ενισχυμένων δειγμάτων με 1.5% κ.β. EPS, 2% κ.ο. PE και 6% κ.β. ανακυκλωμένων αδρανών

Στο παραπάνω διάγραμμα με την μπλε γραμμή εικονίζεται η συνάρτηση του δείγματος 1, ενώ με την κόκκινη η συνάρτηση του δείγματος 2. Παρατηρείται ότι το μέτρο ελαστικότητας έχει επανέλθει στα ίδια επίπεδα τιμών με το γεωπολυμερές αναφοράς. Από την άλλη ο λόγος Poisson, αυξάνεται με την προσθήκη των ανακυκλωμένων αδρανών, ωστόσο η τιμή του δεν επανέρχεται στα ίδια επίπεδα με το γεωπολυμερές αναφοράς. Συνεπώς, αποδεικνύεται ότι η προσθήκη ανακυκλωμένων αδρανών επαναφέρει το τελικό προϊόν στα επίπεδα ψαθυρότητας του γεωπολυμερούς αναφοράς.

6. Συμπεράσματα

1. Είναι δυνατόν να παραχθούν γεωπολυμερή και ελαφροβαρή γεωπολυμερή από Απόβλητα Εκσκαφών, Κατασκευών και Κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ).
2. Τα δείγματα απλού γεωπολυμερούς παρουσίασαν αντοχές συγκρίσιμες με εκείνες του συμβατικού τσιμέντου. Πιο συγκεκριμένα, τα δείγματα αυτά εμφάνισαν τις εξής ιδιότητες: θλιπτική αντοχή 43.9MPa, καμπτική αντοχή 4.0MPa και φαινόμενη πυκνότητα 2.0g/cm³.
3. Είναι δυνατόν να μειωθεί η πυκνότητα των απλών γεωπολυμερών με την προσθήκη διογκωμένης πολυστερίνης EPS, η οποία έχει προέλθει από θερμομονωτικά πάνελ.
4. Είναι δυνατόν να ενισχυθούν οι μηχανικές ιδιότητες ελαφροβαρών γεωπολυμερών με την εισαγωγή ινών που έχουν προκύψει από απόβλητα πλαστικών.
5. Παρασκευάστηκαν δείγματα τα οποία ενισχύθηκαν με διογκωμένη πολυστερίνη σε ποσοστά από 0.5% έως 3.0% κ.β., ίνες από απόβλητα πλαστικών σε ποσοστά από 0.5% έως 2.0% κ.ο., διογκωμένη πολυστερίνη σε ποσοστό 1.5% κ.β. και ίνες σε ποσοστά από 0.5% κ.ο. έως 2% κ.ο., διογκωμένη πολυστερίνη σε ποσοστό 2.0% κ.β. και ίνες σε ποσοστά από 0.5% έως 2.0% κ.ο., διογκωμένη πολυστερίνη σε ποσοστό 1.5% και ίνες σε ποσοστό 2.0% κ.β. και ανακυκλωμένα αδρανή σε ποσοστά από 4.0% έως 18.0% κ.β.. Τα δείγματα θλιπτικές αντοχές από 44.9MPa έως 6.5MPa, καμπτικές αντοχές από 4.0MPa έως 1.7MPa και φαινόμενη πυκνότητα από 2.0g/cm³ έως 1.1g/cm³. Συμπεραίνουμε επομένως ότι είναι δυνατόν να παραχθούν δομικά υλικά με ένα μεγάλο εύρος ιδιοτήτων, ανάλογα με την περιεκτικότητα σε πρόσθετα. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να επιλεγεί το κατάλληλο υλικό για την κατάλληλη εφαρμογή ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες.
6. Η προσθήκη διογκωμένης πολυστερίνης και ινών από ΑΕΚΚ μειώνει την ψαθυρότητα του απλού γεωπολυμερούς, ενώ η προσθήκη ανακυκλωμένων αδρανών την αυξάνει.

7. Τάσεις για μελλοντική έρευνα

Η τεχνολογία των γεωπολυμερών έχει αρχίσει να συγκεντρώνει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των ιδιαίτερα θετικών ιδιοτήτων που εμφανίζουν τα προϊόντα της σε διάφορους τομείς. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμα πολλά σημεία τα οποία χρήζουν διευκρίνισης, αλλά και πληθώρα προβλημάτων τα οποία θα πρέπει να επιλυθούν, προκειμένου τα γεωπολυμερή να αποτελέσουν μία βιώσιμη εναλλακτική. Συνεπώς, οι μελλοντικές έρευνες πρέπει να επικεντρωθούν:

1. Στην κατασκευή σκυροδεμάτων γεωπολυμερών με την ελάχιστη δόση αλκαλικών ενεργοποιητών και την ελάχιστη θερμοκρασία επεξεργασίας με σκοπό την παραγωγή ενός βιώσιμου προϊόντος με χαμηλή ενσωματωμένη ενέργεια, χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα, χαμηλό παραγωγικό κόστος και που να είναι ασφαλές κατά τη διαχείρισή του από τους εργαζόμενους. [1,2]
2. Στην παραγωγή φιλικών προς το χρήστη ενεργοποιητών. [2]
2. Στην ανάπτυξη νέων μεθόδων ενεργοποίησης και επεξεργασίας όπως η χρήση αποβλήτων π.χ. αλκαλικών αποβλήτων υδάτων ή άλλων πρόσθετων ουσιών, που έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τους εμπορικούς αλκαλικούς ενεργοποιητές, καθώς οι υπάρχοντες ενεργοποιητές έχουν ιδιαίτερα υψηλό κόστος. [1,2]
3. Στην καθιέρωση τυποποιημένων μεθόδων και δοκιμών, καθώς και προτύπων με βάση τις επιδόσεις, σχεδιασμένων ειδικά για γεωπολυμερή. Αυτό μπορεί να είναι ένα από τα λίγα βήματα για να πεισθεί η κοινότητα για την ευρεία αποδοχή των γεωπολυμερών στην αντικατάσταση του σκυροδέματος OPC.
4. Στην πλήρη διασαφήνιση και μοντελοποίηση της κινητικής της αντίδρασης του γεωπολυμερισμού, των ιδιοτήτων των υλικών και της ρεολογικής συμπεριφοράς ενός αριθμού νέων γεωπολυμερών, για τις διάφορες πρώτες ύλες και συνθήκες επεξεργασίας. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως γενική κατευθυντήρια γραμμή για τους ερευνητές στον προσδιορισμό των κρίσιμων παραμέτρων και παραγόντων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή των γεωπολυμερών. Εκτός αυτού, πρέπει να αντιμετωπιστούν με επιστημονικό τρόπο τα αντιφατικά συμπεράσματα σε ό,τι αφορά την ενσωματωμένη ενέργεια και το αποτύπωμα διοξειδίου του άνθρακα των γεωπολυμερών σε σύγκριση με το συμβατικό τσιμέντο Portland. [3]
5. Στην αξιοποίηση προηγμένων αναλυτικών μεθόδων προκειμένου να διασαφηνιστεί η δομική μονάδα των άμορφων γεωπολυμερικών προϊόντων που σχηματίζονται από απλές ή υβριδισμένες πρώτες ύλες, και που δεν μπορούν να προσδιοριστούν ποσοτικά χρησιμοποιώντας άλλες, πιο συμβατικές, αναλυτικές μεθόδους.
6. Απαιτείται βελτιωμένος χαρακτηρισμός των πρώτων υλών που είναι κατάλληλες για γεωπολυμερισμό, όσο και των τελικών προϊόντων. Η συμπεριφορά των φάσεων που είναι παρούσες στις πρώτες ύλες κατά τη διάρκεια της αλκαλικής ενεργοποίησης, θα πρέπει να μελετηθούν με περισσότερη λεπτομέρεια. Καθώς οι ιδιότητες των αλκαλικά ενεργοποιημένων ή γεωπολυμερικών υλικών είναι ευαίσθητες σε μεταβολές των χημικών και φυσικών χαρακτηριστικών των πρώτων υλών και αυτά τα χαρακτηριστικά ποικίλουν ανάλογα με το χρόνο και την πηγή. [1,2]
7. Στη μελέτη των επιπτώσεων των συνθηκών ωρίμανσης στη μηχανική συμπεριφορά των γεωπολυμερών. Οι βέλτιστες συνθήκες σκλήρυνσης και οι επιδράσεις της υγρασίας της ατμόσφαιρας και της θέρμανσης της πάστας πάνω στις ιδιότητες του τελικού γεωπολυμερούς πρέπει να διασαφηνιστούν.
8. Στη μελέτη της συμπεριφοράς του γεωπολυμερικού σκυροδέματος με διαφορετικές ενισχύσεις.[1,2]

9. Στη μελέτη της συμπεριφοράς των γεωπολυμερών σε μακροπρόθεσμη βάση φαίνεται να είναι σημαντικό εμπόδιο στην περαιτέρω χρήση τους. Στοιχεία σχετικά με την αντίδραση των γεωπολυμερικών προϊόντων σε σκληρά περιβάλλοντα και κάτω από ερπυσμό και κόπωση θα είναι ωφέλιμες. [1,2]
10. Στην αξιολόγηση κύκλου ζωής (LCA) κάθε γεωπολυμερικού σκυροδέματος προκειμένου να αποδειχθούν πραγματικά τα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη που προσφέρουν τα γεωπολυμερή ως συνδετικό υλικό σε σχέση με το τσιμέντο OPC.
11. Στη δημιουργία βάσεων δεδομένων θα βοηθούσε στην πρόβλεψη των επιδόσεων των γεωπολυμερών.
15. Στην ανάπτυξη προσμίξεων κατάλληλων για γεωπολυμερικά σκυροδέματα, καθώς αυτή τη στιγμή στην αγορά υπάρχουν διαθέσιμες προσμίξεις μόνο για το PC, οι οποίες δεν είναι συμβατές με τα αλκαλικά ενεργοποιημένα τσιμέντα. [2]

8. Βιβλιογραφία

1. Behzad Majidi: Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review
2. A. Allahverdi, E.N. Kani: Use of construction and demolition waste (CDW) for alkali-activated or geopolymer cements, Iran University of Science and Technology, Iran - Semnan University, Iran, DOI: 10.1533/9780857096906.3.439
3. Part Wei Ken, Mahyuddin Ramli, Cheah Chee Ban: An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products
School of Housing, Building and Planning, Universiti Sains Malaysia, 11800 Penang, Malaysia
4. Linlin Chong, , Xiang Hu: Geopolymer: Current status and research needs (Article in Indian Concrete Journal), Hunan University, Ghent University, February 2015
5. D. Kioupis, A. Skaropoulou, S. Tsivilis, G. Kakali: Development of Green Building Materials through Alkali Activation of Construction and Demolition Wastes, School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Athens, 15773, Greece
6. Susan A. Bernal, Erich D. Rodríguez, Ana Paula Kirchheimc, JohnLProvisa: Management and valorization of wastes through use in producing alkali-activated cement materials, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
7. M.F. Zawraha, R.A. Gadoa,*, N. Felтинb, S. Ducourtieub, L. Devoilleba: Recycling and utilization assessment of waste firedclay bricks (Grog) with granulated blast-furnaceslag for geopolymer production , National Research Center, Ceramics Department, 12311 Dokki, Cairo, EgyptbLaboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE), 78197 Trappes, Francea
8. Arvind Pathak, Sanjay Kumar, Vinay Kumar Jha: Development of Building Material from Geopolymerization of Construction and Demolition Waste (CDW), Central Department of Chemistry Kirtipur, Kathmandu, Nepal
9. Vinay Kumar Jha and Anupama Tuladhar: An Attempt of Geopolymer Synthesis from Construction Waste, Central Department of Chemistry, Tribhuvan University, Kirtipur, Kathmandu, Nepal
10. L. Reig, M.M. Tashima, M.V. Borrachero, J. Monzó, C.R. Cheeseman, J. Payá: Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste, EMC, Universitat Jaume I, Av. Sos Baynat s/n, 12071 Castelló de la Plana, Spain, Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK
11. Zengqing Sun, Hao Cui, Hao An, Dejing Tao, Yan Xu, Jianping Zhai, Qin Li: Synthesis and thermal behavior of geopolymer-type material from waste ceramic, State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, and School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, PR China
12. Konstantinos A. Komnitsas: 2011 International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities, Technical University Crete, Dpt. Mineral Resources Eng., 73100 Chania, Greece
13. Pavel Rovnaník, Bohuslav Rezník, Pavla Rovnaníková: Blended alkali-activated fly ash/brick powder materials, Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Veverí 331/95, Brno 602 00, Czech Republic International Conference on Ecology and new Building materials and products, ICEBMP 2016
14. J. Payá , M.V. Borrachero, J. Monzó, L. Soriano, M.M. Tashima: A new geopolymeric

binder from hydrated-carbonated cement, Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Edificio 4G, 46022 Valencia, Spain

15. Kwesi Kurentsir Sagoe-Crentsil, Shiqin Yan, Leigh Gesthuizen: Patente WO2013044325A1 - Geopolymer product - Google Patentes, Inventores

16. Χρυσάνθη Παναγιωτοπούλου: Διδακτορική διατριβή «Αξιοποίηση Ελληνικών Βιομηχανικών Ορυκτών και Παραπροϊόντων στην Τεχνολογία των Γεωπολυμερών», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα 2009

17. A. Allahverdi, E. Najafi Kani: Construction Wastes as Raw Materials for Geopolymer Binders, Received: October 2008 Accepted: June 2009

18. Green Integrated Structural Elements for Retrofitting and New Construction of Buildings, Geopolymer matrix with fibre reinforcement, D 6.2.

19. D. Kioupis, Ch. Kavakakis, S. Tsvivilis, G. Kakali: Synthesis and characterization of porous fly ash based geopolymers using Si as foaming agent, National Technical University of Athens, School of Chemical Engineering, 9 Heroon Polytechniou St., 15773, Athens, Greece., Hellenic Open University, School of Science and Technology, 18 Parodos Aristotelous St., 26335, Patras, Greece.

20. Sayieda R. Zedan, Maha R. Mohamed, Doaa A. Ahmed, Aya H. Mohammed: Effect of demolition/construction wastes on the properties of alkali activated slag cement, Housing and Building National Research Center, Giza, Egypt, Faculty of Women of Arts, Science and Education, Ain Shams University, Cairo, Egypt, Faculty of Engineering and Technology, Future University, Cairo, Egypt, Received 4 November 2015; revised 30 November 2015; accepted 1 December 2015

21. Dimitra Zaharaki, Michalis Galetakis, Kostas Komnitsas: Valorization of construction and demolition (C&D) and industrial wastes through alkali activation, School of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, University Campus, 73100 Chania, Greece

22. Joana Gonçalves Rapazote, Cristovão Laginhas, Amândio Teixeira-Pinto: Development of Building Materials through Alkaline Activation of Construction and Demolition Waste (CDW) – Resistance to High Temperatures

23. ΣΕΕΒ-04-2016: New technologies and strategies for the development of pre-fabricated elements through the reuse and recycling of construction materials and structures

24. Green Integrated Structural Elements for Retrofitting and New Construction of Buildings, Report on additional CDW, D 4.1.

25. Work Packages for Materials Research

26. John L. Provis: Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? Received: 22 July 2013 / Accepted: 29 October 2013 / Published online: 5 November 2013 RILEM 2013

27. Fatih Özalp, Halit Dilsad Yilmaz, Mustafa Kara, Ömer Kaya, Aylin Sahin: Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes, ISTON, Istanbul Concrete Elements and Ready Mixed Concrete Factories, _Istanbul, Turkey, TÜB_ITAK Marmara Research Centre, Materials Institute, Gebze, Kocaeli, Turkey

28. Λυκάκη Άννα, Επιβλέπων καθηγητής: Τσιβιλής Σωτήριος: Εναλλακτική διαχείριση αποβλήτων από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ) Μελέτη περίπτωσης: Νομός Ηρακλείου Κρήτης, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας (ΣΘΕΤ), Μάιος 2016

29. Alexander Vásquez, Venus Cárdenas, Rafael A. Robayo, Ruby Mejía de Gutiérrez:

Geopolymer based on concrete demolition waste, Composite Materials Group (CENM),
Universidad del Valle, Cali, Colombia

30. Dr Xiangming (Michael) Zhou: Topic: EeB-04-2016 New technologies and strategies for the development of pre-fabricated elements through the reuse and recycling of construction materials and structures, Coordinator: Brunel University, London

31. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction, Zuhua Zhang, John L. Provis, Andrew Reid, Hao Wang, Centre of Excellence in Engineered Fibre Composites (CEEFC), Faculty of Engineering and Surveying, Faculty of Health, Engineering and Science, University of Southern Queensland, Toowoomba, Australia, Department of Materials Science and Engineering, The University of Sheffield, Sir Robert Hadfield Building, Mappin St, Sheffield S1 3JD, United Kingdom c Halok Engineering Co. Ltd., Brisbane, Australia

32. Preparation of phosphoric acid-based geopolymer foams using limestone as pore forming agent – Thermal properties by in situ XRPD and Rietveld refinements, Magdalena Lassinantti Gualtieri, Marcello Romagnoli, Alessandro F.Gualtieri, Dipartimento Ingegneria “Enzo Ferrari”, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Via Pietro Vivarelli 10, I-41125 Modena, Italy, Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche, Università degli studi di Modena e Reggio Emilia, Via Campi 103, I-41125 Modena, Italy

33. The Pore Characteristics of Geopolymer Foam Concrete and Their Impact on the Compressive Strength and Modulus, Zuhua Zhang and Hao Wang, Centre for Future Materials, University of Southern Queensland, Toowoomba, QLD, Australia

34. Application of Organic Additives as Pore Forming Agents for Geopolymer Composites, Suresh K. Kaliappan, Ahmer A. Siyal, Zakaria Man, Mark Lay, Rashid Shamsuddin, Sustainable Living, Universiti Teknologi PETRONAS, 32610, Seri Iskandar, Perak, Malaysia

35. Effect of pore forming agents on geopolymer porosity and mechanical properties, Suresh K. Kaliappan, Ahmer A. Siyal, Zakaria Man, Mark Lay, Rashid Shamsuddin, Sustainable Living, Universiti Teknologi PETRONAS, 32610, Seri Iskandar, Perak, Malaysia

36. Influence of blowing agent on the fresh- and hardened-state properties of lightweight geopolymers, Rui M.Novais, G.Ascensão, L.H.Buruberri, L.Senff, J.A.Labrincha, Department of Materials and Ceramic Engineering, CICECO — Aveiro Institute of Materials, University of Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal, Mobility Engineering Center, Federal University of Santa Catarina (UFSC), 89218-000 Joinville, SC, Brazil

37. The Influence of Some Surfactants on Porous Concrete Properties, Modestas KLIGYS, Antanas LAUKAITIS, Marijonas SINICA, Georgijus SEZEMANAS, Vilnius Gediminas Technical University, Institute of Thermal Insulation, Linkmenų 28, LT-08217 Vilnius, Lithuania Received 19 September 2007; accepted 16 October 2007

38. Characterization of an environment friendly lightweight concrete containing ethyl vinyl acetate, Nattakan Dulsang, Pornnapa Kasemsiri, Patcharapol Posi, Salim Hizirolu, Prinya Chindaprasirt, Sustainable Infrastructure Research and Development Center and Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002, Thailand, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus, Khon Kaen 40000, Thailand, Department of Natural Resource Ecology and Management, Oklahoma State University, 303-G Agricultural Hall, Stillwater, OK 74078, USA, Sustainable Infrastructure Research and Development Center and Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

39. Recycled lightweight concrete made from footwear industry waste and CDW, Paulo

Roberto Lopes Lima, Mônica Batista Leite, Edielma Quinteiro Ribeiro Santiago, Post-graduate Program of Civil and Environmental Engineering, Department of Technology, State University of Feira de Santana, Av. Transnordestina, S/N – Novo Horizonte, Feira de Santana, Bahia 44036-900, Brazil, Accepted 1 February 2010, Available online 1 March 2010.

40. Isufaj Lorena, Επιβλέπων καθηγητής: Κακάλη Γλυκερία: Αξιοποίηση αργιλοπυριτικών υλικών κατεδάφισης στην τεχνολογία δομικών υλικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2018

41. Μαρία Όξενκιουν – Πετροπούλου, Φασματομετρικές Μέθοδοι, Γ' Έκδοση, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2012, σελ. 225-278

42. Ferdinand P. Beer, E. Russel Johnston Jr., John T. DeWolf, David F. Mazurek, Μηχανική των Υλικών, 6η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2014, σελ. 68-69, 104-105

43. Μαρίνος Καττής, Τεχνική Μηχανική (Αντοχή Υλικών) - Σημειώσεις Διαλέξεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Τομέας Συνθέσεων Τεχνολογικής Αιχμής, Αθήνα 2012, σελ. 12-13

44. Σταμάτης Τσίμας, Σωτήρης Τσιβιλής, Επιστήμη & Τεχνολογία Τσιμέντου, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2010, σελ. 32